

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté : Technologie

Département : Génie Mécanique



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Spécialité: Mécanique et Énergétique

Par :

Mr AZIZI Abdelghani

Thème :

Contribution à l'étude et l'optimisation d'une cheminée solaire cas du Sahara Algérien

Soutenue le 02/10/2019, devant le jury composé de :

ZAHLOUL Hamou	Professeur	UHB Chlef	Président
TAHRI Toufik	Professeur	UHB Chlef	Rapporteur
SELLAMI Mohamed Hassen	MCA	UKM Ouargla	Co-Rapporteur
LOUKARFI Larbi	Professeur	UHB Chlef	Examineur
KHELIL Ali	Professeur	UHB Chlef	Examineur
BOUDGHENE STAMBOULI Amine	Professeur	USTO Oran	Examineur
BETTAHAR Ahmed	Professeur	UHB Chlef	Invité

Année universitaire 2019/2020

Résumé :

La centrale à cheminée solaire (CCS) est une technologie alternative pour la production d'électricité à partir de l'énergie solaire. L'objectif de ce travail est l'étude des performances de la cheminée solaire, des prototypes des cheminées solaires à petite échelle ont été construits à l'Université d'Ouargla, en Algérie. Un modèle théorique est développé dans cette étude pour évaluer les performances d'une cheminée solaire et les effets des paramètres de la cheminée sur l'efficacité et la puissance de la CCS. Le modèle numérique CFD de turbulence k- ϵ standard a été adopté pour simuler le flux d'air dans le prototype de cheminée solaire. L'étude a révélé que les vitesses de l'air mesurées à l'entrée de la cheminée sont en bon accord avec celles prédites par simulation en utilisant le modèle CFD. Les résultats de la simulation montrent une zone de recirculation à l'entrée du collecteur avec des vitesses négatives qui entraînent une réduction des performances de la cheminée solaire. De plus, une vitesse de l'air maximale de 1,6 m/s à l'entrée de la cheminée a été observée. Aussi, une zone de perturbation est observée à l'entrée de la cheminée et les particules d'air sont orientées de manière aléatoire. Cette désorganisation du champ de vitesse provoque une perte d'énergie cinétique par une chute de pression. La tendance de la variation de la production de la puissance théorique dans le prototype CCS suit la même tendance de rayonnement solaire et a atteint environ 1,10 W entre 10h00 et 17h00. En utilisant les dimensions du prototype CCS de Manzanares et les conditions météorologiques d'Ouargla, nous avons constaté que la puissance estimée atteignait 104 kW, ce qui est supérieur à la puissance produite à Manzanares (75 kW). Ces résultats montrent que la technologie des cheminées solaires convient très bien aux zones chaudes et arides comme le Sud-Est de l'Algérie. Une autre installation d'un prototype à petite échelle a été réalisée à l'université d'Ouargla, c'est le premier prototype installé en Algérie, où le rayonnement solaire est très élevé avec l'existence de la source géothermique. Le but de cette installation est d'assurer le fonctionnement de la cheminée solaire la nuit ou en cas de manque des radiations solaires par utilisation de la chaleur géothermique de la source d'eau (albienne). Les résultats ont montré que l'intégration du système de réchauffeur d'eau à la place de l'eau géothermique albienne avec la cheminée solaire améliore l'efficacité du système et maintenir le fonctionnement de la CCS ainsi que la production d'électricité continue le jour et la nuit.

Mots-clés : Cheminée solaire, expérimental, CFD, géothermique albienne, puissance électrique, Ouargla.

Abstract:

The solar chimney power plant (SCPP) is an alternative technology for the production of electricity from solar energy. The objective of this work is the study of the performances of the solar chimney. Prototypes of small scale solar chimneys were built at the University of Ouargla, Algeria. A theoretical model is developed in this study to evaluate the performance of a solar chimney and the effects of chimney parameters on the efficiency and power of SCPP. The CFD numerical model of standard k- ϵ turbulence has been adopted to simulate the airflow in the solar chimney prototype. The study found that air velocities measured at the entrance of the chimney are in good agreement with those predicted by simulation using the CFD model. The results of the simulation show a recirculation zone at the collector inlet with negative velocities that reduce the performance of the solar chimney. In addition, a maximum air velocity of 1.6 m / s at the entrance to the chimney was observed. Also, a disturbance zone is observed at the entrance of the chimney and the air particles are oriented randomly. This disorganization of the velocity field causes a loss of kinetic energy by a pressure drop. The trend of the variation in the output of the theoretical power in the SCPP prototype follows the same trend of solar radiation and reached about 1.10 W between 10:00 and 17:00. Using the Manzanares SCPP prototype dimensions and Ouargla weather conditions, we found that the estimated power was 104kW, which is higher than the power produced at Manzanares (75kW). These results show that solar chimney technology is very suitable for hot and arid areas like south-eastern Algeria. Another installation of a small-scale prototype was carried out at the University of Ouargla, it is the first prototype installed in Algeria, where the solar radiation is very high with the existence of the geothermal source. The purpose of this installation is to ensure the operation of the solar chimney at night or in case of lack of solar radiation by using the geothermal heat of the source (albiénne). The results showed that the integration of the water heater system in place of the albiénne geothermal water with the solar chimney improves the efficiency of the system and maintain the operation of the SCPP as well as the continuous production of electricity day and night.

Keywords: Solar chimney, experimental, albiénne geothermal, electrical power, Ouargla.

مخلص:

محطة المدخنة الشمسية هي تقنية بديلة لإنتاج الكهرباء من الطاقة الشمسية. الهدف من هذا العمل هو دراسة أداء المدخنة الشمسية. تم بناء نماذج أولية من المداخل الشمسية الصغيرة في جامعة ورقلة ، الجزائر. تم تطوير نموذج نظري في هذه الدراسة لتقييم أداء المداخل الشمسية وتأثير معلمات المداخل على كفاءة وقوة محطة المدخنة الشمسية. تم اعتماد نموذج Fluent ANSYS CFD العددي للاضطراب k-ε القياسي لمحاكاة تدفق الهواء في النموذج الأولي للمداخل الشمسية. وجدت الدراسة أن سرعات الهواء المقاسة عند مدخل المدخنة تتفق بشكل جيد مع تلك التي تنبأت بها المحاكاة باستخدام نموذج Fluent ANSYS CFD. تظهر نتائج المحاكاة منطقة إعادة دوران عند مدخل المجمع مع سرعات سلبية تقلل من أداء المدخنة الشمسية. بالإضافة إلى ذلك ، لوحظت سرعة هواء قصوى قدرها 1.6 م / ث عند مدخل المداخل. أيضا، لوحظ وجود منطقة اضطراب عند مدخل المدخنة وجزيئات الهواء موجهة عشوائيا. يؤدي عدم تنظيم مجال السرعة هذا إلى فقدان الطاقة الحركية من خلال انخفاض الضغط. يتبع اتجاه التباين في ناتج القدرة النظرية في النموذج الأولي لمحطة المدخنة الشمسية نفس اتجاه الإشعاع الشمسي ووصل إلى حوالي 1.10 وات بين الساعة 10:00 والساعة 17:00. باستخدام أبعاد النموذج الأولي لمحطة المدخنة الشمسية منازراس وظروف الطقس في مدينة ورقلة، وجدنا أن الطاقة المقدره كانت 104 كيلو واط ، وهو أعلى من الطاقة المنتجة في منازراس حيث وصلت 75 كيلو واط . توضح هذه النتائج أن تقنية المداخل الشمسية مناسبة جداً للمناطق الحارة والقاحلة مثل جنوب شرق الجزائر. تم إجراء تركيب آخر لنموذج أولي صغير الحجم في جامعة ورقلة ، وهو أول نموذج تم تركيبه في الجزائر ، حيث الإشعاع الشمسي مرتفع للغاية بوجود مصدر الطاقة الحرارية الأرضية. الغرض من هذا التثبيت هو ضمان تشغيل المدخنة الشمسية في الليل أو في حالة عدم وجود إشعاع شمسي باستخدام الحرارة الحرارية الأرضية للمصدر (albienne). أظهرت النتائج أن تكامل نظام سخان المياه في مكان المياه الحرارية الأرضية في albienne مع المداخل الشمسية يحسن من كفاءة النظام ويحافظ على تشغيل محطة المدخنة الشمسية وكذلك الإنتاج المستمر للكهرباء ليلا ونهارا.

املكت المفتاحية:

المداخل الشمسية؛ تجريبي؛ الطاقة الحرارية الأرضية؛ الطاقة الكهربائية؛ ورقلة

Dédicaces

À mon père

À ma mère qui m'est toujours la plus chère

À mes frères et mes sœurs

À tous les membres de ma famille, grands et petits.

À tous mes amis.

Remerciements

Je tiens à remercier vivement mon Directeur de thèse le Professeur **TAHRI Toufik** pour ses conseils très utiles, ses encouragements et sa disponibilité tout au long de la préparation de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma vive gratitude à mon Co-directeur de thèse le Docteur **SELLAMI Mohamed Hassen**, Université Kasdi Merbah d'Ouargla, pour son aide précieuse et son aimable collaboration à l'élaboration de cette thèse.

Je tiens à remercier aussi le Professeur **LEDJEL Segni**, le Directeur de laboratoire de recherche de génie des procédés à l'Université Kasdi Merbah d'Ouargla pour son soutien, ces conseils et son aide précieuse durant toute la période de préparation des travaux expérimentaux.

Je remercie aussi le Docteur **BELAKROUM Rassim**, Université Kasdi Merbah d'Ouargla, pour tous ses efforts et sa disponibilité permanente, sa contribution majeure à l'orientation des travaux de recherche et ses idées originales qui m'ont servi à enrichir le contenu de cette thèse.

Je suis particulièrement reconnaissant à Monsieur **ZAHLOUL Hamou**, Professeur à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, pour avoir accepté de présider le jury de soutenance de ma thèse.

Je suis également reconnaissant à Monsieur **LOUKARFI Larbi**, Monsieur **KHELIL Ali** et Monsieur **BETTAHAR Ahmed**, Professeurs à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef et aussi Monsieur **BOUDGHENE STAMBOULI Amine** Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed-Boudiaf, qu'ils trouvent ici ma gratitude de me faire l'honneur d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Par la même occasion, je présente également mes vifs remerciements aux enseignants chercheurs de l'université Hassiba Benbouali de Chlef, pour leurs conseils et leurs encouragements.

Enfin, tous mes remerciements à toute personne m'ayant aidé de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

Nomenclature

Symboles latins

A :	Surface, (m^2)	k :	Énergie cinétique turbulente (m^2/s^2)
C_p :	Chaleur spécifique à pression constante, (J /kg.K)	u :	vitesse suivant r (m/s)
g :	Accélération gravitationnelle, (m/s^2)	v :	vitesse suivant y (m/s)
H :	Hauteur de la cheminée, (m)	S :	terme source (m)
P :	Puissance, (W)	G :	Intensité du rayonnement solaire, (W/m^2)
p :	Pression, (Pa)	ΔP :	Pressure différence, (N/m^2)
Q :	Flux de chaleur, (W)	ΔT :	Différence de température (K)
V :	Vitesse, (m/s)	T :	Température, (K)
t :	Temps (s)	R, r :	Rayon (m)
\dot{m} :	débit massique (Kg/s)		

Symbole grecques

α :	Coefficient d'absorption efficace	Γ :	coefficient de diffusion relatif à la variable
η :	rendement	Φ :	sources internes de dissipation d'énergie
β :	Facteur de perte d'énergie par convection, ($W / m^2.K$)	ε :	taux de dissipation turbulent
ρ :	Masse volumique, (kg / m^3)	σ :	constante de Stefan-Boltzmann ($W/m^2.K^4$)
ϑ :	viscosité cinématique moléculaire	μ :	viscosité dynamique

Indices

a :	Ambiante	Col :	Collecteur
Ch :	Cheminée	s :	Solaire
t :	Turbine	tg :	Turbine/générateur

Abréviation

CCS :	Centrale à cheminée solaire
CFD :	Computational Fluid Dynamics

Liste des figures

Chapitre-I-

Fig. I.1. Schéma du principe de fonctionnement d'une centrale à cheminée solaire.....	4
Fig. I.2. La Centrale à cheminée solaire de Manzanares en Espagne.....	5
Fig. I.3. Image générée par ordinateur d'une centrale à cheminée solaire à grande échelle.....	5
Fig. I.4. Rayonnement solaire global annuel.....	7
Fig. I.5. (a) Dessin de Léonardo da Vinci, (b) moteur solaire proposé par Isidoro Cabanyes.....	9
Fig. I.6. Principe de la centrale à cheminée solaire du Professeur Dubos.....	10
Fig. I.7. Cheminées solaires dans le désert marocain imaginé par Dubos.....	10
Fig. I.8. La tour solaire du Professeur NAZARE.....	10
Fig. I.9. Options de conception du collecteur.....	12
Fig. I.10. Bilan thermique du collecteur.....	13
Fig. I.11. Modèle de Bilgen et Rheault.....	14
Fig. I.12. Configuration du capteur solaire de Bonnelle.....	15
Fig. I.13. Différentes technologies des cheminées.....	16
Fig. I.14. Formes de construction de cheminée (Bernardes, 2004).....	17
Fig. I.15. Vue verticale et vue de dessus de trois configurations de turbines : (a) type à axe vertical unique ; (b) type à axe vertical multiple ; (c) type à plusieurs axes horizontaux.....	20
Fig. I.16. Principe de stockage de chaleur sous collecteur.....	21
Fig. I.17. Projet Centrale à cheminée solaire de Manzanares en Espagne.....	22
Fig. I.18. Projet Cheminée solaire de Namibien.....	24
Fig. I.19. Prototypes expérimentaux des cheminées solaires.....	30
Fig. I.20. Centrale à Cheminée solaire géothermique hybride.....	30

Chapitre-II-

Fig. II.1. Domaine d'étude et conditions aux limites.....	33
Fig. II.2. Structure d'ANSYS Fluent CFD.....	35
Fig. II.3. Maillage utilisé dans notre étude numérique CFD.....	36
Fig. II.4. Cycle réel de la cheminée solaire.....	37

Chapitre-III-

Fig. III.1. Schéma dimensionnelle en 3D de prototype.....	43
Fig. III.2. Fondation du Collecteur utilisé en bois.....	44
Fig. III.3. Le collecteur en pastique PVC utilisé.....	44

