

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté Des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



Présenté pour l'obtention du diplôme de
DOCTORAT ES-SCIENCES
Spécialité : Génie Mécanique
Option : Génie Mécanique

Présenté par :

ACHOURI El Hadj

Thème

**Contribution à l'étude expérimentale
d'une cheminée solaire en Algérie**

Soutenu publiquement le : 23/Mai/2021

Devant le jury composé de :

Mr. BOUBEKRI Abdelghani	Pr.	Président	Université K. M. Ouargla
Mr. SETTOU Nouredine	Pr.	Directeur de thèse	Université K. M. Ouargla
Mr. BENMOUSSA Hocine	Pr.	Examineur	Université Batna 2
Mr. NEGROU Belkhir	M.C.A.	Examineur	Université K. M. Ouargla
Mr. NECIB Djilani	M.C.A.	Examineur	Université H. L. El Oued
Mr. HAMDANI Maamar	M.R.A.	Examineur	URAER Ghardaïa

Année universitaire : 2020/2021

Contribution à l'étude expérimentale d'une cheminée solaire en Algérie

Résumé : La centrale solaire à cheminée est une installation économique pour produire de l'énergie électrique. Parmi les facteurs affectant le rendement d'une cheminée solaire, on trouve les dimensions géométriques : la hauteur et le diamètre de la cheminée, ainsi que le diamètre et la hauteur du collecteur. Afin d'apporter notre contribution dans ce domaine, nous nous sommes appuyés sur la méthode des plans d'expérience pour déterminer l'importance de l'impact de ces paramètres pour nous permettre de créer un modèle expérimental de cheminée solaire. A travers des travaux expérimentaux, nous avons obtenu une idée réelle de l'effet des paramètres géométriques sur la vitesse de l'écoulement de l'air sous le collecteur solaire et donc sur la productivité de la centrale solaire proposée pour le sud de l'Algérie. En complément de cette étude, nous avons présenté une proposition technico-économique pour donner une vision réaliste du coût de ce type de centrale et du prix de l'énergie électrique produite.

Mots-clés : Energie solaire, cheminée solaire, rayonnement, conversion d'énergie, étude expérimentale, optimisation.

Contribution to the experimental study of a solar chimney in Algeria

Abstract: The solar chimney power plant (SCPP) is an economical installation for producing electrical energy. Among the factors affecting the performance of a solar chimney are geometric dimensions: the height and diameter of the chimney, as well as the diameter and height of the collector. In order to make our contribution in this field, we relied on the method of experimental designs to determine the importance of the impact of these parameters to allow us to create an experimental model of solar chimney and through works experiments of this allowed us to take a real vision of the effect of the geometric parameters on the air flow under the solar collector and therefore on the productivity of the solar station proposed in the south of Algeria. In addition to this study, we presented a technical and economic proposal to give a realistic view of the cost of this type of station and the price of the electrical energy produced.

Keywords: Solar energy, solar chimney, radiation, energy conversion, experimental study, optimization.

المساهمة في الدراسة التجريبية لمدخنة شمسية بالجزائر

ملخص : مركز الطاقة الشمسية باستعمال المدخنة هي جهاز اقتصادي لتوليد الطاقة الكهربائية. من بين العوامل المؤثر على كفاءة المدخنة الشمسية نجد الأبعاد الهندسية ونذكر منها: ارتفاع وقطر المدخنة وقطر وارتفاع المجمع. فمن أجل تقديم مساهمتنا في هذا المجال، اعتمدنا على طريقة المخططات التجريبية لتحديد أهمية تأثير هاته المعاملات لتمكننا من انشاء نموذجاً تجريبياً لمدخنة شمسية ومن خلال العمل التجريبي سمح لنا بأخذ رؤية حقيقية لتأثير المعاملات الهندسية على سرعة تدفق الهواء تحت المجمع الشمسي وبالتالي على إنتاجية المركز الشمسي المقترح إنشاؤه في الجنوب الجزائري. وكإضافة لهذه الدراسة، قدمنا عرضاً تقنياً اقتصادياً لإعطاء نظرة واقعية عن تكلفة مثل هكذا محطات وعن سعر الطاقة الكهربائية المنتجة.

الكلمات المفتاحية : الطاقة الشمسية، المدخنة الشمسية، الإشعاع، تحويل الطاقة، الدراسة التجريبية، التحسين.

*À ma famille,
À tous mes collègues et amis*

Remerciements

Avant tout, je remercie **ALLAH**, le Tout Puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail de recherche.

Tout d'abord je tiens à exprimer, plus particulièrement ma profonde reconnaissance et ma grande estime à mon directeur de thèse le Professeur **SETTOU Noureddine** pour avoir accepté de diriger cette thèse, pour son suivi, pour sa grande disponibilité ainsi que ses encouragements constants, ce qui m'a apporté beaucoup tant sur le plan scientifique que personnel son soutien et conseils judicieux.

Je remercie infiniment monsieur **NEGROU Belkhir**, maître de conférences à l'université Kasdi Merbah Ouargla, pour son soutien et ces conseils judicieux et d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Mes meilleurs remerciements vont au professeur **BOUBEKRI Abdelghani** de l'université Kasdi Merbah Ouargla d'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Mes meilleurs remerciements vont aux :

- **Pr. BENMOUSSA Hocine**, Professeur à l'université Batna 2.
- **Dr. NECIB Djilani**, Maître de conférences à l'université Echahid Hamma Lakhdhar El Oued.
- **Dr. HAMDANI Maamar**, Maître de Recherche à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelable (URAER) Ghardaïa.

Qui m'ont accordé leurs temps et m'ont fait l'honneur de juger mes travaux de thèse.

Mes sincères reconnaissances à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.

Table des Matières

Liste des figures	i
Liste des tableaux	iv
Liste des abréviations	v
Introduction Générale.....	4
Chapitre 1 : Contexte Energétique Mondial Et National	7
1 Introduction	7
2 Contexte énergétique mondial : ressources, production et consommation.....	7
2.1 RESSOURCES MONDIALES EN ENERGIES FOSSILES	7
2.1.1 Pétrole.....	8
2.1.2 Gaz naturel.....	9
2.1.3 Charbon.....	9
2.2 PRODUCTION ET CONSOMMATION ENERGETIQUE MONDIAL	10
2.2.1 Pétrole.....	10
2.2.2 Gaz naturel.....	11
2.2.3 Charbon.....	12
3 Contexte énergétique national : ressources, production et demande	13
3.1 RESSOURCES ENERGETIQUES	13
3.2 PRODUCTION ENERGETIQUE	14
3.3 CONSOMMATION ENERGETIQUE	14
4 Transition énergétique	15
4.1 DEFINITION DE LA TRANSITION ENERGETIQUE	15
4.2 CONCEPT DE LA TRANSITION ENERGETIQUE	15
4.3 POTENTIELS DE LA TRANSITION ENERGETIQUE	16

4.3.1	Potentiel mondial en énergies renouvelables	16
4.3.2	Potentiel national en énergies renouvelables	17
4.3.2.1	Potentiel solaire.....	17
4.3.2.2	Potentiel Eolien	18
4.3.2.3	Potentiel géothermique.....	18
4.3.2.4	Potentiel de l'hydroélectricité.....	18
4.3.2.5	Potentiel de la Biomasse.....	18
4.4	PRODUCTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE EN ALGERIE.....	19
4.5	PROJETS ALGERIEN DE PRODUCTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE SOLAIRE.....	20
4.5.1	Centrale Hybride Solaire-Gaz de Hassi R'mel.....	20
4.5.2	Ferme Eolienne de Kabertène	21
4.5.3	Centrale Pilote Photovoltaïque d'Oued N'Chou	21
4.5.4	Projet de 343 MW en centrales photovoltaïques	21
5	Conclusion.....	21
Chapitre 2 : Centrales Solaires A Cheminée : Etat De L'art.....		22
1	Introduction	22
2	Principe de conversion d'énergie	23
2.1	COMPOSANTS D'UNE CENTRALE SOLAIRE A CHEMINEE	23
2.1.1	Collecteur	23
2.1.2	Cheminée	23
2.1.3	Unité de conversion d'énergie	23
2.2	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE SOLAIRE A CHEMINEE.....	24
3	Projets des cheminées solaires.....	24
3.1	PROTOTYPE DE MANZANARES.....	25

3.2	PROJET DE BURONGA (MILDURA EN AUSTRALIE)	25
3.3	PROJET DE L'AFRIQUE DU SUD	26
3.4	PROJET CHINOIS	26
3.5	PROJET ESPAGNOL	26
3.6	PROJET NAMIBIEN	27
3.7	PROJET D'ARIZONA	27
3.8	AUTRES PROJETS	28
4	Progrès des études et recherches expérimentales	28
5	Objectif du travail	32
6	Conclusion	32
Chapitre 3 : Etude Analytique Et Optimisation		33
1	Introduction	33
2	Méthode des plans d'expériences	33
2.1	METHODOLOGIE DES PLANS D'EXPERIENCES	33
2.2	FACTEURS DE LA METHODE DU PLAN D'EXPERIENCES	34
2.3	NIVEAUX DES FACTEURS	34
2.4	REPONSE (SORTIES DE L'EXPERIENCE)	34
2.5	TYPES GENERAUX DU PLAN D'EXPERIENCE	35
2.6	DESCRIPTION DU LOGICIEL STATGRAPHICS	35
2.7	PLAN D'EXPERIENCE DANS STATGRAPHICS	36
3	Prototype de la cheminée solaire à étudier	37
4	Conditions de fonctionnement	38
5	Optimisation de la conception	38
5.1	PHASES DES PLANS D'EXPERIENCES	39
6	Résultats et discussions	42

6.1	OPTIMISATION DE LA VITESSE D'ECOULEMENT A L'ENTRE DE LA CHEMINEE.....	43
6.1.1	Les facteurs affectant	Error! Bookmark not defined.
6.1.2	Analyse	44
6.1.2.1	Coefficient de régression pour la vitesse.....	44
6.1.2.2	Diagramme de Pareto	44
6.1.2.3	Diagrammes des effets de principaux paramètres	46
6.1.2.4	Diagramme des interactions pour la vitesse	46
6.1.2.5	Surface de réponse.....	49
6.1.2.6	Analyse de la variation de la vitesse	51
6.1.2.7	Recherche de la condition optimale (Optimisation de la réponse)	51
7	Conclusion.....	51
	Chapitre 4 : Etude Expérimentale	53
1	Introduction	53
2	Conditions de fonctionnement.....	53
2.1	PROTOCOLE EXPERIMENTAL.....	53
2.1.1	Description de champs de l'installation.....	53
2.1.2	Description de la cheminée solaire conçue.....	53
2.1.2.1	Absorbeur.....	54
2.1.2.2	Collecteur.....	54
2.1.2.3	Cheminée	55
2.1.3	Appareils de mesure utilisés	55
2.1.3.1	Appareil de mesure du rayonnement solaire global.....	55
2.1.3.2	Appareil de mesure de la température ambiante.....	55
2.1.3.3	Appareil de mesure de la qualité de l'air.....	55

2.1.3.4	Appareil de mesure de la température.....	56
2.1.4	Positions des thermocouples et du capteur de vitesse	56
2.2	RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	57
2.2.1	Champ des vitesses.....	57
2.2.1.1	Effet de la hauteur de l'entrée du collecteur.....	57
2.2.1.2	Effet de diamètre de la cheminée.....	60
2.2.2	Champ des températures	61
2.3	STOCKAGE DE L'ENERGIE PRODUITE.....	63
2.3.1	Système de stockage de chaleur.....	63
2.3.2	Discussions des résultats.....	63
3	Conclusion.....	67
Chapitre 5 : Etude Technico-Economique De L'installation.....		68
1	Introduction	68
2	Conception et méthodologie	68
2.1	EMPLACEMENT	68
2.2	IRRADIATION SOLAIRE.....	69
2.3	TEMPERATURE AMBIANTE	69
3	Analyse thermodynamique.....	70
3.1	ÉNERGIE ELECTRIQUE PRODUITE PAR LA CHEMINEE SOLAIRE	70
4	Différents effets sur la productivité.....	73
4.1	EFFET DE LA TEMPERATURE AMBIANTE ET DE L'IRRADIATION SOLAIRE	73
4.2	EFFET DU DIAMETRE DU COLLECTEUR ET DE LA HAUTEUR DE LA CHEMINEE.....	73
4.3	INFLUENCES DES PARAMETRES GEOMETRIQUES SUR L'EFFICACITE DE LA PRODUCTION.....	74
5	Etude économique	75

5.1	CONSOMMATION ELECTRIQUE DE LA WILAYA D'OUARGLA	76
5.2	CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DE LA CENTRALE SOLAIRE PROPOSEE.....	76
5.3	ESTIMATION DE LA PRODUCTION ANNUELLE D'ENERGIE ELECTRIQUE DANS LA REGION D'OUARGLA	77
5.4	ETUDE ECONOMIQUE DE L'INSTALLATION	78
5.4.1	Coût d'investissement total	78
5.4.2	Coût moyen de l'électricité produite.....	83
6	Impact des crédits carbone	85
7	Conclusion.....	86
	Conclusion Générale Et Perspectives.....	87
	Références Bibliographiques	90
	Annexe.....	100

Liste des Figures

Figure 1: Répartition des ressources mondiales prouvées de pétrole jusqu'à 2019	8
Figure 2: Répartition des ressources mondiales prouvées du gaz naturel jusqu'à 2019	9
Figure 3: Répartition des ressources mondiales prouvées du charbon jusqu'à 2019	10
Figure 4: Evolution de la production et la consommation mondiales du pétrole en Millions de Barils/Jour	11
Figure 5: Evolutions de la production et de la consommation mondiale du gaz naturel en Milliards de m ³	12
Figure 6: Evolution de la production et de la consommation mondiale du charbon en Millions de tep.	13
Figure 7: Répartition des énergies renouvelables	17
Figure 8: Puissance installée par type d'équipement en fin 2017	19
Figure 9: Prévission et consistance du programme National en Energie Renouvelables	20
Figure 10: Schéma d'une centrale solaire à tour ascendante conventionnelle (1 : Environnement au niveau du sol, 2 : Entrée de capteur, 3 : Sortie du collecteur, 4 : Entrée au turbines, 5 : Sortie des turbines, 6 : Sortie de la CSC, 7 : Atmosphère à la hauteur de sortie).	24
Figure 11: Configuration géométrique d'une cheminée solaire (1 : sol, 2 : Collecteur, 3 : turbines + générateurs, 4 : Cheminée).	37
Figure 12: Conditions thermiques et hydrodynamiques dans une cheminée solaire.	38
Figure 13: Fenêtre Data book	41
Figure 14: Diagramme de Pareto pour la vitesse normalisée.	45
Figure 15: Diagramme de Pareto pour la vitesse normalisée après avoir exclu la non-influence des facteurs.	45
Figure 16: Effets des principaux paramètres sur la vitesse.	46
Figure 17: Illustration d'interaction pour la vitesse entre AB, AC, BC.	47
Figure 18: Illustration d'interaction pour la vitesse entre AB.	47
Figure 19: Illustration d'interaction pour la vitesse entre AC.	48
Figure 20: Illustration d'interaction pour la vitesse entre BC.	49

Figure 21: Surface estimée pour la vitesse en fonction de hauteur et diamètre de la cheminée et l'autre facteur est fixé au niveau +1.	50
Figure 22: Surface estimée pour la vitesse en fonction de hauteur et diamètre de la cheminée et l'autre facteur est fixé au niveau -1.	51
Figure 23: Prototype de la Cheminée Solaire réalisée	54
Figure 24: Emplacement des thermocouples et du capteur de vitesse.	56
Figure 25: Variations des vitesses d'écoulement de l'air à l'entrée de la cheminée en fonction du temps pour le Cas de $H_{Ch}=400$ cm et $D_{Ch}=16$ cm.	58
Figure 26: Variations des vitesses d'écoulement de l'air à l'entrée de la cheminée en fonction du temps pour le Cas de $H_{Ch}=300$ cm et $D_{Ch}=16$ cm.	59
Figure 27: Variations des vitesses d'écoulement de l'air à l'entrée de la cheminée en fonction du temps pour le cas de $H_{Ch}=400$ cm où $D_{Ch}=11$ cm ou $D_{Ch}=16$ cm.	60
Figure 28: Variations des vitesses à l'entrée de la cheminée en fonction du temps pour le cas de $H_{Ch}=300$ cm où $D_{Ch}=11$ cm ou $D_{Ch}=16$ cm.	61
Figure 29: Variations de la température à l'entrée et à la sortie de la cheminée en fonction du temps.	62
Figure 30: Variations de la température à l'entrée entrée et à la sortie de la cheminée en fonction du temps.	62
Figure 31: Variations du rayonnement solaire et de la température en fonction de temps pour différents modes de stockage.	64
Figure 32: Variations de la vitesse de l'air à l'entrée de la cheminée pour les quatre cas en fonction du temps.	66
Figure 33: Carte d'irradiation horizontale globale en Algérie.	69
Figure 34: Variations d'IHG et de la température moyenne mensuelle (Données de l'URAER)	70
Figure 35: Effet de la température ambiante et de l'irradiation solaire.	73
Figure 36: Effet du diamètre du collecteur et de la hauteur de la cheminée.	74
Figure 37: Influences des paramètres géométriques sur l'efficacité de la production	74
Figure 38: Production annuelle de la cheminée solaire.	78
Figure 39: Répartition du coût de l'UCP.	82

Figure 40: Répartition du coût de l'installation.

83

Liste des Tableaux

Tableau 1: Réserves mondiales prouvées des énergies fossiles	8
Tableau 2: Ensoleillement reçu en Algérie par région	18
Tableau 3: Caractéristiques du prototype de Manzanares	25
Tableau 4: Caractéristiques de la centrale de Buronga	26
Tableau 5: Caractéristiques du projet Espagnol.	27
Tableau 6: Caractéristiques du projet Namibien.	27
Tableau 7: Caractéristiques de la centrale d'Arizona.	27
Tableau 8: Paramètres géométriques de différentes configurations de la cheminée solaire.	37
Tableau 9: Définition de la variable de réponse.	39
Tableau 10: Facteurs contrôlables définis.	40
Tableau 11: Sélection des facteurs étudiés et leurs niveaux de variation pour l'étude réalisée.	43
Tableau 12: Planification du plan fractionnel 2^3 avec les variables du code A et les valeurs naturelles B et Y comme réponses.	43
Tableau 13: Interactions et effets à deux facteur sur la réponse Y	44
Tableau 14: Paramètres géométriques optimaux.	51
Tableau 15: Principaux paramètres géométriques du prototype de cheminée solaire.	55
Tableau 16: IHG et températures moyennes pour chaque mois (Données d'URAER).	69
Tableau 17: Caractéristiques techniques et géométriques de la centrale solaire proposée.	77
Tableau 18: Coûts de l'UCP (Unité de conversion de puissance)	82
Tableau 19: Dépenses totales de l'installation.	83

Liste des Abréviations

Unités physiques	
°C	Degré Celsius
cm	Centimètre
G	Giga
h	Heure
J	Joule
k	Kilo
kg	Kilogramme
M	Million
M	Méga
m ²	Mètre carré
m ³	Mètre cube
M	Milliards
mm	Millimètre
t	Tonne
T	Tira
tep	Tonnes équivalent pétrole
W	Watt

Unités monétaires	
DA	Dinar Algérien
\$	Dollars des Etats Unis d'Amérique
€	Euros

Autres	
GES	Gaz à Effet de Serre
CCS	Centrale Solaire à Cheminée
DOE	Desing Of Experiment
IHG	Irradiation Horizontale Globale
UCP	Unité de Conversion de Puissance
HTF	Heat Transfert Fluide

Acronymes	
AIE	Agence internationale de l'énergie
BP	British Pétroluim
OPEP	Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Economiques
CEI	Communauté des Etats Indépendantes
MEM	Ministère de l'Energie et des Mines
MENA	Middle East and North Africa

Nomenclatures		
D_{Co}	Diamètre de collecteur	[cm]
D_{Ch}	Diamètre de la cheminée	[cm]
H_{Co}	Hauteur de collecteur	[cm]
H_{Ch}	Hauteur de la cheminée	[cm]
G_h	Radiation solaire globale reçue sur un plan horizontal	[W/m ²]
P	Puissance produite	[W]
$\eta_{Co}, \eta_{Ch}, \eta_{Tur}$	Rendement des collecteur, cheminée et turbine respectivement	
P_{tot}	Puissance total de l'air dans la cheminée	[W]
A_{Co}	Surface du collecteur	[cm ²]
C_p	Capacité calorifique	
ρ_{atm}, ρ_{Ch}	Masses volumique de l'air	[kg/m ³]
g	Force gravitationnelle	[Nm ² kg]
U, v	Composantes du vecteur de vitesse	[m/s]
K	Conductivité thermique	[W/m ² k]
T	Température	[°C]
A_1, A_2, A_3	Facteurs	
B_1, B_2, B_3	Valeurs naturelles	
Y	Réponse	
X_k	Valeur de facteur	
\bar{y}_j	La grande moyenne	
m	Nombre d'échantillons	
C_{Ch}	Coût de la cheminée	[€]
C_{Cof}	Coût de la coufrage	[€]
C_{cons}	Coût de construction	[€]
C_{transp}	Coût de transport	[€]
$LCOE$	Coût d'électricité produite	[€/kWh]
\dot{Q}_{solar}	Energie solaire absorbée	[W]

Introduction Générale

L'énergie est la pierre angulaire des économies nationales, elle est étroitement liée à la vie des êtres humains. Depuis la crise énergétique mondiale survenue dans les années 1970, l'épuisement des ressources énergétiques fossiles a provoqué une récession économique de nombreux pays développés, ce qui affecte le développement durable des économies nationales et leur stabilité sociale directement.

Les progrès technologiques et la croissance de l'économie mondiale au cours des dernières décennies ont conduit à de fortes améliorations des conditions de vie dans les pays développés. Cependant, ces améliorations ont un impact environnemental négatif. Les problèmes de qualité de l'air et le changement climatique mondial constituent deux enjeux majeurs qui dépendent de l'utilisation des sources d'énergies fossiles [1].

L'Algérie s'engage elle aussi à une transition énergétique dans laquelle s'inscrit dans les évolutions de la situation énergétique nationale, régionale et mondiale. Une situation marquée par le recours croissant aux énergies fossiles (pétrole, gaz naturel) et la consommation croissante de ces sources d'énergie, malgré les conséquences de leur utilisation et leur caractère épuisable à long terme, qui accélère les risques de changement climatique. Une politique énergétique basée sur les énergies renouvelables notamment le solaire et l'économie de l'énergie devient plus que nécessaire [2].

Suite à différentes études réalisées entre autres des évaluations satellitaires, le Centre aérospatial allemand (DLR) a conclu que l'Algérie possède le potentiel solaire le plus important du bassin méditerranéen, soit 169440 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque et 35 TWh/an pour l'énergie éolienne. Le potentiel solaire algérien équivaut à 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'mel [3].

L'épuisement des ressources énergétiques fossiles, la réduction des émissions polluantes et la diversification des filières de production de l'électricité à moindre coût aussi la contribution au développement durable ont conduit la politique énergétique algérienne de donner une très grande importance aux énergies vertes par le lancement d'un

programme ambitieux de développement des énergies renouvelables en premier lieu l'énergie solaire.

Parmi les techniques d'exploitation de l'énergie solaire, la cheminée solaire qui se caractérise par une très grande efficacité de transformer le rayonnement solaire en énergie électrique en introduisant des turbines. L'installation d'une station de ce genre dans notre région demande une large étude, c'est pour cela on va essayer de donner notre contribution dans ce domaine par l'installation d'une maquette de petite échelle d'une cheminée solaire qui sera destinée à évaluer dans l'espace-temps l'influence des différents paramètres intervenant dans la conversion et ensuite la production d'énergie [4].

Dans le but de motiver la politique énergétique nationale pour la transition par l'adoption d'une nouvelle technologie de production de l'énergie électrique et de donner une contribution à l'étude et l'amélioration du rendement de la cheminée solaire, nous avons établi notre prototype de cheminée qui sera exploité par la suite pour étudier l'influence des différents paramètres sur l'efficacité de production de la cheminée solaire pour atteindre la meilleure conception de cet équipement qui nous fournir une production énergétique optimale.

En vue d'atteindre cet objectif le travail présenté dans cette thèse s'articule de la façon suivante :

Dans le premier chapitre, nous essayons de donner une analyse du contexte énergétique mondial aussi dans l'Algérie à travers d'une présentation des situations actuelles des ressources, de productions et de demande énergétique. Aussi dans ce chapitre on présente la transition énergétique comme solution plus sécurisée où on a prendre la production de l'énergie électrique à partir de cheminée solaire comme exemple.

Ensuite, Le deuxième chapitre, intitulé : **Centrales solaires à cheminée : Etat de l'art**, présente une étude bibliographique approfondie, qui nous a permis d'avoir une vision plus complète sur les installations de type cheminée solaire. Cette recherche bibliographique sur les études théoriques, numériques et expérimentales nous a permis de faire une vision approfondie et nous a donné la possibilité de valider certains résultats de notre étude avec les résultats expérimentaux et numériques des autres chercheurs.

Le troisième chapitre est réservé à une étude analytique aussi numérique de l'influence des paramètres géométriques sur l'efficacité (production et rendement) d'une cheminée solaire à l'aide de la méthode des plans d'expériences qui a été choisie comme un outil pour atteindre un choix optimal des paramètres géométriques les plus influents sur la productivité de l'installation.

Le quatrième chapitre intitulé : **Etude expérimentale**, décrit dans un premier temps le prototype de la cheminée solaire réalisée au niveau de l'université KASDI Merbah Ouargla et le déroulement de protocole expérimental. Dans un deuxième temps, le stockage de l'énergie prend une part dans cette étude pour assurer l'alimentation de la cheminée en cas d'absence du rayonnement solaire.

Dans le cinquième et dernier chapitre, nous procédons à une analyse et une étude d'ordre technico-économique afin de donner une estimation des dépenses nécessaires pour la réalisation des différents composants de la centrale solaire à cheminée et d'avoir une idée globale sur le coût total de l'installation.

Finalement, le manuscrit est terminé par une conclusion qui rappelle les principales contributions élaborées tout au long de ce travail de thèse. Les recommandations et quelques perspectives de nos travaux de recherche dans ce domaine sont proposées.

Chapitre 1 : Contexte Energétique Mondial et National

1 Introduction

Dans le temps où les besoins humains en énergie prennent une tendance à la hausse due au rôle important de l'énergie dans tous les secteurs de notre vie des certains effets indésirables interviennent tel que l'épuisement des ressources naturelles et les risques écologiques, ces effets nous obligent de réfléchir à d'autres techniques plus sécurisées qui utilisent des ressources inépuisables aussi renouvelables. La politique de transition énergétique nécessite d'être appréhendée en tenant compte plusieurs enjeux liés aux ressources, production et au demande énergétique.

Pour donner une large vision aux enjeux énergétiques, dans ce premier chapitre nous essayons de faire une analyse du contexte énergétique mondial aussi dans l'Algérie à travers une présentation des situations actuelles des ressources, de productions et de demande énergétique. Aussi dans ce chapitre, on présente la transition énergétique comme solution plus sécurisée où la production de l'énergie électrique peut être assurée par une cheminée solaire.

2 Contexte énergétique mondial : Ressources, production et consommation

La demande énergétique au niveau mondial est tendancielle en progression élevée sous l'effet de la croissance démographique et de la croissance économique, tirée principalement par les pays émergents, elle pourrait doubler à l'horizon de quelques années.

Dans ce que suit on va présenter les états actuels des ressources énergétiques en se basant sur les statistiques publiés par le British pitroleum en 2020.

2.1 Ressources mondiales en énergies fossiles

Les gisements de combustible fossile tel que le pétrole, le gaz naturel et le charbon couvrent aujourd'hui environ 80% des besoins mondiaux en énergie. Lorsque l'on parle des ressources ce nous conduit à parler du ratio (Réserves prouvées/Production) qui donne

une claire signe sur la durée de vie des gisements de combustible fossile. Selon les derniers chiffres donnés par le BP, le tableau qui suit donne une nette vision sur l'état des ressources mondiales de pétrole, gaz naturel et des minéraux solides (charbon, bitumineux et lignite) jusqu'à la fin 2019.

Tableau 1: Réserves mondiales prouvées des énergies fossiles [5].

Combustible	Réserves Prouvées	Ratio R/P (Années)
Pétrole (Milliards tep)	244.6	49.9
Gaz naturel (Milliards m ³)	198.8	49.8
Minéraux solides (Milliards tonnes)	1069.6	132

2.1.1 Pétrole

Les statistiques de British Petroleum montrent que les réserves mondiales prouvées de pétrole s'élevaient à 244.6 milliards de tonnes (environ 1734 milliards de barils) à la fin de 2019 (voir Tableau 1), le ratio (Réserves prouvées / Production) montre que les réserves de pétrole en 2019 représentaient 50 ans de production actuelle où l'OPEP possède 70,1% des réserves mondiales [5].

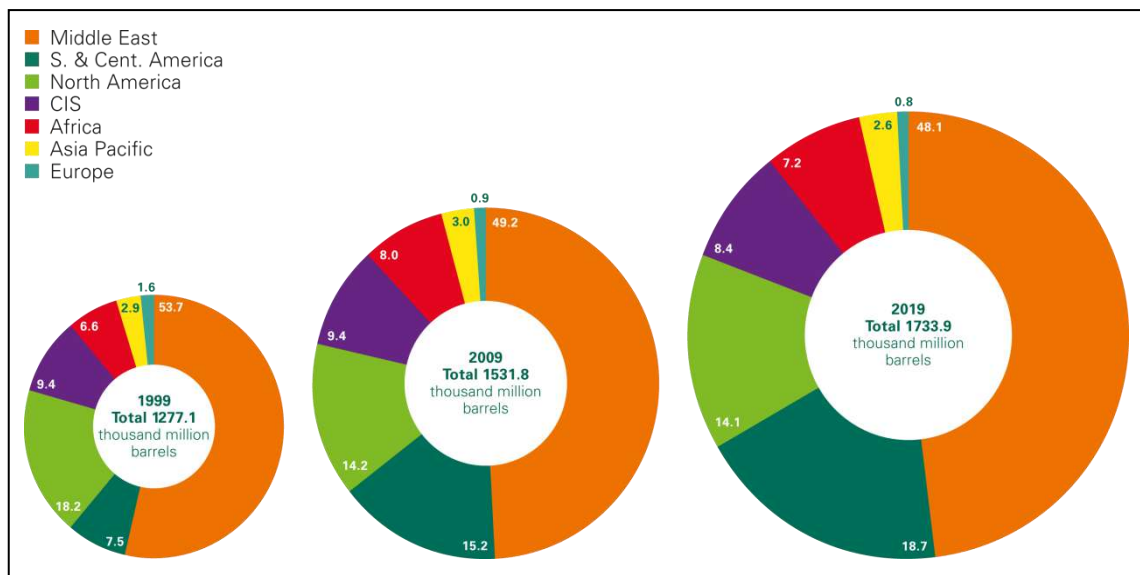


Figure 1: Répartition des ressources mondiales prouvées de pétrole jusqu'à 2019 [5].

Les premiers pays en termes de réserves sont le Venezuela (17.5 % des réserves mondiales), suivi de près par l'Arabie saoudite (17.2 %) et le Canada (9.8 %). La Figure 1

montre que 48.1 % de ressources mondiales se trouvent dans le moyen orient, suivis par l'Amérique du sud qui contient 18.7 % des réserves [5].

2.1.2 Gaz naturel

Le Tableau 1, montre que les réserves du gaz naturel mondiale sont à l'ordre de 198.8 Mdm³ ce chiffre traduit globalement 49.8 années de production avec les rythmes actuels et sans des nouveaux découverts.

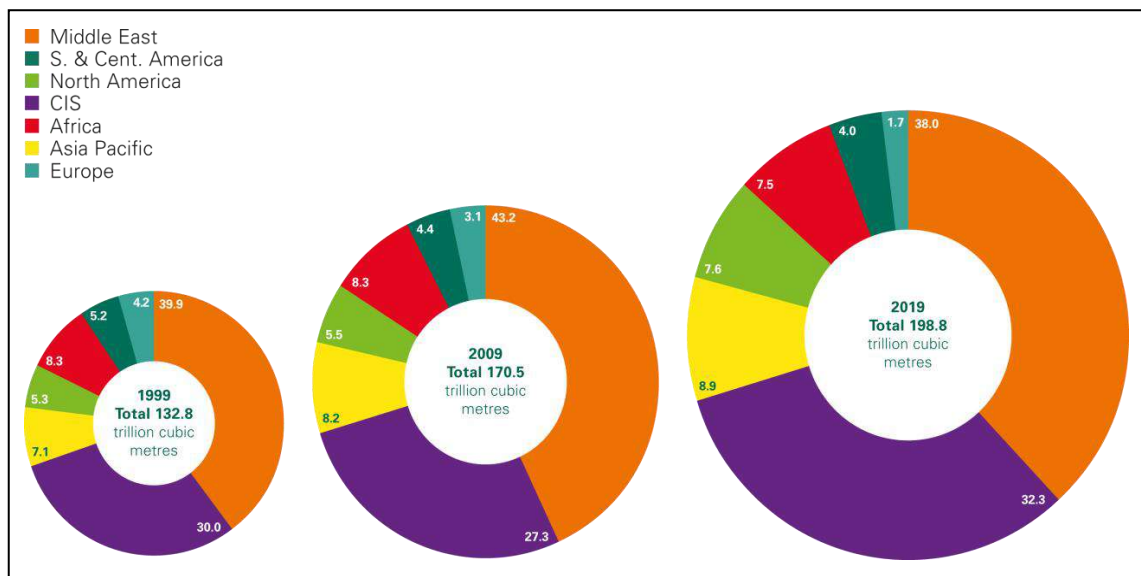


Figure 2: Répartition des ressources mondiales prouvées du gaz naturel jusqu'à 2019 [5].

On constate que le Moyen-Orient possède 38 % des réserves mondiales prouvées suivie par la CEI avec un pourcentage de 32.3 %, sont les régions avec les rapports (Réserves prouvées/Production) les plus élevés. En terme des pays ayant les plus grandes réserves on trouve la Russie (38 Tm³), l'Iran (32 Tm³) et le Qatar (24,7 Tm³) [5].

2.1.3 Charbon

Les réserves mondiales de charbon en 2019 s'élevaient à 1069.636 milliards de tonnes (voir tableau 1), et sont fortement concentrées dans quelques pays seulement : Etats-Unis (23 %), Russie (15 %), Australie (14 %) et Chine (13 %). La Figure 3 montre la répartition des ressources mondiales du charbon à la fin de l'année 2019 vis-à-vis des années 1999 et 2009.

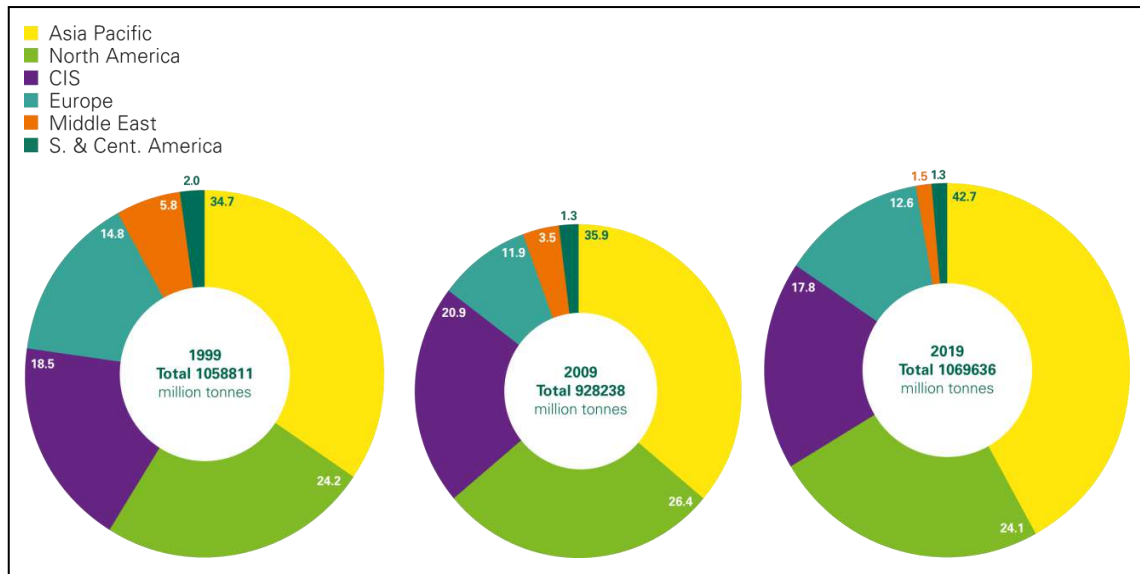


Figure 3: Répartition des ressources mondiales prouvées du charbon jusqu'à 2019 [5].

La plupart des réserves sont anthracites et bitumineuses (70 %). Le ratio (Réserves prouvées/Production) mondial actuel montre que les réserves de charbon en 2019 représentaient 132 années de production avec les rythmes actuelles [5].

2.2 Production et consommation énergétique mondiale

Malgré les efforts de la communauté internationale pour assurer une transition énergétique plus sécurisée (moins de gaz à effet de serre, faible teneur en carbone) la demande d'énergie primaire a augmenté de plus de 50 % de celle à 1990, D'après les données de l'AIE les énergies fossiles dominent largement le mix énergétique primaire mondial en 2017 (Environ 81 %) où la consommation mondiale d'énergie primaire est de 14,0 Gtep en 2017. Dans ce qui suit on donne une analyse de production et de consommation des énergies fossiles au niveau mondial.

2.2.1 Pétrole

La production mondiale de pétrole a baissé de 60000 barils par jour en 2019, la forte croissance de la production américaine (1,7 million de barils/jour) ayant été plus que compensée par une baisse de la production de l'OPEP (-2 millions de barils/jour), avec forte baisse en Iran (-1,3 million de barils/jour) au Venezuela (-560 000 barils/jour) et en Arabie saoudite (-430 000 barils/jour). La consommation de pétrole en 2019 a augmenté de

0,9 million de barils par jour en dessous de la moyenne (barils/jour), soit 0,9 %. La croissance a été tirée par la Chine (680 000 barils/jour) et d'autres économies émergentes, tandis que la demande a reculé dans l'OCDE (-290 000 barils/jour) [5].

La Figure 4 représente les évolutions de la production et de la consommation mondiale du pétrole. Il est clair que la production a décliné lors de l'année 2019 suite au prix du brut malgré sa les pays de l'Asie Pacific présente une augmentation remarquable au niveau de la consommation.

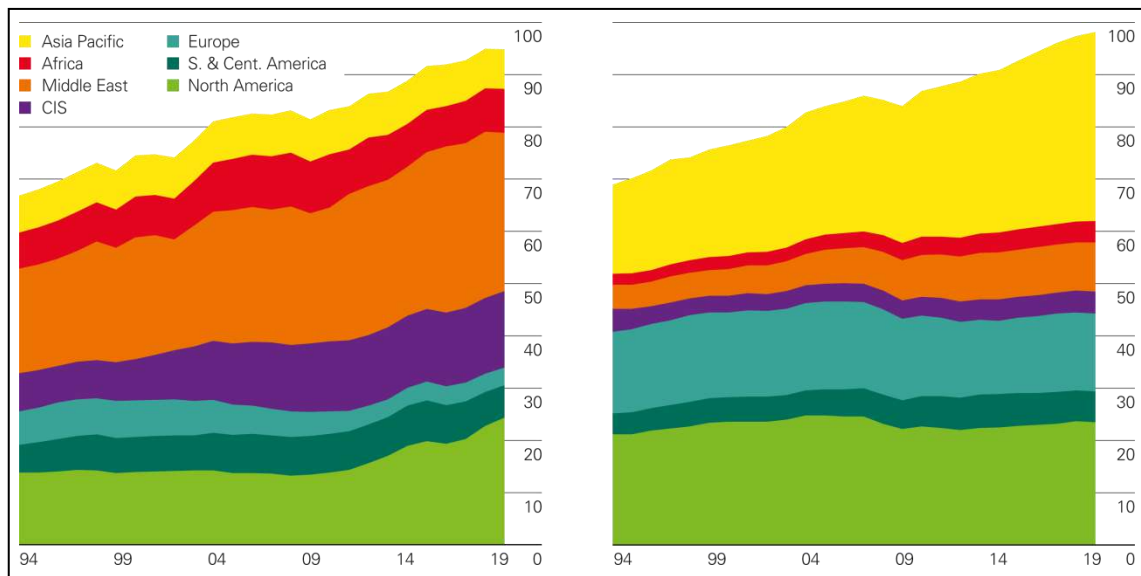


Figure 4: Evolution de la production et la consommation mondiales du pétrole en Millions de Barils/Jour [5].

2.2.2 Gaz naturel

La production mondiale de gaz a augmenté de 132 milliards de mètres cubes (Soit 3.4 %), où les États-Unis représentant des deux tiers de cette augmentation (85 milliards m³). L'Australie (23 milliards m³) et la Chine (16 milliards m³) ont également été des contributeurs clés à la croissance. La consommation de gaz naturel a augmenté de 78 milliards m³, (soit 2 %), bien en deçà de la forte croissance observée en 2018 (5,3 %). La croissance a été tirée par les États-Unis (27 milliards m³) et La Chine (24 milliards m³), tandis que la Russie et le Japon ont connu les baisses les plus importantes (10 et 8 milliards m³ respectivement) [5].

Les évolutions de la production et de la consommation mondiales du gaz naturel sont représentées sur la figure dans la suivante :

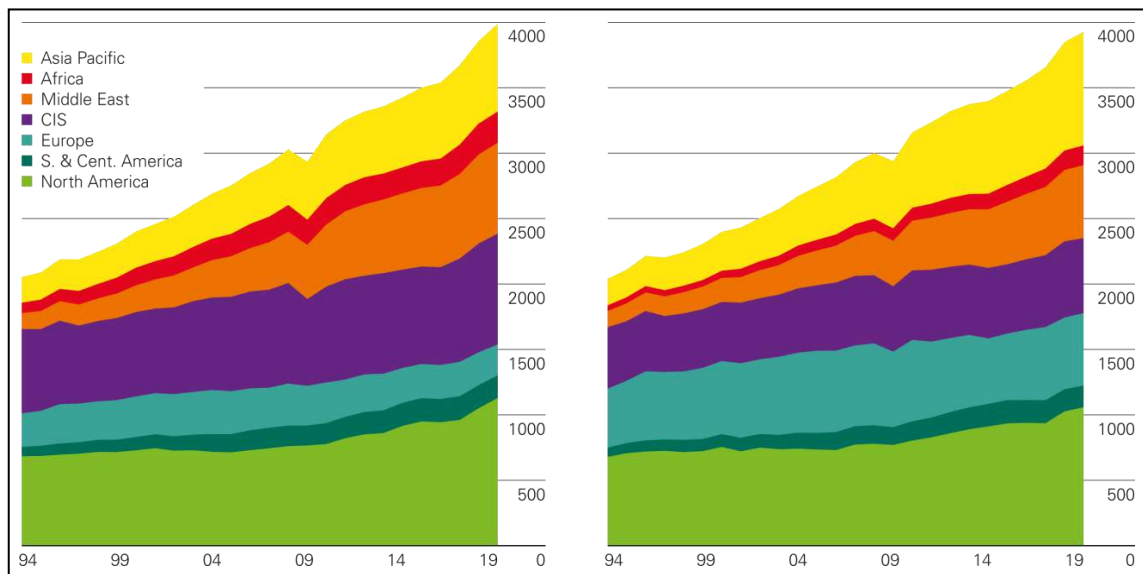


Figure 5: Evolutions de la production et de la consommation mondiale du gaz naturel en Milliards de m³ [5].

2.2.3 Charbon

La consommation mondiale de charbon voit sa quatrième baisse dans les six dernières années où elle a baissé de 0,6% (-0,9 EJ). Dans les pays non membres de l'OCDE, des augmentations notables ont été enregistrées en Chine (1,8 EJ), en Indonésie (0,6 EJ) et au Vietnam (0,5 EJ), cependant, la croissance en Inde n'était que de 0,3% (0,1 EJ) la plus basse depuis 2001. La demande de l'OCDE a fortement baissé, emmenée par les Etats-Unis (-1,9 EJ) et l'Allemagne (-0,6 EJ) au niveau le plus bas depuis 1965 [5].

La production mondiale de charbon a augmenté de 1,5 %, la Chine et l'Indonésie ayant fourni les seules augmentations significatives (3,2 EJ et 1,3 EJ respectivement). Les baisses de production les plus importantes sont également venues des Etats-Unis (-1,1 EJ) et de l'Allemagne (-0,3 EJ) [5].

Ces indications sont illustrées sur la Figure 6 qui représente les évolutions de production et de consommation mondiale du charbon dans quelques régions du monde.

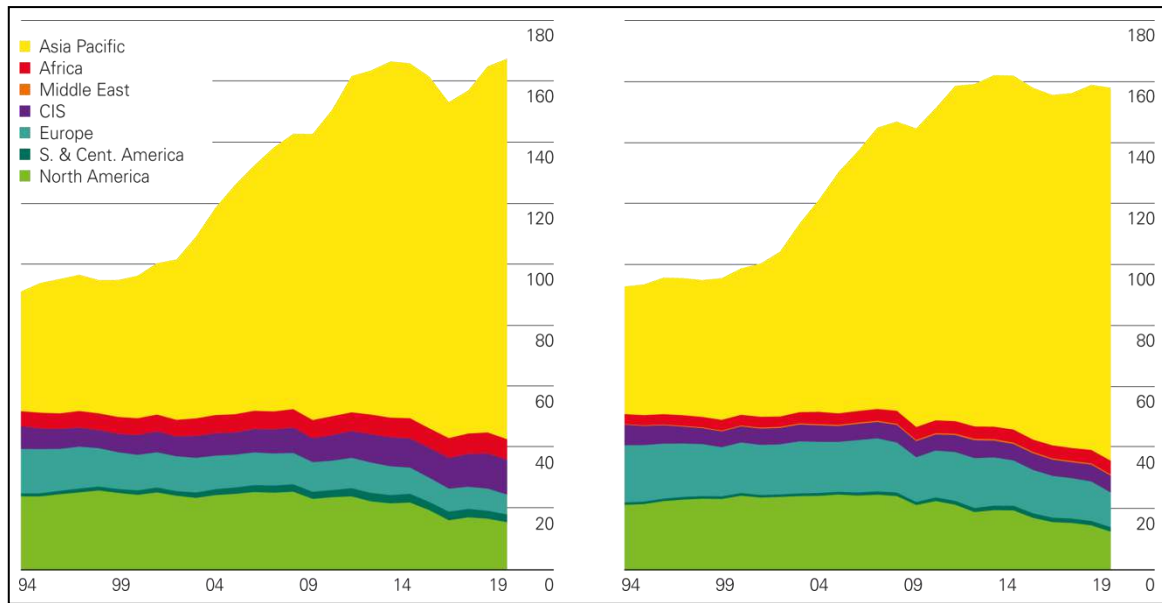


Figure 6: Evolution de la production et de la consommation mondiale du charbon en Millions de tep [5].

3 Contexte énergétique national : Ressources, production et demande

L'Algérie est l'un des grands pays producteurs et exportateurs d'énergie au monde. Cela a été réalisé à travers la mise en œuvre de stratégies et de politiques pour promouvoir la dimension économique, sociale et environnementale de l'utilisation des ressources énergétiques. Cependant, les efforts et les politiques déployés n'ont pas encore placé le pays à sa place en ce qui concerne la diversification des sources d'énergie [6].

L'Algérie prend une position laideur en termes d'énergie primaire où elle est le premier producteur de gaz naturel en Afrique, parmi les trois premiers producteurs de pétrole en l'Afrique et le troisième fournisseur de gaz naturel à l'Europe après la Russie et le Norvège et son quatrième fournisseur en énergie total. Elle est devenue membre de l'Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole (OPEP) en 1969 [7].

3.1 Ressources énergétiques

Les richesses naturelles considérables et diversifiées de l'Algérie, notamment en hydrocarbures lui ont permis d'occuper la 15^{ième} place en matière de réserves pétrolières et la 10^{ième} en matière de réserves de gaz naturel au niveau mondial.

En fin 2019, les réserves prouvées de pétrole brut en Algérie sont estimées à 12.2 milliards de barils (1500 Millions de tonnes) qui représentent environ 22 ans et demi d'exploitation au rythme de production actuel (soit 0.7 % des réserves mondial), avec ces chiffres l'Algérie occupe la troisième place en Afrique derrière la Libye et le Nigeria. En ce qui concerne le gaz naturel, l'Algérie possède environ 4.3 trillions m³ de réserves prouvées à la fin de 2019 (soit 2.2 % des réserves mondiales), ces réserves peuvent durer pour environ 50.3 années avec les rythmes de production actuels. Les statistiques montrent que les réserves prouvées des hydrocarbures sont inchangées depuis plusieurs années [5].

Les réserves d'hydrocarbures non conventionnels (gaz de schiste) sont estimées pour leur part à 700 trillions de m³ ce qui correspond à quatre fois le niveau de ses réserves gazières actuelles et représentant ainsi la troisième réserve la plus importante au monde [8].

3.2 Production énergétique

La production énergétique nationale de gaz naturel brut et de pétrole brut a diminué régulièrement ces dernières années, principalement en raison du retard marqué sur l'installation des nouveaux projets de production et les infrastructures qui ont été retardé à plusieurs reprises. Où la production du pétrole a diminué de 77.2 Millions de tonnes en 2009 à 64.3 Millions de tonnes en fin 2019 (Représente 1.4 % de la production mondiale). Pour le gaz naturel, la production nationale a diminué de 93.8 Billions m³ (3.38 Ej) en 2018 pour atteindre les 86.2 Billions m³ (3.10 Ej) en 2019 [5].

3.3 Consommation énergétique

La consommation nationale en énergies primaires continue son augmentation pour atteindre en fin 2019 les 2.54 Ej avec un taux de croissance par an égale à 4.9 % par rapport à l'année précédente, la croissance a été tirée par les deux produits essentiels le pétrole et le gaz. La consommation nationale du pétrole a augmenté de 0.83 Ej en 2018 pour atteindre 0.88 Ej en fin 2019, soit avec un taux de croissance égale à 3.1 % entre 2008 et 2018 [5].

Aussi la consommation algérienne de gaz naturel a été avoir une croissance remarquable entre les deux années 2018 et 2019 avec un taux d'augmentation à l'ordre de

4.2 % où la consommation a été 1.63 EJ (45.2 Billions m³) par contre en fin 2018 était 1.56 EJ l'équivalent de 43.4 Billions m³. En fin 2009 elle était à 0.94 EJ (26.2 Billions m³) [5].

4 Transition énergétique

4.1 Définition de la transition énergétique

La transition énergétique, désigne le passage progressif d'un système énergétique basé sur la consommation de ressources énergétiques non renouvelables (carboné et limité en ressources) à un état à venir correspond à un système énergétique fondé, en partie, sur l'utilisation d'énergies renouvelables (dé carboné et plus durable), aussi que sur des comportements énergétiques plus efficaces et plus sobres. Ce changement de système énergétique apparaît motivé par son économie face aux enjeux d'évolution des prix, d'approvisionnement en énergie, d'épuisement des ressources naturelles et de respect de l'environnement. Elle prend la forme d'un ensemble de ruptures majeures dans le système sociotechnique actuel [9], [10].

Les développements économiques et industriels du monde entier se sont passés sans prise en compte de l'environnement, le sujet environnemental est devenu un enjeu nouveau de la société que dans les dernières années. On peut résumer la transition énergétique d'après Rahmouni [11] de comment :

- Consommer mieux en économisant l'énergie (moins de carburants fossiles, moins de transport, plus de confort thermique, plus d'efficacité dans l'industrie) ;
- Produire autrement en préservant l'environnement (plus de ressources locales, des énergies renouvelables, moins de déchets) ;
- Faire progresser la société grâce à des projets mobilisateurs (projets coopératifs de production d'énergie, services innovants) ;
- Créer des emplois dans de nouveaux métiers d'avenir et dans le bâtiment.

4.2 Concept de la transition énergétique

Suite aux chocs pétroliers de 1973 et 1979, le concept de transition énergétique est apparu au début des années 1980 en Allemagne et en Autriche, sous la forme d'un livre blanc, suivi à Berlin du premier congrès sur le sujet. Son objectif serait de comment passer

des énergies fossiles et fissiles utilisées dans les systèmes énergétiques actuels basant sur des ressources non renouvelables vers un mix énergétique basé sur des ressources renouvelables. La transition énergétique s'agit d'une modification radicale des politiques énergétiques d'une production centralisée à partir de ressources épuisables non renouvelables à une production décentralisée et renouvelable, et celui d'une politique orientée par l'offre d'énergie à une politique déterminée par la satisfaction de la demande sociale de services énergétiques [11], [12].

4.3 Potentiels de la transition énergétique

Pour que les combustibles fossiles soient épuisables et leur utilisation génère des Dégâts à travers des dommages environnementaux irréversibles, l'indispensable de la transition énergétique sera une nécessité [13].

En effet, dans la lutte contre le changement climatique, les questions énergétiques sont en tête de l'agenda au niveau national et mondial où environ les deux tiers des émissions mondiales de GES proviennent de la production et l'utilisation de l'énergie, qui place le secteur de l'énergie au cœur des efforts de lutte contre le changement climatique. Dans ce contexte, nous sommes obligés de montrer la voie vers la transition vers un système énergétique sûr, durable et compétitif [14].

4.3.1 Potentiel mondial en énergies renouvelables

L'Agence Internationale de l'Energie d'après son rapport de 2018, à annoncer que 16.4% de la consommation finale d'énergie dans le monde provient des énergies renouvelables. Ce qui traduit une très faible progression des énergies renouvelables dans le monde. Par contre dans le secteur de l'électricité les dernières statistiques montrent que plus de 27% de l'électricité mondiale est produite par voies renouvelables [15], [16].

La croissance des énergies renouvelables change d'un pays à un autre. Selon l'AIE En Europe, les énergies renouvelables représentent la part la plus importante avec 17 % en moyenne de la consommation énergétique. Au Brésil le taux s'élève à 42 % de la consommation énergétique est d'origine renouvelable. Mais certains pays proches ont des mix énergétiques très pauvres en énergie renouvelable. En comparaison, les Etats-Unis et la

Chine n'atteignent que 10 % de leur consommation énergétique grâce aux énergies renouvelables. et l'Inde plafonnent quant à 11 % [15], [17].

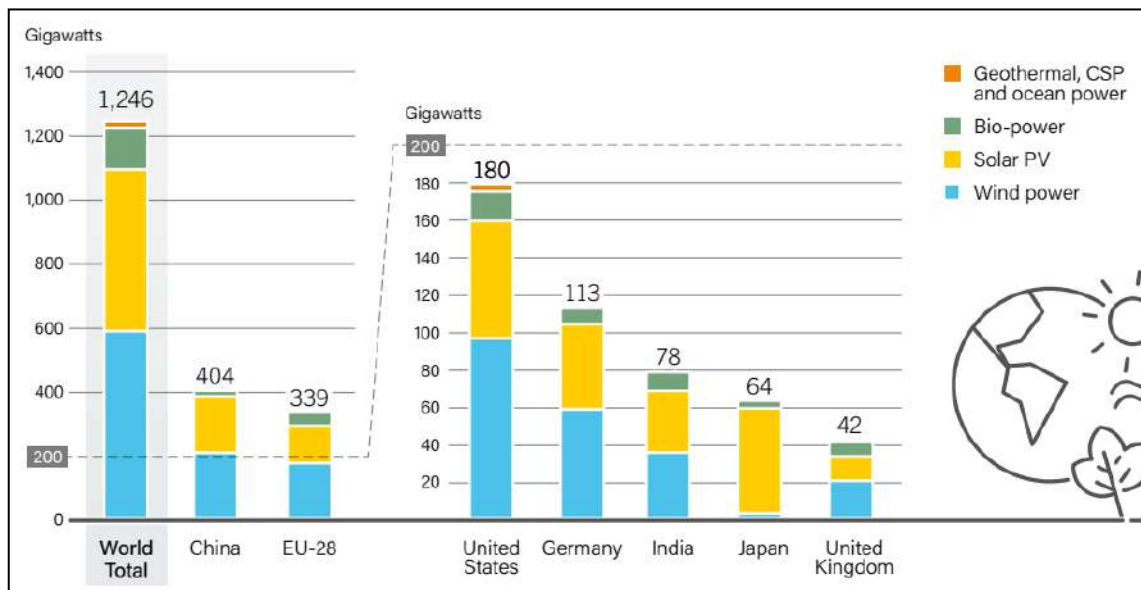


Figure 7: Répartition des énergies renouvelables [16].

La répartition des sources renouvelables varie énormément selon les pays et les régions de la planète. En effet, les conditions naturelles locales dirigent la production d'énergies d'origine renouvelable (Figure 7).

4.3.2 Potentiel national en énergies renouvelables

L'Algérie joue un rôle très important sur les marchés mondiaux de l'énergie, qu'elle soit fossile ou bien renouvelable. Dans ce qui suit, on va essayer de mettre en revue le potentiel des énergies renouvelables en Algérie, par une analyse statistique des ressources énergétiques renouvelables tel que l'énergie solaire, le vent, l'hydroélectricité, la géothermie et la biomasse [18], [19].

4.3.2.1 Potentiel solaire

En raison de sa situation géographique, l'Algérie détient l'un des potentiels solaires les plus élevés au monde, l'estimation de l'ensoleillement annuel moyen est de 2000 heures ce qui peut fournir une puissance solaire à l'environ de 1700 kWh/m²/an au nord de pays

et de 2650 kWh/m²/an le désert qui couvre les 5/6 du territoire national, ce qui correspond au plus grand champs solaire de monde [20].

Tableau 2: Ensoleillement reçu en Algérie par région [19], [21].

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Les statistiques montrent que le potentiel énergétique solaire de l'Algérie est de l'ordre de 169 900 TWh/an d'une manière globale [22].

4.3.2.2 Potentiel Eolien

Le potentiel éolien Algérien se traduit par un régime de vent modéré qui varie de 2 à 6 m/s sur les hauts plateaux et peut dépasser les 8 m/s sur le grand sud. Ce potentiel énergétique convient pour produire une énergie un peu faible dans la plupart du territoire national [6].

4.3.2.3 Potentiel géothermique

L'Algérie présente un potentiel très riche en sources chaudes répartis presque sur tout le territoire national, presque 33 % entre elles ont une température qui dépasse les 45 °C et d'autres qui dépassent les 118 °C à Biskra. En termes d'électricité les statistiques estimes que le potentiel total de l'énergie géothermique est à l'environnement de 700 MW [23].

4.3.2.4 Potentiel de l'hydroélectricité

Sur le territoire Algérien et en termes de chiffres, on peut dire que 65 milliards de m³ c'est la quantité globale tombant, parmi lesquels 23 milliards de m³ des ressources utiles où on trouve 50 barrages d'eau qui sont actuellement exploitables [2].

4.3.2.5 Potentiel de la Biomasse

En peut résumer le potentiel national de la biomasse en deux ressources les forêts et les déchets ménagers et assimilés, qui sont jusqu'à ce jour inexploités d'une manière qui donne un ajout au secteur énergétique il reste toujours relativement limité, Le potentiel

actuel du forest est de l'ordre de 37 Millions de Tep. Les statistiques de la MEM montrent que seulement 22 ktep du bois est consommé en 2018 contre 10 ktep en 2019 [24]. D'autre part, un potentiel qui représente un gisement de l'ordre de 1.33 Mtep/an des déchets agricoles et urbains soit équivalent de 5 millions de tonnes ne sont pas encore recyclés [25].

4.4 Production de l'énergie électrique en Algérie

La situation actuelle de l'énergie électrique en Algérie commence à avoir une tendance importante dans sa politique future à s'intéresser à l'exploitation de ses ressources des énergies renouvelables et en particulier l'énorme potentiel de l'énergie solaire dont les gisements sont disponibles et abondants dans tout le pays [19].

Le renforcement des capacités de production, par Sonelgaz et ses sociétés filiales, a connu ces dernières années, une évolution conséquente de la puissance de production d'électricité installée, qui a atteint 21 999 MW en 2020. Où l'énergie électrique produite durant l'année 2020 a atteint 76 027 GWh [26], [27].

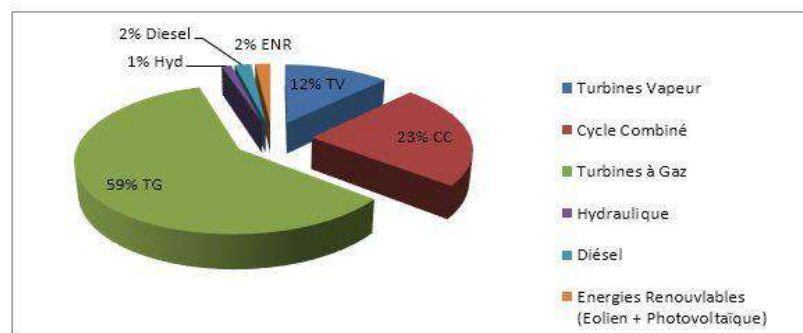


Figure 8: Puissance installée par type d'équipement en fin 2017 [27].

Malgré que la production de l'énergie électrique atteigne des niveaux encourageants, la **Figure8** montre que la dépendance aux énergies fossiles construit un obstacle devant une progression libre et plus sécurisée. C'est pour cela que l'Algérie s'est engagée à une transition vers les énergies renouvelables afin d'apporter des solutions durables.

L'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable. Le programme des énergies renouvelables dans sa version actualisée, consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national,

avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent. La Figure 9 présente la consistance du programme en énergie renouvelables à réaliser pour le marché national sur la période 2015-2030 est de 22 000 MW [27].

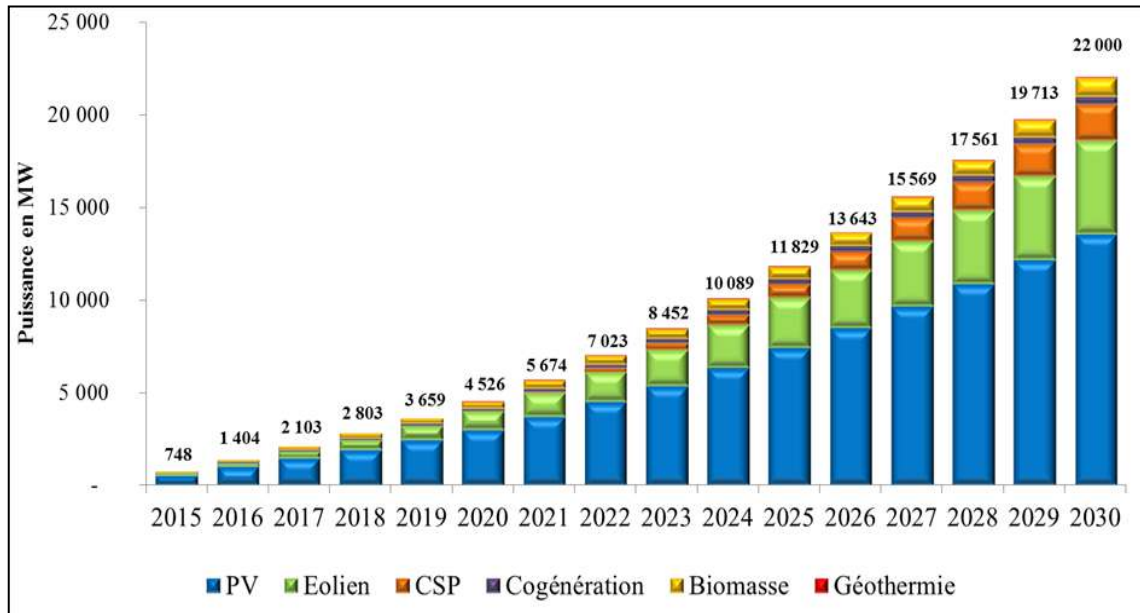


Figure 9: Prévion et consistance du programme national en Energies Renouvelables [27].