Fig. III.4. La cheminée utilisé avec un support en acier.....	45
Fig. III.5. Vue générale du prototype cheminée solaire.....	45
Fig. III.6. Préparation d'emplacement de couverture en verre.....	46
Fig. III.7. Le collecteur carré (5x5 m) avec couverture en	46
Fig. III.8. Schéma 3D du support cheminée installé.....	47
Fig. III.9. La cheminée de prototype n°2.....	47
Fig. III.10. Vue générale du prototype cheminée solaire.....	49
Fig. III.11. Couche de 0,05 m de gravier.....	49
Fig. III.12. Couche de 0,05 m de sable.....	49
Fig. III.13. Couche en plastique transparent.....	49
Fig. III.14. Couche de 0,025 m de laine de verre.....	49
Fig. III.15. Couche de 0,1 m de gravier.....	49
Fig. III.16. Couche de 0,1 m de sable.....	49
Fig. III.17. Couche de plastique noire.....	40
Fig. III.18. Support de la cheminée fixé sur terre.....	40
Fig. III.19. La cheminée installée dans le prototype n°3.....	51
Fig. III.20. Vue générale du prototype cheminée solaire n°3.....	51
Fig. III.21. Schéma de la centrale à cheminée solaire proposée avec source géothermique.....	52
Fig. III.22. Réchauffeur d'eau électrique intégrée avec le prototype CCS.....	53
Fig. III.23. Serpentin en cuivre installée à l'intérieur du collecteur de CCS.....	53
Fig. III.24. Lieux d'installation des thermocouples pour mesure les températures.....	54
Fig. III.25. Thermocouple de type K utilisé.....	54
Fig. III.26. Mac Solar pour mesure le rayonnement solaire.....	55
Fig. III.27. Anémomètre à hélice testo 416 Pour mesure la vitesse de l'air.....	56
Fig. III.28. Appareil chauvin-Arnoux C.A 1051.....	57

Chapitre –IV-

Fig. IV.1. Variation du rayonnement solaire et température ambiante mesurés en fonction du temps.....	60
Fig. IV.2. Comparaison de la vitesse de l'air calculé par CFD et de la vitesse de l'air mesurée à l'entrée de la cheminée avec le rayonnement solaire en fonction du temps.....	61
Fig. IV.3. Lignes de courant d'air et champ de température à l'intérieur du prototype n° 1 par ANSYS FLUENT CFD.....	61
Fig. IV.4. Champ de vitesse de l'air dans le prototype cheminée solaire par ANSYS FLUENT.	62

Fig. IV.5. Vecteurs de vitesse de l'air dans le prototype CCS par ANSYS FLUENT CFD.....	63
Fig. IV.6. Variation de la puissance de CCS calculé par le modèle mathématique et du rayonnement solaire en fonction du temps.....	63
Fig. IV.7. Effet de la hauteur de la cheminée sur l'efficacité de la CCS.....	64
Fig. IV.8. Effet de la hauteur de la cheminée sur la puissance du prototype CCS.....	64
Fig. IV.9. Variation de la puissance calculée par le modèle mathématique en utilisant les du CCS de Manzanares et les paramètres climatique d'Ouargla en fonction du temps.....	65
Fig. IV.10. Distributions des températures dans le prototype n°2 en fonction du temps.....	66
Fig. IV.11 : Variation de la Vitesse de l'air mesurée à la sortie du collecteur et le rayonnement solaire en fonction du temps (15 Mars 2017).....	67
Fig. IV.12: Variation de la Vitesse de l'air mesurée à la sortie du collecteur et la température ambiante en fonction du temps (15 Mars 2017).....	67
Fig. IV.13 : Variation de la vitesse de l'air mesuré et le rayonnement solaire en fonction Du temps sans intégration de réchauffe d'eau électrique (8 Février 2017).....	68
Fig. IV.14. Variation de la vitesse de l'air mesuré et la température ambiante en fonction du temps sans l'intégration de réchauffeur d'eau électrique (8 Février 2017).....	69
Fig. IV.15. Variation de la vitesse de l'air avec la température de l'eau à l'entrée et de la sortie du collecteur en fonction du temps avec intégration du réchauffeur d'eau électrique.....	70
Fig. IV.16. Comparaison les paramètres météorologiques pour les deux jours le 8 et 27 Février 2017.....	70
Fig. IV.17. Variation de la vitesse de l'air à l'entrée de la cheminée avec et sans intégration du réchauffeur d'eau électrique en fonction du temps (8 et 27 Février 2017)	71
Fig. IV.18. Variation de la puissance calculé de la CCS avec et sans intégration de réchauffeur d'eau électrique en fonction du temps (8 et 27 Février 2017).....	72

Liste des tableaux

Chapitre-I-

Table. I.1. Comparaison des Puissances.....	8
Table. I.2. Comparaison des Prix du kWh.....	8
Table. I.3. Dimensions principales et données techniques du prototype de CCS Manzanares....	23
Table I.4. Caractéristiques du prototype de cheminée solaire.....	26

Chapitre-II-

Table. II.1. Expressions des Φ , $\Gamma\Phi$, $P\Phi$ et $S\Phi$ Pour les équations de transport.....	32
---	-----------

Chapitre-III-

Table. III.1. Caractéristiques techniques du thermocouple.....	54
Table. III.2. Caractéristiques techniques de l'appareil Mac Solar.....	55
Table. III.3. Caractéristiques techniques de l'appareil Anémomètre à hélice testo 416.....	56
Table. III.4. Caractéristiques techniques de l'appareil chauvin-Arnoux C.A 1051.....	57

Sommaire

Résumé	I
Abstract	II
ملخص	III
Dédicaces	IV
Remerciements	V
Nomenclature	VI
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	X
Sommaire	XI
Introduction générale	1

Chapitre -I-

État de l'art sur la cheminée solaire

I.1.Introduction.....	4
I.2. Pourquoi utiliser des centrales à cheminée solaire?.....	6
I.2.1. Avantages.....	6
I.2.2. Inconvénients.....	7
I.3. Comparaisons avec d'autres types des centrales.....	7
I.3.1. Comparaison des Puissances.....	7
I.3.2. Comparaison des Prix du kWh.....	8
I.4. Historique.....	8
I.5. Principe de Fonctionnement.....	11
I.6. Composants de cheminée solaire.....	12
I.6.1. Construction et matériaux.....	12
I.6.1.1. Le Collecteur.....	12
I.6.1.2. La Cheminée.....	15
I.6.1.3. La Turbine.....	17
I.7. Le stockage d'énergie.....	20
I.8. Projets des Centrales à Cheminée Solaire.....	22
I.8.1. Projet Prototype de Manzanares.....	22
I.8.2. Projet Prototype Australien.....	23
I.8.3. Le projet espagnol.....	23
I.8.4. Le projet Namibien.....	24

I.8.5. Le projet chinois.....	25
I.9. Les prototypes expérimentaux.....	25
I.10. Cheminée géothermique-solaire.....	30
I.11. Conclusion	31

**Chapitre -II-
Méthode Numérique et Modèle Théorique**

II.1. Introduction	32
II.2. Méthode Numérique.....	32
II.2.1. Modèle mathématique.....	32
II.2.2. Modèle CFD utilisé.....	34
II.2.3. Configuration numérique.....	35
II.2.4. Génération de maillage.....	35
II.3. Modèle Théorique.....	36
II.3.1. Cycle thermodynamique de la cheminée solaire.....	36
II.3.2. Modélisation de la performance de la CCS.....	38
II.3.2.1. Le collecteur solaire.....	38
II.3.2.2. La cheminée.....	39
II.3.2.3. La Turbine.....	40
II.4. Conclusion.....	41

Chapitre -III-

Equipements et Dispositif Expérimental

III.1. Introduction.....	43
III.2. Les phases de construction des prototypes installés.....	43
III.2.1. Prototype n°1 avec collecteur rectangulaire en plastique.....	43
III.2.1.1. Structure et composants.....	44
III.2.2. Prototype n°2 avec collecteur carré en plastique.....	46
III.2.2.1. Structure et composants.....	46
III.2.3. Prototype n°3 avec collecteur circulaire en plastique.....	48
III.2.3.1. Structure et composants.....	48
III.2.3.2. Système d'échange de chaleur intégré avec la cheminée solaire.....	52
III.3. Instruments des mesures utilisées.....	53
III.3.1. Mesure de la température.....	54
III.3.2. Mesure du rayonnement solaire global.....	55

III.3.3. Mesure de la vitesse de l'air.....	56
III.3.3.1. L'anémomètre à hélice testo 416.....	56
III.3.3.2. Anémomètre à fil chaud appareil chauvin-Arnoux C.A 1051.....	57
III.4. Conclusion.....	58

Chapitre -IV-

Résultats et Discussions

IV.1.Introduction.....	59
IV.2. Prototype n°1 avec collecteur rectangulaire en plastique.....	59
IV.2.1. Mesure des paramètres environnementaux.....	59
IV.2.2. Validation de la vitesse de l'air prédictive du collecteur.....	60
IV.2.3. Flux d'air à l'intérieur de la cheminée.....	61
IV.2.4. Estimation de l'efficacité et de la puissance.....	63
IV.3. Prototype n°2 avec collecteur carré en verre.....	65
IV.3.1. Mesure des températures dans la cheminée solaire.....	65
IV.3.2. Mesure la vitesse de l'air et rayonnement solaire.....	66
IV.4. Prototype n°3 avec collecteur circulaire en plastique.....	68
IV.4.1. L'effet des paramètres environnementaux sur la vitesse d'entrée de la cheminée sans l'intégration du réchauffeur d'eau électrique.....	68
IV.4.2. L'effet du réchauffeur d'eau électrique intégré avec la cheminée solaire.....	69
IV.4.3. Estimation de la puissance de la cheminée solaire.....	72
IV.5. Conclusion.....	73
Conclusion générale et perspectives.....	75
Références Bibliographiques.....	77

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

L'augmentation du CO₂ libéré principalement par l'utilisation des combustibles fossiles peut avoir plusieurs effets négatifs sur notre écosystème, notamment l'extinction d'animaux, le recul des glaciers, la perte de forêts productives et de biodiversité, l'acidification des océans, etc. [1].

Avec le problème de la pollution mondiale et de l'épuisement des réserves d'énergie fossile, les énergies renouvelables et propres semblent être les meilleurs moyens et la source la plus fiable pour l'utilisation énergétique de l'humanité dans un avenir proche.

En raison de la nécessité urgente d'accélérer l'évolution des technologies énergétiques de pointe pour relever les défis universels de l'énergie propre et du développement durable, l'électricité thermo-solaire (ETS) a une capacité significative de satisfaire les demandes en énergie électrique [2].

La forme d'énergie renouvelable la plus abondante et la mieux distribuée dans le monde est l'énergie solaire, elle constitue un atout majeur pour les régions arides et semi-arides. Une gamme de technologies solaires est utilisée dans le monde entier pour récupérer l'énergie solaire du soleil. Au cours des dernières années, une innovation passionnante a été introduite par des chercheurs appelée «cheminée solaire». Il s'agit d'une centrale de production d'énergie électrique, qui convertit l'énergie solaire thermique en énergie électrique par un processus de transfert de chaleur complexe. La mise en œuvre de ce projet a une grande importance pour le développement de nouvelles ressources énergétiques et la commercialisation du système de production d'énergie de ce type et aidera les pays en développement à promouvoir le développement rapide de la production d'énergie électrique par des flux d'air chaud [3].

La conversion de l'énergie solaire en chaleur et en énergie électrique est devenue le principal centre de recherche dans le monde. La production d'énergie électrique par les centrales thermiques et les cheminées solaires est maintenant une réalité, en particulier dans les régions fortement ensoleillées. C'est une technologie prometteuse qui permet d'exploiter et de convertir l'énergie solaire en énergie électrique en utilisant trois composants ; à savoir : collecteur solaire, tour ou cheminée et turbogénérateur. Les principaux problèmes rencontrés dans les centrales solaires à cheminée sont : efficacité faible, grandes dimensions et une forte dépendance du rayonnement solaire. Cependant, les performances du système peuvent être optimisées et améliorées par l'intégration d'une autre source d'énergie thermique et l'utilisation d'un stockage efficace de l'énergie solaire [4].

Le projet de centrale à cheminée solaire pourrait être également intégrer à d'autres dispositifs solaires tels que le dessalement de l'eau de mer, ainsi que des chauffages solaires ou des séchoirs solaires afin d'améliorer leurs performances [5,6].

Notre étude porte sur la faisabilité de l'intégration de deux énergies renouvelables à savoir l'énergie solaire et l'énergie géothermique, pour la production d'énergie électrique. Un prototype de cheminée solaire à petite échelle a été réalisé à l'université de Kasdi Merbah de Ouargla où la durée l'ensoleillement solaire moyenne est d'environ 3500 h/an [7] et l'existence de la source géothermique de la nappe albiennne. Le but de cette étude est d'assurer le fonctionnement de la cheminée solaire pendant la nuit et lorsqu'il y a un faible rayonnement solaire par la combinaison avec la source géothermique. La disponibilité de l'eau de la nappe albiennne dans la région du Sahara, en particulier dans la région de Ouargla, nous a permis d'exploiter l'énergie thermique de cette source dans les cheminées solaires ainsi que pour l'agriculture. L'eau de la source géothermique circule dans des conduites installées à l'intérieur de la serre à une température relativement élevée, comprise généralement entre 40 ° C et 70 ° C. L'air à l'intérieur du collecteur est en contact avec les tubes en cuivre remplis d'eau chaude provoque un transfert de chaleur par convection. Cette chaleur provient d'un transfert de chaleur entre l'eau et les parois des tubes. Dans notre étude, on a utilisé un réchauffeur d'eau électrique pour chauffer l'eau et remplacer la source géothermique albiennne.

➤ **Objectifs de la thèse :**

- Réaliser une étude bibliographique détaillée sur les centrales à cheminée solaire, leurs concepts opérationnels, leurs composants et leurs paramètres de performance généraux.
- Réaliser et installer des prototypes à cheminée solaire à l'Université Kasdi Merbah d'Ouargla.
- Tester et simuler numériquement en utilisant le code commercial ANSYS Fluent le prototype à cheminé solaire installé.
- Déterminer théoriquement les performances des prototypes cheminés solaire dans diverses conditions opérationnelles.

Cette thèse est répartie en quatre chapitres comme suit.

Chapitre(I) présente l'historique et une étude bibliographique approfondie sur les cheminées solaires, le principe et le mode de fonctionnement et les travaux réalisés sur les différentes cheminées solaires à travers le monde.

Chapitre(II) présente un modèle de simulation numérique sur la cheminée solaire par ANSYS Fluent en 2D, une analyse théorique détaillée utilisant le cycle thermodynamique est également présentée dans ce chapitre afin d'évaluer les performances de la cheminée solaire.

Chapitre(III) présente d'une description détaillée sur la réalisation des prototypes de la cheminée solaire à travers les phases de conception et les mesures des différents paramètres considérés

Chapitre (IV) présente des résultats des simulations numériques CFD et les résultats du modèle théorique ainsi que les résultats expérimentaux de la cheminée solaire. Les résultats obtenus sont accompagnés par des discussions sur l'évolution des paramètres étudiés qui influent sur la performance de la cheminée solaire.

Enfin, une conclusion générale qui résume les résultats obtenus dans notre travail réalisé avec quelques recommandations.

Chapitre -I-

ETAT DE L'ART SUR LES CHEMINEES SOLAIRES

I.1. Introduction

Une centrale à cheminée solaire est un système composé d'un collecteur circulaire surélevé à une certaine hauteur du sol, et une cheminée au centre du collecteur, le schéma est illustré dans la figure (I.1). Une seule turbine ou plusieurs turbines sont installées à la base de la cheminée ou à proximité de celle-ci, ces dernières sont connectées à des générateurs électriques.

Les rayons du soleil pénètrent dans le collecteur et atteignent la surface du sol, ces derniers chauffent l'air emprisonné sous le collecteur, ce qui provoque sa montée dans la cheminée. L'air qui monte dans la cheminée entraîne les turbogénérateurs qui produisent de l'électricité.

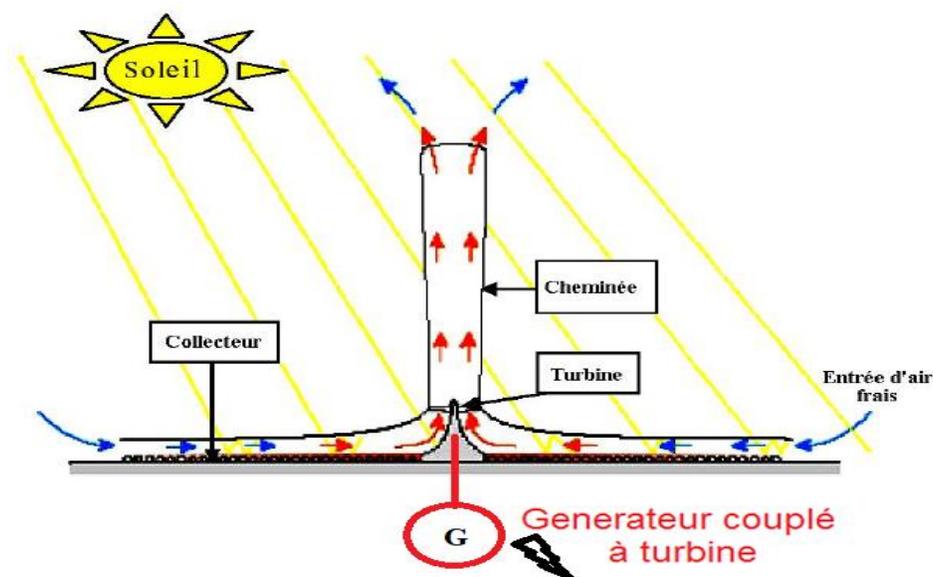


Fig. I.1 : Schéma de principe de fonctionnement d'une centrale à cheminée solaire

Un prototype de centrale à cheminée solaire a été construit à Manzanares en Espagne en 1982 dans le cadre d'un partenariat entre l'entreprise allemande d'ingénierie des structures Schlaich Bergermann et le gouvernement espagnol (figure I.2). La centrale a un diamètre de collecteur de 244 m, une cheminée de 194 m de haut et 10 m de diamètre. Elle était conçue pour produire 50 kW. Même si elle n'atteignait pas la puissance maximale prévue dans la conception, la centrale a fonctionné avec succès pendant sept ans, ce qui prouve que le concept était techniquement valable.



Fig. I.2 : La Centrale à cheminée solaire de Manzanares en Espagne

Depuis l'installation de la centrale pilote, diverses études ont été menées sur la possibilité de construire de grandes centrales à cheminée solaire. Selon ces études, le diamètre des collecteurs dans ces installations sera compris entre 4 000 et 7 000 m, la hauteur des cheminées de 1 000 à 1 500 m avec un diamètre de cheminée de l'ordre de 160 m et devrait générer une puissance maximale comprise entre 85 MW et 275 MW, en fonction de la taille de centrale cheminée solaire. L'engagement le plus notable en faveur de la construction d'une telle centrale est une joint-venture actuelle entre une société australienne, EnviroMission Ltd. et la société allemande Schlaich Bergermann und Partner. Ces sociétés recherchent actuellement de nouvelles opportunités d'investissement et envisagent de construire une centrale solaire à grande échelle (figure I.3) près de Mildura, l'Australie dans un avenir proche.



Fig. I.3 : Image générée par ordinateur d'une centrale à cheminée solaire à grande échelle proposée par Schlaich Bergermann und Partner, 2006.[8]

I.2. Pourquoi utiliser les centrales à cheminée solaire ?

La section suivante répertorie les avantages de la production d'énergie à l'aide de la technologie des centrales à cheminée solaire et évalue également les inconvénients par rapport à d'autres sources d'énergie. Nombreux de ces facteurs ont été mentionnés par Schlaich (1994) [9], Trieb et al. (1997) [10], et Gannon (2002)[11].

I.2.1. Avantages

- ❖ La centrale à cheminée solaire utilise le rayonnement solaire direct et diffus. Par conséquent, bien que réduite, l'installation génère toujours de l'énergie dans les temps nuageux.
- ❖ Le sol situé sous le collecteur d'une centrale à cheminée solaire sert de mécanisme de stockage naturel de l'énergie afin de garantir le fonctionnement continu de la centrale pendant la nuit.
- ❖ Les matériaux de construction (principalement le verre et le béton) pour une telle installation sont relativement peu coûteux et facilement disponibles.
- ❖ La centrale à cheminée solaire utilise une technologie simple. À l'exception peut-être du turbogénérateur, la technologie d'une centrale à cheminée solaire ne deviendra pas facilement obsolète.
- ❖ La centrale n'a besoin d'aucun combustible non renouvelable pour fonctionner et ne produit aucune émission. Cela signifie également que la centrale n'aura jamais à faire face à la hausse des coûts de carburant.
- ❖ Aux sites de la centrale appropriés tels que les zones désertiques, le rayonnement solaire est une source d'énergie d'entrée très fiable.
- ❖ La centrale a une longue durée de vie (au moins 80 à 100 ans).
- ❖ Les centrales à cheminée solaire ne nécessitent aucune eau de refroidissement.
- ❖ Faible coût de maintenance.

Les avantages mentionnés ci-dessus sont les principaux avantages d'une centrale à cheminée solaire. Parmi les avantages secondaires de la construction d'une telle centrale, il y a la création d'emplois pendant la période de construction et le développement du tourisme dans la région (en raison du fait qu'une structure d'une telle envergure n'a jamais été construite auparavant). La figure (I.4) illustre les régions du monde où le rayonnement solaire annuel est élevé, les zones jaunes recevant plus de 1950 kWh / m² par an, tandis que les zones rouges recevant plus de 2 200

kWh / m² par an. Les zones jaunes ou rouges sont des endroits idéaux pour les centrales solaires à cheminée.

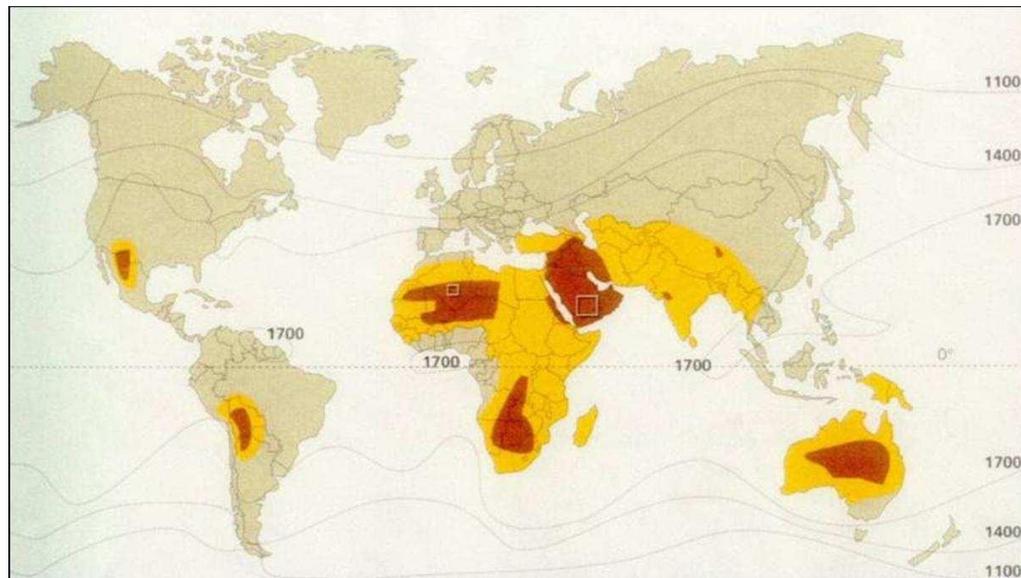


Fig. I.4 : Rayonnement solaire global annuel

I.2.2. Inconvénients

- Pour être économiquement viables, les centrales à cheminée solaires doivent être construites à très grande échelle. En raison de sa taille, le coût en capital initial d'une telle centrale est très élevé.
- La puissance fournie n'est pas constante tout au long de la journée ou de l'année. La production en période de pointe de la demande en énergie (tôt le matin et en début de soirée) est faible, tandis que la production d'électricité atteint son maximum en période de faible demande en électricité.
- La construction de la centrale à cheminée solaire nécessite d'énormes quantités de matériaux qui posent des problèmes logistiques concernant la disponibilité et le transport des matériaux.

I.3. Comparaisons des CCS avec d'autres types des centrales électriques

I.3.1. Comparaison des puissances

Le tableau (I.1) illustre les valeurs des puissances électriques produites pour les centrales électriques des différents types (cheminée, photovoltaïque, et nucléaire), où il est clairement observé que la production d'électricité par la centrale nucléaire est la plus grande comparée aux autres types au monde.

Table. I.1 : Comparaison des Puissances [12]

Cheminée solaire	Photovoltaïque	Nucléaire
Manzanares : 50 KW	Ordinaire : 5 MW	Ordinaire : 1000 MW par réacteur
Ciudad Real : 40 MW	Les plus grandes : 60 MW	Civaux : 2*1450 MW
Australie : 200 MW	Andasol 1, 2, 3 : 3*50 MW	EPR : Puissance électrique : 1650 MW
Namibie : 400 MW		

I.3.2. Comparaison des Prix du kWh

Le tableau (I.2) présente les prix du kWh des puissances électriques produites par différents types de technologie des centrales électriques au monde (cheminée solaire, photovoltaïque, et nucléaire), où le prix le moins chère de kWh trouvé dans la centrale à cheminée solaire par rapport les autres types des centrales électrique.

Table. I.2 : Comparaison des Prix du kWh [12]

Cheminée solaire	Photovoltaïque	Nucléaire
Estimations : 7 € cents pour une centrale de 200 MW 20 € cents pour une centrale de 5 MW	Amareleja (Portugal) : 28 € cents (46 MW) Andasol (Espagne) : 27 € cents (50 MW) Mildura (Australie) : 9 € cents (154 MW)	Plus vague : 11 € cents, sans compter le prix de l'élimination des déchets, des assurances accidents, et du démentiement des centrales.
cheminée solaire : 2 € cents		

I.4. Historique

Des nombreux chercheurs du monde entier ont présenté divers projets de cheminées solaires. Environ de l'année 1500 le dessinateur Léonardo da Vinci a dessiné une cheminée nommée fumigène (figure I.5-a) [13]. Et l'idée d'utiliser une cheminée solaire pour produire de l'électricité a été proposée pour la première fois par l'ingénieur espagnol Isodoro Cabanyes en 1903. Une autre description aussi a été élaborée en 1931 par l'écrivain scientifique allemand Hans

Gunther [14]. Au 25 août 1903 «La Energia Eléctrica», a proposé un projet intitulé «Projet de moteur solaire» (figure I.5-b). Dans cette machine, un collecteur ressemblant à une grande jupe réchauffe l'air et le transporte vers le haut vers un ventilateur pentagonal à l'intérieur d'une structure en brique rectangulaire ressemblant vaguement à une cheminée (sans feu). L'air chauffé fait tourner le ventilateur et génère de l'électricité avant qu'il ne s'échappe par une cheminée de 63,87 m de hauteur, et se refroidis et rejointe l'atmosphère [15].

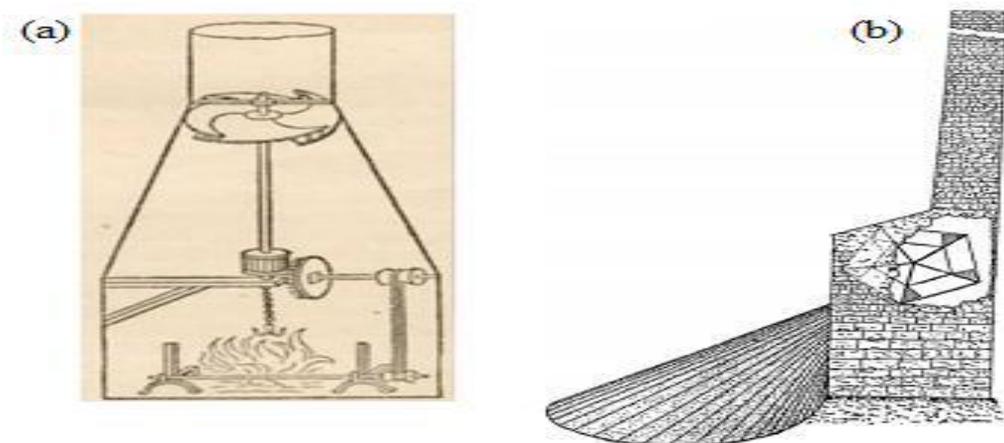


Fig. I.5 : (a) La cheminée de Léonard da Vinci, (b) Projet de moteur solaire proposé par Isidoro Cabanyes.

En 1926, le Professeur Bernard Dubos proposa à l'Académie française des sciences de construire une centrale solaire aéro-électrique en Afrique du Nord avec sa cheminée solaire sur le flanc de la montagne, après avoir observé plusieurs tourbillons de sable dans le sud du Sahara (figure I.6 et I.7) [16].

L'auteur affirme qu'il est possible d'atteindre une vitesse de l'air ascendante de 50 m /s dans la cheminée, dont l'énorme quantité d'énergie peut être extraite par les éoliennes [17].

L'académie a recommandé de donner suite à l'idée de Dubos, en particulier en Afrique du Nord, qui n'a pas de carburant et le besoin de la puissance. En fait, Dubos avait à l'esprit les monts de l'Atlas de l'Afrique du Nord lorsqu'il élaborait ses plans [17]. En 1956, il a déposé son premier brevet en Algérie. Il produisait artificiellement un vortex atmosphérique ancestral dans une sorte de buse de Laval de forme ronde et récupérait de l'énergie au moyen de turbines. Nazare a reçu un brevet français pour son invention en 1964 (figure I.8) [16]. En 1975, l'Américain Robert

Lucier a déposé une demande de brevet fondée sur une conception plus complète. Ce brevet a été délivré en 1981 [16].