4.5 Projets Algérien de production de l'énergie électrique solaire

Pour réduire graduellement la croissance de la consommation énergétique, la politique énergétique algérienne vise la concrétisation sur le terrain d'un programme national d'efficacité énergétique. Des prévisions indiquent que les économies d'énergie cumulées engrangées seraient de l'ordre de 93 millions de Tep, dont 63 millions de Tep d'ici 2030 et le reste au-delà de cet horizon. La phase d'exécution du programme national a connu la réalisation de plusieurs projets et actions :

4.5.1 Centrale Hybride Solaire-Gaz de Hassi R'mel

La centrale a été installée à Hassi R'mel et mise en service en juillet 2011 avec une capacité de 150 MW qui utilise un Système à cycle solaire combiné d'un concentrateur solaire parabolique de 120 MW et un système HTF (Heat Transfer Fluide) de 30 MW.

4.5.2 Ferme Eolienne de Kabertène

La ferme a été installée dans la wilaya d'Adrar exactement à Kabertène et mise en service en juin 2014 d'une capacité de production de 10.2 MW. La ferme comprend 12 éoliennes d'une puissance de 850 KW pour chacune.

4.5.3 Centrale Pilote Photovoltaïque d'Oued N'Chou

La centrale Photovoltaïque a été installée à Oued N'Chou dans la wilaya de Ghardaïa, avec une capacité de 1.1 MW, elle était mise en service en juin 2014.

4.5.4 Projet de 343 MW en centrales photovoltaïques

Plusieurs centrales photovoltaïques de petites puissances (de 2 à 40 MW) qui à été installées dans plusieurs sites nationaux entre février 2015 et janvier 2018.

5 Conclusion

Le développement économique et social mondial et national est toujours freiné par une sécurité énergétique et des contraintes environnementales. C'est pour cela que la transition vers des nouveaux modèles énergétiques plus sécurisés et durables sera une nécessité dans nos jours aussi pour les générations futures assurer leurs propres besoins.

Dans ce chapitre la situation énergétique mondiale et nationale a été présentée où on a analysé les différentes statistiques concernant les états des ressources, de production et de consommation, tous les données actuelles signifiés le renforcent et l'urgence du développement durable dans les tous les activités humaines. La stratégie d'investissement sur les programmes des énergies renouvelables a favorisé la relance des projets et amélioré les performances des entreprises de réalisation, tout en répondant à la croissance de la demande énergétique en particulier de l'électricité.

Chapitre 2 : Centrales Solaires à Cheminée : Etat de l'Art

1 Introduction

Les sources d'énergie renouvelables sont de plus en plus utilisées pour diminuer le taux de pollution et la poursuite déclin des ressources énergétiques dans le monde [28].

De nos jours, les solutions d'énergie renouvelable sont devenues une nécessité pour améliorer les économies des pays. Parmi les autres modes de conversion d'énergie solaire en énergie électrique que le photovoltaïque on trouve les centrales solaires à cheminée qui sont des techniques attractives en raison de sa simplicité de travail, la fonction principale de la configuration CSC est de convertir de l'énergie solaire en énergie électrique [29]. Cette technique se base sur la création d'un mouvement de l'air à partir de l'association de l'exploitation de l'énergie solaire et la flottabilité de l'air sous l'effet de la force d'Archimède, dont le but est la création d'un vent artificiel qui est utilisé par la suite pour actionner des turbines pour produire de l'électricité. Cette technique d'exploitation d'énergie solaire se fait par un dispositif appelé la cheminée solaire. Le système de centrale solaire à cheminée, parfois appelé la tour solaire ascendante, est une centrale d'énergie renouvelable pour la production d'électricité à partir du rayonnement solaire, ce système est composé de quatre parties : cheminée, collecteur, couche de stockage d'énergie et unités de conversion de puissance [1], [30].

L'idée d'utiliser la technologie des cheminées solaires dans la production d'électricité était initialement proposée par Isidoro Cabanyes en 1903. Dans les années 1970, le professeur Schlaich a réaffirmé cette idée dans certaines conférences et a construit un prototype à Manzanares, 150 km au sud de Madrid, Espagne [31].

Dans ce chapitre, nous commençons par une présentation des généralités sur la cheminée solaire, où nous rappelons brièvement son principe de fonctionnement et de conversion d'énergie ainsi que la description de chaque composant du système, le chapitre se concentre également sur les recherches et les développements réalisés sur des projets de cheminées solaires. Nous terminons par une présentation et discussion des recherches publiées dans le domaine de la cheminée solaire.

2 Principe de conversion d'énergie

Les centrales solaires à cheminée sont des systèmes de conversion d'énergie solaire thermique qui utilisent une combinaison de trois technologies (serre, cheminée et turbine) pour exploiter et convertir l'énergie solaire en énergie électrique [32]. Ils se composent généralement d'un capteur solaire pour générer de l'air flottant chauffé, une grande cheminée au centre du capteur à travers lequel l'air flottant monte, et les turbines et les générateurs à extraire l'électricité de la différence de pression [33].

2.1 Composants d'une centrale solaire à cheminée

Pour générer de l'énergie électrique à l'aide d'une centrale solaire à cheminée, elle doit être composée de :

2.1.1 Un collecteur

Qui est un toit à effet de serre ouvert collectionneur généralement constitué de feuille de plastique ou plaque de verre qui emprisonne l'énergie solaire et augmente l'enthalpie totale de l'air, par la suite l'énergie thermique est converti en énergie cinétique lorsque la chaleur absorbée dans le collecteur est transférée à l'air [32].

2.1.2 Une cheminée

Située au centre de la serre collecteur utilisée pour diriger et ventiler l'air à faible densité à travers l'éolienne. L'écoulement créé est utilisé pour convertir l'enthalpie de l'air en travail mécanique qui sera utilisé par la suite pour entraîner les turbines génératrices de l'énergie électrique [34]. Il a été signalé que le débit massique de l'air ascendant est approximativement proportionnel à l'augmentation de la température de l'air du capteur et à la hauteur de la cheminée solaire [35], [36].

2.1.3 Une unité de conversion d'énergie

Elle a le rôle de convertir de l'énergie mécanique produite par l'écoulement de l'air en énergie électrique pour la consommation. Elle se compose d'un ou plusieurs turbogénérateurs.

2.2 Principe de fonctionnement d'une centrale solaire à cheminée

Une centrale solaire à cheminée est une combinaison de trois technologies établies, à savoir, la serre, la cheminée et l'éolienne. La cheminée, qui est une longue structure tubulaire, est placée au centre de la serre circulaire pendant que l'éolienne est montée à l'intérieur de la cheminée. Cette combinaison unique accomplit la tâche de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, Cette implique deux étapes intermédiaires. En premier étape, la conversion de l'énergie solaire en énergie thermique se fait dans la serre (également appelée collecteur) au moyen de l'effet de serre. Dans la deuxième étape, la cheminée convertit l'énergie thermique générée en énergie cinétique et finalement en énergie électrique en utilisant une combinaison d'une éolienne et d'un générateur. La Figure 7 donne une vue d'ensemble de la cheminée solaire [37].

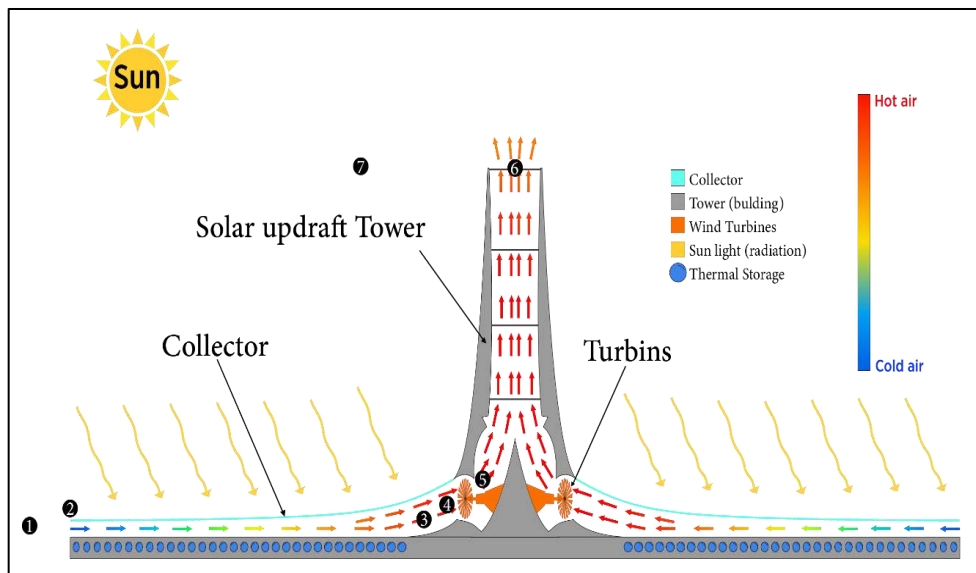


Figure 10: Schéma d'une centrale solaire à tour ascendante conventionnelle [37]

(1 :Environnement au niveau du sol, 2 :Entrée de capteur, 3 :Sortie du collecteur, 4 :Entrée au turbines, 5: Sortie des turbines, 6: Sortie de la CSC, 7: Atmosphère à la hauteur de sortie).

3 Projets des cheminées solaires

Depuis le début de la troisième millénaire, les accords de Kyoto en 1997 prisent en compte la problématique environnementale et climatique, ainsi que l'épuisement des réserves d'énergies fossiles, ont intensifié les efforts pour une diversité énergétique avec un regain d'intérêt notoire pour l'énergie solaire, selon une politique révisée et des objectifs

bien définis [38]. Aujourd'hui la plus grande ressource d'énergie techniquement exploitable sur la planète se trouve dans les régions [39]. L'énergie solaire représente la seule ressource énergétique qui peut recouvrir la demande énergétique mondiale dans le futur terme [40]. Dans le concept DESERTEC EU-MENA, Des estimations d'ici à 2050 vise l'installation d'un nombre suffisant de centrales au pays de MENA, de tel sorte que la demande locale soit satisfaite, et aussi un excès de 200 GWe à 300 GWe pour l'exportation vers l'Europe, soit une capacité de 700 TWh/an [41].

En effet, plusieurs pays se sont déjà lancé des projets de centrale solaire à cheminée, tels que l'Espagne, la Chine, et les Etats unis.

3.1 Prototype de Manzanares

Un projet qui a été le fruit d'une collaboration entre l'Etat espagnol et les chercheurs allemands Schlaich Bergermann et Partner en 1982 [42], [43]. La centrale a fonctionné jusqu'à 1989, Les paramètres techniques et dimensionnels de ce prototype sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 3: Caractéristiques du prototype de Manzanares

Hauteur de la cheminée	194.6 m
Diamètre de la cheminée	10.16 m
Hauteur moyenne de la couverture	1.85 m
Différence de température dans le collecteur	20°C
Puissance électrique nominale	50 kW
Surface du collecteur en membrane plastique	40000 m ²

3.2 Projet de Buronga (Mildura en Australie)

En 2001, le gouvernement australien a voté en faveur de la construction d'une centrale de 200 MW à Buronga.

Ce projet est le plus ambitieux aujourd'hui, il a été proposé que la cheminée ait une hauteur de 1000 m avec 120 m de diamètre et un collecteur de 7000 m de diamètre [35], [44], [45].

Tableau 4: Caractéristiques de la centrale de Buronga

Hauteur de la cheminée	1000 m
Diamètre de la cheminée	120 m
Diamètre du collecteur	7000 m
Hauteur moyenne de la couverture	1.85 m
Puissance électrique nominale	200 MW
Température de l'air chauffé	70 °C

3.3 Projet d'Afrique du Sud

Un autre SCPP à grande échelle est prévu pour l'Afrique du Sud avec un collecteur d'environ 6900 m de diamètre et une cheminée de 1500 m de haut et 160 m de diamètre de cheminée. Le choix de la cheminée de 1500 m de hauteur basé sur l'économie d'échelle de l'effet de hauteur de cheminée. Selon Schlaich, la production d'énergie de SCPP avec 1500 m de hauteur, la cheminée donne environ trois fois la puissance d'une autre de 750 m hauteur et de même surface de collecteur

3.4 Projet Chinois

Une installation de 200 kW à Jinshawan, Chine a débuté en mai 2009 et visait à construire une installation couvrant 277 hectares et produisant 27,5 MW d'ici 2013. La serre a été exploitée de tel sorte à réduire les tempêtes de vent de sable [32], [35], [46].

Un autre développement dans La Chine est la proposition de construire une cheminée solaire de 1000 m de haut pour la production d'énergie et le développement du tourisme à Shanghai [35].

3.5 Projet Espagnol

Un projet de centrale solaire devrait être installé à Ciudad Real, Espagne, intitulé Ciudad Real qui mesurerait 750 m de haut, couvrant une superficie de 350 hectares avec une puissance prévue de 40 MW [32], [35].

Les paramètres techniques et dimensionnels de ce prototype sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 5: Caractéristiques du projet Espagnol.

Hauteur de la cheminée	750 m
Diamètre du collecteur	3000 m
Vitesse de l'air à l'intérieur de la cheminée	12 m/s
Puissance électrique nominale	40 MW
Cout du projet	240 M€

3.6 Projet Namibien

Le gouvernement namibien a approuvé en 2008 une proposition de construction d'une cheminée solaire de 400 MW appelée Green Tower. La tour devrait mesurer 1500 m de hauteur et 280 m de diamètre, et la base sera constituée d'une serre de 37 km² pouvant être exploitée et cultivée [35], [47]. Les paramètres techniques et dimensionnels de ce prototype sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 6: Caractéristiques du projet Namibien.

Hauteur de la cheminée	1500 m
Diamètre de la cheminée	280 m
Puissance électrique nominale	400 MW
Cout du projet	1000 M\$

3.7 Projet d'Arizona

Une centrale est prévue dans le désert d'Arizona en 2001, où une production de 200 MW a été visée. Qui pourrait générer 4000 fois plus de puissance que celle construite à Manzanares en Espagne. Les travaux de construction étaient donnés à une firme australienne qui travaille sous la consultation de l'allemand Schlaich Bergemann. Les paramètres techniques et dimensionnels de ce prototype sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 7: Caractéristiques de la centrale d'Arizona.

Hauteur de la cheminée	1000 m
Diamètre de la cheminée	130 m
Hauteur moyenne de la couverture	1.85 m
Température de l'air chauffé	60-70°C
Puissance électrique nominale	200MW
Surface du collecteur	35km ²

3.8 Autres projets

Les autres projets prévus comprennent le projet de 200 MW du Sri-Lanka, trois projets de 200 MW aux États-Unis, le Projet du français Raphaël Menard (Montagnes solaires) où une production de 500 MW a été visée, Projet du Grec Christos Papa georgiou (Cheminées flottantes), la centrale de 200 MW au Rajasthan, en Inde et la centrale de 200 MW en Chine [48]. De nombreuses installations expérimentales se sont concentrées sur l'amélioration des performances de l'installation avec des modifications ont été proposées et étudiées par différents chercheurs du monde entier [49]–[55].

4 Progrès des études et recherches expérimentales

La conception de la cheminée solaire revient à l'espagnole Isidoro Cabanyes depuis plus de 100 ans. En 1903, où il a été initialement proposé une conception d'une centrale solaire à cheminée. Puis en 1926 le français Bernard Dubos propose la construction d'une centrale solaire aéro-électrique en Afrique du Nord avec sa cheminée solaire sur le versant d'une grande montagne. En 1931, le chercheur allemand, Hanns Gunther a mis au point une technologie utilisant simplement l'effet de serre et de cheminée pour entraîner une turbine génératrice d'énergie solaire. Plusieurs décennies plus tard, le professeur Jorg Schlaich mettre à nouveau la même idée en 1974 pour que le premier prototype de centrale solaire à cheminée au monde à construit à Manzanares en 1982 [1], [56].

La construction de ce prototype, était le point de départ pour des chercheurs de nombreux pays de construire des différentes tailles et types de systèmes de génération de l'énergie solaire thermique.

En 1983, **Krisst** aux Etats-Unis construit une petite cheminée solaire composée d'une cheminée de 10 m d'hauteur et un collecteur de 6 m de diamètre dans le but de produire une puissance de 10 W [57].

En 1985, **Kulunk** à Izmit en Turquie a réussi de produire une puissance de 0.14 W à l'aide d'une micro-échelle d'une hauteur de 2 m et de 70 mm de diamètre et une surface de collection de 9 m² [58].

Entre 1997 et 1998, en Floride, **Pasurmarthi and Sherif** ont construit un prototype expérimental de cheminée solaire à petite échelle pour vérifier le mécanisme de fonctionnement et les performances de stockage d'énergie. Aussi pour étudier l'effet de différents paramètres géométriques [59].

En 2002, à Wuhan en Chine, **Zhou et al.** ont conçu et construit une installation pilote de cheminée solaire afin d'étudier le champ de température, ils ont aussi installés un système de stockage pour stocker l'énergie captée du rayonnement solaire [60].

En 2007, **Ketlogetswe et al.** à Botswana, ont construit une cheminée en verre renforcé de 22 m de hauteur pour mesurer les champs de températures et vitesses ainsi que le rayonnement solaire [61]. Dans la même année à Isparta, Turquie, **Koyun et al.** ont construit une cheminée solaire pilote d'une hauteur de 15 m et de 1.19 m de diamètre et d'un collecteur de diamètre de 16 m soit un surface de collection de 200 m² Les deux études expérimentales et une modélisation théorique a été réalisée pour tester la conception [62].

En 2008, **Ferreria et al.** ont construit un prototype au Brésil pour le séchage des aliments. Dans ce prototype pilote menue d'une tour de 12.3 m d'hauteur et 1 m de diamètre avec un collecteur de 25 m de diamètre, sa couverture était placée à 0,5 m au-dessus du niveau du sol. Les analyses théoriques et les expériences en collaboration avec **Maia et al.** ont indiqué que la hauteur et le diamètre de la tour sont les variables physiques les plus importantes pour la conception des cheminées solaires [63]–[68].

En 2010, **Wei et al.** ont construit une nouvelle centrale solaire ascendante combinée avec un système d'énergie éolienne pour produire de l'électricité dans un désert de Wuhai, Mongolie à la Chine. La hauteur de la cheminée était de 53 m et de 10 m de diamètre, le collecteur couvre une superficie de 5300 m². Il a été signalé que la puissance produite par le système était de 200 kW [69]. En même année, **Kasaeian et al.** Pour mesurer les vitesses et les températures, ont construit un prototype à l'Université de Zanzan, en Iran, où la hauteur de la cheminée était 12 m et le diamètre du collecteur était 10 m. En raison de l'effet de serre qui se produit sous le capteur, la différence de température entre la sortie du capteur et la température ambiante atteint 25 °C, Le temps que la vitesse d'entrée du collecteur était nulle, la vitesse maximale de l'air de 3 m/s a été enregistrée à l'intérieur de la cheminée [70].

En 2011, **Najmi et al.** ont effectué une étude sur l'optimisation d'une cheminée solaire typique utilisant du caoutchouc ou de l'asphalte au fond du capteur et du double vitrage pour le capteur pour produire plus d'énergie [71]. En même année, **Mehla et al.** ont fait une analyse du champ de vitesse pour des diamètres de cheminée variables, ils ont conclu que le rapport du diamètre de la cheminée à la hauteur de la cheminée de 0,1 était optimal pour une cheminée de 0,8 m de hauteur [72].

En 2012, **Chappell et al.** ont fait la conception et le test d'une cheminée solaire à petite échelle où ils ont essayé d'avoir une conception et fabrication pour un faible coût des matériaux de construction et un entretien minimal [73]. En même année, et pour avoir une vision sur les champs de vitesse d'écoulement de l'air, la température, le rayonnement solaire et la différence de pression étaient, **Al-Dabbas** a conçu son centrale électrique de tour ascendante solaire en Jordanie [74].

En 2013, **Gholamalizadeh et Mansouri** ont donné une approche globale pour concevoir et améliorer une cheminée solaire où les effets des paramètres géométriques sur la performance de la cheminée ont été étudiés [51]. En même année, **Aja et al.** ont étudié l'effet de la vitesse et de la direction du vent sur la performance de la cheminée solaire, ils ont conclu que la vitesse du vent a eu un effet significatif sur la perte de chaleur par convection [75].

En 2014, **Khanal et Lei** ont fait l'étude d'une cheminée solaire à paroi passive inclinée pour que des différents angles d'inclinaison de la paroi passive aient été étudiés [76]. En même année, **Al-Azawie et al.** ont construit une installation expérimentale pour acquérir des données mesurées de la capacité de conversion de six matériaux de sol différents, potentiellement disponibles en Malaisie [77]. Dans la même période, **Li et Liu** ont étudié les performances thermiques d'une cheminée solaire combinée avec PCM, où trois flux de chaleur différents des effets positifs ont été observés [78]. **Kasaeian et al.** ont proposé un modèle mathématique qui a été validé avec les données expérimentales en vue de l'optimisation des paramètres géométriques d'une cheminée solaire à Téhéran [79]. Dans la même année, **Tan et Wong** ont testé les influences de la vitesse de l'air ambiant et de la charge thermique interne sur le développement de la vitesse de l'air dans la cheminée solaire pour les vitesses de l'air ambiant supérieur à 2 m/s [80].

En 2015, **Shahreza et Imani**, ont étudié expérimentalement et numériquement un nouveau modèle à petite échelle de cheminée solaire où ils sont utilisés des intensificateurs du flux de chaleur. Les résultats montrent que l'utilisation d'intensificateurs a provoqué une vitesse maximale remarquable de 5,12 m/s a été atteinte [81]. Dans la même période, une centrale électrique pilote à cheminée solaire avec une hauteur de 2 m et un diamètre de collection de 3 m a été construite à l'Université de Téhéran, en Iran par **Ghalamchi et al.** La mesure et l'évaluation des différents paramètres montrent que la réduction de la taille d'entrée a un effet positif sur les performances de production d'énergie solaire des cheminées. Une vitesse maximale de l'air de 1,3 m/s a été enregistrée à l'intérieur de la cheminée [82]. En même année, **Okada et al.** Ont appliqué une tour de diffuseur au lieu d'une tour cylindrique dans le but que l'efficacité de la production d'énergie du système soit augmentée. Leurs expériences de laboratoire, montrent que la tour de type diffuseur proposée induit une vitesse environ 1,38 à 1,44 fois supérieure à celle du type cylindrique conventionnel [83]. À la même année, **Nasirivatan et al.** ont étudié expérimentalement l'effet du vent de corona (ionique) sur la convection naturelle au niveau de l'absorbeur d'une centrale solaire à cheminée. Leurs résultats montrent que la quantité de transfert de chaleur a augmenté de plus de 14,5% lors de l'application d'une tension de 15 kV et la vitesse dans la cheminée a connu une amélioration d'environ 72 % [84].

En 2016, **Ghalamchi et al.** ont construit une installation comprenant une cheminée de 3 m de hauteur et 3 m de diamètre de collecteur pour analyser deux paramètres efficaces ; le matériau absorbant et les dimensions géométriques. Les analyses faites montrent que l'absorbeur en aluminium a un taux de transfert de chaleur plus élevé que celui en fer et la vitesse maximale de l'air de 1,7 m/s a été enregistrée à l'intérieur de la cheminée [85].

Après 2016 plusieurs études expérimentales sont faites par des chercheurs dans le domaine de la centrale solaire à cheminée pour donner des différentes contributions pour rendre les centrales plus productives, parmi lesquelles on cite les études suivantes : **Ayadi et al.** [28], **Fadaei et al.** [86], **Bouabidi et al.** [87], **OK. Ahmad et al.** [88], **Al-Kaiem et al.** [89], **Bashirnezhed et al.** [90], **Nasraoui et al.** [91], **Nasraoui et al.** [92], **Mokrani et al.** [93], **Balijepalli et al.** [94] et **Belkhode et al.** [95].

5 Objectif du travail

L'énergie solaire est l'une des sources très prometteuses pour la production d'électricité verte dans les années à venir. Cependant, le développement de cette filière est donc de fait lié à la mise en place de moyens de conversion de cette énergie parmi lesquels on trouve la cheminée solaire qui se base sur un simple principe de conversion par la création d'un écoulement de l'air pour entraîner une ou des turbogénérateurs.

Plusieurs études quelques soient, expérimentales ou théoriques ont été menées dans le cadre de la centrale solaire à cheminée dont les objectifs principaux se résument dans la structure, à l'amélioration de la productivité des centrales, les phénomènes qui s'y produisent lors de la conversion de l'énergie.

L'objectif principal de ce travail est de donner une contribution aux études et recherches menées à la centrale solaire à cheminée et d'évaluer les performances de cette dernière pour donner un appui à la politique nationale Algérienne pour une transition énergétique par l'installation d'une centrale solaire à cheminée comme une nouvelle technique de production de l'énergie électrique. Le travail s'appuie sur une étude analytique, expérimentale et technico-économique dans le but d'acquérir une meilleure compréhension de fonctionnement et des performances de la cheminée solaire.

6 Conclusion

Les centrales solaires à cheminée présentent une technique prouvée pour la production de l'énergie électrique, elles comprennent plusieurs modes de conversion d'énergie qui utilisent le rayonnement solaire pour réchauffer l'air atmosphérique comme un fluide de travail pour entraîner les turbogénérateurs.

Les travaux expérimentaux menés à ce type d'installation concernent principalement des simples et petites cheminées solaires, De nombreuses modifications et optimisations ont été effectuées dans le but d'obtenir l'harmonie dimensionnelle pour optimiser ces systèmes. De nombreux rapports sont disponibles où les résultats de la plupart des travaux sont brièvement rapportés pour montrer un concept général de chaque œuvre.

Chapitre 3 : Etude Analytique et Optimisation

1 Introduction

Dans le domaine de la recherche scientifique, la plupart des ingénieurs et techniciens travaillent sur l'amélioration de leur processus de production ou des produits au moyen de tests. Malheureusement, les stratégies et les méthodes qui sont couramment utilisés pour la pratique de telles analyses souvent ou toujours coûteuse et inefficace et elle suscite beaucoup d'expériences difficilement utilisables, c'est pour ça qu'elles s'appuient sur la planification.

Dans ce chapitre, nous donnerons au lecteur une explication brève et simplifiée sur la méthode des plans d'expériences et le logiciel utilisé dans ce chapitre, où nous offrons un résumé de la méthodologie à suivre pour obtenir les paramètres géométriques optimaux et nous indiquerons également le modèle mathématique nécessaire. En mettant l'accent sur le logiciel STATGRAPHICS que nous avons adopté dans cette étude.

2 Méthode des plans d'expériences

La méthode des plans d'expériences vise à optimiser le recueil d'information quantifiable sur un phénomène physique, au sens large, c'est-à-dire du type que l'on rencontre dans les sciences expérimentales [96]. La méthode traditionnelle d'essai, qui dépend généralement de modifier les paramètres après l'autre, d'observer changent avec le temps, cette méthode ne donne pas de résultats acceptables de l'interaction entre les différents facteurs, qui affectent directement l'expérience et sa longueur. Afin d'éviter ou d'éliminer les inconvénients des expériences traditionnelles, une méthode basée sur des expériences aussi peu que possible a été créée par détermination de la relation entre les différents facteurs d'influence et les résultats escomptés, qui sont appelés plan d'expérience [97].

2.1 Méthodologie des plans d'expériences

L'intérêt de la méthode est de réaliser un plan de test afin d'extraire autant le plus possible d'informations sur les données recueillies en présence de nombreuses et multiples variables. Leur importance ou leur idée de base est de changer tous les facteurs pertinents

dans le temps, sur une série d'expériences prévues, d'une façon de dessiner un modèle mathématique. Ce modèle est ensuite utilisé pour l'interprétation, de prévision et d'optimisation des facteurs du problème étudié.

2.2 Facteurs de la méthode du plan d'expériences

Il y a deux types de facteurs : les facteurs contrôlables dont les effets sont d'une importance majeure et fondamentale et les facteurs qui sont incontrôlables (facteurs de bruit) sont des facteurs qui sont habituellement ingérables et doivent réduire leur impact sur la réponse [98].

2.3 Niveaux des facteurs

- **Bas** : Pour conformer mer ou mélanger des facteurs, l'extrémité inférieure de la gamme à laquelle le facteur se mettra au milieu de l'essai.
- **Haut** : Pour les facteurs continues ou mélangés, l'extrémité supérieure de la gamme à laquelle se réglera le facteur. Niveaux : pour directement les éléments, les dimensions particulières qui seront utilisées lors du procès. Séparez chaque dimension par une virgule.
- **Discret** : Un facteur qui peut juste prendre un arrangement discret des valeurs.
- **Continu** : Un facteur qui peut être varié sur un domaine continu.
- **Mélange** : Un facteur qui représente la quantité de composantes contenues dans un mélange [98].

2.4 Réponse (sorties de l'expérience)

Résultats quantifiables sont susceptibles de relever par les composants et leurs dimensions distinctes. Les expérimentateurs veulent régulièrement de s'abstenir de rationaliser la procédure d'une réaction au détriment d'une autre. En conséquence, les résultats essentiels sont estimés et étudiés afin de déterminer les facteurs et leurs paramètres qui donneront le meilleur dans l'ensemble entraîner aux qualités fondamentales de qualité, les facteurs quantifiables et évaluables caractéristiques [99].

2.5 Types généraux du plan d'expérience

- **Dépistage:** Proposé des plans pour choisir les éléments les plus cruciaux qui influencent une réaction. Une grande partie des plans incluent seulement 2 dimensions de chaque facteur. Les éléments peuvent être quantitatifs ou discrets [98].
- **Surface de réponse:** Ces structures sont destinées à trouver les niveaux optimaux des facteurs expérimentaux. Chaque facteur est gardé en cours d'exécution au moins 3 niveaux. Où les structures de surface de réponse sont seulement accessibles si tous les facteurs sont continus [100].
- **Factorielle multiniveau:** Ces plans vous permettent d'indiquer le nombre des niveaux où chaque facteur doit être défini et comprennent toutes les combinaisons des niveaux de ces facteurs. Il est régulièrement utilisé pour produire un ensemble des candidats en cours d'exécution pour le choix de la stratégie de création de plan D'optimal. Remarque, le plan factoriel multi niveau est seulement accessible si tous les facteurs sont continus [100].
- **Matrice orthogonale:** Une classe générale des plans créés par Genichi Taguchi. Les facteurs peuvent être quantitatifs ou discrets [100].

2.6 Description du logiciel STATGRAPHICS

STATGRAPHICS est un logiciel statistique polyvalent qui convient parfaitement à une utilisation aux débutants en économie et en économétrie, ainsi qu'à ceux qui suivent des cours d'affaires, ingénierie, mathématiques et autres domaines. Son utilisation attrayante de graphiques, avec son système de menu facile à utiliser, est un outil idéal pour stimuler et intéresser ou bénéficier l'utilisateur. Ce c'est particulièrement vrai au début de la rencontre d'un étudiant avec du matériel quantitatif, il ou elle peut ressentir une résistance préalable. Le paquet est passé par plusieurs versions, avec plus récent, offrant de meilleures procédures, de meilleures installations de traitement des données et saut qualitatif dans la qualité de la documentation [101].

Le menu de conception expérimentale et l'aide associée avec lui, sont généralement des zones opaques dans la plupart des génériques statistiques, sont particulièrement bien mises en œuvre. Rien ne peut rendre ce travail une évidence, mais le programme se porte

plutôt bien. Bien que les utilisateurs doivent comprendre ce qu'ils font, le programme offre de bonnes incitations mnémoriques (aux principes de base, aux classes de conception et de conception, par exemple), et le dialogue progressif rend la mise en œuvre aussi simple que possible. Les utilisateurs sont dirigés vers la création, la modification, l'optimisation, l'augmentation et l'analyse de leurs conceptions d'une manière assez incassable. Les outils disponibles couvrent avec succès le dépistage ; surfaces de réponse ; des mélanges ; factorielles multi niveaux ; matrices internes ou externes ; composantes de variance hiérarchiques catégoriques simples ou multifactorielles ; et optimisation des réponses multiples [102].

2.7 Plan d'expérience dans STATGRAPHICS

La conception de plan d'expérience de STATGRAPHICS contient un autre assistant qui aide ses utilisateurs dans la construction et l'analyse des expériences conçues. Il redirige l'utilisateur au moyen de douze étapes essentielles [100]. Qui peuvent être résumés comme suit [98]:

- **Phase 1 : Création d'un essai**
 - **Etape 1** : Définir les variables de réponse.
 - **Etape 2** : Définir les facteurs expérimentaux.
 - **Etape 3** : Choisir le modèle expérimental approprié.
 - **Etape 4** : Définir le modèle pour qu'il s'adapte aux données.
 - **Etape 5** : Sélection d'un sous-ensemble optimal des essais. (si créer un plan optimal).
 - **Etape 6** : Évaluation du plan.
 - **Etape 7** : Enregistrer le procès qui a été déposée.
- **Phase 2 : Analyse des résultats**
 - **Etape 8** : Analyser les résultats en mettant au point un affichage mesurable pour chaque variable de réponse.
 - **Etape 9** : Trouver le réglage des facteurs expérimentaux qui optimisent les réponses.
 - **Etape 10** : Enregistrer les résultats.
- **Phase 3 : Plus d'expérimentation**

- **Etape 11 :** Augmenter le plan si nécessaire en ajoutant des cycles supplémentaires.
- **Etape 12 :** En extrapolant les modèles au-delà de la région expérimentale pour rechercher les zones qui peuvent produire des résultats encore mieux.

3 Prototype de la cheminée solaire a étudié

Le tableau qui suit montre les dimensions des différentes configurations proposées pour la cheminée solaire conçue il résume les paramètres géométriques appropriés à chaque configuration.

Tableau 8: Paramètres géométriques de différentes configurations de la cheminée solaire.

Elément	Dimensions
Hauteur de la cheminée H_{Ch}	300 cm, 400 cm
Angle d'inclinaison du collecteur	5°
Surface du collecteur	6 m ²
Diamètre de la cheminée D_{Ch}	11 cm, 16 cm
Diamètre du collecteur D_{Co}	300 cm
Epaisseur de l'isolant thermique	3 cm
Epaisseur du vitrage	4 mm
Epaisseur de la plaque absorbante	0.3 mm
Longueur d'un côté	1.14 m
Hauteur du collecteur H_{Co}	5 cm, 10 cm, 15 cm

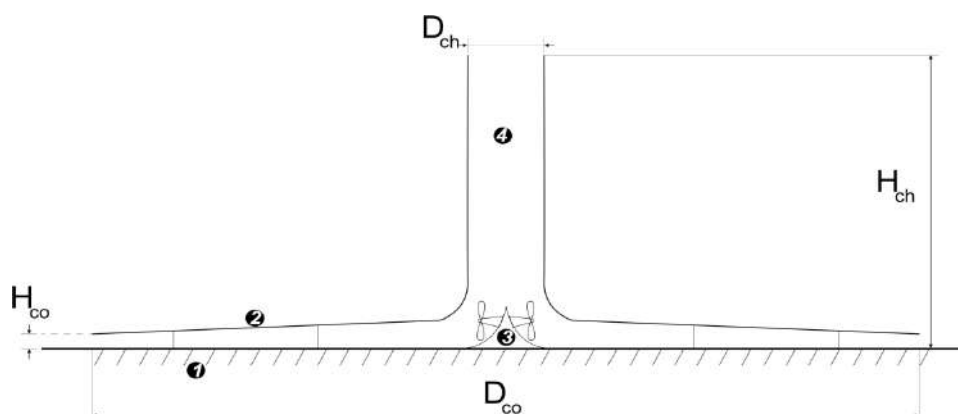


Figure 11: Configuration géométrique d'une cheminée solaire (1 : Sol, 2 : Collecteur, 3 : Turbines + Générateurs, 4 : Cheminée).

4 Conditions de fonctionnement

Les conditions de fonctionnement de la cheminée solaire à étudier en prenant en considération que les essais sont menés avec une cheminée de hauteur soit 300 ou 400 cm avec lame d'air de 5 cm, 10 cm et 15 cm et avec un diamètre de la cheminée soit 11 cm ou 16 cm. Les conditions aux limites adimensionnelles sont des conditions dynamiques représentées par les vitesses « u et v » et des conditions thermiques présentées par la température T, voir la figure suivante :

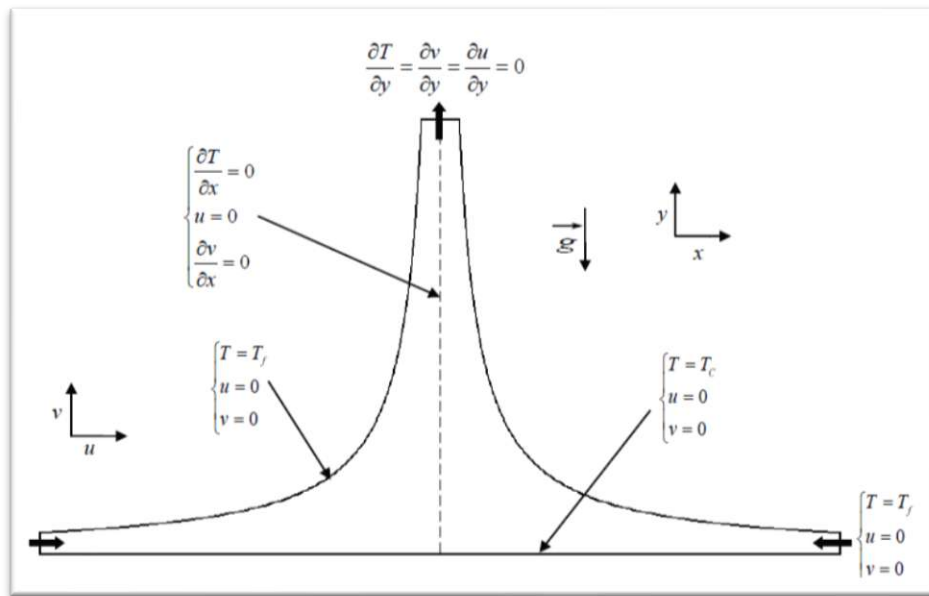


Figure 12: Conditions thermiques et hydrodynamiques dans une cheminée solaire.

5 Optimisation de la conception

Dans cette partie de l'étude notre objectif est d'améliorer la conception de la cheminée solaire et savoir les paramètres géométriques qui affectée par cette conception afin de produire une grande vitesse à l'entrée de cheminée et une productivité plus efficace et pour ce faire nous avons adopté la méthode des plans d'expérience que nous avons expliqué précédemment dans ce chapitre.

Nous utilisons la méthode des plans d'expériences et le logiciel STATGRAPHICS ce qui nous aide à trouver rapidement les bons résultats et donner les paramètres optimaux pour réaliser notre prototype d'expérience.

5.1 Phases des plans d'expériences

- **Phase de création d'un essai**

Etape 1 : Définition des variables de réponse

Cette étape nous permet de définir nos réponses, dans notre cas nous avons juste la vitesse et on a choisi un ensemble des options, où nous avons choisi les niveaux de réponse indiqués dans le tableau suivant, en tenant compte des valeurs raisonnables que la vitesse maximale peut atteindre.

Tableau 9: Définition de la variable de réponse.

Nom	Unité	Analyse	Objectif	Impact	Sensibilité	Bas	Haut
Vitesse	m/s	Mean	Maximiser	3	Haute	1	3

- **Analyse :** La statistique à analyser. Ce paramètre est uniquement pertinent si vous collectez plusieurs échantillons lors de chaque analyse ou si vous créez une conception de paramètre robuste, avec des facteurs croisés.
- **Moyenne (mean) :** Crée un modèle pour la réponse moyenne. Si Y_{ij} est égal à la mesure obtenue à partir du « i » échantillon collecté lors de « j » analyse et en laissant m le nombre d'échantillons collectés lors de cette analyse, la moyenne est calculée à partir de :
 - $$\bar{y}_j = \frac{\sum_{i=1}^m Y_{ij}}{m}$$
- **Objectif :** L'expérience a pour objectif d'augmenter la vitesse.
- **Impact :** Nombre compris entre 1,0 et 5,0 décrivant l'importance relative de chaque réponse.
- **Sensibilité :** à quel point il est important de se rapprocher de l'objectif souhaité. Cela affecte la forme des fonctions de désirabilité créées lors de l'optimisation de la réponse [98].

Etape 2 : Définition des facteurs expérimentaux

Cette étape nous permet d'identifier nos facteurs expérimentaux qui varient au cours de l'expérience. Nous avons ajouté des facteurs expérimentaux contrôlés qui affectent la vitesse maximale.

Tableau 10: Facteurs contrôlables définis.

Nom	Unité	Type	Rôle	Bas	Haut
Diamètre de la cheminée	cm	Catégorique	Controllable	11	16
Hauteur de la cheminée	cm	Catégorique	Controllable	300	400
Lame d'air	cm	Continue	Controllable	5	15

Etape 3 : Choix du modèle expérimental approprié

La troisième étape de la création d'une expérience consiste à choisir un modèle expérimental, cette étape nous permet de déterminer le type d'expérience avec laquelle nous souhaitons travailler. Dans notre cas, nous choisissons la conception de dépistage (Screening Designs), nous sélectionnons le factorielle 2^3 afin de réduire le nombre d'expériences, donc on a 8 expériences.

Etape 5 : Définition du modèle pour qu'il s'adapte aux données

Cette étape nous permet de spécifier le modèle d'ajustement, et le modèle typique de criblage est le modèle d'interactions à 2 facteurs.

Etape5 : Sélection d'un sous-ensemble optimal des essais

Une fois que le programme nous a indiqué le nombre d'expériences pouvant être effectuées, cette étape nous permet de déterminer le nombre d'expériences que nous estimons appropriées, nous avons sélectionné 8 essais (8 expériences). Nous complétons toutes les expériences proposées par STATGRAPHICS et fournissons les résultats (réponse) représentant la vitesse.

	BLOCK	H ch	D ch	lame air	Vitesse
		m	m	m	m/s
1	1	1,0	1,0	1,0	1,75
2	1	-1,0	1,0	1,0	1,8
3	1	-1,0	-1,0	-1,0	1,4
4	1	1,0	-1,0	-1,0	1,25
5	1	1,0	-1,0	1,0	1,9
6	1	-1,0	-1,0	1,0	1,3
7	1	-1,0	1,0	-1,0	1,7
8	1	1,0	1,0	-1,0	2,30

Figure 13: Fenêtre Databook

Etape 6 : Evaluation du plan

Cette étape génère un certain nombre de résumés numériques et graphiques d'options différentes des propriétés du modèle sélectionné, que l'on peut utiliser pour savoir si le modèle est bon, en particulier pour le modèle prédictif. Variance où devrait être relativement constant pour la région expérimentale. Les options les plus importantes pour avoir une bonne évaluation du modèle à cette étape sont les courbes Leverage et Prédiction.

Etape 7 : Enregistrement de procès qui a été déposée

Dans cette étape, nous sauvegardons tout le travail que nous avons déjà fait et les résultats obtenus.

- Phase d'analyse des résultats

Après avoir créé notre expérience, nous passons à la phase d'analyse des résultats.

Etape 8 : Analyse des données

A ce stade on va analyser les résultats en mettant au point un affichage mesurable pour chaque variable de réponse.

Etape 9 : Optimisation des réponses

Afin de trouver une combinaison de facteurs expérimentaux permettant d'obtenir de bons résultats pour plusieurs variables de réponse, l'assistant de dématérialisation (DOE) utilise le concept de fonctions de désirabilité [98]. La désirabilité est mesurée sur une échelle de 0 à 1, 1 étant le plus désirable, lorsque plusieurs réponses suggèrent différentes conditions de fonctionnement optimales, un équilibre entre ces réponses est obtenu à l'aide de fonction de désirabilité.

Etape 10 : Enregistrement des résultats

Cette étape nous permet d'enregistrer nos résultats dans un Stat Polio.

- **Phase plus d'expérimentation**

Etape 11 : Augmentation des conceptions

On va augmenter le plan si nécessaire en ajoutant des cycles supplémentaires.

Etape 12 : Extrapolation de modèle

Cette étape nous permet d'utiliser le modèle statistique pour prévoir les paramètres des facteurs extérieurs à la région expérimentale qui pourrait produire des résultats encore meilleurs.

6 Résultats et discussions

Dans ce qui suit nous intéressons à l'analyse des résultats obtenus par optimisation de la vitesse maximal en utilisant le logicielle STATGRAPHICS pour définir l'influence des paramètres géométriques sur l'efficacité de la cheminée solaire et pour trouver le paramètre le plus influent en utilisant la méthode des plans d'expériences qui a été présenté précédemment.

6.1 Optimisation de la vitesse d'écoulement à l'entrée de la cheminée

6.1.1 Les facteurs affectants

La première étude consiste à développer des plans d'expériences pour optimiser la performance énergétique de la cheminée solaire, plusieurs paramètres géométrique (Facteurs) ont été étudiés pour déterminer leur effet sur la vitesse maximale, les facteurs sont divisés en deux, facteurs catégorique et facteurs continue pour chacun des facteurs continus et des facteurs catégoriques les niveaux de variation (bas et haut) -1 et +1 ont été définis et sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau 11: Sélection des facteurs étudiés et leurs niveaux de variation pour l'étude réalisée.

Catégorique			
Facteurs	Variables	Niveau -1	Niveau 1
A ₁	Hauteur de la cheminée (cm)	300	400
A ₂	Diamètre de la cheminée (cm)	11	16
Continue			
A ₃	Lame d'air (cm)	5	15

Le plan d'expérience utilisé est un plan factoriel dont la construction générale a été décrite précédemment cela représente $2^3 = 8$ expériences ainsi que les réponses mesurées, le tableau suivant représente toutes les expériences :

Tableau 12: Planification du plan fractionnel 2^3 avec les variables du code A et les valeurs naturelles B et Y comme réponses.

Courses	A ₁	A ₂	A ₃	B ₁	B ₂	B ₃	Y
1	1	1	1	4	0.16	0.15	1.75
2	-1	1	1	3	0.16	0.15	1.8
3	-1	-1	-1	3	0.11	0.05	1.4
4	1	-1	-1	4	0.11	0.05	1.25
5	1	-1	1	4	0.11	0.15	1.9
6	-1	-1	1	3	0.11	0.15	1.3
7	-1	1	-1	3	0.11	0.05	1.7
8	1	1	-1	4	0.16	0.05	2.30

6.1.2 Analyse

6.1.2.1 Coefficient de régression pour la vitesse

A partir des valeurs des effets ou des coefficients indiqués dans le tableau suivant, le modèle mathématique qui suit peut-être exprimer pour notre réponse.

Tableau 13: Interactions et effets à deux facteurs sur la réponse Y

Coefficient	Estimation
Constant	1,675
A : H _{Ch}	0,125
B : D _{Ch}	0,2125
C : lame d'air	0,0125
AB	0,0125
AC	0,0125
BC	-0,125

Ce volet affiche l'équation de régression ajustée aux données. L'équation du modèle ajusté est :

$$Y = 1.675 + 0.125A_1 + 0.2125A_2 + 0.0125A_3 + 0.0125A_1A_2 + 0.0125A_1A_3 - 0.125A_2A_3$$

6.1.2.2 Diagramme de Pareto

Le graphique de Pareto dans les Figure 14 et Figure 15 montre tous les effets de paramètre et leurs interactions par ordre décroissant d'importance. Le signe (+) indique une contribution positive de l'effet, tandis que le signe (-) indique une contribution négative [103]. Montre une ligne bleue verticale pour déterminer quels effets sont statistiquement importants, La longueur de chaque barre est proportionnelle à la valeur de la statistique calculée pour l'effet associé. Toute barre au-delà de la ligne verticale est statistiquement significative au niveau de signification sélectionné [97].

Dans notre cas, les réponses sont la vitesse, il y a des effets principaux (A : hauteur de la cheminée, B : diamètre de la cheminée, C : lame d'air) et trois interactions (BC, AC, AB).

A : A un impact positif sur la réponse.

B : A un impact positif sur la réponse.

C : A un impact positif sur la réponse.

BC : Avoir un impact négatif sur la réponse.

AC : Avoir un impact positif sur la réponse.

AB : Avoir un impact positif sur la réponse.

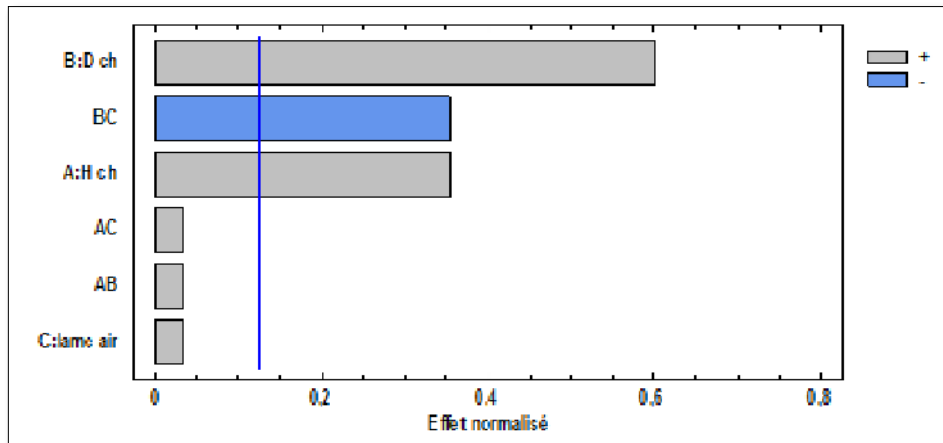


Figure 14: Diagramme de Pareto pour la vitesse normalisée.

Les valeurs représentées dans la Figure 15 indiquent que toutes ces interactions (AC, AB) sont négligeables, ces interactions peuvent donc être éliminées du modèle, cet ajustement n'a pas affecté l'adéquation du modèle.

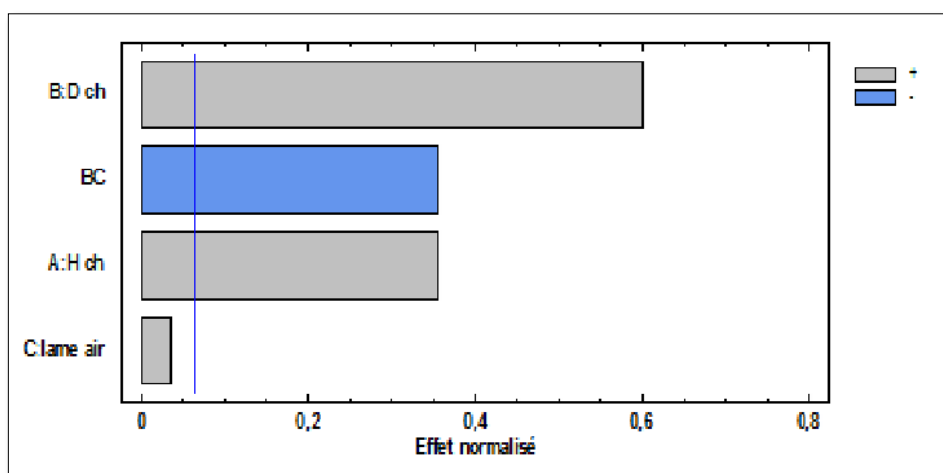


Figure 15: Diagramme de Pareto pour la vitesse normalisée après avoir exclu la non-influence des facteurs.

6.1.2.3 Diagrammes des effets de principaux paramètres

Les courbes des principaux effets illustrées dans la figure suivante montrent la variation estimée de la vitesse, quand chacun des facteurs est décalé de son niveau le plus bas (-1) à son niveau le plus élevé (+1), tous les autres facteurs étant maintenus constants à (0). Nous observons l'effet des facteurs sur la vitesse, le facteur principal qui a un effet significatif sur la vitesse est le diamètre de la cheminée où le taux d'impact atteint à 22.1% qui varie entre [1.46 – 1.88] m/s, quant à la hauteur de la cheminée elle a également un effet pouvant aller jusqu'à 13.1% qui varie entre [1.80 – 1.55] m/s, quant à la lame d'air nous remarquons un effet très faible sur la vitesse.

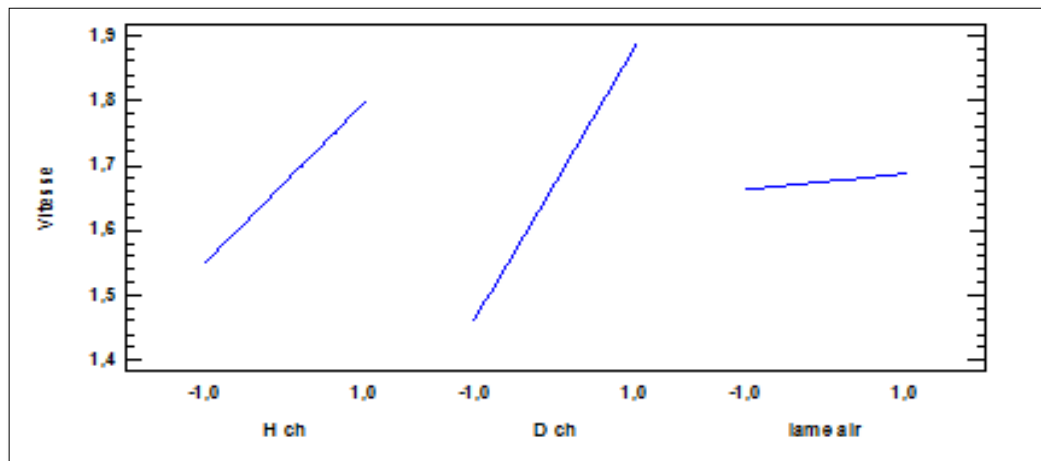


Figure 16: Effets des principaux paramètres sur la vitesse.

6.1.2.4 Diagramme des interactions pour la vitesse

Pour déterminer si les facteurs du processus interagissent ou non, on peut utiliser un outil graphique simple mais puissant appelé diagramme d'interaction.

- Si les lignes du tracé d'interaction sont parallèles, ce que montre qu'il n'y a pas d'interaction entre les facteurs du processus.
- La réponse ne dépend pas de -1 à +1 des niveaux de facteur à l'autre niveau de facteur.
- Si les lignes ne sont pas parallèles, il existe une interaction entre les facteurs.
- Plus le degré de séparation entre parallélismes est important (qu'être parallèle), plus l'effet de l'interaction est élevé.

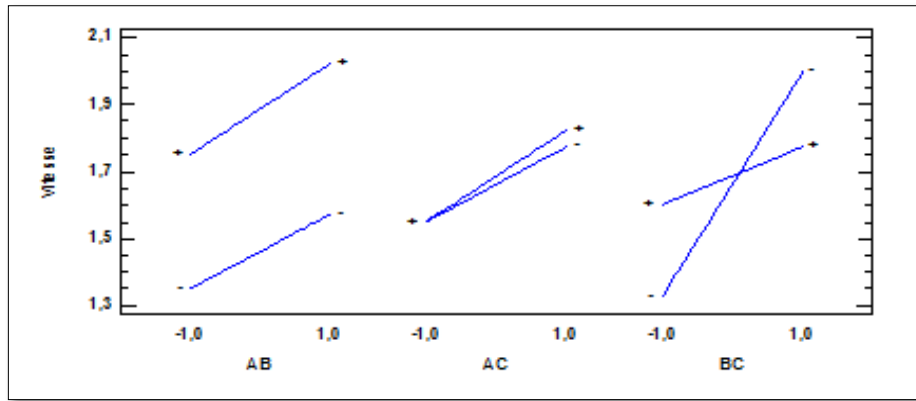


Figure 17: Illustration d'interaction pour la vitesse entre AB, AC, BC.

Il est généralement facile de comprendre le graphique, "Pane Options" sont utilisées pour dessiner chaque interaction individuellement:

- **Graphique de l'interaction (AB)**

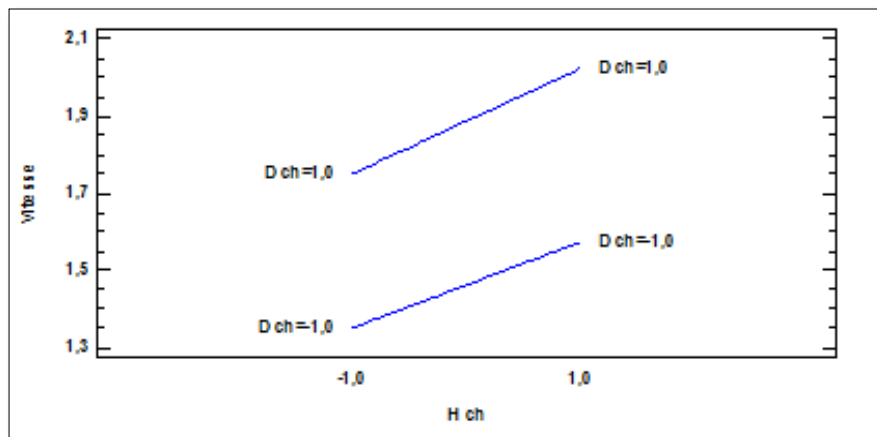


Figure 18: Illustration d'interaction pour la vitesse entre AB.

Diagramme d'interaction entre «Hauteur » et « Diamètre » de la cheminée :

Ce graphique montre l'effet de la hauteur de la cheminée H_{Ch} sur la vitesse à deux niveaux du diamètre de la cheminée D_{Ch} (+1) et (-1) sont respectivement de 0,14 m/s et 0,115 m/s, cela signifie que l'effet du diamètre est plus important lorsqu'on augmente la hauteur de la cheminée. L'interaction entre les deux facteurs est déterminée comme suit : $(0,14 - 0,115) / 2 = 0,0125$ m/s. Cette interaction est faible puisque les deux droites ont presque la même pente. Quand la hauteur de cheminée est au niveau bas (-1), l'effet du

diamètre est 0,2 m/s, quand la hauteur de cheminée est à haut niveau (+1), l'effet du diamètre est 0,225 m/s, cela signifie que l'effet de la hauteur de la cheminée est un peu plus élevé lorsque le diamètre de cheminée est à haut niveau. Où la vitesse maximale de l'écoulement atteint 2,03 m/s lorsque les deux facteurs sont à leurs niveaux haut (+1).

- **Graphique de l'interaction (AC)**

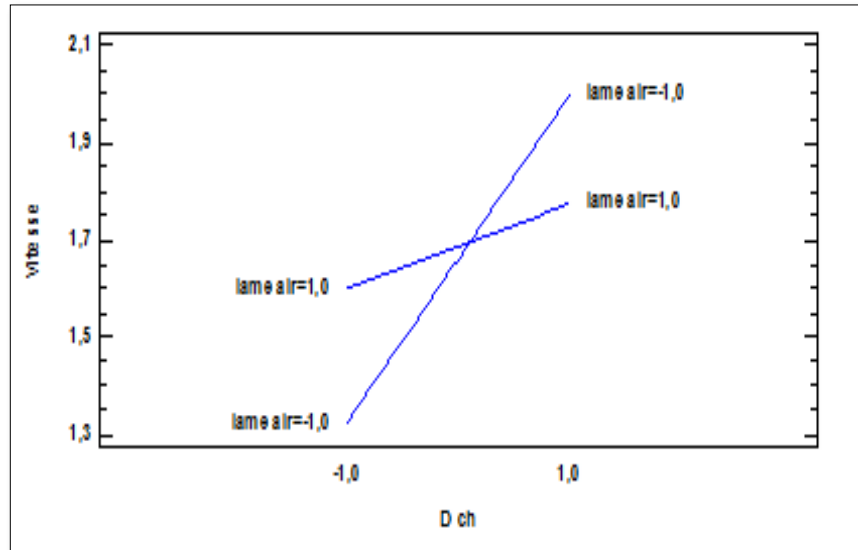


Figure 19: Illustration d'interaction pour la vitesse entre AC.

Diagramme d'interaction entre « Diamètre » et « Lame d'air » : Ce graphique montre l'effet du diamètre de la cheminée sur la vitesse à deux niveaux de la lame d'air (+1) et (-1) qui sont respectivement de 0,09m/s et de 0,34 m/s, cela signifie que l'effet du diamètre est plus élevé lorsque la lame d'air est au niveau bas (-1). Nous savons que si les droites des effets ne sont pas parallèles, il y a une interaction significative, c'est le cas de ces deux facteurs puisque les droites sont croisées. L'interaction entre les deux facteurs est déterminée comme suit : $(0,09 - 0,34) / 2 = - 0,125$ m/s. Cela signifie que cette interaction est très forte. Où la vitesse maximale de l'écoulement atteint 2 m/s lorsque la lame d'air est au niveau bas (-1) et le diamètre de la cheminée est à haut niveau (+1).

- **Graphique de l'interaction (BC)**

Diagramme d'interaction entre « Hauteur » et « Lame d'air » de la cheminée :

Le graphique sur la **Figure 20** montre l'effet de la hauteur de cheminée (H_{ch}) sur la vitesse à deux niveaux de la lame d'air (+1) et (-1) qui sont respectivement de 0,14 m/s et de 0,115 m/s, cela signifie que l'effet de la hauteur est un peu plus élevé lorsque la lame d'air est à haut niveau (+1). L'interaction entre les deux facteurs est déterminée comme suit : $(0,14 - 0,115) / 2 = 0,0125$ m/s, cela signifie que cette interaction est faible. Quand la hauteur de la cheminée est au niveau bas (-1), l'effet de la lame d'air est nul, puisque les deux facteurs ont la même vitesse, quand la hauteur de cheminée est à haut niveau (+1), l'effet de la lame d'air est 0,025 m/s. Cela signifie que l'effet de la hauteur de cheminée est important lorsque la lame d'air est à haut niveau (+1). Où la vitesse maximale de l'écoulement atteint 1,83 m/s lorsque les deux facteurs sont à leur niveau haut (+1).