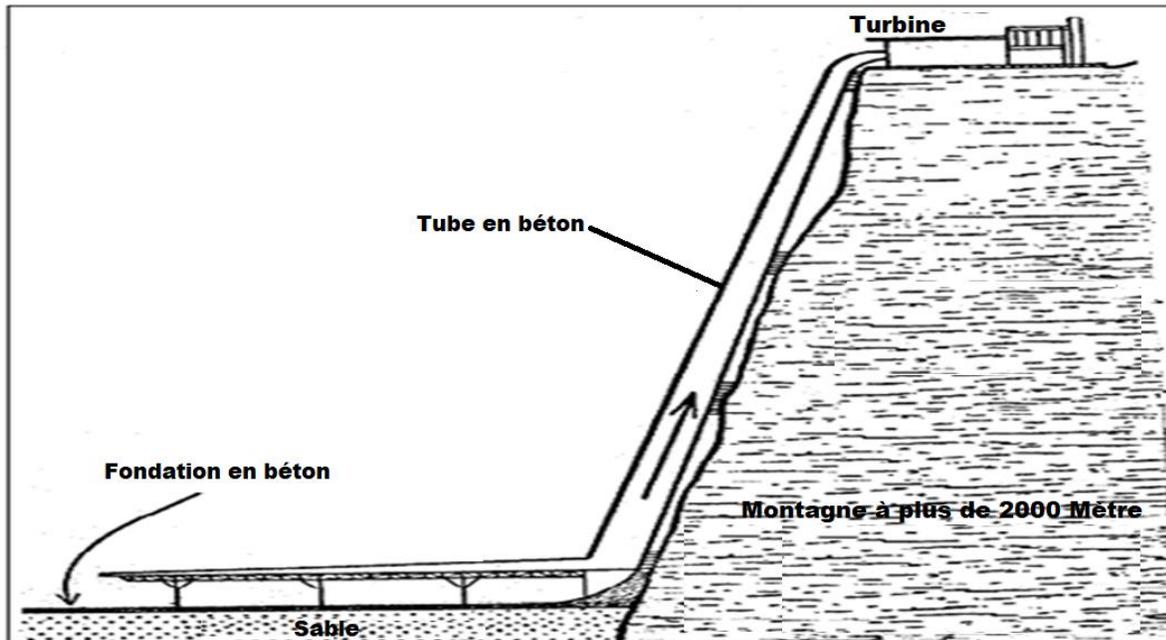


Fig. I.6 : Principe de la centrale du professeur Dubos

Dès 1982, une équipe dirigée par l'ingénieur civil allemand Jörg Schlaich a pris l'initiative de construire un prototype à Manzanares en Espagne, d'une hauteur de 200 m et d'une puissance maximale de 50 kW [18]. En 2002, Time Magazine a identifié ce projet comme l'une des meilleures inventions de l'année.



Fig. I.7 : Cheminée solaire dans le désert marocain imaginé par Dubos.



Fig. I.8 : La tour solaire du professeur NAZARE.

Le principe de fonctionnement est considéré comme révolutionnaire basé sur la monter d'air chaud à travers la cheminée [14].

I.5. Principe de Fonctionnement de la cheminée solaire

Comme présenté à la figure I.1, une cheminée solaire convertit le rayonnement solaire en électricité en combinant trois principes bien connus : l'effet de serre, la tour et les éoliennes d'une manière nouvelle. L'air chaud est produit par le soleil sous une grande verrière [19]. Les rayons solaires directs et diffus frappent le toit en verre, où des fractions spécifiques de l'énergie sont réfléchies, absorbées et transmises. Les quantités de ces fractions dépendent de l'angle d'incidence solaire et des caractéristiques optiques du verre, telles que l'indice de réfraction, l'épaisseur et le coefficient d'extinction. Le rayonnement solaire transmis frappe la surface du sol ; une partie de l'énergie est absorbée, tandis qu'une autre partie est renvoyée vers le toit, où elle est générée par le gain. La réflexion multiple du rayonnement se poursuit, entraînant une fraction plus élevée de l'énergie absorbée par le sol, connue sous le nom de produit d'absorbance / transmittance du sol. Grâce au mécanisme de convection naturelle, la surface chaude du sol réchauffe l'air adjacent, ce qui provoque sa remontée. L'air flottant monte dans la cheminée de l'installation, aspirant ainsi davantage d'air au périmètre du collecteur et initiant ainsi une convection forcée qui chauffe plus rapidement l'air du collecteur. Par convection mixte, l'air chaud du capteur réchauffe la face inférieure du toit du capteur. Une partie de l'énergie absorbée par la surface du sol est acheminée vers la terre la plus froide, tandis qu'un échange de rayonnement a également lieu entre la surface de la surface chaude et le toit du collecteur plus froid. À son tour, par convection naturelle et forcée, le toit du collecteur transfère de l'énergie de sa surface à l'air ambiant adjacent [18].

Au fur et à mesure que l'air s'écoule du périmètre du collecteur vers la cheminée, sa température augmente tandis que la vitesse de l'air reste à peu près constante à cause de la hauteur croissante du collecteur. L'air chauffé monte dans la cheminée, où il refroidit à travers les parois de la cheminée. La cheminée convertit la chaleur en énergie cinétique. La différence de pression entre la base de la cheminée et la pression ambiante à la sortie peut être estimée à partir de la différence de densité. Cela dépend des températures de l'air à l'entrée et au sommet de la cheminée. La différence de pression disponible pour entraîner la turbine peut être réduite par la perte de friction dans la cheminée, les pertes à l'entrée et la perte d'énergie cinétique de sortie [19]. Au fur et à

mesure que l'air du collecteur circule dans la où les turbines, l'énergie cinétique de l'air fait tourner les aubes de la turbine qui entraînent à leur tour le où les générateurs [18].

I.6. Composants de cheminée solaire

I.6.1. construction et matériaux

I.6.1.1. Le Collecteur

Le composant principal d'une centrale à cheminée solaire est le collecteur solaire. Les collecteurs d'énergie solaire sont des types spéciaux d'échangeurs de chaleur qui transforment l'énergie du rayonnement solaire en énergie interne du moyen de transport [20]. Le collecteur est la partie de la cheminée qui produit de l'air chaud par effet de serre. Il a un toit constitué d'un film plastique ou d'un film de verre. Le matériau du toit est tendu horizontalement à deux ou six mètres du sol (figure I.9). La hauteur du toit augmente à proximité de la base de la cheminée, de sorte que l'air est dévié vers la base de la cheminée avec une perte de friction minimale. Ce revêtement admet la composante de rayonnement solaire à ondes courtes et retient le rayonnement à ondes longues du sol chauffé. Ainsi, le sol sous le toit se réchauffe et transfère sa chaleur à l'air qui s'écoule radialement au-dessus de celui-ci de l'extérieur vers la cheminée (figure I.10) [21]. La structure du collecteur change en fonction du matériau de revêtement utilisé.

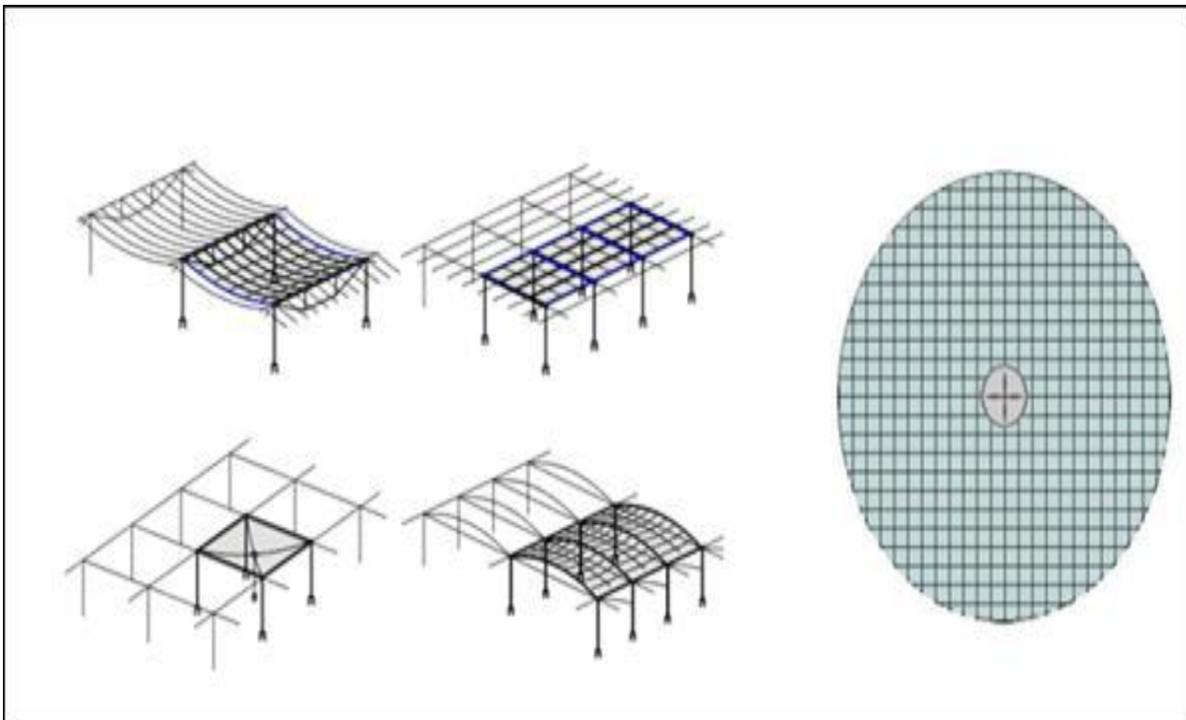


Fig. I.9 : Options de conception du collecteur

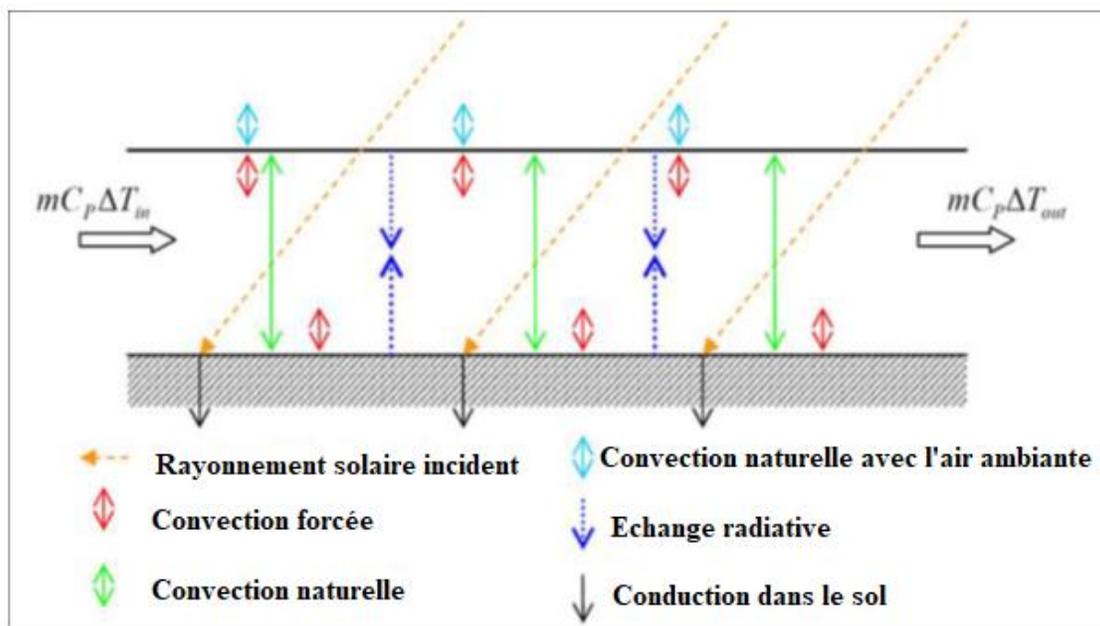


Fig. I.10 : Bilan thermique du collecteur

Des efforts de recherche importants ont été consacrés à la construction, à la simulation et à l'exploitation du collecteur de cheminée solaire. Pasumarthi et Sherif (1997) ont testé deux types de capteurs : (1) l'extension de la base du capteur et (2) l'introduction d'un absorbeur intermédiaire. Les températures expérimentales rapportées sont supérieures aux températures théoriquement prédites. Les auteurs expliquent que l'une des raisons de ce comportement est le fait que les températures expérimentales rapportées sont les températures maximales atteintes à l'intérieur de la cheminée, alors que le modèle théorique prédit la température de l'air en vrac [22]. Schlaich (1995) a présenté un modèle analytique. Les premiers modèles numériques ont été présentés par Kröger et Buys (1999), Gannon et Von Backström (2000), Hedderwick (2001) et Beyers et al. (2002) [23]. Kröger et Buys (1999) présentent leurs travaux dans leur article spécifique au collecteur de cheminée solaire [24]. Kröger et Buys (2001) présentent une analyse détaillée de la plante, y compris avec un collecteur transitoire prévoir les puissances maximales pour un cycle opérationnel d'un an [24]. Dans l'étude de Lombaard et al (2002), les températures de la plaque collectrice isolée et du verre du capteur solaire horizontal ont été mesurées et comparées aux valeurs théoriquement prédites pour différentes conditions ambiantes. En utilisant une équation appropriée pour la prévision du transfert de chaleur entre la couverture et l'environnement naturel, un bon accord a été obtenu entre les valeurs théoriquement prédites et les valeurs mesurées expérimentalement [25]. M. O. Hamdan (2004) a présenté un modèle

analytique permettant de prédire la performance d'une centrale à cheminée solaire. La tête de la turbine a un effet très important sur l'efficacité de deuxième loi et la puissance totale récoltée [26]. En 2005, les Canadiens E. Bilgen et J. Rheault (**Fig. I.11**) ont proposé la construction du capteur solaire dans une section en pente raide et effilée (à haute altitude). Cette idée est bien sûr une idée nouvelle et brillante car l'angle d'inclinaison aiderait à fournir une surface suffisante et efficace du capteur pour recevoir le rayonnement solaire, améliorant ainsi l'efficacité du capteur solaire. L'amélioration de l'efficacité des capteurs solaires augmenterait la quantité de chaleur utile nécessaire pour réchauffer l'air froid [27]

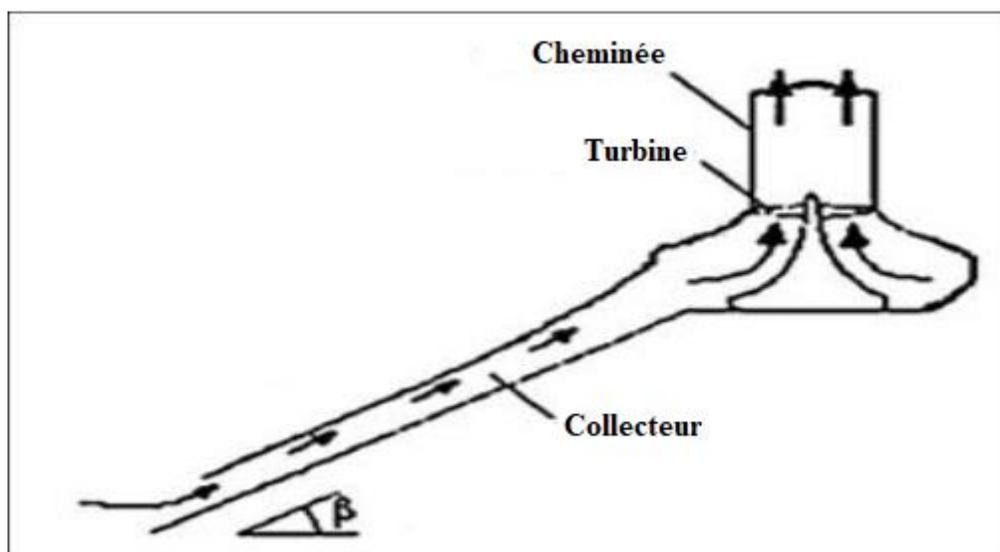


Fig. I.11 : Modèle de Bilgen et Rheault [27].

Pretorius et Kroger (2006) ont évalué l'influence d'une équation de transfert de chaleur convective développée, d'un coefficient de perte de charge plus précis à l'entrée d'une turbine, d'un verre collecteur de qualité et de divers types de sol sur les performances d'une centrale solaire à grande échelle [28]. N. Ninic (2006) [29] a analysé divers types de capteurs utilisant de l'air sec et humide. Plus récemment, un modèle mathématique pour la centrale solaire à cheminée inclinée est proposé. Le modèle comprend un détail de flux à l'intérieur d'un collecteur et les mécanismes interactifs entre le collecteur, la turbine et la cheminée [30].

Bernardes et al. a développé un modèle mathématique complet pour analyser un système de centrale solaire de cheminée à grande échelle avec un auvent à double et un collecteur avec une couche de stockage d'énergie et les performances des turbines envisagées, en comparant les

prévisions de simulation aux résultats expérimentaux du prototype de Manzanares, et a évalué le contrôle opérationnel stratégies applicables au CCS [31,32,33].

Bonnelle (2003) suggère d'utiliser un collecteur avec une structure nerveuse (figure I.12), conduisant à une séparation partielle des fonctions principales du collecteur, qui sont (1) le captage de la chaleur et (2) le transport de l'air chaud vers la tour. Cependant, il reste à prouver si une telle dérogation à la configuration standard avec un simple toit en verre améliorerait réellement les performances du capteur [23, 34].

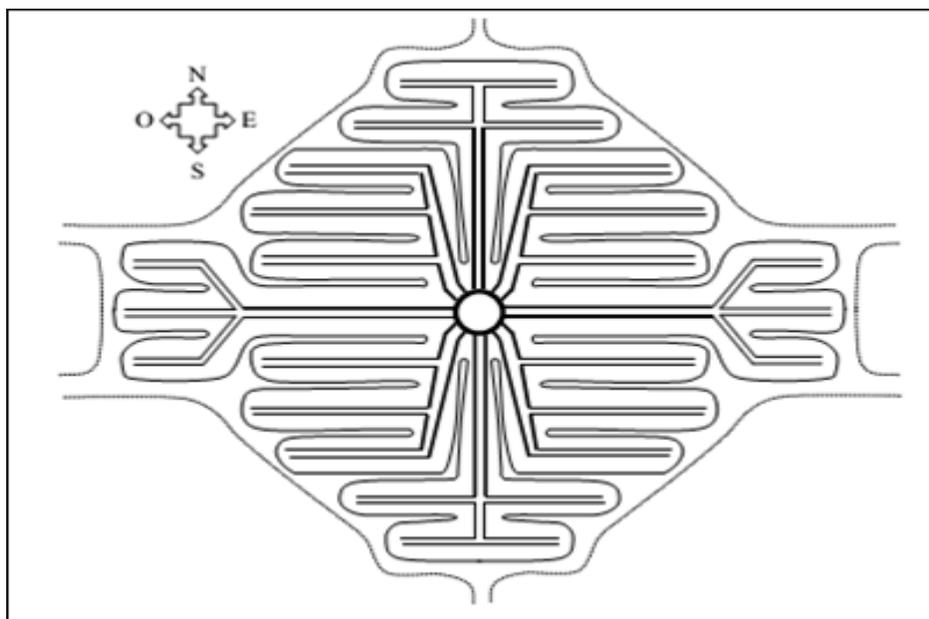


Fig. I.12 : Configuration du capteur solaire de Bonnelle [34].

I.6.1.2. La Cheminée

Tube de la cheminée ou la tour ; est la principale caractéristique de la cheminée solaire. La tour, qui agit comme une grande cheminée, est située au centre de la canopée de la serre et constitue le moteur thermique de la technologie. La tour crée un différentiel de température entre l'air froid en haut et l'air chauffé en bas. Cela crée un effet de cheminée, qui aspire l'air du bas de la tour du haut. La cheminée de l'installation est extrêmement haute et nécessitera une base stable tout en permettant la libre circulation de l'air à travers la turbine. Il serait également avantageux que la turbine soit aussi basse que possible dans la cheminée pour en simplifier la construction [24].

Il existe différentes méthodes pour construire une telle tour : tubes autoportants en béton armé, tubes en tôle d'acier supportés par des haubans, ou construction en treillis de câbles avec un revêtement de tôle ou de membranes (figures I.13 et 1.14) [35]. Les procédures de conception de

telles structures sont toutes bien établies et ont déjà été utilisées pour les tours de refroidissement ; ainsi, aucun nouveau développement n'est requis. Des études statiques et mécano-structurelles détaillées ont montré qu'il était opportun de rigidifier la tour en plusieurs étapes, de sorte qu'un matériau de paroi relativement mince suffirait. Notre solution consiste à utiliser des faisceaux de torons sous la forme de roues à rayons «plates» qui s'étendent sur la section transversale de la tour. C'est peut-être la seule nouveauté structurelle réelle dans ces tours par rapport aux structures existantes.

Schlaich (1994) a suggéré que le béton armé était considéré comme une structure de matériau de construction très haute. Des études ont montré que cette méthode de construction est pratiquement la solution la plus durable et la plus rentable [21, 36, 37]. Ces tours peuvent également être construites à l'aide d'autres technologies, notamment : des tours en acier haubané dont le cadre est recouvert de filets de câbles en acier, de membranes ou de films métalliques trapézoïdaux (1994). La hauteur maximale de la cheminée solaire est de 1000 m. Pour renforcer la structure de la cheminée haute et les gigantesques panneaux solaires, des raidisseurs à anneau de compression sont installés avec un espacement vertical [38].

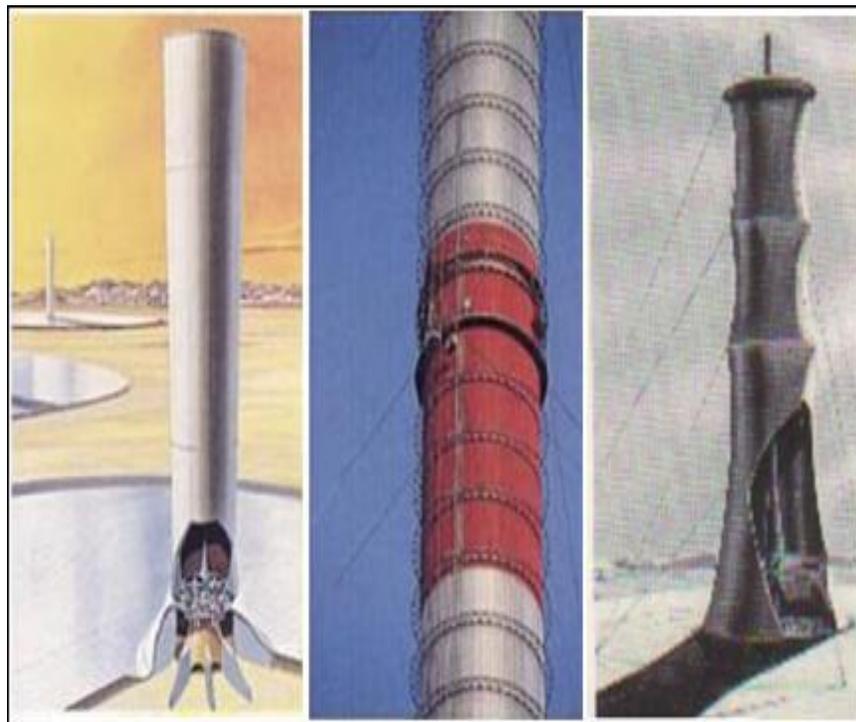


Fig. I.13 : Différentes technologies des cheminées [21].

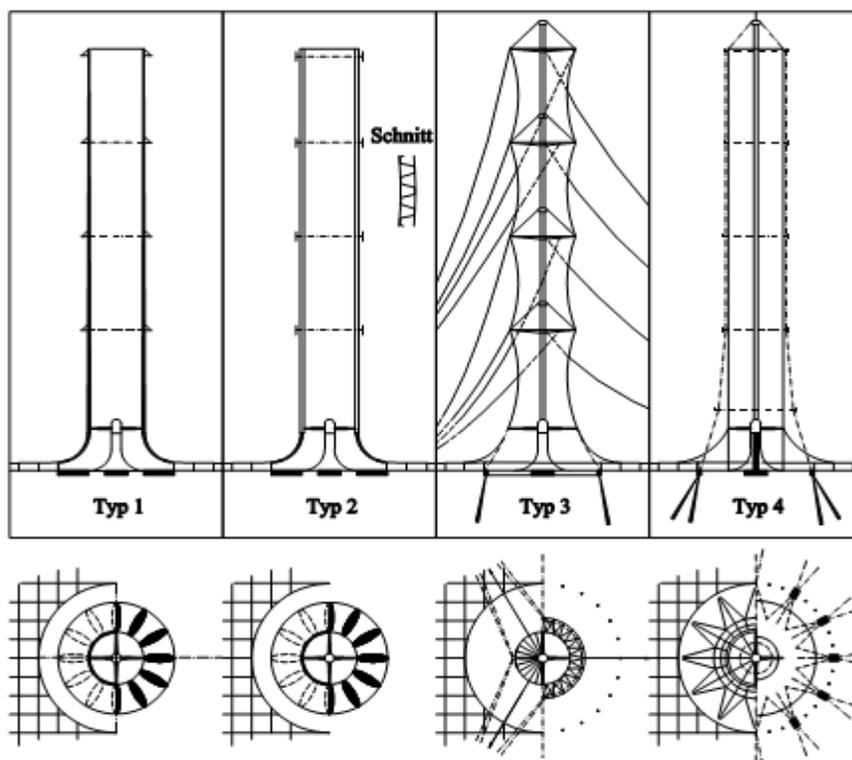


Fig. I.14 : Formes de construction de cheminée (Bernardes, 2004) [39].

I.6.1.3. La Turbine

La turbine de la cheminée solaire est un composant important de la centrale, car elle extrait l'énergie de l'air et la transmet au générateur. Cela a une influence significative sur l'installation car la chute de pression de la turbine et le débit massique de l'installation sont couplés. Les spécifications des éoliennes solaires sont, à bien des égards, similaires à celles des grandes éoliennes. Ils convertissent tous les deux de grandes quantités d'énergie dans le flux d'air en énergie électrique [18].

Dans les centrales solaires à cheminée solaire, les turbines sont canalisées et leur efficacité totale théoriquement réalisable est par conséquent de 100% la limite de Betz, qui est applicable aux centrales carénées. La direction du flux d'air entrant est connue et reste constante. Les turbines sont protégées des intempéries mais doivent faire face à des températures plus élevées. Les grands volumes de collecteur et de cheminée agissent comme un tampon empêchant les fluctuations importantes de la vitesse du flux d'air, c'est-à-dire que les charges dynamiques sur les aubes de la turbine et tous les autres composants rotatifs sont comparativement faibles. En

outre, la perte de charge des turbines dans les SCCP est environ 10 fois plus importante que dans les éoliennes [18].

Divers agencements et configurations de turbines ont été proposés pour l'unité de conversion de l'énergie des cheminées solaires (figure I.15). Une turbine à axe vertical unique sans aube d'entrée a été utilisée dans l'usine pilote de Manzanares [40]. Des configurations avec plusieurs turbines à axe vertical ont également été proposées [41], ainsi que des agencements de turbines comprenant une paire de rotors à rotation opposée, avec ou sans aubes directrices [42]. La circulation de l'air à l'intérieur de l'installation, la perte de charge et le débit peuvent être ajustés en faisant varier l'angle d'inclinaison des pales de la turbine [40]. Afin de prédire les performances de l'unité de conversion de cheminée solaire, divers modèles mathématiques ont été développés. L'étude bibliographique suivante porte sur les turbines à cheminée solaires. De nombreuses études ont été menées pour évaluer la chute de pression dans la turbine en tant que partie de la différence de pression totale disponible dans le système : Haaf et al. (1983), Mullet (1987), Schlaich (1995), Gannon et Von Backström (2000), Bernardes et al. (2003) [24]. Gannon (2002) et Gannon & Von Backström (2003) ont étudié la performance des turbines des centrales solaires à tour. Des suggestions de conception et d'aménagement des turbines sont proposées, tandis qu'un modèle expérimental est utilisé pour prédire les performances et l'efficacité des turbines [43,44]. Plus tard, les mêmes auteurs (2004) ont développé des équations analytiques en termes de débit de turbine, de coefficient de charge et de degré de réaction, pour exprimer l'influence de chaque coefficient sur le rendement de la turbine. L'objectif de ce travail était de prédire l'efficacité et les caractéristiques de fonctionnement des turbines à cheminée solaire afin d'aider à l'optimisation de la conception de centrales à cheminée solaire [45]. Liu et al. (2005) [36] ont réalisé une simulation numérique pour la centrale de cheminées solaires à gradations MW présentant les effets de la chute de pression dans la turbine sur le tirage et la puissance du système.

La turbine considérée dans cette étude est de type axial, avec des aubes directrices d'entrée radiales (aubes de stator) (figure I.16) [45]. Von Backström et al. (2006) ont mis au point deux analyses pour déterminer le rapport optimal entre la perte de charge de la turbine et la perte de charge disponible dans une centrale à cheminée solaire afin d'optimiser la puissance du fluide. L'objectif de cette étude était d'analyser analytiquement la validité et l'applicabilité de l'hypothèse

selon laquelle, pour un fluide maximal, le rapport optimal entre la perte de charge de la turbine et le potentiel de pression (différence de pression disponible du système) est de $2/3$ [46].

Pour déterminer les paramètres de conception préliminaires et les conditions de fonctionnement des turbines à cheminée solaire, nous comparons deux turbines à rotation inverse, l'une avec des aubes directrices, l'autre système à un seul canal. Les performances de conception et hors conception sont comparées dans trois tailles différentes d'installations de cheminée solaire. Dans cette étude, Denantes et Bilgen (2006) ont conclu que les turbines à rotation opposée sans aubes directrices avaient un rendement de conception inférieur et des performances supérieures à celles du modèle de turbine à une roue [43].

La possibilité technique d'utiliser le potentiel d'exploitation total a été suggérée, en partie pour la génération des travaux de la turbine et en partie pour la maintenance de la structure de circulation de l'air des GVC au-dessus du sol. Les hypothèses de base précédant la modélisation physique des GVC ont été fournies. Une analogie significative existe entre les structures d'écoulement de GVC et les tornades naturelles, jouant ainsi le rôle d'une confirmation presque expérimentale selon laquelle la structure de GVC proposée est techniquement réalisable (2006) [29].

Von Backstörn et Fluri (2007) ont mené une étude et développé deux analyses afin de déterminer le rapport optimal entre la perte de charge de la turbine et la perte de charge disponible dans une centrale à cheminée solaire pour une puissance maximale du fluide [47]. Nizetic et al (2010) ont développé une approche analytique simplifiée pour évaluer le facteur de perte de charge de la turbine dans les centrales à cheminée solaire. Ce facteur (ou taux de perte de charge dans les turbines, en fonction de la perte de charge totale dans la cheminée) est important car il est lié à la puissance de sortie. Les valeurs de facteur (ou de rapport) déterminées de la perte de charge de la turbine se situent dans une plage de valeurs conforme à celle d'autres études. Il a été conclu que, pour les centrales solaires à cheminée, les facteurs de perte de charge des turbines se situent dans la plage de 0,8 à 0,9. Cette approche analytique simplifiée est utile pour l'analyse préliminaire et l'évaluation rapide du potentiel des centrales solaires à cheminée [48]. Les relations entre la puissance d'extraction de la turbine, l'élévation de température dans la turbine, la vitesse et le débit massique sont présentées dans les travaux de Koonsrisuk (2012) [30].