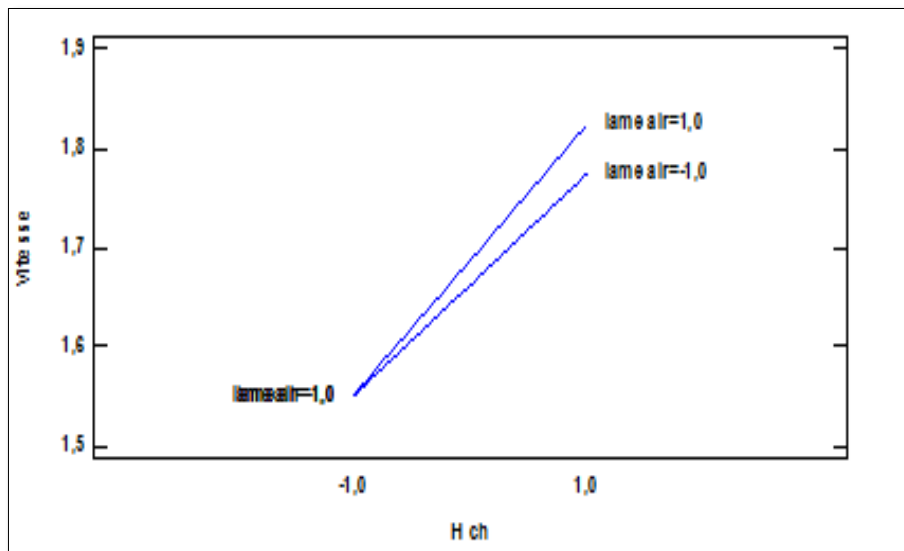


Figure 20: Illustration d'interaction pour la vitesse entre BC.

6.1.2.5 Surface de réponse

Le graphique de surface affiche un graphique de la réponse prédite en fonction de deux facteurs expérimentaux quelconques, les autres facteurs étant maintenus à des valeurs sélectionnées [100].

Les figures ci-dessous montrent respectivement la vitesse en fonction de la hauteur et de diamètre de la cheminée, et les facteurs liés à la lame d'air sont fixés aux niveaux -1 et +1.

A travers la Figure 21, la vitesse change sous forme de deux zones significatives dans le contour. Ce qui montre comment la surface de réponse change dans les zones rouge et verte. La vitesse dans la zone rouge est de 1,95 m/s dans la plage de [0,2, 1] du diamètre de la cheminée, cela signifie que la vitesse d'écoulement est plus élevée quand le diamètre de la cheminée est à haut niveau.

Quant à la zone verte la vitesse d'écoulement est d'environ 1,65 m/s dans la plage de [0,2, 1] d'hauteur, et de [-1, -0,6] du diamètre.

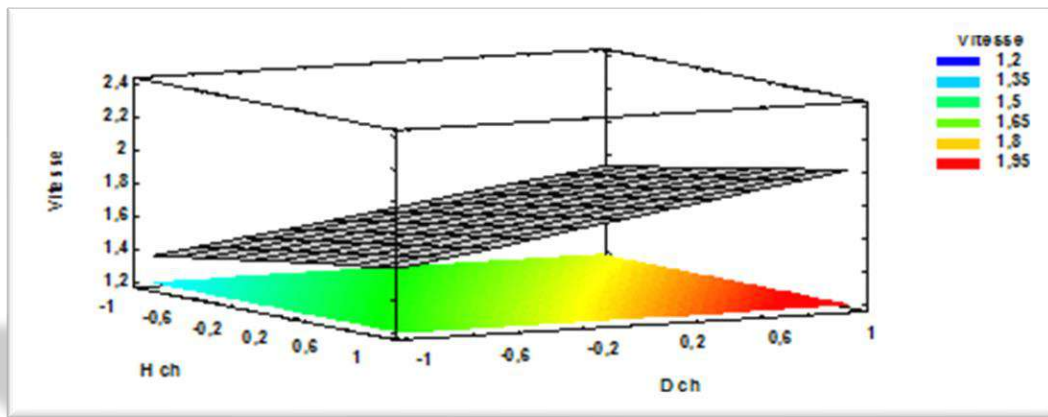


Figure 21: Surface estimée pour la vitesse en fonction de hauteur et diamètre de la cheminée (facteur pour la lame d'air est fixé au niveau +1).

A partir de la Figure 22, la vitesse change sous la forme de trois zones dans le contour. Ce qui nous montre comment la surface de réponse change dans les zones rouges, verte et bleue. La vitesse dans la zone rouge est de 1,95 m / s dans la plage de [0,2, 1] du diamètre de la cheminée. Pour la zone verte, la vitesse est de [1,5 ,1,65] m/s dans la plage de [1, -0,2] de diamètre de la cheminée, pour la zone blues, la vitesse est de 1.2 m/s dans la plage de [-0,2, 1] de hauteur de la cheminée.

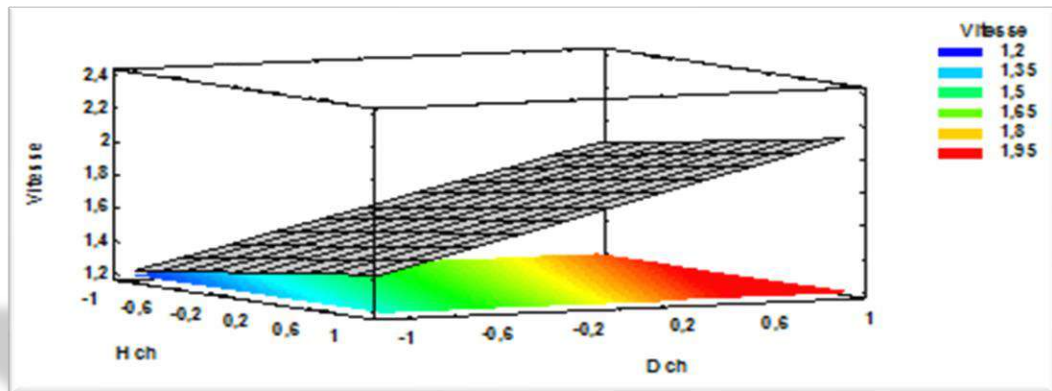


Figure 22: Surface estimée pour la vitesse en fonction de hauteur et diamètre de la cheminée (facteur pour la lame d'air est fixé au niveau -1).

6.1.2.6 Analyse de la variation de la vitesse

La statistique *R-Squared* indique que le modèle exploité explique 71.51% de la variation de la vitesse.

6.1.2.7 Recherche de la condition optimale (Optimisation de la réponse)

Le tableau suivant montre la combinaison de niveaux de facteurs qui maximise la vitesse sur la région indiquée, la vitesse optimale que nous avons atteinte est de 2,125 m/s.

Tableau 14: Paramètres géométriques optimaux.

Facteurs	Bas	Haut	Optimal	Niveau
Hauteur de la cheminée (cm)	300	400	400	1
Diamètre de la cheminée (cm)	11	16	16	1
Hauteur du collecteur(cm)	5	15	5	-1

Après optimisation, nous avons trouvé les meilleurs paramètres géométriques qui nous garantissent une efficacité élevée de la cheminée solaire, où la hauteur de la cheminée est de 400 cm, diamètre de la cheminée est de 16 cm et la lame d'air (Hauteur du collecteur) est de 5 cm.

7 Conclusion

L'objectif principal dans ce chapitre est d'obtenir les paramètres géométriques optimaux pour l'amélioration de l'efficacité de la cheminée solaire. Dans ce but, on a utilisé

la méthode des plans d'expériences, où nous avons toujours cherché à atteindre les paramètres géométriques qui affectent la vitesse à l'entrée de la cheminée solaire et leurs donner une valeur maximale.

Les résultats obtenus par la méthode des plans d'expériences montrent que les paramètres géométriques optimaux qui donnent un meilleur fonctionnement de la cheminée solaire sont de la construire avec :

- Une hauteur de la cheminée solaire égale à 400 cm ;
- Un diamètre de la cheminée solaire égal à 16 cm ;
- Avec une lame d'air à l'entrée du collecteur égale à 5 cm.

Chapitre 4 : Etude Expérimentale

1 Introduction

La plupart des recherches dans le domaine de la cheminée solaire en Algérie sont de nature numérique ou analytique. Dans le but d'aborder la partie expérimentale de ces recherches et de donner une vision réelle à ces dernières, on a installé un prototype d'une cheminée solaire conçue et construite au niveau de l'université de KASDI Merbah Ouargla afin d'étudier l'influence des paramètres géométriques et énergétiques sur le rendement de l'installation et de procéder à des confrontations pour le choix de modèles appropriés pour les ressources environnementaux de notre région. Dans un deuxième temps, nous procédons aux techniques de stockage de l'énergie donnée un temps plus de fonctionnement lors de l'absence du rayonnement solaire.

Des différents paramètres de températures et de vitesse de l'air ont été mesurés et évalués. L'effet de ces mesures sur la production de la cheminée sera déjà un intérêt pour l'amélioration de la conception de cet équipement pour augmenter la production de l'énergie.

2 Conditions de fonctionnement

2.1 Protocole expérimental

Dans ce qui suit on va présenter le déroulement des expériences.

2.1.1 Description de champs de l'installation

Ouargla est située au sud-est Algérien, en superficie elle est la troisième plus grande wilaya d'Algérie. Elle couvre une superficie totale de 163233 km². Elle se trouve à une altitude de 164 mètres, sa latitude est de 31°57' Nord, sa longitude est de 5° 21' [104].

2.1.2 Description de la cheminée solaire conçue

Le prototype de la cheminée solaire a été construit à l'Université d'Ouargla (Algérie) en 2017, comme le montre la Figure 23 [4].



Figure 23: Prototypé de la cheminée solaire réalisée

La plate-forme de la cheminée est de forme octogonale faite à partir de quatre planches d'acier soudées transversalement entre elles. Au centre et aux extrémités des planches des longs boulons sont soudés afin de fixer le collecteur superposé et lui donner différentes positions en hauteur. La cheminée est constituée de :

2.1.2.1 Absorbeur

Une plate-forme octogonale composée de huit tubes rectangulaires en acier soudés transversalement les uns aux autres. Au centre et dans les extrémités des tiges filetées sont soudées afin de fixer le collecteur superposé et de lui donner plusieurs positions en hauteur. Un cadre métallique de forme identique au collecteur en acier de 0,3 mm d'épaisseur peint noir mat, aussi une base en polystyrène de 30 mm d'épaisseur avec la même forme est placée sous la plate-forme à utiliser comme une isolation thermique.

2.1.2.2 Collecteur

Le collecteur qui a pour rôle de chauffer l'air admis par le phénomène de l'effet de serre pour créer le flux d'air a une forme octogonale de 3 m de diamètre, composé de huit

tubes rectangulaires qui composaient une plate-forme identique à celle de l'absorbeur et équipée d'un trou pour insérer la cheminée. Huit pièces de 4 mm d'épaisseur de verre sont placées comme matériau de toiture du collecteur.

2.1.2.3 Cheminée

La cheminée est construite par un tube cylindrique qui peut avoir une hauteur de 400 ou 300 cm et un diamètre de 16 ou 11 cm en PVC (polychlorure de vinyle) et enroulé par du feutre thermique pour assurer une isolation thermique optimale il est fixé sur le support du collecteur à l'aide des vis métalliques.

Tableau 15: Principaux paramètres géométriques du prototype de cheminée solaire [4].

Paramètre	Symbole	Valeur (cm)
Diamètre du collecteur	D_{Co}	300
Hauteur à l'entrée de Collecteur	H_{Co}	5-10-15
Diamètre de la cheminée	D_{Ch}	11-16
Hauteur de la cheminée	H_{Ch}	300-400

2.1.3 Appareils de mesure utilisés

2.1.3.1 Appareil de mesure du rayonnement solaire global

Il s'agit d'un polarimètre qui est constitué d'une partie posée sur la vitre, et un appareil électronique qui transforme le rayonnement en une lecture directe sur un petit écran numérique, et donne une valeur réelle du rayon incident sur la vitre en W/m^2 .

2.1.3.2 Appareil de mesure de la température ambiante

C'est un appareil qui est installé à l'air libre à une hauteur entre (1-1.5 m) sur la surface de la terre pour mesurer les trois grandeurs : température ambiante, humidité relative et température de rosée.

2.1.3.3 Appareil de mesure de la qualité de l'air

Les mesures de la vitesse et de la température de l'air et la vitesse du vent sont effectuées à l'aide d'un anémomètre à affichage numérique (type CA 1051).

2.1.3.4 Appareil de mesure de la température

La mesure des températures s'effectue à l'aide des thermocouples placés aux différents endroits de la cheminée solaire. L'ensemble des thermocouples étant reliés à une boîte de 12 voies connectée à un appareil (Lutron HT-3006A) qui permet l'affichage digital des acquisitions.

2.1.4 Positions des thermocouples et du capteur de vitesse

Les paramètres utiles à notre étude étaient les températures à différents endroits de la maquette et la vitesse de l'air à l'entrée de la cheminée. En ce qui concerne la vitesse d'écoulement de l'air à l'entrée de la cheminée, il était nécessaire d'avoir un instrument de mesure avec la meilleure précision possible, le choix s'est alors porté sur un anémomètre à fil chaud permettant d'effectuer des mesures au dixième de mètre par seconde [4].

Pour obtenir les mesures de la température aux différents endroits, nous avons utilisé plusieurs thermocouples placés comme le montre la Figure 24.

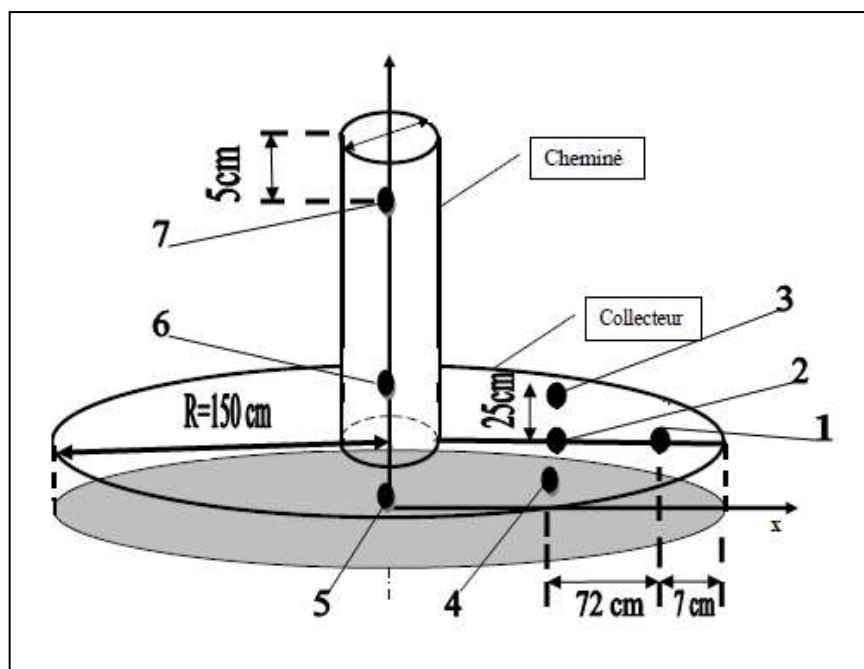


Figure 24: Emplacement des thermocouples et du capteur de vitesse.

Pour se faire une idée de la répartition de la température aux différents points du prototype, nous avons utilisé sept thermocouples, qui ont été positionnés aux

emplacements les plus importants de la maquette connectée à un appareil Lutron HT-3006A qui permet l'affichage numérique des acquisitions.

2.2 Résultats et discussions

Dans cette section, on s'intéresse à l'analyse des résultats expérimentaux obtenus en ce qui concerne l'influence des paramètres géométriques sur l'efficacité de production de la cheminée solaire. Un ensemble des paramètres définissant la taille de la cheminée seront modifiés chaque fois pour voir leur effet sur le rendement de ce dispositif solaire. A travers les contours et les courbes de différentes grandeurs physiques, une discussion et interprétation auront lieu, afin de définir la relation entre les dimensions de la cheminée solaire et son efficacité de production.

La performance du prototype de la cheminée solaire est liée directement à l'effet de certains paramètres géométriques. Pour cela, nous avons envisagé trois variantes de cheminées basées sur la variation de la hauteur et le diamètre de la cheminée et la hauteur du toit du collecteur à partir desquels et par comparaison des résultats nous allons tirer des conclusions concernant les performances de la cheminée solaire. Les différentes mesures ont été effectuées de 09h30 à 18h00 avec des pas de temps de 30 minutes.

2.2.1 Champ des vitesses

Les valeurs des vitesses d'écoulement dans la cheminée solaire qui sera entraîné la turbine par la suite sont équivalentes aux vitesses d'entrée de cheminée.

2.2.1.1 Effet de la hauteur de l'entrée du collecteur

- **Cas de $H_{Ch} = 400$ cm et $D_{Ch} = 16$ cm.**

La hauteur et le diamètre de la cheminée ont été fixés à $H_{Ch} = 400$ cm et $D_{Ch} = 16$ cm, puis la hauteur de l'entrée du collecteur a été changée entre $H_{Co} = 5$ cm, $H_{Co} = 10$ cm et $H_{Co} = 15$ cm. Dans les jours 8, 9 et 16 mai 2017 respectivement, les résultats sont présentés dans la Figure 25.

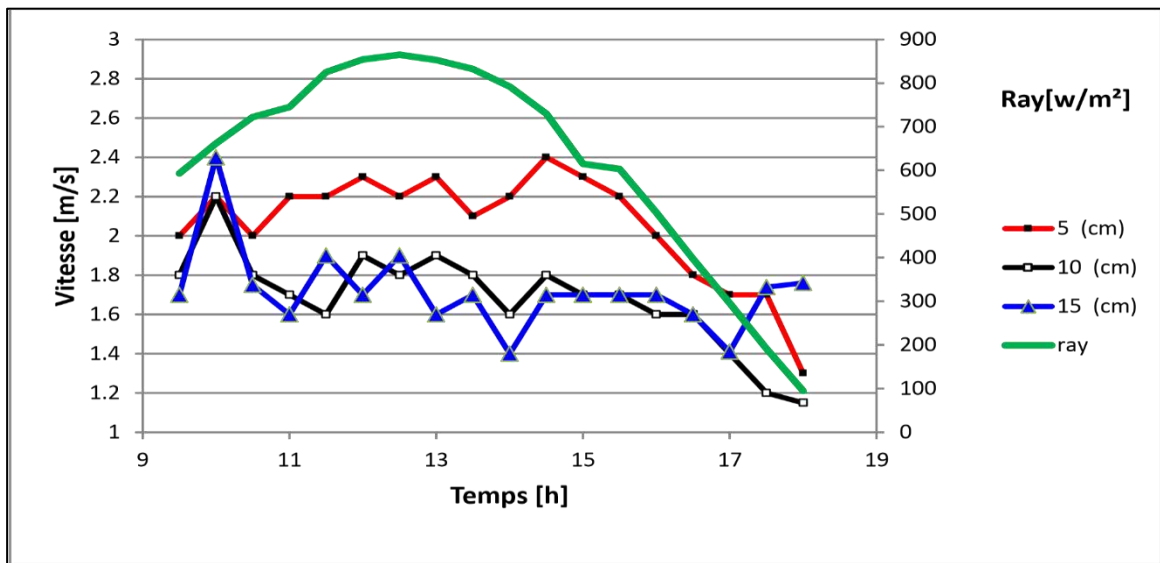


Figure 25: Variations des vitesses d'écoulement de l'air à l'entrée de la cheminée en fonction du temps pour le Cas de $H_{ch}= 400$ cm et $D_{ch}= 16$ cm.

On remarque que la vitesse de l'air pour une hauteur d'entrée égale à ($H_{Co}=5$ cm) est plus élevée que les autres cas ($H_{Co}= 10$ cm et $H_{Co}= 15$ cm). Les principales raisons sont que dans le premier cas, le débit d'entrée est le plus faible, donc le taux de transfert de chaleur est plus élevé. Où au départ la vitesse d'écoulement prend une valeur de 2m/s à 09h30 et atteint une valeur maximale de 2.4m/s à 14h30 puis l'on assiste à une régression jusqu'au point final à 18h00 pour atteindre la valeur de 1.3 m/s.

Pour les deux autres cas ($H_{Co}= 10$ cm et $H_{Co}= 15$ cm) on remarque les mêmes distributions mais avec des valeurs de vitesse un peu inférieures, aussi des pics à 10h00 dues à l'effet de vent.

- Cas de $H_{Ch} = 300$ cm et $D_{Ch} = 16$ cm.

Dans ce cas on a fixé la hauteur et le diamètre de la cheminée ($H_{Ch} = 300$ cm, $D_{Ch} = 16$ cm), puis on a changé la hauteur de toit de collecteur entre $H_{Co} = 5$ cm, $H_{Co} = 10$ cm et $H_{Co} = 15$ cm. Dans les jours respectivement 17, 18 et 19 Mai 2017, les résultats sont présentés dans la Figure 26.

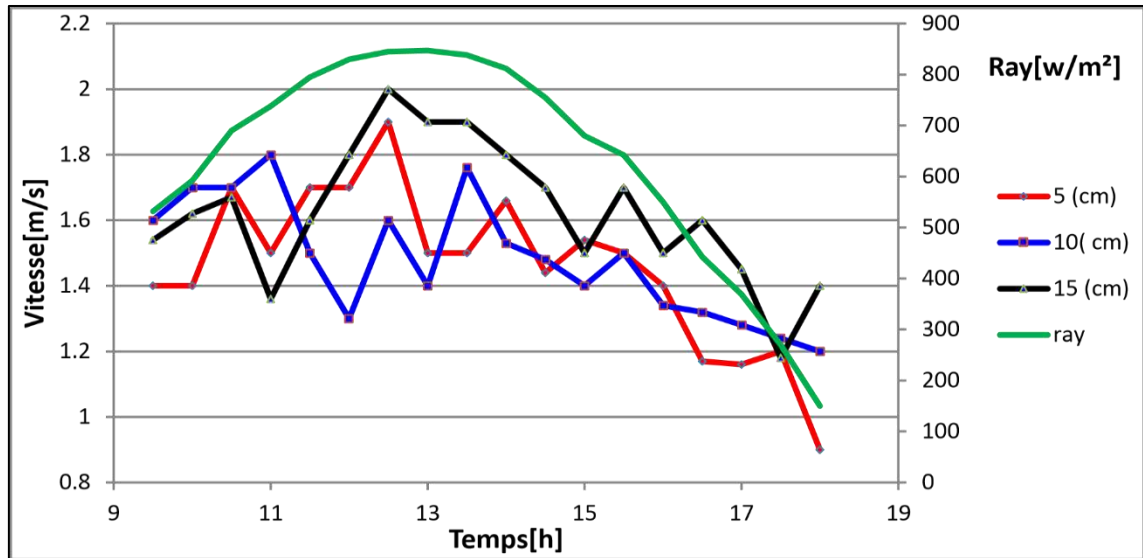


Figure 26: Variations des vitesses d'écoulement de l'air à l'entrée de la cheminée en fonction du temps pour le Cas de $H_{Ch} = 300$ cm et $D_{Ch} = 16$ cm.

Pour une hauteur d'entrée égale à 15 cm, l'écoulement à l'entrée de la cheminée commence avec une vitesse de 1.55 m/s au début de l'expérience soit 9h30 et suit une progression jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur maximale de 2 m/s à 12h30 puis ce diminué régulièrement jusqu'à la valeur de 1.2 m/s à 18h00. Sans oublier l'effet du vent sur cette vitesse parce que cette épaisseur permet le passage du vent au-dessous du collecteur, ce qui explique l'élévation de la vitesse de l'air dans la configuration ($H_{Co} = 15$ cm) par rapport aux autres configurations, au contraire dans le premier cas ($H_{Ch} = 400$ cm) où les vitesses sont plus grandes pour le cas de ($H_{Co} = 5$ cm).

En remarque aussi que la valeur maximale de la vitesse à l'entrée de la cheminée avec une hauteur d'entrée ($H_{Co} = 5$ cm) est 2.4 m/s pour le cas de ($H_{Ch} = 400$ cm) et prend la valeur de 1.9 m/s pour le cas de ($H_{Ch} = 300$ cm). Ce qui nous a permis de conclure que la

vitesse de l'air à l'entrée de cheminée augmente avec l'augmentation de la hauteur de la cheminée de 300 à 400 cm.

2.2.1.2 Effet de diamètre de la cheminée

Pour avoir une vision sur l'effet du diamètre de la cheminée sur les paramètres mesurés nous avons fixé la hauteur de l'entrée du collecteur à $H_{Co}=5$ cm et on a changé le diamètre de la cheminée (D_{Ch}) pour prendre les valeurs 11 et 16 cm pour les deux cas différents de la hauteur de la cheminée $H_{Ch}=400$ cm et $H_{Ch}=300$ cm.

Les Figure 27 et Figure 28, représente la variation des vitesses à l'entrée de la cheminée de hauteur (400 et 300 cm respectivement) en fonction du temps pour les diamètres $D_{Ch}=11$ cm et $D_{Ch}=16$ cm, D'après la Figure 27, on remarque que la vitesse de l'air à l'entrée de la cheminée dans le cas où $D_{Ch}=16$ cm est plus élevé que celle dans le cas où $D_{Ch}=11$ cm durant toute la journée. Par contre dans le cas de cheminée à hauteur $H_{Ch}=300$ cm les deux courbes de vitesse d'air à l'entrée de cheminée pour les deux différents diamètres de la cheminée, sont relativement proches l'un de l'autre.

- Cas de $H_{Ch}=400$ cm et $H_{Co}=5$ cm

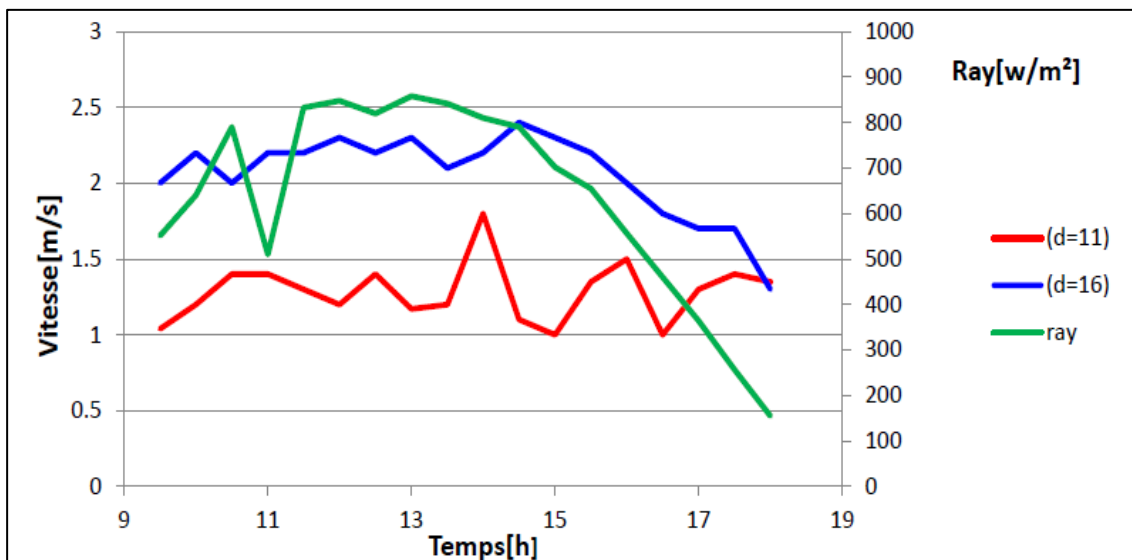


Figure 27: Variations des vitesses d'écoulement de l'air à l'entrée de la cheminée en fonction du temps pour le cas de $H_{Ch}=400$ cm où $D_{Ch}=11$ cm ou $D_{Ch}=16$ cm.

- Cas de $H_{Ch} = 300$ cm et $H_{Co} = 5$ cm.

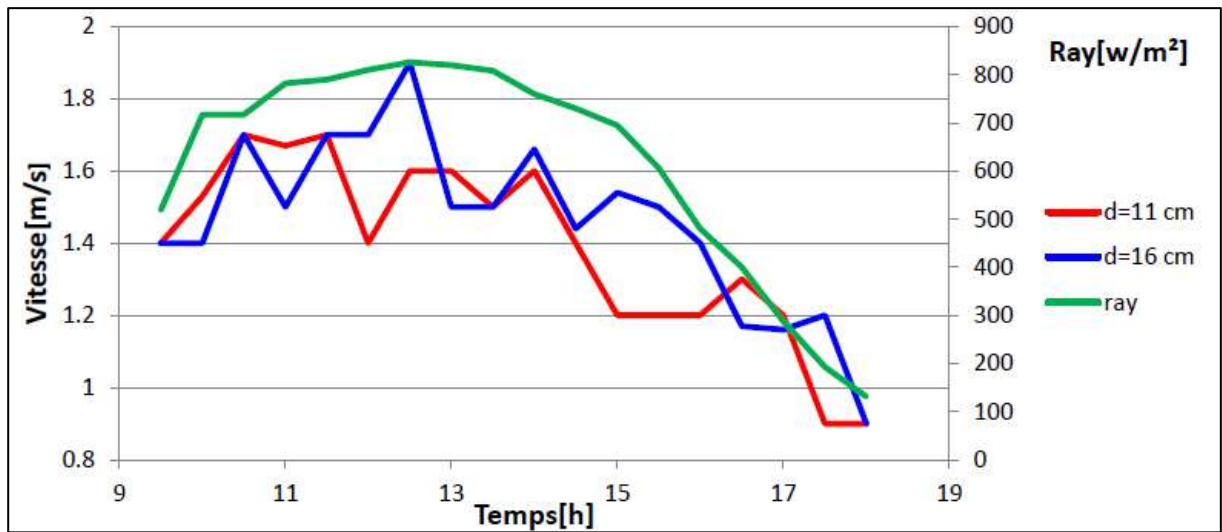


Figure 28: Variations des vitesses d'écoulement de l'air à l'entrée de la cheminée en fonction du temps pour le cas de $H_{Ch} = 300$ cm où $D_{Ch} = 11$ cm ou $D_{Ch} = 16$ cm.

Ces résultats nous ont donné une vision générale sur l'effet du diamètre sur l'écoulement dans notre cheminée. On peut conclure à partir de ces résultats que le diamètre de la cheminée n'a pas un effet considérable dans les basses hauteurs de la cheminée.

2.2.2 Champ des températures

Les changements de température à l'entrée et à la sortie de la cheminée sont utilisés pour donner un aperçu de l'effet de ceux-ci sur les variations de la vitesse d'écoulement. Pour ces courbes, il convient de noter que dans la plupart du temps, les valeurs des températures à l'entrée sont toujours inférieures à celles à la sortie de la cheminée.

- Cas de $H_{Ch} = 400$ cm et $D_{Ch} = 16$ cm.

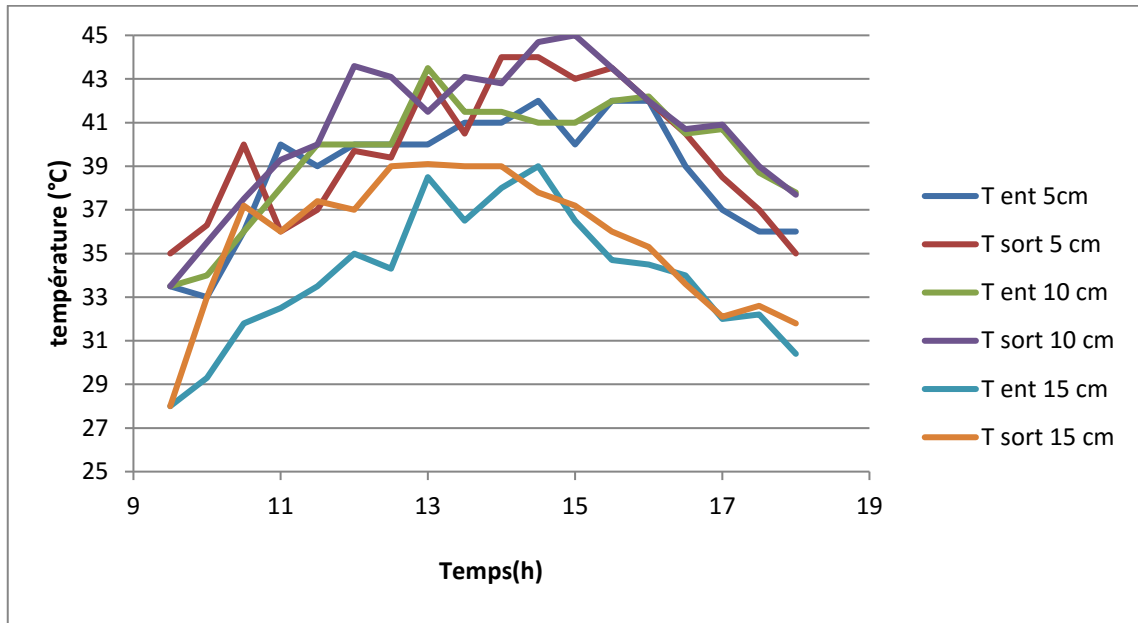


Figure 29: Variations des températures à l'entrée et à la sortie de la cheminée en fonction du temps.