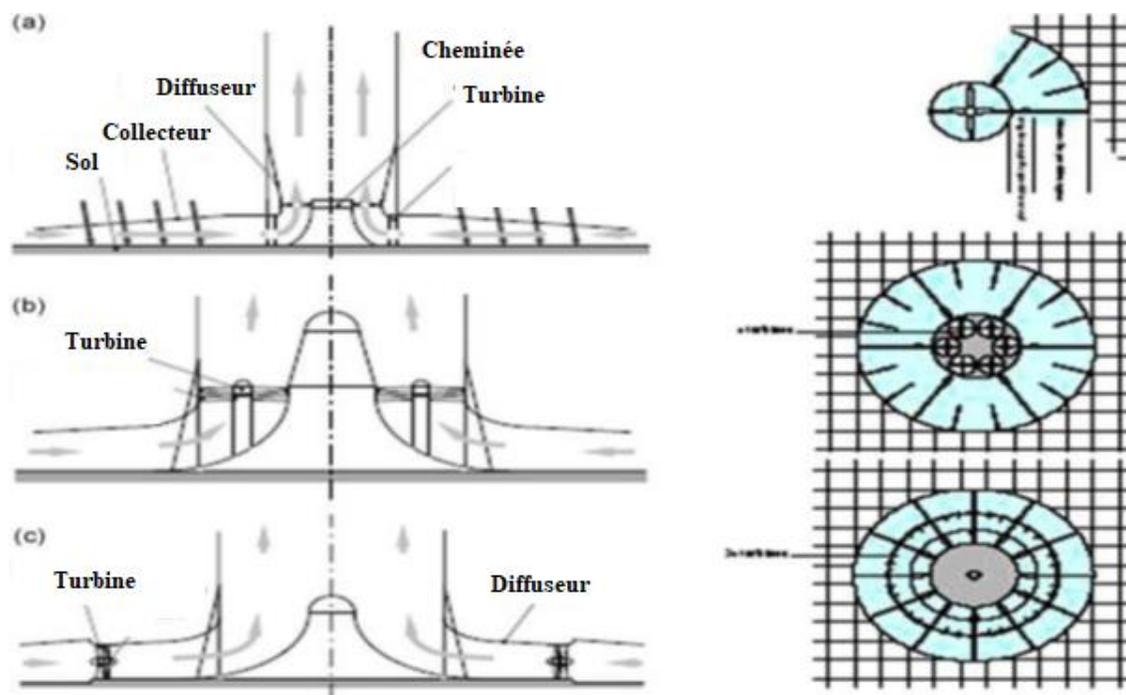


Fig. I.15 : Vue verticale et vue de dessus de trois configurations des turbines : (a) type à axe vertical unique ; (b) type à axe vertical multiple ; (c) type à plusieurs axes horizontaux [49].

I.7. Le stockage d'énergie

Le sol sous le toit du collecteur se comporte comme un moyen de stockage et peut même réchauffer l'air pendant une période importante après le coucher du soleil. L'efficacité de la centrale solaire à cheminée est inférieure à 2% et dépend principalement de la hauteur de la tour. Par conséquent, ces centrales ne peuvent être construites que sur des terrains très bon marché ou gratuits. Ces zones sont généralement situées dans des régions désertiques. Cependant, cette approche ne manque pas d'autres utilisations, la zone extérieure sous le toit du capteur pouvant également servir de serre à des fins agricoles [50]. Des tubes noirs remplis d'eau sont posés côte à côte sur le sol recouvert de tôles noires ou pulvérisé sous le collecteur de toit en verre (Figure I.16). Ils sont remplis une fois avec de l'eau et restent ensuite fermés, de sorte qu'aucune évaporation ne puisse avoir lieu. Le volume d'eau dans les tubes est choisi pour correspondre à une couche d'eau d'une profondeur de 5 à 20 cm en fonction de la puissance souhaitée. Comme le transfert de chaleur entre les tubes noirs et l'eau est beaucoup plus important que celui entre la feuille noire et le sol, même à faible vitesse de circulation de l'eau dans les tubes, et que la capacité calorifique de l'eau (4,2 kJ / kg) est bien supérieure à celle de terre (0,75 - 0,85 kJ / kg), l'eau à l'intérieur des tubes stocke une partie de la chaleur solaire et la libère pendant la nuit, lorsque l'air du collecteur se refroidit [51].

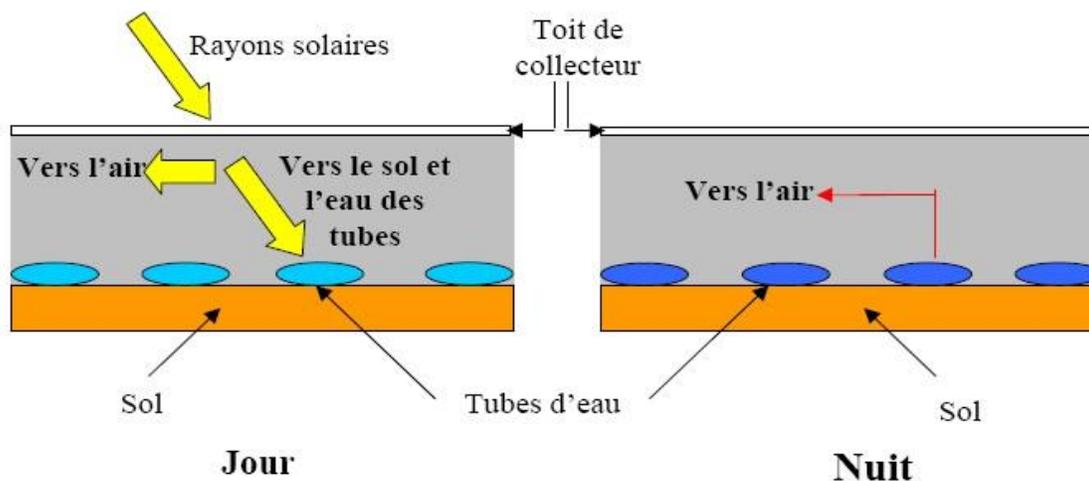


Fig. I.16 : Principe de l'accumulation de chaleur sous le toit à l'aide de tubes noirs remplis d'eau [52].

Kreetz (1997), également équipé de systèmes de stockage d'eau souterraine de cheminée solaire, a examiné l'effet de la puissance du temps, en fonction de (Bernardes, 2004) [39]. Ses calculs ont montré la possibilité d'un fonctionnement continu de la cheminée solaire de jour et de nuit. [33]. Hedderwick [53] et Pretorius et al. (2004) [43] ont étudié et discuté les distributions de température dans le sol sous le collecteur sont également présentées et discutées.

Pour analyser les performances d'une cheminée solaire avec couche de stockage d'énergie, Zheng et al (2010) ont mené une étude numérique. La réponse de différents matériaux de stockage d'énergie au rayonnement solaire et leur effet sur la puissance ont été analysés. Cette étude a montré que le sol et le gravier pourraient être utilisés comme matériau de stockage d'énergie pour les systèmes de cheminées solaires [54]. Ming et al ont réalisé des simulations numériques instables pour analyser les caractéristiques du transfert de chaleur et du débit d'air dans le système de centrale à cheminée solaire avec couche de stockage d'énergie. Les auteurs ont établi des modèles mathématiques des différentes parties du système.

Ils ont étudié l'effet du rayonnement solaire sur les caractéristiques de stockage de chaleur de la couche de stockage d'énergie. Les simulations numériques ont montré qu'il était avantageux pour l'utilisation du sol, avec une capacité calorifique comparativement plus élevée, en tant que matériau de la couche de stockage d'énergie, qui pourrait efficacement moduler la différence de température et de puissance de la centrale solaire à cheminée entre le jour et la nuit.

Les résultats de la simulation ont montré que plus la conductivité de la couche de stockage d'énergie était grande, plus la température de surface de la couche de stockage d'énergie était basse [55].

I.8. Projets des Centrales à Cheminée Solaire

I.8.1. Projet Prototype de Manzanares

Basé sur des informations détaillées, la recherche préliminaire théorique et un large éventail d'expériences en soufflerie, Schlaich Bergermann a conçu, construit et exploité une centrale expérimentale avec une puissance maximale de 50 kW sur un site mis à disposition par la compagnie d'électricité espagnole Union Fenosa Electrica à Manzanares (environ 150 km au sud de Madrid) en 1982 (Figure 1.17), avec des fonds fournis par le ministère allemand de la Recherche et de la Technologie (BMFT) [21].



Fig. I.17 : Projet Centrale cheminée solaire de Manzanares en Espagne

L'objectif de ce projet de recherche est de vérifier, par des mesures sur terrain, le rendement prévu des calculs basés sur la théorie, et d'examiner l'influence des différents composants sur le rendement et l'efficacité de l'usine en vertu d'ingénierie réaliste et des conditions météorologiques. Les dimensions principales et les données techniques de ce prototype sont données dans le Tableau I.3 ci-dessous.

Table. I.3 : Dimensions principales et données techniques du prototype de Manzanares.

Description	Valeur
Rayon de la tour	5.08 m
Rayon du collecteur	122.0 m
Hauteur de la couverture	1.7 m
Hauteur de la cheminée en acier	194.6 m
Nombre de pales de la turbine	4
Profil des pales de la turbine à air	FX W-151-A
Élévation typique de la température de l'air à travers le collecteur	$\Delta T=20$ K
Puissance nominale	50 kW
Partie en plastique de la couverture du collecteur	40 000m ²
Partie en verre de la couverture du collecteur	6000m ²

I.8.2. Projet Prototype Australien

La tour de Buronga se trouve en Australie, à 630 km au sud-ouest de Sydney, dans une zone aride et désertique située à la frontière des états de Nouvelle Galle du Sud et de Victoria.

Il s'agit d'une tour en béton de près de 1 km de hauteur et visible à près de 80 km à la ronde. Elle sera entourée de panneaux solaires couvrant une superficie de 5 km². La centrale fournirait 200 mégawatts de puissance électrique.

❖ Détails du projet

- Une cheminée de 990 m de haut en matériaux composites
- Un collecteur de 7 km de diamètre, soit 38,5km² de verre et de plastique.
- Température de l'air chauffé dans la cheminée : 70 °C.
- Vitesse de l'air dans la cheminée : 15 m/s (54 km/h).
- 32 turbines.
- Puissance produite : 200 mégawatts.

I.8.3. Le projet espagnol

Un autre projet de cheminée solaire a été développé en Espagne dans la localité de Fuente el Fresno, un village de la Province de Ciudad Real. Les travaux devraient être menés en collaboration avec les entreprises espagnoles Campo3 et Imasa, et la compagnie allemande Schlaich Bergermann. Cette tour de 750 mètres de hauteur serait dès lors la plus haute en Europe.

❖ Détails du projet

- Une cheminée de 750 m de haut.
- Un collecteur de 3km de diamètre, couvrant 350 hectares, dont 250 hectares pourraient être utilisés pour la culture de légumes sous serre (tomates).
- Vitesse de l'air dans la cheminée : 43km/h.
- Puissance de l'installation : 40 mégawatts, soit la demande en électricité d'environ 120000 personnes.
- Coût du projet : 240 millions d'euros, que les partenaires espéraient réunir en 2007.

I.8.4. Le projet Namibien

Une société sud-africaine de propriété intellectuelle *Hahn & Hahn* a annoncé qu'elle prévoyait la construction à un coût de 150 millions de dollars US d'une tour solaire de 400 mégawatts en Namibie (Figure 1.18), dans le cadre des efforts pour combler le déficit de l'approvisionnement en électricité dans ce pays.



Fig. I.18 : Projet centrale à Cheminée solaire de Namibien

Cette tour solaire, baptisée *Greentower*, aura une hauteur de 1,5km et un diamètre de 280 mètres et va fonctionner en générant un courant d'air ascendant aux turbines d'entraînement, produisant ainsi 400 MW d'électricité. La superficie de la serre sera de 38,5 km² (7 km de diamètre). Le directeur général de *Hahn & Hahn*, a annoncé que le projet avait été approuvé par le

gouvernement namibien, en ajoutant que la société nationale de distribution de l'électricité financera en partie une étude de faisabilité.

I.8.5. Le projet chinois

Une Cheminée Solaire de 27.5 MW sera construite en Chine (à Jinshawan, Wuhai, Mongolie). Financée par une entreprise locale en Mongolie intérieure avec 1,38 milliards de yuans (160 millions d'euros). La capacité totale planifiée jusqu'en Décembre 2013 par ce projet est de 27,5 MW, représentant un total de 2.780.000 m² de désert occupé par des serres servant de collecteur et un investissement total de 1,38 milliards de yuans [56].

Les travaux seront effectués en trois phases :

- La première phase du projet a déjà été achevée entre Mai 2009 et Décembre 2010 et a permis l'édification d'un prototype de cheminée solaire de 200 kW de démonstration qui occupe 40 000 m² de surface de désert, tour ou cheminée de 53 m de haut et de 18m de diamètre, représentant une dépense de 1 million de Yuans ;
- la deuxième phase du projet débutée en Février 2011 et a duré jusqu'en Décembre 2011, afin de réaliser la construction d'une usine électrique à base de cheminée solaire de 2,2 MW. Ce système de démonstration occupe 220.000 m² de désert et l'investissement qui a été prévu est de 110 millions de Yuans ; la troisième phase du projet est effectuée entre Janvier 2012 et Décembre 2013, pour permettre la construction d'une centrale à cheminée solaire de 25,1 MW, avec une serre collecteur occupant une région désertique de 2.510.000 m², l'investissement prévu est de 1 260 000 000 yuans (1,2 milliards de Yuans Chinois).

I.9. Les prototypes expérimentaux

Les tailles de configuration des CCS sont différentes pour différentes régions en raison de diverses conditions météorologiques et géographiques. En 1997, Pasurmarthi Sheriff et Florida ont mis en place un système (voir la figure I.19-a). Ils présentent la construction et l'essai d'une petite cheminée. Les tests ont porté sur les performances de transfert de chaleur du collecteur et sur les méthodes permettant de les améliorer [24]. Le diamètre de 9,15 m est égal à la hauteur de la tour est égale à 7,92 et son diamètre diminue progressivement de 2,44 m à 0,61 m de base au sommet. La plaque d'aluminium de l'absorbeur était fixée au sol sous le toit du capteur [38]. Une installation pilote expérimentale d'alimentation solaire de cheminée composée d'un collecteur d'air de 5 m de rayon et d'une cheminée de 8 m de hauteur a été construite à HUST, en Chine.

La taille de l'ouverture à la périphérie du collecteur a été choisie à 0,05 m et a été construite pour être facilement ajustable.