- Cas de $H_{Ch} = 300$ cm et $D_{Ch} = 16$ cm.

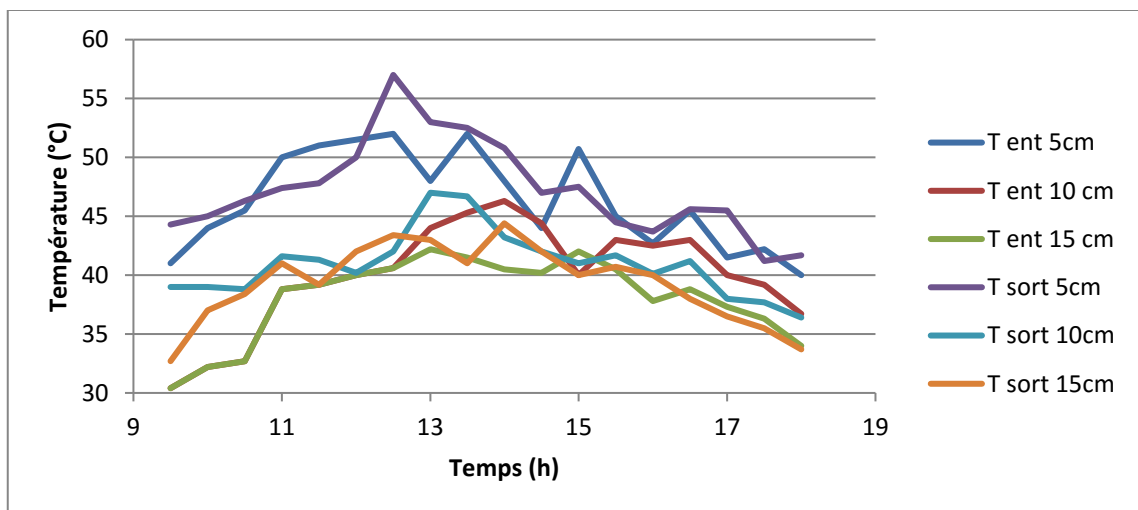


Figure 30: Variations des températures à l'entrée et à la sortie de la cheminée en fonction du temps.

Les valeurs de la température de l'air de la Figure 29 pour le premier cas $H_{Co} = 5$ cm sont plus élevés que les autres cas $H_{Co} = 10$ cm et $H_{Co} = 15$ cm. Cette différence se traduit

comme suit ; pour une hauteur d'entrée de 5 cm, le débit d'air à l'entrée est la plus basse, donc le taux de transfert de chaleur entre l'air et l'absorbeur est le plus élevé. De l'autre part, le vent n'a pas influencé puisque l'entrée du collecteur est proche de la fermeture.

2.3 Stockage de l'énergie produite

Dans le cas de l'énergie solaire, il reste toujours le problème de la continuité de la production de l'énergie thermique à cause de l'intermittence du rayonnement solaire pendant la journée ou l'absence totale à la nuit, cela a obligé l'utilisation du stockage de l'énergie [105], [106].

2.3.1 Système de stockage de chaleur

Le stockage par chaleur sensible a fait ses preuves depuis des milliers d'années. Les critères de choix dépendent de la nature du besoin, des contraintes liées à la réglementation, du coût, et de l'environnement.

L'une des premières améliorations proposées pour les CSC était l'introduction de tubes étanches remplis d'eau dans le collecteur d'air solaire ouvert pour le stockage de chaleur [36]. Sur cette base, nous avons choisi les deux techniques ; du gravier concassé coloré avec une peinture noir mat où on a étudié deux cas pour du gravier : une couche de 05cm et une couche de 10cm. puis de tube noir rempli d'eau.

Tableau 16: Propriétés thermo physique de gravier, de l'eau et du tube [39].

Matière	K (W/m.K)	Cp(J/g.K)
Gravier	0.400	0.99
Eau	0.613	4.18
Type en PVC	0.150	-

2.3.2 Discussions des résultats

Dans ce qui suit, nous allons exposer les résultats expérimentaux obtenus pendant les expériences effectuées.

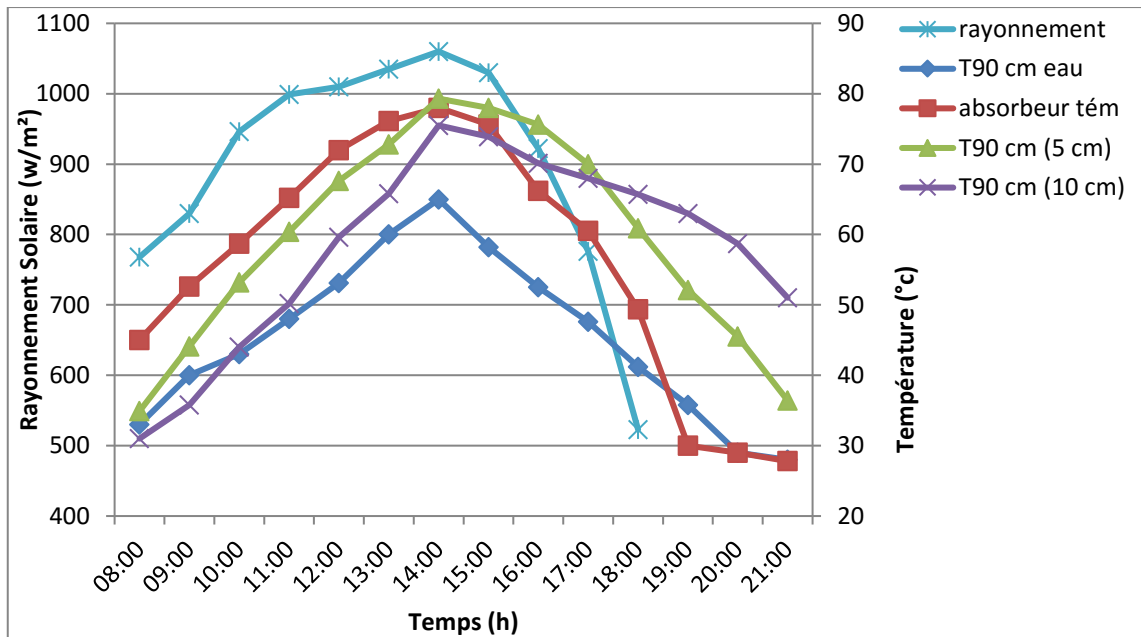


Figure 31: Variations du rayonnement solaire et de la température en fonction de temps pour différents modes de stockage.

La Figure 31 représente les variations de la température en fonction du temps pour le point qui distant de 90cm à l'entrée de collecteur en changeant le matériau à chaque fois.

On peut décomposer les quatre courbes en trois périodes :

[8h00 – 14h00] dans cette période la température de témoin est supérieure aux températures des matériaux de stockage, par ce que le témoin a une grande conductivité thermique et une faible épaisseur.

La courbe en vert présente la température en cas d'utilisation de gravier à une couche de 5 cm, cette température est proche de celle de témoin et supérieure à la température en cas d'une couche de gravier de 10 cm car cette dernière prend plus de temps pour le stockage de la chaleur.

La courbe en bleu présente la température en utilisant de l'eau dans un tube en PVC noir comme matériaux de stockage, on remarque que l'augmentation de la température était très petite par rapport aux autres matériaux par ce que la quantité de l'eau utilisée est faible et le tube noir a une conductivité aussi faible.

[14h00 – 18h00] dans cette période on remarque une diminution rapide de la température de témoin à cause de la diminution du rayonnement solaire, et surtout à cause de sa faible capacité calorifique.

La température en cas d'une couche de gravier de 5 cm et de 10 cm diminue aussi à cause de la diminution du rayonnement, mais d'une façon faible par rapport au témoin, et la température avec une couche de 5 cm reste toujours la plus élevée par rapport aux autres matériaux.

La température en cas d'utilisation d'eau présente une diminution lente par rapport aux autres matériaux à cause de la faible conductivité du tube.

[18h00 – 21h00] après le coucher de soleil, cette période est la plus impérrante car elle va apparaitre l'effet de déstockage de la chaleur sensible pour le gravier et de l'eau.

On observe que la couche de 10 cm de gravier garde une grande quantité de chaleur par rapport à la couche de 5 cm. En termes de température il avait un écart de température de 4 °C au coucher de soleil entre les deux cas, cet écart a augmenté jusqu'à 15°C à 21h00. On peut dire que la quantité de gravier joue un rôle important pour le stockage de la chaleur, dans notre cas la couche de 5 cm à stocker la chaleur jusqu'à 2 heures après le coucher de soleil tandis que la couche de 10 cm a stocké la chaleur 3 heures après l'absence de rayonnement. La quantité de chaleur stockée dans l'eau a été déstockée dans en une heure.

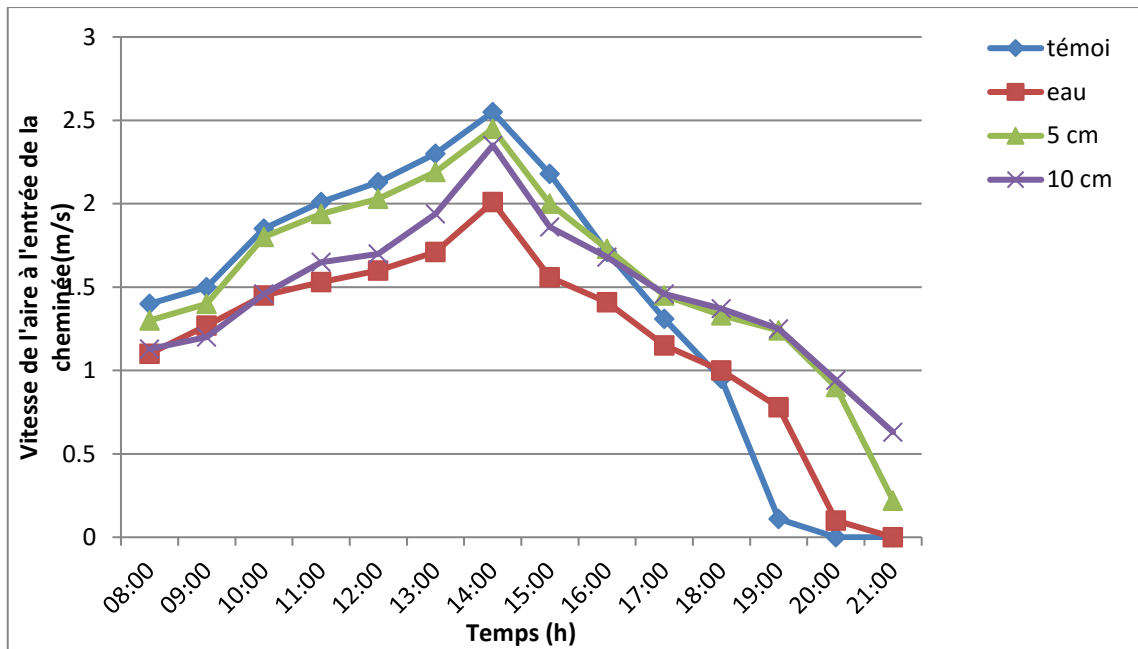


Figure 32: Variations de la vitesse de l'air à l'entrée de la cheminée pour les quatre cas en fonction du temps.

La Figure 32 représente la comparaison de la vitesse de l'air à l'entrée de la cheminée en matin et à la nuit avec et sans stockage, la vitesse de l'air augmente au début de la journée pour atteindre sa valeur maximale vers 14h00 à 2.55 m/s pour le cas de témoin, 2.45 m/s dans le cas de gravier d'une couche de 5 cm, 2.35 m/s pour le cas de gravier d'une couche de 10 cm et de 2.01 m/s dans le cas de l'eau dans un tube noir.

La trajectoire de la courbe de vitesse de l'air en cas de témoin et en cas de couche de gravier de 5cm est presque similaire avec une supériorité pour le témoin. Cet écart dans la vitesse de l'air est observé de 08h00 jusqu'à 16h30, puis il est inversé où la vitesse en cas de couche de gravier de 5 cm sera supérieure avec un écart qui va s'agrandir jusqu'à 20h00, ce qui confirme l'explication de l'écart à la température avant 16h30 pour la Figure 32, mais après 16h30 c'est l'effet de stockage qui a donné l'avantage pour le cas de gravier à une couche de 5 cm.

Dans le cas de l'eau et de gravier avec une couche de 10 cm, la vitesse de l'air était presque la même mais elle était faible par rapport au témoin, l'augmentation de la vitesse en cas d'une couche de gravier de 10 cm sera importante après 12h00 puis elle commence à se diminuer après 14h00, mais elle sera supérieure à celle du témoin et égale à celle de la

couche de gravier de 5 cm après 16h30 jusqu'à 20h00, avec une durée supplémentaire d'une heure jusqu'à 21h00 pour le cas d'une couche de 10cm de couche à cause de la quantité de gravier utilisée dans ce cas. L'augmentation de la vitesse de l'air dans le cas de l'eau était jusqu'à 14h00 mais elle était la plus faible, elle a commencé à diminuer jusqu'à 19h00, cette faible augmentation est due à la quantité utilisée de l'eau et aux propriétés thermo-physiques du tube.

Pendant notre travail on a remarqué qu'une quantité de chaleur est restée prisonnière au fond de la couche de gravier pourtant que la température de milieu égale à la température ambiante (il y'avait pas de gradient de température). Ce phénomène est dû à l'absence de la force motrice à cause de la faible conductivité de gravier pour créer un flux de chaleur vers la partie supérieure de gravier.

Il est très favorisé d'utiliser le gravier comme un matériau de stockage pour la chaleur sensible mais il faut mettre l'épaisseur de la couche en considération, puisque on a remarqué qu'avec une épaisseur importante on va avoir un stockage très important mais avec un faible débit, par contre avec une épaisseur faible, le stockage sera moins mais le débit est très considérable. Comme conclusion générale on peut dire que la vitesse de l'air qui peut entraîner la turbine a une relation directe avec la chaleur dégagée à partir de la surface du corps utilisé pour le stockage.

3 Conclusion

Dans notre étude, nous avons toujours cherchés d'atteindre une plus grande vitesse d'écoulement possible à l'entrée de la cheminée afin d'utiliser cette vitesse pour faire tourner une turbine. Le résultat obtenu montre l'influence remarquable des paramètres géométriques sur la vitesse d'écoulement par la suite sur l'énergie produite. L'utilisation de la cheminée restait toujours limitée à la journée parce que la nuit est un handicap pour la production de l'énergie à cause de l'absence du rayonnement, ce qui impose le stockage de l'énergie pour la fournir pendant la nuit.

Chapitre 5 : Etude Technico-Economique de l'Installation

1 Introduction

Le choix stratégique est motivé par l'immense potentiel de l'énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre une part essentielle au solaire thermique et à l'énergie solaire photovoltaïque. L'énergie solaire devrait atteindre plus de 37% de l'électricité nationale d'ici 2030. Malgré un potentiel assez faible, le programme n'exclut pas l'énergie éolienne, qui constitue le deuxième axe de développement et dont la part devrait être d'environ 3% production d'électricité en 2030.

L'objectif principal de ce chapitre est de réaliser une étude technique aussi économique de la cheminée solaire afin d'obtenir de meilleurs résultats pour pouvoir réaliser ce projet en Algérie en le long terme, en donnant l'exemple de la région d'Ouargla située au sud de l'Algérie, comme un meilleur site pour installer ce projet, car il est considéré comme un lieu propice à la construction de ce projet en raison de sa maîtrise de tous les facteurs climatiques et géographiques obligatoire.

2 Conception et méthodologie

Pour comprendre le système et les exigences de la cheminée, nous avons besoin de plus d'informations à propos de tout cela. Car la bonne idée théorique n'est pas nécessaire pour être bonne en fonctionnement réel et cela pourrait provenir de la situation économique ou de l'emplacement choisi, pour cela nous verrons par la suite tous les différents paramètres pour être sûr de notre projet dans la zone et aussi pour voir différents effets sur l'installation.

2.1 Emplacement

En étant l'Algérie l'un des plus grands pays du monde avec une superficie de 2 381 741 kilomètres carrés et plus des quatre cinquièmes (plus de 80 %) de celui-ci est désertique cela en fait la meilleure option pour ce type de projets [107].

Notre étude est dirigée vers les régions arides où l'on peut trouver des températures élevées et des irradiations solaires aussi la clarté du ciel au cours de l'année et notre but est de voir la réalisation de la centrale solaire à cheminée en Algérie, pour cela nous prendrons la région d'Ouargla comme un site pour l'installation.

2.2 Irradiation solaire

Parce que notre système est un système fixe et à des charges thermiques sur des surfaces planes, nous devons connaître l'IHG qui représente toute l'irradiation que le système recevra.

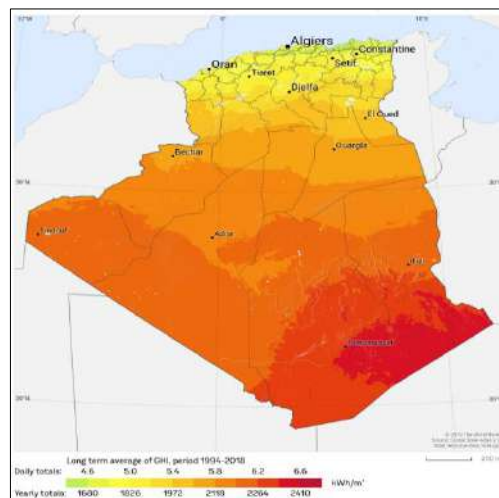


Figure 33: Carte d'irradiation horizontale globale en Algérie [108].

2.3 Température ambiante

Un autre facteur important pour le fonctionnement de la centrale à cheminée est la température autour d'elle qui joue le rôle d'un facteur central dans le fonctionnement du système, le tableau suivant représente à la fois l'IHG et la moyenne température pour chaque mois pour les années précédentes.

Tableau 17: IHG et températures moyennes pour chaque mois (Données de l'URAER) [109].

Mois	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
IHG (kWh/m ²)	120	140	181	220	240	244	251	163	181	150	121	107
T(°C)	11.5	14	17.5	22.5	27.5	32.5	35.5	34.5	30.5	24	17	12.5

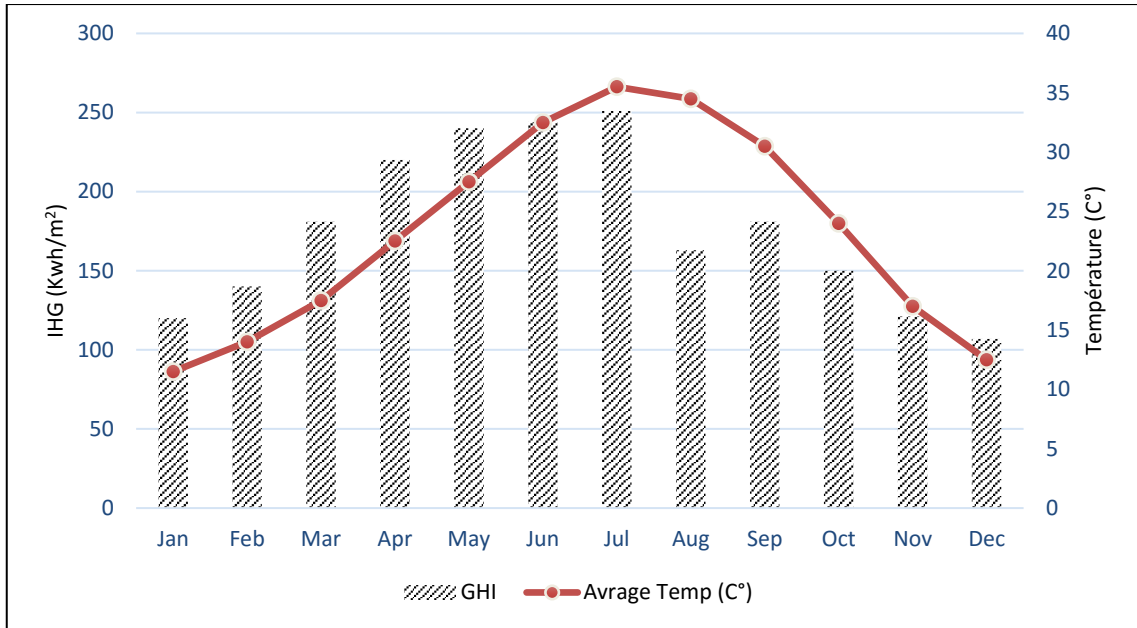


Figure 34: Variations d'IHG et de la température moyenne mensuelle (Données de l'URAER) [109].

D'après les données précédentes Tableau 16 et Figure 34, nous pouvons dire que Ouargla reçoit un moyenne de 176,5 kWh/m² par jour avec un maximum de 251 kWh/m² en juillet et un minimum de 107 kWh/m² en décembre, et pour la température est de 23,3 ° C en valeur moyenne avec un maximum de 35,5 ° C en juillet et un minimum de 11,5 ° C en janvier d'après ce que nous avons conclu que nous avons juillet comme mois où nous recevons le plus rayonnement et la température la plus élevée et entre Décembre et Janvier la plus faible irradiation et température.

3 Analyse thermodynamique

3.1 Énergie électrique produite par la cheminée solaire

La puissance produite par une cheminée solaire peut être calculée comme l'énergie solaire liée au système multiplié par l'efficacité du collecteur, de la cheminée et de la ou des turbine(s) respectivement [110]:

$$P = \dot{Q}_{\text{solaire}} \eta_{\text{Co}} \eta_{\text{Ch}} \eta_{\text{Tur}} \quad (2)$$

\dot{Q}_{solaire} : Représente l'énergie solaire absorbée (W).

L'énergie solaire fournie au système est écrite en fonction de l'énergie solaire globale irradiante sur un plan horizontal et la surface du capteur :

$$\dot{Q}_{solarie} = G_h A_{Co} \quad (3)$$

G_h : Irradiation solaire globale reçue sur un plan horizontal (W/m^2).

A_{Co} : Surface totale du collecteur (m^2).

L'efficacité de la cheminée est alors exprimée par le rapport de la puissance d'air à la quantité de chaleur absorbée dans le collecteur :

$$\eta_{ch} = \frac{P_{tot}}{\dot{Q}} \quad (4)$$

P_{tot} : Puissance d'écoulement totale, dépend de la perte de charge dans la cheminée.

L'énergie contenue dans le flux d'air égale à :

$$P_{tot} = \Delta p_c v_{max} A_{Co} \quad (5)$$

Δp_c : Différence de pression (N/m^2).

v_{max} : Vitesse d'écoulement maximale (m/s).

Le changement de pression dans la cheminée est lié à la flottabilité dans l'air chauffé :

$$\Delta p_{ch} = (\rho_{atm} - \rho_{ch}) g \cdot H_c \quad (6)$$

Sans turbine, le débit d'air maximal est lié à la vitesse de sortie maximale, et la différence de pression est utilisée pour accélérer l'air (converti en énergie cinétique) :

$$P_{tot} = \frac{\dot{m}_{air}}{2} \cdot v_{max}^2 \quad (7)$$

\dot{m}_{air} : Débit massique de l'air (kg/s).

A partir des équations (5), (6) et (7) on peut écrire l'expression de la vitesse maximale sous la forme :

$$(\rho_{atm} - \rho_{ch})g \cdot H_{ch} \cdot v_{max} A_{Co} = \frac{\dot{m}_{air}}{2} \cdot v_{max}^2 \Rightarrow v_{max} = \sqrt{2gH_c \frac{\rho_{atm} - \rho_{ch}}{\rho}} \quad (8)$$

En utilisant l'approximation de Boussinesq : $\rho = \rho_0(1 - \beta(T - T_0))$, la vitesse atteinte par les courants de convection libre peut être exprimée comme :

$$v_{max} = \sqrt{2gH_{ch} \frac{\Delta T}{T_a}} \quad (9)$$

ΔT : Différence de température de l'air à l'entrée et à la sortie du collecteur (°C).

T_a : Température ambiante du lieu considéré (°C).

En combinant cela avec notre deuxième expression pour la puissance d'écoulement (6), nous pouvons voir que l'efficacité de la cheminée est :

$$\eta_{ch} = \frac{gH_{ch}}{c_{p,air} \cdot T_a} \quad (10)$$

$c_{p,air}$: Capacité thermique de l'air (J/kg.K).

A partir des équations développées (3) et (10), la puissance totale générée par la cheminée solaire est :

$$P_{El} = G_h A_{Co} \frac{gH_{ch}}{c_{p,air} \cdot T_a} \eta_{Co} \eta_{Tur} \quad (11)$$

Ainsi, la puissance générée par la cheminée solaire est proportionnelle à la surface du collecteur et à la hauteur de la cheminée, elle est donc proportionnelle au volume du cylindre avec une base égale à la surface du collecteur et d'une hauteur égale à celle du foyer.

La puissance maximale est atteinte lorsque la chute de pression à travers la turbine équivaut aux deux tiers de toute la différence de pression disponible :

$$P_{El-max} = G_h A_{Co} \frac{2}{3} \frac{gH_{ch}}{c_{p,air} \cdot T_a} \eta_{Co} \eta_{Tur} \quad (12)$$

4 Différents effets sur la productivité

4.1 Effet de la température ambiante et de l'irradiation solaire

La productivité de l'énergie électrique augmente avec l'augmentation de l'irradiation solaire et de la température ambiante, mais l'irradiation solaire à un effet plus important par rapport à la température.

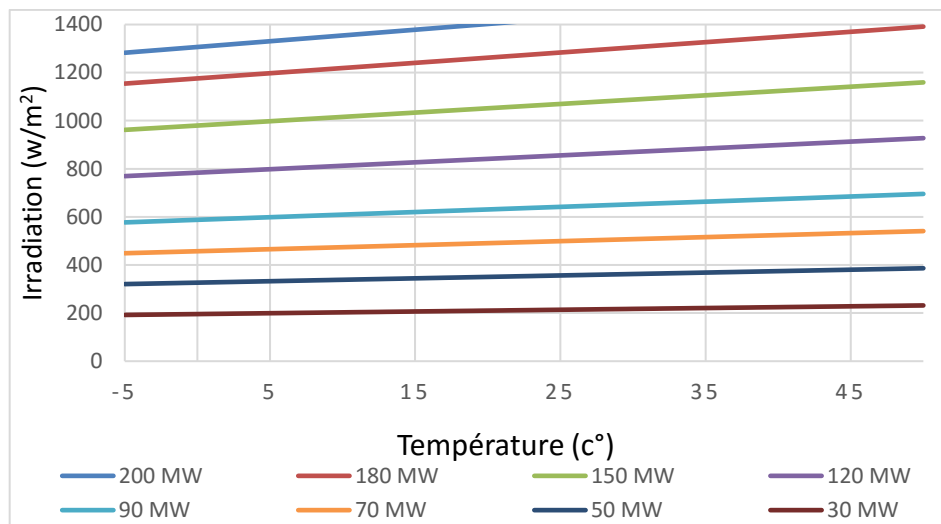


Figure 35: Effet de la température ambiante et de l'irradiation solaire.

Dans le cas d'une cheminée solaire d'une hauteur de 1000 m et d'un diamètre de capteur de 4300 m, la puissance produite est de 150 MW pour un éclairage solaire de 1070 W/m^2 et une température ambiante de 25°C . Cette cheminée produit une puissance de 90 MW lorsque l'illumination solaire est égale à 685 W/m^2 et une température de 45°C .

4.2 Effet du diamètre du collecteur et de la hauteur de la cheminée

La hauteur de la cheminée et le diamètre du collecteur ont un effet important sur la production d'énergie électrique, Figure 36 illustre la production d'énergie électrique en fonction de la hauteur de la cheminée et du diamètre du collecteur pour l'éclairage solaire 800 W/m^2 .

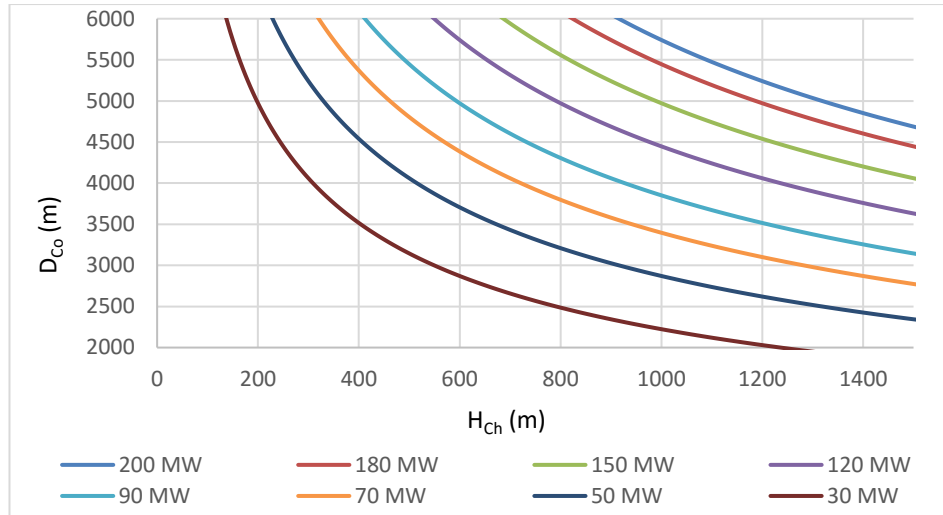


Figure 36: Effet du diamètre du collecteur et de la hauteur de la cheminée.

La puissance électrique délivrée par la cheminée augmente en augmentant le diamètre du collecteur et la hauteur de la cheminée, cette augmentation est rapide pour les petites dimensions et elle sera lente pour les grandes dimensions.

4.3 Influences des paramètres géométriques sur l'efficacité de la production

En raison des nombreux composants de l'installation, nous devons comprendre l'effet de chacun d'eux et l'un des effets majeurs est l'effet géométrique, et pour le comprendre plus ou pour être clair, nous calculerons l'effet sur l'efficacité de la production.

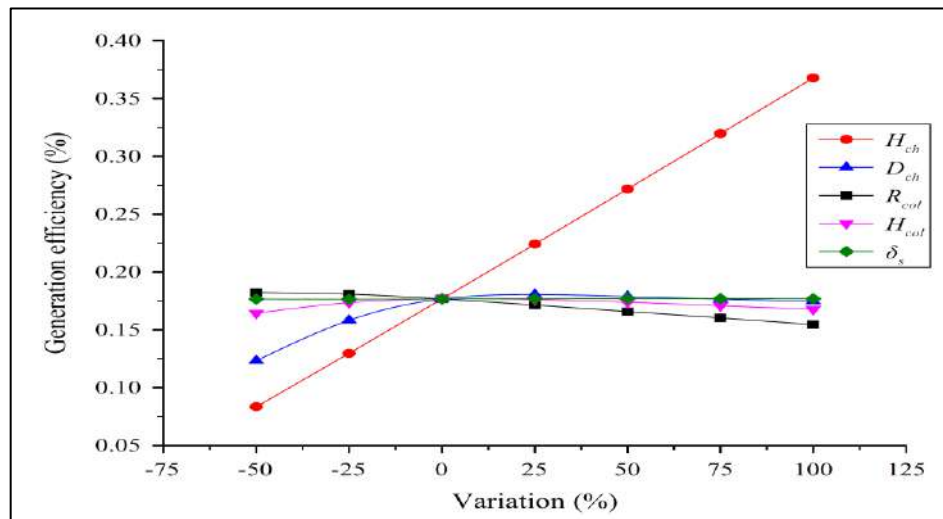


Figure 37: Influences des paramètres géométriques sur l'efficacité de la production [111].