Des tuyaux d'évacuation en PVC standard de 0,3 m de diamètre ont été utilisés comme cheminée. En raison des coûts de construction, l'angle d'inclinaison réel du capteur a été fixé à 8° et la hauteur entre la sortie du capteur et le niveau du sol est donc de 0,8 m. La configuration pilote de la cheminée solaire a été conçue et construite en décembre 2002 afin d'examiner le champ de température ainsi que l'effet de l'heure sur le champ de température (figure I.19-b) [57]. Le toit du capteur et le SC étaient en verre de 4,8 mm d'épaisseur et en PVC, respectivement [58]. Un isolant thermique a été utilisé pour emballer la structure en acier du collecteur afin d'éviter toute diffusion de chaleur à travers celle-ci. L'eau dans les tuyaux (6 cm de diamètre) a été choisie comme corps de stockage. Un lit de couche composite d'un centimètre d'épaisseur avec de l'asphalte et du gravier noir a été appliqué en tant que couche supérieure pour absorber l'énergie solaire, puis la chaleur a été transférée de la couche supérieure aux conduites d'eau. Un multiple conçu sur le principe de fonctionnement d'aube de turbine a été installée à la base de la cheminée [57].

Une cheminée solaire pilote a également été construite sur le campus de l'Université Suleyman Demirel-RACRER (Centre de recherche et d'application sur les ressources d'énergie renouvelables), à Isparta (Turquie), qui mesure 15 m de hauteur, 1,2 m de diamètre et un collecteur vitré à 16 m diamètre (figure I.19- c). Après les études expérimentales, le système est modélisé de manière théorique en fonction de la conception. Ensuite, ce modèle constitue la base du programme informatique développé et les paramètres de performance du système sont obtenus [59]. Les dimensions principales du prototype construit sont illustrées dans le tableau I.4.

Table I.4 : Caractéristiques du prototype de cheminée solaire (Üçgül, 2005).

Paramètre	Symbol	Valeur
Hauteur de la cheminée (m)	H_{Ch}	15
Diamètre du collecteur (m)	D	16
Surface de serre (m²)	A_s	200.96
Cheminée (m²)	A_{ch}	1.19

Compte tenu de la nécessité d'élaborer des stratégies énergétiques à long terme, le ministère de la Science et de la Technologie du Botswana a conçu et mis en place une configuration pilote d'alimentation SC pour la recherche. Le SC était fabriqué à partir de polyester renforcé de verre, qui avait un diamètre intérieur de 2 m et une hauteur de 22 m. Le toit collecteur était constitué

d'un verre clair de 5 mm d'épaisseur soutenu par un cadre en acier. La zone de collecte atteint environ 160 m². L'absorbeur sous le toit était constitué de deux couches de sol compacté d'environ 10 mm d'épaisseur et d'une couche de pierres concassées.

La couche de pierres concassées était étendue sur la surface supérieure de la couche de sol compactée [60]. Les professeurs Rainer Gumpp (conception et construction de structures de support) et le professeur Dr.-Ing Jürgen Ruth (génie des structures), une équipe internationale composée de trois étudiants en architecture et de cinq étudiants en génie civil, ont conçu et construit la cheminée solaire en un semestre. Dans le cadre de leur programme interdisciplinaire de maîtrise en archineering. Le prototype a été installé à l'université Bauhaus de Weimar, en Allemagne (figure I.19-d). Le système est construit avec une feuille de plastique de 420 m² à sa base. L'air chaud circule dans la cheminée de 12 mètres - une construction efficace en treillis avec une bâche isolante rouge - et crée un courant ascendant. Au cours de sa phase d'exploitation de l'été 2008, l'électricité a été stockée dans des batteries alimentant des lampes LED éco énergétiques pour éclairer la construction la nuit [61]. Un prototype pratique de la centrale solaire à cheminée a été conçu et construit pour étudier l'influence des types de sous-sols sur la température de l'air des cheminées dans la région de la ville de Bagdad en Irak. Le prototype est composé d'un toit transparent circulaire (6 mètres de diamètre) ouvert à la périphérie (à 2 cm du sol). Au milieu du toit, il y avait une tour verticale (4 mètres de haut et 20 cm de diamètre) avec de grandes entrées d'air à la base (10 cm du sol). L'étude a été menée à Bagdad d'août à novembre 2010 (figure I.19-e) [62].

Un prototype physique a été construit à Belo Horizonte (Brésil) pour la validation du modèle mathématique et de la méthodologie numérique utilisée. Une tour de 12,3 m de hauteur a été construite avec des feuilles de bois et recouverte de fibre de verre d'un diamètre de 1,0 m. La couverture était faite d'un film plastique thermo-diffuseur. La couverture, d'un diamètre de 25 m, a été placée à 0,5 m au-dessus du sol, à l'aide d'une structure métallique. Le sol absorbeur a été construit en béton et peint en noir opaque (Figure I.19-f). L'analyse a montré que la hauteur et le diamètre de la tour sont les variables physiques les plus importantes pour la conception d'une cheminée solaire [63]. Un système de cheminée solaire a été mis en place sur le campus de l'Université Adiyaman (figure I.19-g) afin de concevoir un sol stratifié spécial (trou de 27 m de diamètre et 0,5 m de profondeur), tandis que la feuille d'aluminium, la laine de verre, le sable, le gravier et le verre brisé trotteurs et sa surface supérieure, asphalte sur le verre de 0,004 m

d'épaisseur portant les panneaux, 17 m de hauteur pour une cheminée de 0,8 m de diamètre et un collecteur d'entrée d'air à hauteur réglable (périphérie) de 0,05 à 0,35 m pour étudier l'effet de la température ambiante, hauteur de la cheminée, diamètre du capteur, valeur du rayonnement solaire, etc., sur les performances ou l'efficacité de la cheminée solaire (CCS) [64].

Afin d'évaluer le modèle de cheminée solaire, un prototype est construit à Al Ain, Émirats arabes unis (Émirats arabes unis), comme illustré à la figure I.19-h, qui consiste en un collecteur de 10 m x 10 m et une cheminée de 8,25 m de haut. Un tuyau en acier de 24 cm de diamètre et de 8,25 m de hauteur est utilisé pour construire la tour de cheminée solaire qui est soutenue par des poutres en acier. Le collecteur est construit en utilisant des poutres en acier avec un réseau en fil d'acier utilisé pour supporter un couvercle en plastique semi-transparent. La surface du collecteur est conçue avec une inclinaison permettant l'évacuation de l'eau en cas de pluie. La hauteur du collecteur depuis le sol est de 0,5 m près du bord du collecteur et de 0,75 m au centre du collecteur [65]. Les données de la cheminée solaire sont collectées sur une période de trois jours en décembre 2011. Le but de ce travail est d'évaluer expérimentalement la performance de la cheminée solaire et de la comparer avec la prédiction du modèle thermique mathématique. L'étude rapporte l'effet de la température dynamique interne du capteur, de la quantité d'énergie solaire emprisonnée dans le capteur et du tirage au vent prévu dans la cheminée.

Une cheminée solaire a été construite à Kerman (ville de Kerman-Iran). La cheminée a une hauteur de 60 m et un diamètre de 3 m. Le collecteur de ce prototype mesure 40 m x 40 m². Ce travail a présenté une analyse économique d'un prototype de cheminée solaire. Il a proposé des suggestions pour maximiser l'utilisation de l'énergie solaire et a calculé la puissance maximale de l'appareil (figure I.19-i) [66]. La figure (I.19-j) montre la première cheminée solaire pilote de l'Université Mutah (Jordanie). Ce prototype a été construit en 2009. [67].

Pour réaliser les travaux expérimentaux et mesurer la température, une cheminée solaire à l'échelle pilote a été construite à l'Université de Zanjan, en Iran, en 2010 (figure I.19-k). La hauteur de la cheminée est de 12 m et le collecteur à un diamètre de 10 m. L'angle d'inclinaison du capteur doit avoir été conçu de manière à pouvoir absorber le rayonnement solaire maximal. La ville de Zanjan a une longueur et une largeur géographiques de 48,45 et 36,68, respectivement. Ainsi, pour absorber le maximum de chaleur par le collecteur, la sortie du collecteur doit avoir une hauteur de $5 \tan \pi / 6$. En raison de contraintes de conception, la sortie a été construite avec une hauteur de 1 m et l'entrée de capteur a été construite avec une hauteur de

15 cm. En raison de la résistance à la chaleur et du faible prix du polyéthylène (PE), un tuyau en PE de 12 m de diamètre de 25 cm a été utilisé pour la fabrication de la cheminée. Le frottement est faible dans le tuyau, en raison du faible diamètre et de la faible hauteur. Pour renforcer la structure, 48 pièces de profilés en acier 4 * 4 ont été utilisées dans le capteur et les bases de capteurs ont été placées dans du béton. Pour préparer un effet de serre adéquat, des feuilles de polycarbonate (PC) ont été appliquées pour la fabrication des feuilles collectrices.

Les plaques de polycarbonate sont mécaniquement résistantes, transparentes, résistantes, résistantes à la chaleur et aux UV. Pour éviter les pertes de chaleur et augmenter l'effet de serre, des feuilles de PC à deux couches ont été sélectionnées. Le matériau noir pouvant être plus noir thermiquement [32], le sol sous le collecteur était totalement recouvert de films noirs de polyéthylène [68].

La première cheminée solaire expérimentale en Tunisie a été installée par l'Institut supérieur des sciences et technologies de l'énergie de Gafsa (2009). La couverture extérieure du collecteur a été construite en plastique (plexiglas). La couverture intérieure était en verre. La distance entre le plexiglas et le verre est choisie suffisamment petite (moins de 2,5 cm) pour négliger la convection thermique entre les deux capots. Pour assurer la solidité, il faut mettre 8 plaques dans le collecteur diamétralement espacées de 5,9 m. une partie du collecteur est formée de trois anneaux circulaires d'égale distance à 2,5 m. L'angle d'inclinaison du capteur par rapport au sol doit être choisi pour maximiser l'absorption du rayonnement solaire lorsque l'angle du capteur est égal à la latitude locale Gafsa 34 °, 25 nord. Afin de minimiser les coûts de construction et de faciliter la maintenance du prototype, [69]. La construction de la cheminée a nécessité l'utilisation de 10 barils cylindriques en fer d'une hauteur de 1,6 m et d'un diamètre de 0,2 m. Ces barils étaient soudés bout à bout. Pour maintenir la cheminée, des colliers de remorquage ont été utilisés à 6,5 et 12,5 m du sol. Des câbles en acier ont été utilisés pour chacun d'eux. L'éolienne sera installée à une hauteur ne dépassant pas 0,55 m. la plate-forme de la turbine sera installée vers le bas.

Les pales de la turbine sont en aluminium. Le diamètre de la turbine (axe vertical) choisi pour éviter les fuites d'air était égal à 0,36 m (figure I.19-I) [69].



Fig. I.19 : Prototypes expérimentaux des cheminées solaires

I.10. Cheminée géothermique-solaire

Afin d'accroître l'efficacité de la centrale solaire à cheminée, certaines approches ont été proposées dans la littérature, telles que : une centrale hybride solaire à géothermie (figure I.20). Cette nouvelle technologie permet la conversion thermique de l'énergie en fonctionnant à la fois avec l'énergie solaire et avec une énergie géothermique réduite.

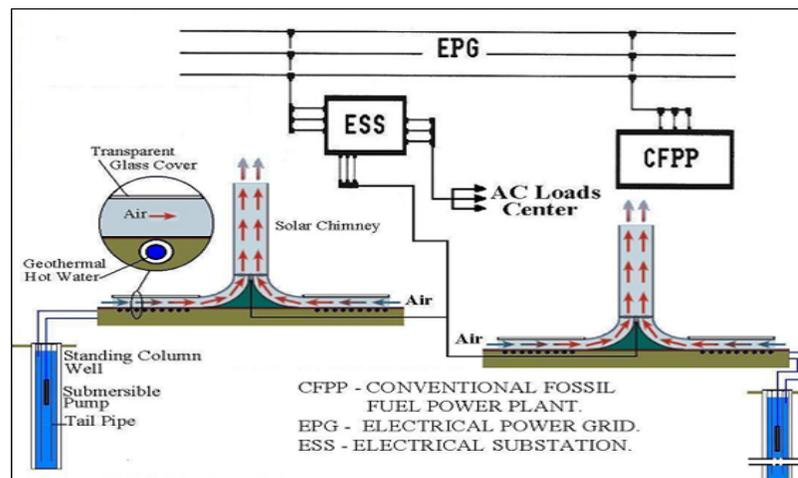


Fig. I.20 : Centrale à Cheminée solaire géothermique hybride [70].

Cette proposition permet de générer de l'énergie électrique même lorsque la lumière du soleil n'est pas disponible. Ainsi, par un temps nuageux et de nuit, un mode de fonctionnement géothermique complet ou la combinaison des technologies solaire et géothermique peut assurer le fonctionnement de l'installation [70].

I.11. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté la littérature précédente sur la CCS, un développement technologique exceptionnel, éclairant des progrès considérables dans leur construction, leur fonctionnement, y compris leurs facettes techniques, économiques, Contrairement aux autres installations solaires, Les centrales à cheminée solaire sont une alternative intéressante aux centrales de production d'électricité centralisée. C'est une technologie parfaitement adaptée aux pays dépourvus d'une infrastructure technique sophistiquée, dans laquelle la simplicité et le fonctionnement non critique de l'installation revêtent une importance cruciale. Il donne également un bref aperçu de l'état actuel des recherches sur la centrale à cheminée solaire et des perspectives d'avenir pour les centrales de grande taille. Ce chapitre montre que peu des prototypes ont été testés dans le monde. On peut en conclure que de tels systèmes doivent être très volumineux pour générer des quantités importantes d'énergie.

En raison du coût de construction élevé de la cheminée solaire, des nombreux chercheurs ont choisi la méthode numérique dans leurs études, en particulier les méthodes numériques par CFD.

Chapitre-II-

MÉTHODE NUMÉRIQUE ET MODÈLE THÉORIQUE

II.1. Introduction

Le développement rapide de la technologie informatique, nous oblige de nos jours à utiliser des méthodes numériques, telles que la Computational Fluid Dynamics (CFD), pour la recherche et les expériences. CFD fournit une solution plus économique et précise aux problèmes de la recherche. Nous avons utilisé dans notre recherche le logiciel ANSYS Fluent Version 15 comme plateforme de simulation. Ce logiciel utilise une équation de Navier-Stokes instable dans sa forme de conservation pour résoudre un ensemble d'équations. L'équation instantanée de masse (d'équation continuité), la quantité de mouvement et les économies d'énergie sont présentés ci-dessous [71].

II.2. Méthode Numérique

II.2.1. Modèle mathématique

L'équation conservative générique suivante [72] est utilisée pour modéliser, en coordonnées cylindriques, l'écoulement de fluide à l'intérieur de la cheminée considéré comme bidimensionnel, laminaire et présentant une convection naturelle moyenne turbulente avec approximations de Boussinesq, des effets de compressibilité négligeables et une dissipation visqueuse :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho \mu \phi) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + P^\phi + S^\phi \quad (1)$$

Tableau II.1. Donne les expressions des paramètres utilisés dans équation 1 pour les équations de transport.