L'efficacité de la génération diminue lentement. Et à cause de cela, l'énergie solaire totale collectée par le collecteur augmente avec l'augmentation de D_{Co} et la densité de l'air intérieur diminue lorsqu'il absorbe plus d'irradiation, ce qui entraîne une amélioration de la puissance de sortie. Cependant, lorsque la température de l'air est élevée, la perte de chaleur du capteur vers l'environnement augmente également. Dans ce cas, l'augmentation en pourcentage de la puissance de sortie est inférieure à celle de l'énergie solaire d'entrée en raison de l'augmentation de la perte d'énergie. Ainsi, le rendement de production, qui est le rapport entre la puissance de sortie et l'énergie solaire totale d'entrée, diminue légèrement [111].

La hauteur du collecteur a un léger effet sur l'efficacité de génération, qui augmente lentement au début, puis diminue lentement avec l'augmentation de H_{Co} . Lorsque la H_{Co} est petite, le débit massique d'air est principalement influencé par H_{Co} . L'augmentation de H_{Co} l'augmentation du débit massique d'air, donc la puissance de sortie augmente. Mais lorsque H_{Co} augmente jusqu'à une certaine valeur, le débit massique d'air est alors principalement contrôlé par le diamètre de la cheminée. Cependant, la vitesse du flux massique d'air diminue avec l'augmentation de H_{Co} , ce qui se traduit par la réduction de l'échange thermique entre l'air et la couche de stockage de chaleur. Ainsi, la température de l'air diminue et la densité de l'air augmente, ce qui réduit la puissance de sortie et l'efficacité de la génération. La couche de stockage de chaleur étant utilisée pour stocker l'énergie solaire, elle n'affecte que la distribution de la production d'électricité dans la journée et la nuit. L'épaisseur de la couche de stockage de chaleur a peu d'influence sur l'efficacité de génération des centrales solaires à cheminée [111].

5 Etude économique

Les centrales solaires à cheminée montrent de bons résultats et de grands chiffres qui nous motivent à le concrétiser, et les bons résultats du projet ne signifient pas qu'il est bon économiquement. Parce que toute personne, s'il veut construire cette construction (même avec la simplicité de la conception et du composant), voudrait savoir si ce projet sera rentable économiquement, nous devons donc savoir où ira notre argent, spécialement il y a beaucoup d'autres remplacements plus faciles dans la construction et moins chers [112]. Donc nous allons voir tous les calculs nécessaires pour être sûr de notre projet, tandis que tout le calcul sera concentré pour la région d'Ouargla.

5.1 Consommation électrique de la région d'Ouargla

Ouargla c'est une grande wilaya située dans le sud de l'Algérie et une partie de son désert donc il fait chaud et aride la plupart de l'année également avec une bonne irradiation (Pour les CSC on se concentre sur l'IHG donc l'effet des jours nuageux est négligeable). Avec une population dans l'environ de 558 556 habitants ces dernières années. L'augmentation de la population de la wilaya influe directement sur la consommation et la demande de l'énergie électrique [113].

En raison du manque d'informations sur la consommation d'électricité, nous utiliserons les données annuelles et nous avons une moyenne de 82,18 GWhs avec un coût de 514,19 MDA en juin 2018 (source : Sonalgaz) et sur cette base, nous tenterons d'identifier le coût de notre système qui pourrait fournir cette capacité.

5.2 Caractéristiques géométriques de la centrale solaire proposée

Pour pouvoir calculer le côté économique de cette installation, nous devons spécifier les caractéristiques techniques et géométriques de la centrale, sur la base des données précédentes de la région d'Ouargla, nous suggérons de construire un projet de 100 MW pour pouvoir gérer la forte demande dans l'été et pendant la durée du projet avec l'augmentation de la population.

Les dimensions optimales peuvent être calculées uniquement en incluant les coûts des composants spécifiques (collecteur, tour, turbines) pour les sites individuels. Ainsi, des usines de dimensions clés optimales différentes seront construites pour différents sites mais toujours à un coût optimal: si la zone de collecte est bon marché et coûteuse en béton, alors le collecteur sera grand et la tour relativement petite, et si le collecteur est cher, il y aura un collecteur plus petit et un grande tour [36].

Dans le cas d'Ouargla et avec les grands espaces du désert le projet sera parrainé par le gouvernement, nous augmentons l'espace du collecteur et réduisons la hauteur de la tour en raison de l'instabilité de la terre, ce sera une situation difficile pour stabiliser la tour et la construction devenue compliquée et coûteuse. Les paramètres géométriques choisis sont présentés dans le Tableau 17 où les calculs sont faits sur la base de $G_h = 800 \text{ W/m}^2$ et $T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tableau 18: Caractéristiques techniques et géométriques de la centrale solaire proposée.

Cheminée	Hauteur	600 m
	Diamètre	150 m
	Efficacité	≤ 0.03
Collecteur	Hauteur du collecteur à l'entrée	3 m
	Diamètre	6000 m
	Efficacité	0.5
Turbine	Efficacité	0.8

5.3 Estimation de la production annuelle d'énergie électrique dans la région d'Ouargla

Sur la base du calcul des caractéristiques géométriques de la cheminée, nous verrons ensuite la production annuelle d'électricité prise en considération du facteur de capacité en tant que station solaire avec 50% de l'électricité totale produite [110]. Nous prenons cela comme nombre estimé car elle pourrait être plus ou moins élevée en fonction de nombreux autres facteurs et pour la CSC, c'est un facteur vraiment prometteur.

$$\text{Facteur de capacité} = \frac{\text{Energie total produite (MW.h)}}{(365 \text{ jours}) \times (24 \text{ h/jours}) \times (\text{Capacité de la station MW})} \quad (13)$$

Dans notre cas, la station sera d'environ 100 MW qui vont produire 438 GWhs c'est pour un fonctionnement de 24 heures dans des conditions optimales (irradiation et température).

$$0.5 \times (365 \text{ jours}) \times (24 \text{ h/jour}) \times (100 \text{ MW}) = 438000 \text{ (MW.h)} \quad (14)$$

Lors des opérations de maintenance ou de contrôle du collecteur et d'autres composants de la centrale solaire, la sauvegarde au gaz naturel est une option, où elle rendra la station plus stable dans la production d'électricité (Non pris en compte dans notre étude). Pour la région d'Ouargla, nous aurons une capacité mensuelle de production au cours de l'année présentée sur la Figure 38.

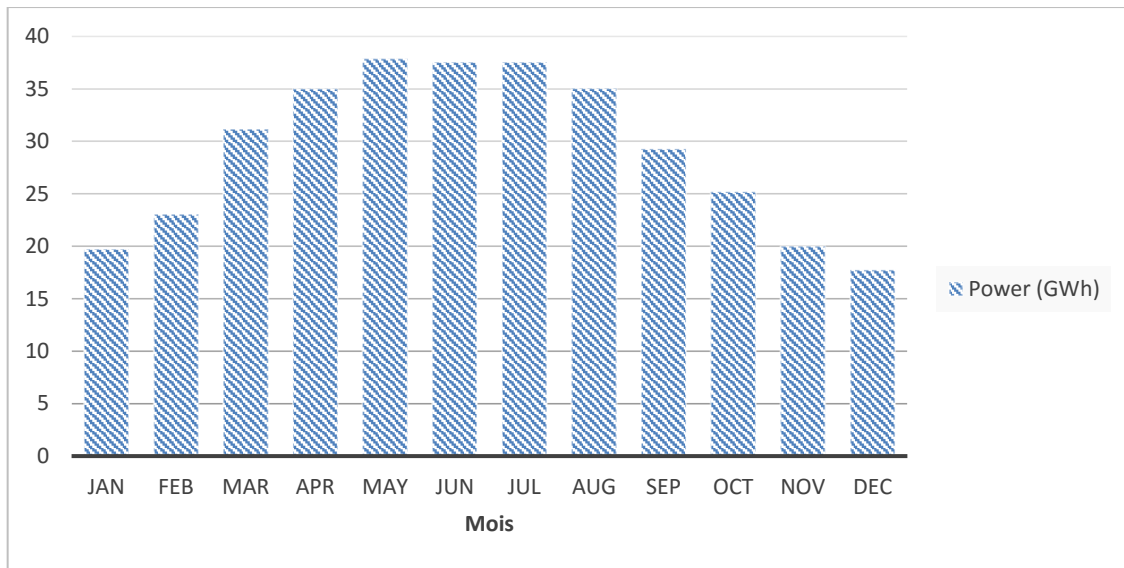


Figure 38: Production annuelle de la cheminée solaire.

La production annuelle de la cheminée solaire d'une hauteur de 600 m et d'un diamètre de 6000 m, et pour un fonctionnement 24/7 (couche de stockage thermique incluse), égale à 350 GWh/an.

5.4 Etude économique de l'installation

Tout projet d'avenir constitue donc un investissement. Investir, c'est engager de l'argent dans un projet tout en acceptant un certain risque afin d'augmenter les revenus, de réduire les dépenses ou de conserver une part de marché plus tard, et de donner au client une meilleure énergie à faible coût. La décision de réaliser un projet fera l'objet d'une étude et d'une analyse économiques [114].

Dans notre cas, nous estimons le coût d'investissement total en utilisant la méthode du coût du cycle de vie et afin de faire une comparaison entre différentes configurations de cheminées solaires, le coût moyen actualisé de l'électricité sera calculé.

5.4.1 Coût d'investissement total

Le coût d'investissement total est constitué par le coût d'investissement initial qui est la somme du coût de chaque composant constituant la cheminée solaire, ainsi que du coût actualisé d'entretien et d'exploitation [35], [115], [116].

Le coût d'investissement initial comprend les coûts d'investissement pour le collecteur, la cheminée et le système mécanique, ainsi que les autres coûts comprennent le coût d'installation, le coût d'achat du terrain et le coût d'ingénierie, le coût du système de stockage [114].

$$I_0 = C_{Co} + C_{Ch} + C_{Mec} + autres \quad (15)$$

I_0 : Investissement initial.

C_{Co} : Coût d'investissement du collecteur.

C_{Ch} : Coût d'investissement de la cheminée.

C_{Mec} : Coût d'investissement du système mécanique.

Pour cela, nous devons calculer le coût de chaque composant (collecteur, cheminée, turbines).

- Coût du collecteur

Dans notre cas, nous considérons un toit collecteur en verre, car le film plastique serait facilement détruit dans les déserts où le climat est généralement mauvais.

Le collecteur est constitué d'un toit transparent relevé par un support. La construction de support se compose de colonnes en acier supportant une matrice en treillis, à partir de laquelle le verre est suspendu [117]. L'investissement comprend donc le prix des matériaux utilisés (verre et acier) et le coût de construction.

$$C_{Co} = A_{Co} \times C_{verre,acier} \quad (16)$$

Le prix du verre et de l'acier est estimé à 10,9 €/m² il conclut le coût de (verre et supports ensemble / $C_{verre} = 4,56$ €/m², $C_{support} = 6,35$ €/m²).

$$C_{Co} = \frac{6000^2}{4} \times \pi \times 10.91 = 308,472,982.7\text{€}$$

Dans ce cas, le coût du collecteur est de : 308,47 M€.

- **Coût de la cheminée**

Le coût de la tour est en fonction du volume de matériau utilisé, du coût spécifique du matériau et du coût de construction. Pour estimer le coût de construction des petites cheminées, le volume des fondations est supposé être linéairement proportionnel au volume de matériau utilisé [118].

Le coût de construction d'une cheminée est la somme du coût du matériel d'excavation qui est linéairement proportionnel au volume de la cheminée, plus le coût de coffrage de l'excavation [114].

$$C_{Ch} = C_{Cof} + C_{renf} + C_{cons} + C_{transp} \quad (17)$$

Pour mieux comprendre la conception, nous devons connaître l'évolution de l'épaisseur de la paroi de la tour à partir de 0,85 m en bas et diminue à 0,25 à 400 m de hauteur et continuer vers le haut, avec un diamètre intérieur stable de 150 m.

Le volume de la cheminée est :

$$V_{Ch} = e \pi d_c H_{Ch} \quad (18)$$

$$= \left(\frac{0.85 + 0.25}{2} \right) \times \pi \times 150 \times 600 = 155,508.83 \text{ m}^3$$

e : Epaisseur de la tour.

Calcul du volume du béton :

$C_{Béton}$: est pour une bonne qualité = 125 €/m³ et pour une qualité normale = 100 €/m³).

Pour un prix donné par mètre cube de béton ($C_{Béton}$), le coffrage de la cheminée est calculé par la relation suivante :

$$C_{cof} = V_{Ch} C_{Béton} = 155,508.83 \times 125 = 19,438,604.54 \text{ €}$$

$C_{Béton}$: Prix de m³ de béton utilisé.

$$C_{renf} = V_{Ch} \times \rho \times C = 155,508.83 \times 120 \times 0.75 = 13,995,794.7 \text{ €}$$

$$C_{cons} = V_{Ch} \times C = 155,508.83 \times 312.5 = 48,596,509.48 \text{ €}$$

$$C_{transp} = V_{Ch} \times \rho \times C = 388,770.83 \text{ €}$$

$$\begin{aligned} C_{Ch} &= 19,438,604.54 + 13,995,794.7 + 48,596,509.48 + 388,770.83 \\ &= 82,379,679.55 \text{ €} \end{aligned}$$

Finalement le prix total de la cheminée est de : 82,38 M€.

- **Coût du système mécanique (Unité de conversion de puissance)**

Les analyses des coûts des systèmes mécaniques (turbine, alternateur, etc.) sont les plus complexes, car nous disposons de très peu d'informations sur les coûts. La loi des coûts est élaborée en fonction des données disponibles et devra évoluer en fonction de l'avancement des connaissances.

Les principales hypothèses sont [117]:

- Il n'y a pas de diffuseur après les turbines.
- Le générateur est directement entraîné par l'arbre principal, c'est-à-dire qu'aucune boîte de vitesses n'est nécessaire.
- Les aubes de guidage d'entrée sont incluses et leur coût est supposé égal au coût total des aubes de rotor.
- Le coût des conduits de turbine et de la structure centrale fait partie du coût de l'UCP.
- Un processus de production mature est supposé pour tous les composants.

Le modèle actuel coûte au total 40,7 M€ pour l'unité de conversion de puissance. Avec une puissance de pointe de 100 MW, cela équivaut à un coût par puissance installée de 407 €/kW [117].

Le coût du système mécanique augmente avec la diminution de la puissance nominale de ce dernier.

Tableau 19: Coûts de l'UCP (Unité de Conversion de Puissance)

Composants	Cout[M€]
Base de station	23.08
Coût total des turbines	4.25
Structure centrale	0.46
Conduites	3.64
Soutiens	0.15
Génératrices	5.92
Electronique	2.89
Contrôles	0.30
Total	40.7

Le pourcentage du prix de chaque composant sur le prix total de l'UCP est présenté dans la figure suivante :

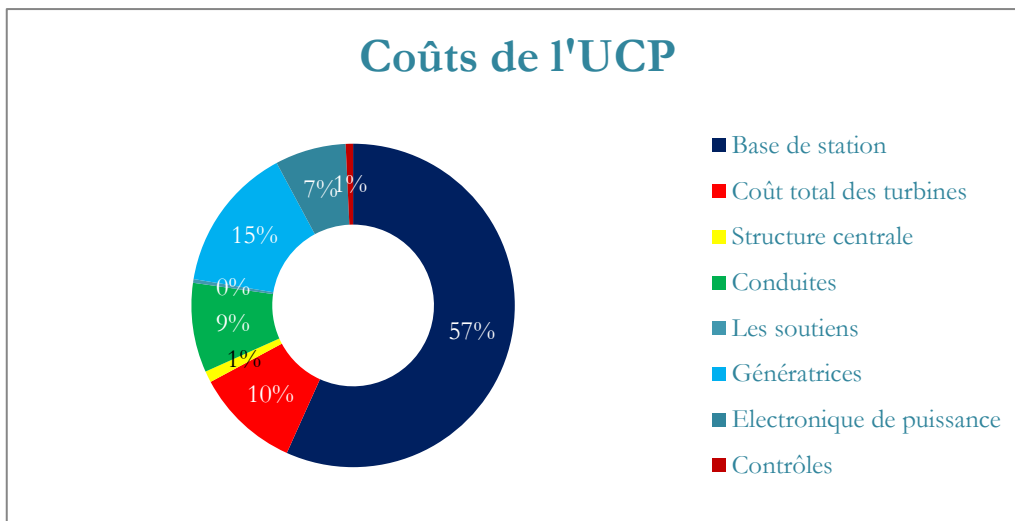


Figure 39: Répartition du coût de l'UCP.

Le coût d'entretien représente les coûts d'entretien du système mécanique, de la cheminée et du collecteur. Généralement, la cheminée solaire ne nécessite pas trop d'entretien durant l'année (Environ 0,55% /an) [118].

- **Coût total**

Dans le Tableau 19 et le graphique sur la Figure 40, nous verrons une meilleure image sur la répartition des dépenses des différentes parties de l'installation solaire à cheminée proposée pour alimenter la région d'Ouargla.

Tableau 20: Dépenses totales de l'installation.

Composants	Coût [M€]
Collecteur	308.47
Cheminée	82.38
Unité de conversion d'énergie	40.7
Autres frais (maintenances, ...)	25.8
Total	457.35

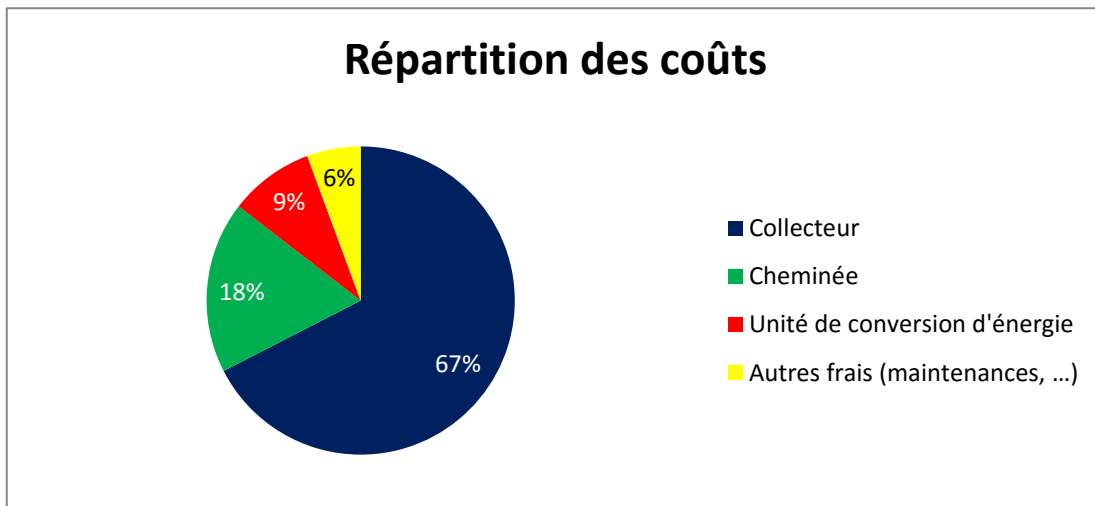


Figure 40: Répartition du coût de l'installation.

On remarque que le collecteur prend la majeure partie du budget du projet c'est parce qu'il couvre une zone d'un diamètre de 6000 m et on a réduit la hauteur de la tour et pour obtenir la même capacité avec une tour plus haute et un collecteur plus petit (ne va pas avoir un impact énorme sur le coût).

5.4.2 Coût moyen de l'électricité produite

Le coût moyen de l'énergie électrique produite est calculé conformément à la méthode d'analyse du coût de cycle de vie on utilise la relation [118] :

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{n=1}^N (C_{Main/Expl} + C_{Remp}) / (1+r)^n}{\sum_{n=1}^N P_{El,an} / (1+r)^n} \quad (19)$$

Où :

$P_{El,an}$: Est l'énergie électrique annuelle moyenne produite en MWh/an.

N : Est la période d'amortissement de la centrale solaire calculée en années.

$C_{Main/Expl}$: Est le coût de maintenance et d'exploitation (Estimé à 1.9 M€) [119].

C_{Remp} : Est le coût de remplacement.

r : Est le taux d'actualisation.

Les paramètres nécessaires sont les suivants :

- Investissement initial : 457,35 M€.
- $P_{El,an} = 350 \text{ GWh/an}$.
- Durée d'amortissement : $N = 30$ (Le grand avantage de la CSC est sa longue durée de vie [118]).

Pour un taux d'actualisation de 6% le coût moyen de l'électricité produite sera :

$$LCOE = 0.25 \text{ €/KWh}$$

Le prix de l'énergie électrique produite en (€/kWh) peut être calculé à partir des données préalablement adoptées. Et l'on peut transférer en dinar algérien sur la base de la valeur de 1 € = 151,28 Da (Cours de Janvier 2020).

L'analyse et les estimations des coûts étaient basées sur les données de prix obtenues de la référence [117].

6 Impact des crédits carbone

Pour étudier l'impact des crédits carbone sur le coût nivelé de l'électricité, on suppose qu'une centrale à gaz naturel en Algérie, qui émet généralement 0,548 kg de CO₂/kWh (Statistique de l'IEA), serait remplacée par la cheminée solaire. Une centrale solaire à cheminée avec la configuration proposée réduirait alors les émissions de CO₂ à moins de [117]:

$$350 \text{ GWh/an} \times 0.548 \times 10^6 = 191.8 \times 10^6 \text{ kg/an}$$

L'analyse actuelle néglige le fait que le processus de construction de la première centrale solaire à cheminée sera conduit par des combustibles fossiles. En supposant un prix du crédit carbone de 35 €/t CO₂ (Estimé en 2019) [120], les revenus perçus par la centrale solaire à cheminée au cours de la première année d'exploitation seraient :

$$191.8 \times 10^3 \times 35 = 6.71 \times 10^6 \text{ €}$$

On suppose que ce montant augmente avec l'inflation chaque année. Par conséquent, selon la valeur actuelle du crédit carbone sur la durée de vie du projet ($N = 30$) on trouve un gain de [119][121]:

$$\frac{6.71 \times 10^6}{f - i} \left[\left(\frac{1 + f}{1 + i} \right)^N - 1 \right] = \frac{6.71 \times 10^6}{0.07 - 0.04} \left[\left(\frac{1 + 0.07}{1 + 0.04} \right)^{30} - 1 \right] = 301.28 \text{ M€}.$$

Où :

f : Est le taux d'inflation (Estimé à 7%),

i : Est le taux d'intérêt (Estimé à 4%).

Lors de l'introduction du rendement annuel de 350 GWhs, le coût de l'électricité produite devient significativement faible ($LCOE = 0.22 \text{ €/KWh}$).

7 Conclusion

Pour fonctionner au mieux, une cheminée solaire doit être construite dans une région très ensoleillée avec beaucoup d'espace inhabité, les endroits les plus appropriés sont dans le Sahara. Les caractéristiques climatiques du Sahara algérien offrent de très bonnes conditions qui permettent certainement d'atteindre de bons rendements au niveau d'une cheminée solaire. Où Il n'y a aucun dommage écologique et aucune consommation de ressources, même pas pour la construction, car les tours solaires sont principalement constituées de béton et de verre qui sont fabriqués à partir de sable et de pierre plus de l'énergie autoproduite. Par conséquent, dans les zones désertiques avec du sable et de la pierre inépuisable, les tours solaires peuvent se reproduire une source d'énergie véritablement durable.

La cheminée solaire, si ses performances étaient prouvées, serait une technologie robuste face au temps. Contrairement au PV qui nécessite le remplacement des cellules PV à la fin de leur durée de vie nominale, la tour en béton, si elle est construite avec soin, devrait durer plus longtemps que les 30 ans indiqués, avec un remplacement minimal des pièces mobiles dans la turbine et le générateur.

Conclusion Générale et Perspectives

L'énergie renouvelable a prouvé sa nécessité dans la vie humaine et industrielle comme alternative de l'énergie fossile qui est très polluante, en diminution permanente et trop chère. Comme le désert algérien est un endroit clair et ensoleillé toute l'année, l'utilisation de l'énergie solaire est très recommandée, cette énergie peut être exploitée pour la production de l'électricité soit par la voie photovoltaïque, thermique ou par l'installation d'une centrale à cheminée solaire qui est un moyen moderne pour produire de l'énergie électrique sans causer un impact polluant sur l'environnement et sans que le procédé soit lié à une énergie fossile ou temporaire.

La cheminée solaire est un système très simple qui ne nécessite pas une grande technologie pour sa construction, tous ces éléments constitutifs sont très simples et ne coûtent pas très cher. Pour fonctionner au mieux, une cheminée solaire doit être construite dans une région très ensoleillée et disposant de nombreux espaces inhabités. Les caractéristiques climatiques du Sahara algérien offrent de très bonnes conditions permettant certainement d'atteindre de bons rendements au niveau d'une cheminée solaire.

La situation énergétique actuelle au niveau mondial et national qui est caractérisée par une dominance des énergies fossiles en termes de ressources, de production et de consommation, aussi une analyse des recensements de potentiel mondial et national en énergies renouvelables ont été présentées, puis un aperçu sur l'état de l'art de l'installation de type cheminée solaire et des recherches liées au domaine de développement de ce type de technologie ont été faites. La nécessité d'avoir la configuration optimale du prototype de la cheminée solaire conçue nous oblige de s'appuyer sur la méthode des plans d'expériences pour obtenir les valeurs optimales des paramètres géométriques qui affectent directement la vitesse à l'entrée de la cheminée solaire.

Comme résultats obtenus par la méthode des plans d'expériences, les valeurs de la vitesse d'écoulement qui va générer une puissance maximale sera pour une configuration ayant une hauteur de cheminée égale à 400 cm avec un diamètre de celle-ci de 16 cm et une hauteur à l'entrée du collecteur de 5 cm.

Une partie du travail a été focalisé sur la présentation du prototype de la cheminée solaire conçue et l'étude expérimentale effectuée sur celui-ci, où on a aussi essayé de tester plus d'une technique de stockage pour alimenter l'installation lors de l'absence du rayonnement solaire. Après une série d'expériences, nous avons constaté que :

- l'épaisseur de 5 cm de l'espace d'air à l'entrée du collecteur donne une valeur significative de la température en dessous du collecteur qui donne la meilleure valeur de la vitesse d'écoulement de l'air à l'entrée de la cheminée par rapport aux autres épaisseurs 10 et 15 cm,
- la vitesse atteint une valeur maximale égale à 2,4 m/s dans le cas de 400 cm de hauteur de cheminée et un diamètre de 16 cm et une épaisseur d'entrée d'air égale à 5 cm,
- l'augmentation de la hauteur de la cheminée permet d'augmenter la vitesse d'écoulement à l'entrée de la cheminée,
- l'augmentation du diamètre de la cheminée permet une augmentation du débit massique, ce qui se traduit par une productivité élevée.
- l'augmentation de l'épaisseur de la couche du gravier intégrée sous le collecteur donne une quantité plus d'énergie stockée.

Par la suite, nous avons donné un bon aperçu sur les principales conclusions de l'estimation d'un coût total de 457.35 M€ réservé pour la construction d'une grande installation avec une cheminée de 600 m de hauteur et un collecteur de 6000 m de diamètre offrant un faible coût d'électricité et une puissance de sortie annuelle de 350 GWh/an largement suffisante pour alimenter la région d'Ouargla.

La projection de la méthode du coût du cycle de vie sur notre modèle d'installation nous a permis d'estimer un coût total d'investissement de l'ordre de 457.35 M€, avec un coût moyen actualisé de l'électricité de 0.25 €/kWh. Lors de l'introduction de l'effet de l'impact potentiel des crédits de carbone sur le coût de l'électricité avec un rendement annuel de 350 GWhs, le coût d'électricité produite devient significativement faible.

Ce travail s'inscrit dans un des thèmes qui vise une politique énergétique loin des ressources fossiles qui conduit à une transition énergétique dans les brefs délais, comme perspectives futures à ce travail. Nous recommandons de compléter ce travail par une suite

de travaux qui mènera à l'installation d'une centrale solaire de type cheminée dans le sud Algérien où elles consistent à :

- analyser les risques de l'effet de serre et l'humidité produites par la centrale sur l'environnement aussi sur le climat local,
- étudier la possibilité de remplacer la grande installation par des petites unités de conversion d'énergie de type cheminée solaire,
- proposer des études en collaboration avec des agronomes pour rechercher le type de cultures agricoles pouvant intégrer la serre du collecteur, ce qui permet de donner un autre gain économique.

Références Bibliographiques

- [1] T. Ming, *Solar chimney power plant generating technology*. 2016.
- [2] RECIOUI Bakhta, “Etude prospective de la récupération d’énergie en Algérie,” Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, 2016.
- [3] B. Mahmah *et al.*, “MedHySol: Future federator project of massive production of solar hydrogen,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 11, pp. 4922–4933, 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.12.068.
- [4] A. El Hadj, S. Noureddine, D. M. Mabrouk, N. Belkhir, and R. Soumia, “Experimental investigation of a small solar chimney in the south of Algeria,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1968, 2018, doi: 10.1063/1.5039239.
- [5] B. P. (BP), “BP Statistical Review of World Energy 2020,” BP London, 2020.
- [6] A. Z’hour, “Stratégies d’approvisionnement en énergies fossiles des centrales électriques algériennes Perspectives et développements,” *Batna 2*, 2018.
- [7] G. Abderrahmane, “Maîtrise et optimisation de la gestion énergétique en Algérie,” Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, 2017.
- [8] N. Zerguini and Neila, “Cartographie de la controverse d’exploration et d’exploitation du gaz de schiste en Algérie,” <http://journals.openedition.org/ethiquepublique>, no. vol. 18, n° 1, Jan. 2016, doi: 10.4000/Ethique Publique.2562.
- [9] P. Lejoux and N. Ortar, “La transition énergétique : vrais enjeux, faux départs ?,” *SHS Web Conf.*, vol. 9, no. 2014, p. 01001, 2014, doi: 10.1051/shsconf/20140901001.
- [10] K. Duruisseau, “L’émergence du concept de transition énergétique. Quels apports de la géographie ?,” *Bull. la Société Géographique Liège*, vol. 63, pp. 21–34, 2014.
- [11] R. Soumia, “Etude prospective de la transition énergétique et l’impact environnemental en Algérie,” Kasdi Merbah Ouargla, 2018.
- [12] B. Dessus, “La transition énergétique : pourquoi , pour qui et comment ?,” *Les possibles*, no. 03, pp. 1–5, 2014.
- [13] P. Dato, “La transition énergétique,” University of Grenoble Alpes, 2017.
- [14] F. Chiba, “Energy transition : Difficulties , implications and solutions Fadoua Chiba To cite this version : HAL Id : tel-02070521,” 2019.
- [15] “Panorama des énergies renouvelables dans le monde | Le blog d’ekWateur.”

- <https://ekwateur.fr/2019/07/12/energies-renouvelables-monde-panorama/> (accessed Jan. 13, 2021).
- [16] Hannah E. Murdock Duncan Gibb Thomas André, *Renewables 2019 Global Status Report*, vol. 8, no. 3. 2019.
- [17] I. Renewable Energy Agency, *Renewable Energy Capacity Statistics 2019*. 2019.
- [18] A. Bouraiou *et al.*, “Status of renewable energy potential and utilization in Algeria,” *J. Clean. Prod.*, vol. 246, p. 119011, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119011.
- [19] D. Dib, B. Abdelhakim, M. Samir, G. Wissem, and S. Youcef, “The algerian challenge between the dependence on fossil fuels and its huge potential in renewable energy,” *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 2, no. 3, pp. 463–470, 2012, doi: 10.20508/ijrer.23383.
- [20] “Energies renouvelables, L’Algérie possède un potentiel très important en énergie solaire - Algerie360.” <https://www.algerie360.com/energies-renouvelables-lalgerie-possede-un-potentiel-tres-important-en-energie-solaire/> (accessed Jan. 12, 2021).
- [21] Z. Abada and M. Bouharkat, “Study of management strategy of energy resources in Algeria,” *Energy Reports*, vol. 4, no. 2018, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1016/j.egyr.2017.09.004.
- [22] I. Coop, “Bulletin des E nergies Renouvelables,” 2013.
- [23] A. Gouareh *et al.*, “GIS-based analysis of hydrogen production from geothermal electricity using CO₂ as working fluid in Algeria,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 44, pp. 15244–15253, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.05.105.
- [24] R. Algerienne and D. Et, “Bilan Energétique N a t i o n a l 2 0 1 9,” 2020.
- [25] “Ministère de l’Énergie | Algérie.” <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie> (accessed Jan. 13, 2021).
- [26] “Sonelgaz.” <https://www.sonelgaz.dz/fr> (accessed Jan. 14, 2021).
- [27] Ministère de l’Énergie | Algérie. <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=electricite-et-gaz> (accessed Jan. 14, 2021).
- [28] A. Ayadi, Z. Driss, A. Bouabidi, H. Nasraoui, M. bsisa, and M. S. Abid, “A computational and an experimental study on the effect of the chimney height on the thermal characteristics of a solar chimney power plant,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part E J. Process Mech. Eng.*, vol. 232, no. 4, pp. 503–516, Aug. 2018, doi: 10.1177/0954408917719776.
- [29] A. Ayadi, Z. Driss, A. Bouabidi, and M. S. Abid, “Experimental and numerical study of the impact of the collector roof inclination on the performance of a solar chimney power plant,” *Energy Build.*, vol. 139, pp. 263–276, 2017, doi:

- 10.1016/j.enbuild.2017.01.047.
- [30] F. Lupi, C. Borri, R. Harte, W. B. Krätzig, and H. J. Niemann, “Facing technological challenges of Solar Updraft Power Plants,” *J. Sound Vib.*, vol. 334, pp. 57–84, 2015, doi: 10.1016/j.jsv.2014.03.010.
- [31] R. Robert, “Solar prototype development in Spain show great promise,” *MPs Rev.*, vol. 2, pp. 21–23, 1982.
- [32] H. H. Al-Kayiem and O. C. Aja, “Historic and recent progress in solar chimney power plant enhancing technologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 1269–1292, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.331.
- [33] P. J. Cottam, P. Duffour, P. Lindstrand, and P. Fromme, “Solar chimney power plants – Dimension matching for optimum performance,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 194, no. April, pp. 112–123, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.04.074.
- [34] M. O. Hamdan, “Analysis of a solar chimney power plant in the Arabian Gulf region,” *Renew. Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 2593–2598, 2011, doi: 10.1016/j.renene.2010.05.002.
- [35] X. Zhou, F. Wang, and R. M. Ochieng, “A review of solar chimney power technology,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 8. Elsevier Ltd, pp. 2315–2338, Oct. 01, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.04.018.
- [36] J. Schlaich, R. Bergermann, W. Schiel, and G. Weinrebe, “Design of commercial solar updraft tower systems - Utilization of solar induced convective flows for power generation,” *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*, vol. 127, no. 1, pp. 117–124, 2005, doi: 10.1115/1.1823493.
- [37] R. Sangi, “Performance evaluation of solar chimney power plants in Iran,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 704–710, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.08.035.
- [38] “Services for Professionals in Solar Energy and Radiation (SoDa),” 2021. .
- [39] M. FEIDT, *Energétique : concepts et applications*. Sciences sup, 2006.
- [40] S. Hakim, “centrale solaire à cheminée,” 2017.
- [41] D. Foundation, *Clean Power from Deserts. The DESERTEC Concept for Energy, Water and Climate Security*, 4th Editio. White Book, 2009.
- [42] J. Schlaich, “Tension structures for solar electricity generation,” vol. 21, pp. 658–668, 1999.
- [43] “Solar Thermal Electricity Generation,” pp. 76–81, 1984.
- [44] C. M. Meyer, “Towers of power: the solar updraft tower,” *La Mancha*, pp. 49–51, 2008.

- [45] T. MH and R. Davey, “The solar tower: large scale renewable energy power station development,” *Proc. 19th world energy Congr. Sydney, Aust.*, 2004.
- [46] X. Zhou, M. A. do. S. Bernardes, and R. M. Ochieng, “Influence of atmospheric cross flow on solar updraft tower inflow,” *Energy*, vol. 42, no. 1, pp. 393–400, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.03.037.
- [47] T. TAHAR, “Contribution a L ’ Etude Numerique De La Convection Naturelle Laminaire D ’ Un Systeme Radial De Chauffage Solaire,” *Thèse*, p. 132, 2014.
- [48] A. Serag-Eldin, “New Developments in Large Scale Solar Energy Conversion,” in *New Trends in Technologies*, InTech, 2010.
- [49] A. O. Chikere, H. H. Al-Kayiem, and Z. A. A. Karim, “Review on the enhancement techniques and introduction of an alternate enhancement technique of solar chimney power plant,” *J. Appl. Sci.*, vol. 11, no. 11, pp. 1877–1884, Jan. 2011, doi: 10.3923/jas.2011.1877.1884.
- [50] C. D., *Floating Solar Chimney Technology*, no. February. 2010.
- [51] E. Gholamalizadeh and S. H. Mansouri, “A comprehensive approach to design and improve a solar chimney power plant: A special case - Kerman project,” *Appl. Energy*, vol. 102, pp. 975–982, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.06.012.
- [52] “A novel concept for constructing a leaning solar chimney power plant supported by a mountain-- 《Renewable Energy》 2006年04期.” http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-NCNY200604003.htm (accessed Jan. 09, 2021).
- [53] X. Zhou, J. Yang, J. Wang, and B. Xiao, “Novel concept for producing energy integrating a solar collector with a man made mountain hollow,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 3, pp. 847–854, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.enconman.2008.09.006.
- [54] A. Asnaghi and S. M. Ladjvardi, “Solar chimney power plant performance in Iran,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 5, Pergamon, pp. 3383–3390, Jun. 01, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.02.017.
- [55] A. Asnaghi, S. M. Ladjvardi, A. H. Kashani, and P. S. Izadkhist, “Solar chimney power plant performance analysis in the central regions of Iran,” *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*, vol. 135, no. 1, Feb. 2013, doi: 10.1115/1.4006966.
- [56] Richards and R, “Spanish solar chimney nears completion,” *Mod. Power Syst.; (United Kingdom)*, vol. 1:11, 1981.
- [57] R. Krisst, *Energy-transfer systems*. 620 central ave north, milica, 1983.
- [58] “Kulunk, H. (1985) A prototype solar convection chimney operated under Izmit conditions. Proceedings of the 7th Miami International Conference on Alternative

- Energy Sources, Vol. 162. - References - Scientific Research Publishing.” [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1895187](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1895187) (accessed Jan. 10, 2021).
- [59] N. Pasumarthi and S. A. Sherif, “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, no. 5, pp. 443–461, Apr. 1998, doi: 10.1002/(SICI)1099-114X(199804)22:5<443::AID-ER381>3.0.CO;2-V.
- [60] X. Zhou, J. Yang, B. Xiao, and G. Hou, “Experimental study of temperature field in a solar chimney power setup,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 27, no. 11–12, pp. 2044–2050, Aug. 2007, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2006.12.007.
- [61] C. Ketlogetswe, J. K. Fiszdon, and O. O. Seabe, “Solar chimney power generation project-The case for Botswana,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 7. Pergamon, pp. 2005–2012, Sep. 01, 2008, doi: 10.1016/j.rser.2007.03.009.
- [62] A. Koyun, “Güneş Bacası Sisteminin Termal Özet Dizaynı,” 2007.
- [63] A. G. Ferreira, C. B. Maia, M. F. B. Cortez, and R. M. Valle, “Technical feasibility assessment of a solar chimney for food drying,” *Sol. Energy*, vol. 82, no. 3, pp. 198–205, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.solener.2007.08.002.
- [64] A. G. Ferreira, L. M. Gonçalves, and C. B. Maia, “Solar drying of a solid waste from steel wire industry,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 73, no. 1, pp. 104–110, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.07.047.
- [65] C. B. Maia, A. G. Ferreira, R. M. Valle, and M. F. B. Cortez, “Analysis of the airflow in a prototype of a solar chimney dryer,” *Heat Transf. Eng.*, vol. 30, no. 5, pp. 393–399, Apr. 2009, doi: 10.1080/01457630802414797.
- [66] C. B. Maia, A. G. Ferreira, R. M. Valle, and M. F. B. Cortez, “Theoretical evaluation of the influence of geometric parameters and materials on the behavior of the airflow in a solar chimney,” *Comput. Fluids*, vol. 38, no. 3, pp. 625–636, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.compfluid.2008.06.005.
- [67] C. B. Maia, J. O. Castro Silva, L. Cabezas-Gómez, S. M. Hanriot, and A. G. Ferreira, “Energy and exergy analysis of the airflow inside a solar chimney,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27. Pergamon, pp. 350–361, Nov. 01, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.06.020.
- [68] C. B. Maia, A. G. Ferreira, and S. M. Hanriot, “Evaluation of a tracking flat-plate solar collector in Brazil,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 73, no. 1, pp. 953–962, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.08.052.
- [69] “Shed absorbability and tower structure characteristics of the solar heated wind updraft tower power--《Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology》 2013年01期.” http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-BTGX201301014.htm (accessed Jan. 10, 2021).

- [70] A. B. Kasaeian, E. Heidari, and S. N. Vatan, “Experimental investigation of climatic effects on the efficiency of a solar chimney pilot power plant,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 9, pp. 5202–5206, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.04.019.
- [71] M. Najmi, A. Nazari, H. Mansouri, and G. Zahedi, “Feasibility study on optimization of a typical solar chimney power plant,” *Heat Mass Transf. und Stoffuebertragung*, vol. 48, no. 3, pp. 475–485, Mar. 2012, doi: 10.1007/s00231-011-0894-5.
- [72] N. Mehla, N. S. Thakur, and R. Makade, “Experimental analysis of a velocity field using variable chimney diameter for solar updraft tower Solar Absorption Cooling System View project Solar Updraft Tower View project EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A VELOCITY FIELD USING VARIABLE CHIMNEY DIAMETER FOR SOLAR UPDRAFT TOWER,” 2011. Accessed: Jan. 09, 2021. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/265007003>.
- [73] R. D. Chappell, M. J. Congdon, and J. J. French, “Design, construction, and testing of a small scale solar chimney for nomadic herdsman,” in *ASME 2012 6th International Conference on Energy Sustainability, ES 2012, Collocated with the ASME 2012 10th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology*, Jul. 2012, no. PARTS A AND B, pp. 33–38, doi: 10.1115/ES2012-91194.
- [74] M. A. Al-Dabbas, “The first pilot demonstration: solar updraft tower power plant in Jordan,” *Int. J. Sustain. Energy*, vol. 31, no. 6, pp. 399–410, Dec. 2012, doi: 10.1080/1478646X.2011.589516.
- [75] O. C. Aja, H. H. Al-Kayiem, and Z. A. Abdul Karim, “Experimental investigation of the effect of wind speed and wind direction on a solar chimney power plant,” *WIT Trans. Ecol. Environ.*, vol. 179 VOLUME 2, pp. 945–955, Dec. 2013, doi: 10.2495/SC130802.
- [76] R. Khanal and C. Lei, “An experimental investigation of an inclined passive wall solar chimney for natural ventilation,” *Sol. Energy*, vol. 107, pp. 461–474, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.05.032.
- [77] “Energy and Sustainability V - Google Books.” https://books.google.dz/books?hl=en&lr=&id=3K2TBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA219&dq=+Al-Azawie+SS,+Hassan+S,+Zammeri+MF.+Experimental+and+numerical+study+on+ground+material+absorptivity+for+solar+chimney+power+applications.+In:+Proceedings+of+the+5th+international+conference+on+energy+and+sustainability:+Putrajaya,+Malaysia%3B+2014.&ots=FTfql0io7H&sig=HgFPsEwrM4C2q_jo8Xfs0VUODm8&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (accessed Jan. 11, 2021).
- [78] Y. Li and S. Liu, “Experimental study on thermal performance of a solar chimney combined with PCM,” *Appl. Energy*, vol. 114, pp. 172–178, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.09.022.
- [79] A. Kasaeian, M. Ghalamchi, and M. Ghalamchi, “Simulation and optimization of

- geometric parameters of a solar chimney in Tehran,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 83, pp. 28–34, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.03.042.
- [80] A. Y. K. Tan and N. H. Wong, “Influences of ambient air speed and internal heat load on the performance of solar chimney in the tropics,” *Sol. Energy*, vol. 102, pp. 116–125, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.01.023.
- [81] A. R. Shahreza and H. Imani, “Experimental and numerical investigation on an innovative solar chimney,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 95, pp. 446–452, May 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2014.10.051.
- [82] M. Ghalamchi, A. Kasaeian, and M. Ghalamchi, “Experimental study of geometrical and climate effects on the performance of a small solar chimney,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43. Elsevier Ltd, pp. 425–431, Mar. 01, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.11.068.
- [83] S. Okada, T. Uchida, T. Karasudani, and Y. Ohya, “Improvement in solar chimney power generation by using a diffuser tower,” *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*, vol. 137, no. 3, Jun. 2015, doi: 10.1115/1.4029377.
- [84] S. Nasirivatan, A. Kasaeian, M. Ghalamchi, and M. Ghalamchi, “Performance optimization of solar chimney power plant using electric/corona wind,” *J. Electrostat.*, vol. 78, pp. 22–30, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.elstat.2015.09.007.
- [85] M. Ghalamchi, A. Kasaeian, M. Ghalamchi, and A. H. Mirzahassemi, “An experimental study on the thermal performance of a solar chimney with different dimensional parameters,” *Renew. Energy*, vol. 91, pp. 477–483, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.01.091.
- [86] N. Fadaei, A. Kasaeian, A. Akbarzadeh, and S. H. Hashemabadi, “Experimental investigation of solar chimney with phase change material (PCM),” *Renew. Energy*, vol. 123, pp. 26–35, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.01.122.
- [87] A. Bouabidi, A. Ayadi, H. Nasraoui, Z. Driss, and M. S. Abid, “Study of solar chimney in Tunisia: Effect of the chimney configurations on the local flow characteristics,” *Energy Build.*, vol. 169, pp. 27–38, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.01.049.
- [88] O. K. Ahmed and A. S. Hussein, “New design of solar chimney (case study),” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 11, pp. 105–112, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.csite.2017.12.008.
- [89] H. H. Al-Kayiem, K. V. Sreejaya, and A. O. Chikere, “Experimental and numerical analysis of the influence of inlet configuration on the performance of a roof top solar chimney,” *Energy Build.*, vol. 159, pp. 89–98, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.10.063.
- [90] K. Bashirnezhad, M. kavyanpoor, S. A. Kebriyae, and A. Moosavi, “The experimental appraisalment of the effect of energy storage on the performance of solar chimney using phase change material,” *Sol. Energy*, vol. 169, pp. 411–423, Jul.

- 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.05.001.
- [91] H. Nasraoui, Z. Driss, A. Ayadi, A. Bouabidi, and H. Kchaou, “Numerical and experimental study of the impact of conical chimney angle on the thermodynamic characteristics of a solar chimney power plant,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part E J. Process Mech. Eng.*, vol. 233, no. 5, pp. 1185–1199, Oct. 2019, doi: 10.1177/0954408919859160.
- [92] H. Nasraoui, Z. Driss, and H. Kchaou, “Novel collector design for enhancing the performance of solar chimney power plant,” *Renew. Energy*, vol. 145, pp. 1658–1671, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.07.062.
- [93] O. B. E. K. Mokrani, M. R. Ouahrani, M. H. Sellami, and L. Segni, “Experimental investigations of hybrid: geothermal water/solar chimney power plant,” *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, 2020, doi: 10.1080/15567036.2020.1810830.
- [94] R. Balijepalli, V. P. Chandramohan, and K. Kirankumar, “Development of a small scale plant for a solar chimney power plant (SCPP): A detailed fabrication procedure, experiments and performance parameters evaluation,” *Renew. Energy*, vol. 148, pp. 247–260, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.12.001.
- [95] P. Belkhode, C. Sakhale, and A. Bejalwar, “Evaluation of the experimental data to determine the performance of a solar chimney power plant,” in *Materials Today: Proceedings*, Jan. 2020, vol. 27, pp. 102–106, doi: 10.1016/j.matpr.2019.09.006.
- [96] J. Gauchi, J. G. Introduction, and I. De Statistique, “Introduction à la méthode des plans d’ expériences To cite this version: HAL Id: hal-02795365 A LA METHODE DES PLANS D’ EXPERIENCES Unité de Mathématiques et d’ Informatique Appliquées Edition Décembre 2016,” vol. 2016, 2020.
- [97] H. S and M. F, “Optimized parameters of an air solar collector for drying applications using the experimental design method,” Université Kasdi Merbah Ouargla, 2018.
- [98] S. Point, *Statgraphics Centurion XVI: User Manual*. StatPoint Technologies, 2009.
- [99] “Design of Experiments (DOE) Tutorial.” <https://www.moresteam.com/toolbox/design-of-experiments.cfm> (accessed Jan. 14, 2021).
- [100] S. P. Technologies, “STATGRAPHICS ‘DOE Wizard – Screening Designs,’” 2017.
- [101] N. Davies and A. R. Tremayne, “Review of STATGRAPHICS,” *J. Appl. Econom.*, vol. 9(3), pp. 335–341, 1994.
- [102] “Software Reviews from Quality Digest.” <https://www.qualitydigest.com/jan02/html/software.html> (accessed Jan. 14, 2021).
- [103] M. BADACHE, “Etude numerique et experimentale du transfert de chaleur dans un

- capteur solaire a perforations dote d'un collecteur transparent et opaque," universite du Quebec, 2013.
- [104] D. BECHKI, "Etude comparative et optimisation des procédés de distillation solaire en vue de la production d' eau potable dans les zones arides sahariennes," p. 185, 2011.
- [105] R. Bergermann, W. Schiel, and G. Weinrebe, "Electricity from the sun," no. January, 2005.
- [106] E. P. Ortega, "Analyzes of Solar Chimney Design," Norwegian University of Science and Technology, 2011.
- [107] S. Larbi, A. Bouhdjar, K. Meliani, A. Taghourt, and H. Semai, "Solar chimney power plant with heat storage system performance analysis in South Region of Algeria," *Proc. 2015 IEEE Int. Renew. Sustain. Energy Conf. IRSEC 2015*, 2016, doi: 10.1109/IRSEC.2015.7454948.
- [108] S. R. Assessment, "SAM Training Solar Resource Assessment/Mapping."
- [109] K. Gairaa and Y. Bakelli, "Solar Energy Potential Assessment in the Algerian South Area: Case of Ghardaïa Region," *J. Renew. Energy*, vol. 2013, pp. 1–11, 2013, doi: 10.1155/2013/496348.
- [110] B. Negrou, N. Settou, N. Chennouf, and B. Dokkar, "Valuation and development of the solar hydrogen production," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 6, pp. 4110–4116, 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.09.013.
- [111] J. Li, H. Guo, and S. Huang, "Power generation quality analysis and geometric optimization for solar chimney power plants," *Sol. Energy*, vol. 139, pp. 228–237, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.09.033.
- [112] I. Khaoula and L. Salah, "Technico-economic aspect analysis in the design of solar chimney power plants," vol. 37, pp. 30–33, 2018.
- [113] "Wilaya Ouargla, Algérie - DB-City : Toutes les infos sur les Pays, Régions, Villes et Villages." <https://fr.db-city.com/Algérie--Ouargla> (accessed Feb. 13, 2021).
- [114] S. Rahmouni, "Optimisation techno-économique de la production d'hydrogène à partir de différentes sources renouvelables dans le sud Algérien," Kasdi Marbah Oargla, 2013.
- [115] A. T. Mustafa, H. H. Al-kayiem, and S. I. U. Gilani, "A Survey on Performance Enhancement of Solar Updraft Tower Power Plants," *Int. J. Eng. Tech. Res.*, vol. 2, no. 7, pp. 34–39, 2014.
- [116] A. Dhahri and A. Omri, "A Review of solar Chimney Power Generation Technology," no. 3, pp. 1–17, 2013.

- [117] G. Van Zijl and T. P. Fluri, “Cost Analysis of Solar Chimney Power Plants Cost Analysis of Solar Chimney Power Plants,” no. January 2020, 2006.
- [118] S. Nizetic, N. Duic, and B. Klarin, “Analysis and Feasibility of Implementing Solar Chimney Power Plants in the Mediterranean Region,” no. November, 2008, doi: 10.1016/j.energy.2008.05.012.
- [119] T. P. Fluri, J. P. Pretorius, C. Van Dyk, T. W. Von Backström, D. G. Kröger, and G. P. A. G. V. Zijl, “Cost analysis of solar chimney power plants,” *Sol. Energy*, vol. 83, no. 2, pp. 246–256, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.solener.2008.07.020.
- [120] “Le prix du carbone pourrait atteindre entre 35 et 40 euros la tonne au cours des cinq prochaines années.” <https://www.actu-environnement.com/ae/news/prix-carbone-marche-europeen-hausse-quota-gaz-charbon-31866.php4> (accessed May 02, 2021).
- [121] X. Zhou, J. Yang, F. Wang, and B. Xiao, “Economic analysis of power generation from floating solar chimney power plant,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 4. Pergamon, pp. 736–749, May 01, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2008.02.011.

Annexe

- I- Propriétés thermophysiques des matériaux utilisés pour la construction du prototype de la cheminée :

Tableau 1 : Propriétés thermophysiques des matériaux utilisés.

Propriété	Acier	Verre	PVC
Conductivité thermique (W/m.K)	50.2	0.93	0.23-1.06
Chaleur massique (J/kg.K)	473	840	1300
Diffusivité thermique 10^{-6} m ² /s	10-12	0.5	1.2
Emissivité	0.2-0.32	0.94 (à 90°)	0.91-0.93
Transmissivité (%)	-	85-92	-

- II- Photos illustrant le déroulement de la construction du prototype de la cheminée réalisée :

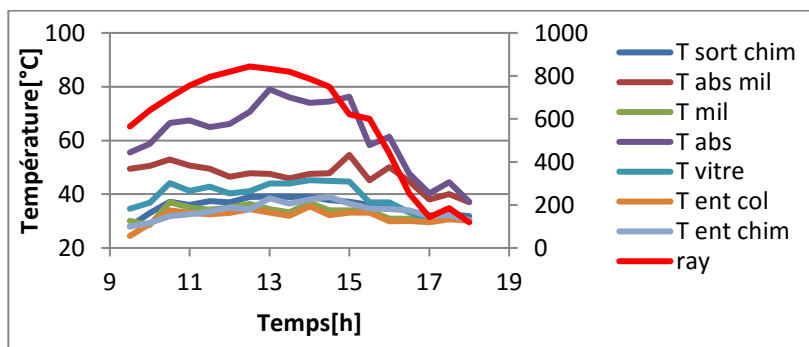




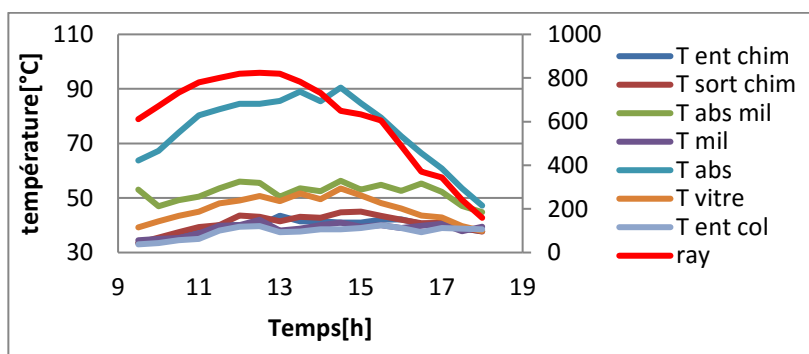
III- Variations du rayonnement et des températures aux différents points de la cheminée :

- Cas de $H_{Ch}=400\text{cm}$, $D_{Ch}=16\text{cm}$.

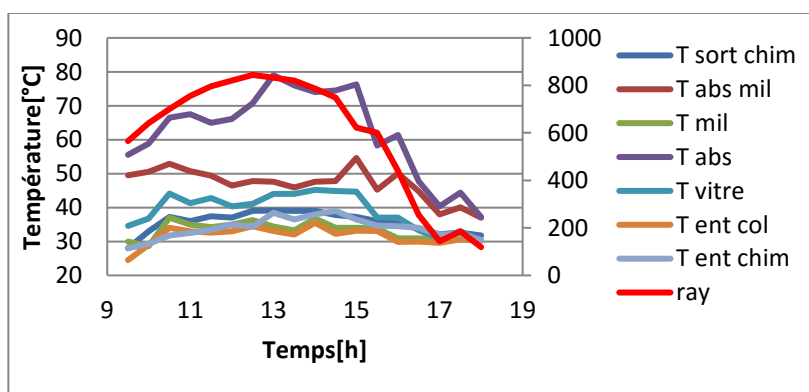
1- Journée de 18 Mai 2017. Pour $H_{Co} = 5\text{ cm}$



2- Journée de 18 Mai 2017. Pour $H_{Co} = 10\text{ cm}$

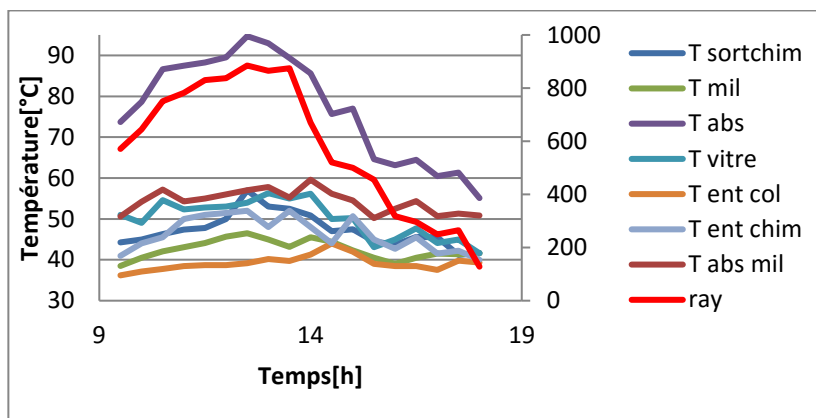


3- Journée de 18 Mai 2017. Pour $H_{Co} = 15\text{cm}$

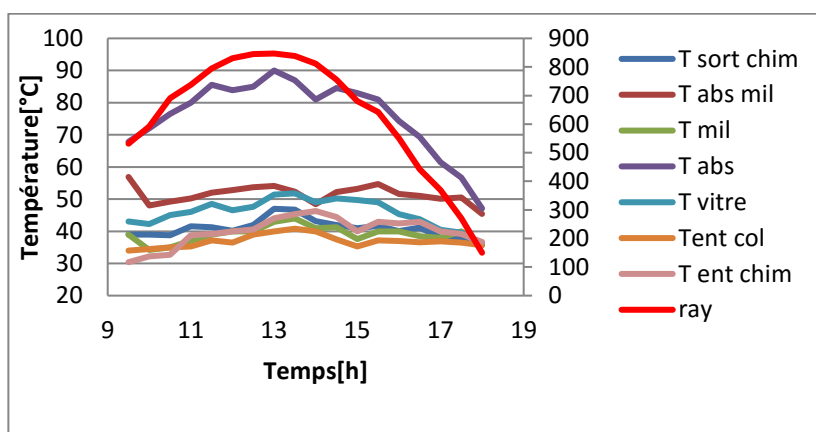


- Cas de $H_{Ch}=300\text{cm}$, $D_{Ch}=16\text{cm}$.

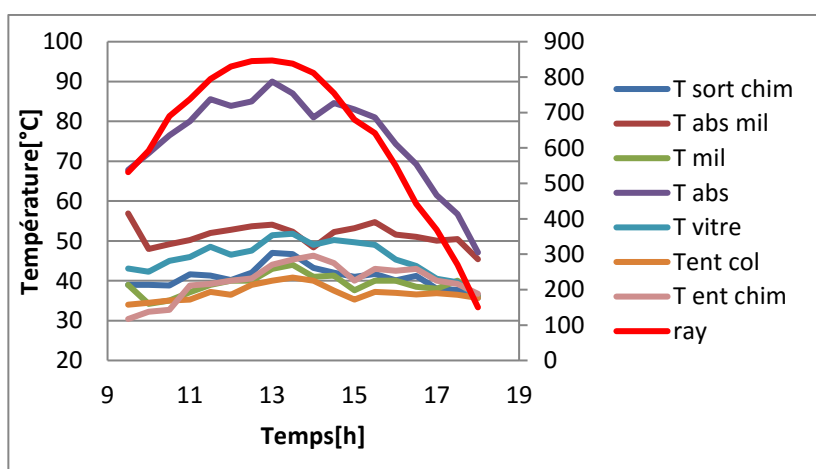
1- Journée de 18 Mai 2017. Pour $H_{Co} = 5$ cm



2- Journée de 18 Mai 2017. Pour $H_{Co} = 10$ cm

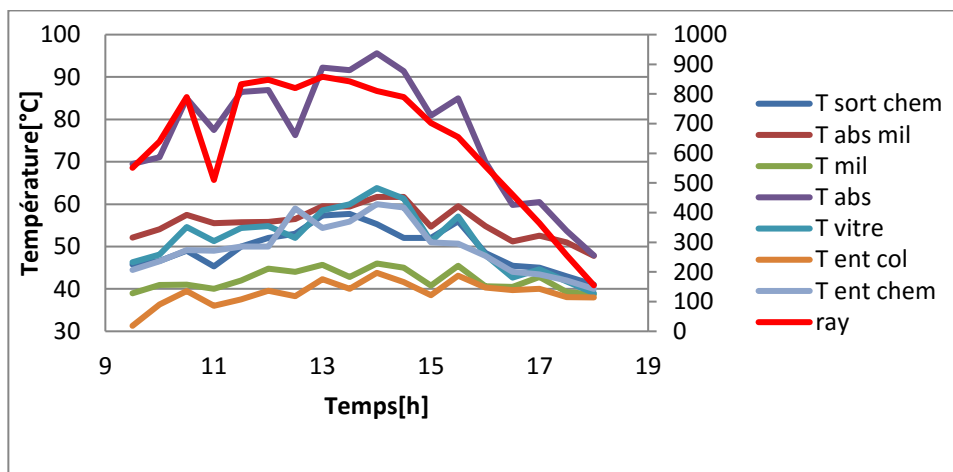


3- Journée de 18 Mai 2017. Pour $H_{Co} = 15$ cm



- Cas de $H_{Ch} = 400$ cm, $D_{Ch} = 11$ cm.

1- Journée de 18 Mai 2017. Pour $H_{Co} = 5 \text{ cm}$



- Cas de $H_{Ch}=300\text{cm}$, $D_{Ch}=11\text{cm}$.

Journée de 18 Mai 2017. Pour $H_{Co}= 5 \text{ cm}$.