Table. II.1 : Expressions des Φ , Γ^Φ , P^Φ et S^Φ pour les équations de transport

Équation	Φ	Γ^Φ	P^Φ	S^Φ
Continuité	1	0	0	0
Mouvement - composant r	u	$\mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial r}$	$-\frac{2(\mu + \mu_t)u}{r^2}$
Mouvement - composant y	v	$\mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial y}$	$g \rho_0 \beta (T - T_0)$
Énergie	T	$\frac{k + k_t}{C_p}$	0	0

La solution à l'ensemble d'équations générée doit satisfaire les conditions aux limites données à la figure II.1. T_{cover} est la température de couverture. Le mur de la tour est considéré comme adiabatique. La condition antidérapante est imposée à tous les murs. La surface du sol était supposée à température constante T_{Sol} . Le système est supposé être à flux axisymétrique. Au sommet de la tour de cheminée, on suppose une région d'écoulement complètement développée pour la vitesse et la température. À la limite d'entrée, la température d'entrée $T_{ambiante}$ est supposée constante et égale à la température ambiante.

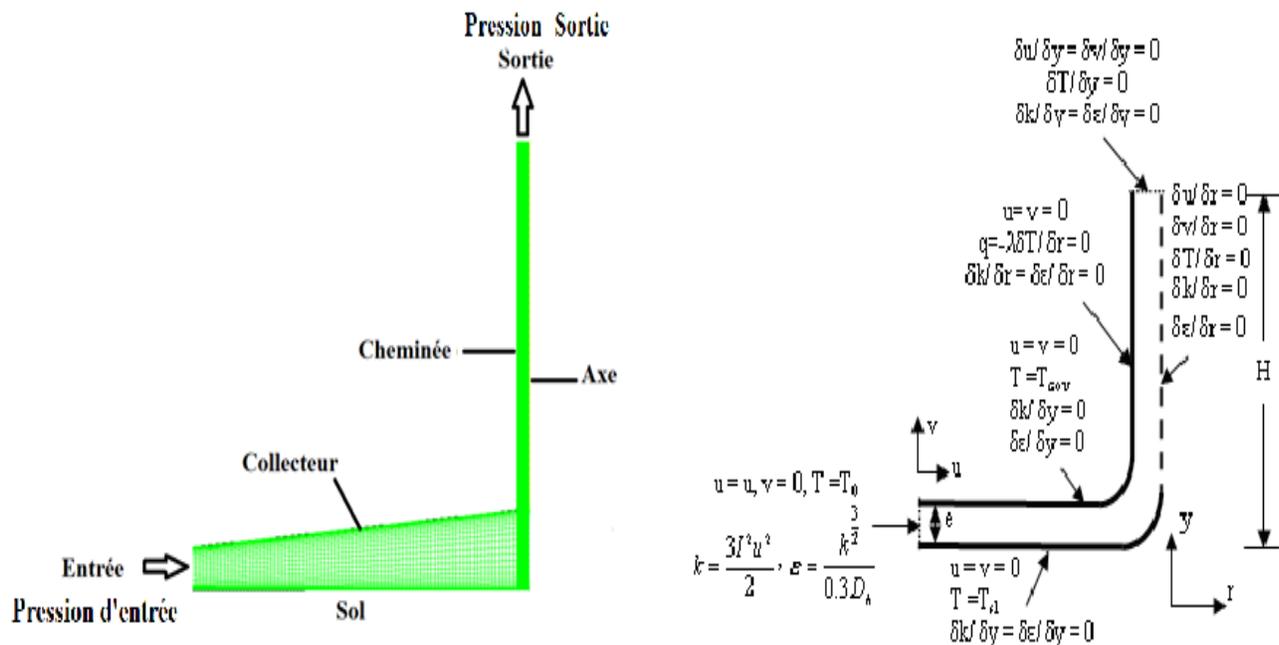


Fig. II.1 : Domaine d'étude et conditions aux limites

Comme il est spécifié par Chergui et al. [73], dans les problèmes de convection naturelle à cavité ouverte, le débit massique à l'entrée causé par les forces de flottabilité est inconnu et doit être calculé de manière itérative.

Dans les cas turbulents, deux autres équations sont nécessaires pour calculer les variables supplémentaires turbulentes apparaissant dans les équations d'écoulement moyen en tant que viscosité turbulente. La résolution des équations ci-dessus nécessite la détermination de la viscosité turbulente (μ_t). Pour ce faire, nous avons utilisé le modèle κ - ϵ . Ce modèle, en plusieurs versions, concerne principalement le flux moyen et donc la mise en énergie cinétique. Pour les calculs, le modèle standard de Launder et Spalding [74] avec fonctions murales a été

sélectionné. Dans ce modèle, la viscosité turbulente est évaluée à partir de l'énergie cinétique turbulente κ et de sa dissipation ε .

$$\nu_t = C_\mu \int_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (2)$$

Des équations de transport pour des variables supplémentaires turbulentes sont nécessaires pour fermer l'ensemble d'équations du flux moyen permettant le calcul de la viscosité turbulente.

A. Équation d'énergie cinétique turbulente (κ) :

$$\rho \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(ru\kappa)}{\partial r} + v \frac{\partial(v\kappa)}{\partial y} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) r \frac{\partial \kappa}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \right] + P_\kappa + G_\kappa - \rho \varepsilon \quad (3)$$

B. Dissipation de l'équation d'énergie cinétique (ε):

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(ru\varepsilon)}{\partial r} + v \frac{\partial(v\varepsilon)}{\partial y} \right) &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) r \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] &+ (C_{\varepsilon 1}(P_\kappa + C_{\varepsilon 3}G_\kappa) - \rho C_{\varepsilon 2}\varepsilon) \frac{\varepsilon}{\kappa} \end{aligned} \quad (4)$$

II.2.2. Modèle CFD utilisé

Pour la présente étude, le modèle de turbulence k- ε standard est adopté pour étudier le flux d'air dans la configuration considérée. Dans ces simulations, le modèle de Boussinesq a été adopté. Ce modèle considère la densité comme une valeur constante dans toutes les équations résolues, sauf pour évaluer le terme de la flottabilité dans l'équation du moment. Les écoulements turbulents sont fortement affectés par la présence des murs. La modélisation près des murs a un impact significatif sur la fidélité des solutions numériques, dans la mesure où les murs sont la principale source de tourbillon et de turbulence moyenne. Donc, la reproduction exacte de l'écoulement dans la zone proche des murs nécessite l'utilisation de l'approche par les fonctions murales. Ces dernières utilisent des formules semi-empiriques qui fournissent un champ d'écoulement approprié dans la zone affectée par la couche de viscosité ou limite.

Le solveur de problèmes de fluide dynamique, FLUENT basé sur la méthode des volumes finis, a été utilisé dans les études numériques actuelles. L'algorithme SIMPLE (acronyme de méthode semi-implicite pour les équations liées à la pression) est utilisé pour établir le couplage

entre les champs de vitesse et de pression. L'algorithme SIMPLE relie les équations de quantité de mouvement à l'équation de conservation de masse à l'aide de corrections de pression. L'algorithme a été choisi parmi d'autres en raison de sa robustesse et de son efficacité dans le calcul des écoulements de fluide.

II.2.3. Configuration numérique

Le travail de CFD dans cette thèse a été réalisé à l'aide d'un logiciel commercial de CFD appelé ANSYS Fluent 15. Pour la simulation CFD dans ANSYS fluent, des nombreux processus sont impliqués et répertoriés dans la figure (II.2).

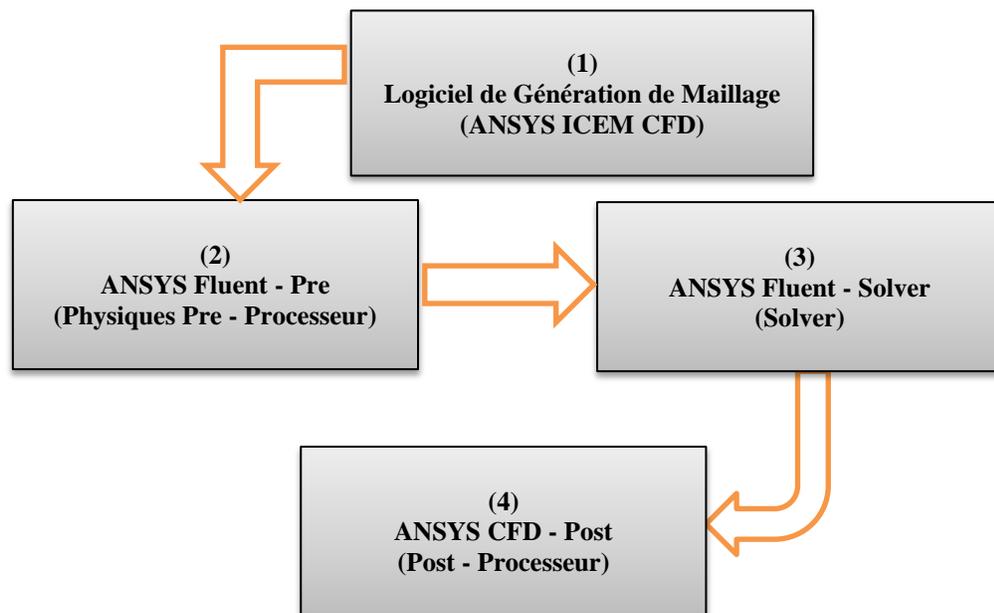


Fig. II.2 : Structure du simulateur ANSYS Fluent CFD

II.2.4. Génération de maillage

Le logiciel ANSYS ICEM, CFD a été utilisé pour la génération de grille. Le domaine de calcul a été discrétisé à l'aide de la méthode ICEM CFD Hexa-Mesher ou de la méthode de maillage définie par l'utilisateur.

La grille hexaédrique utilisée garantit que les résultats obtenus sont de la plus haute qualité et de précision. Les maillages pour la cheminée solaire et le collecteur d'air solaire sont illustrés dans la figure (II.3). Le nombre total de nœuds pour le modèle était de 10130.

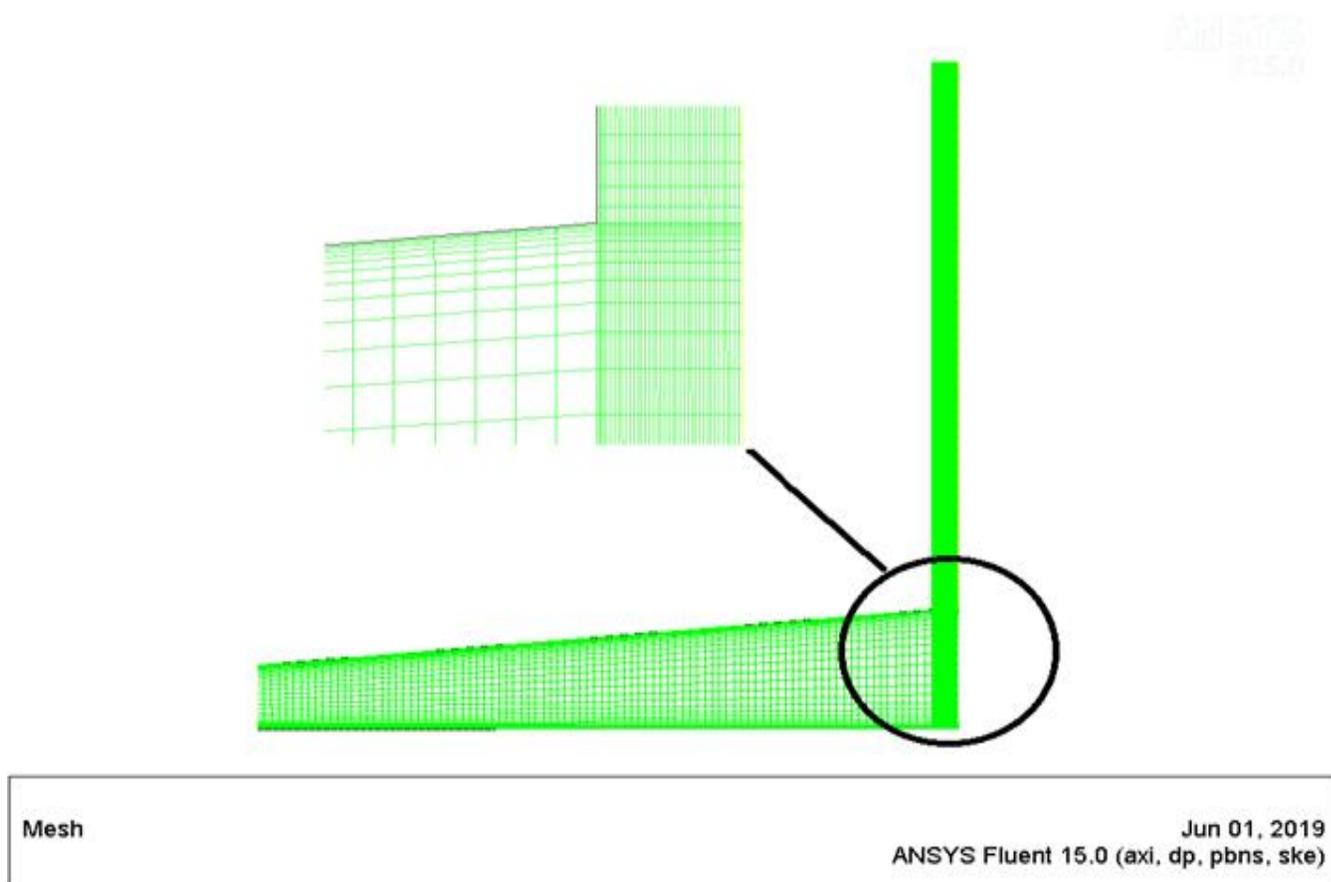


Fig. II.3 : Maillage utilisé dans notre étude numérique CFD

II.3. Modèle Théorique

II.3.1. Cycle thermodynamique de la cheminée solaire

Le fonctionnement de la cheminée solaire exige la présence de l'air, qui transporte la chaleur obtenue dans le collecteur à partir des rayons solaires vers l'ensemble des dispositifs qui sont capables d'exploiter cette énergie thermique, en la transformant en énergie cinétique. L'air sort de la cheminée, ce qui permet d'introduire l'air frais au collecteur pour subir le cycle suivant. Donc l'air peut être considéré comme un fluide de fonctionnement d'un cycle d'une machine thermodynamique. L'analyse du cycle du fluide de fonctionnement de la cheminée solaire se fait sous les hypothèses suivantes :

- Le fluide de fonctionnement est l'air sec et il est considéré comme un gaz parfait.
- Le flux de chaleur dans le système est le gain net par l'air.
- Le débit massique de l'air est constant.
- Les conditions atmosphériques à l'entrée et à la sortie sont constantes.

- La différence de pression ΔP_{23} dans le collecteur est nulle (elle est négligeable devant celle entre l'entrée et la sortie de cheminée).
- Les différentes transformations du cycle théorique de la cheminée solaire sont :
 - ✓ 1-2: Compression isentropique dans l'atmosphère (Augmentation de la pression et de la température dans l'atmosphère vers le bas).
 - ✓ 2-3: Échauffement isobare dans le collecteur par les rayons solaires.
 - ✓ 3-3st : Détente isentropique dans la turbine.
 - ✓ 3st-4 : Détente isentropique dans la cheminée.

Le Cycle réel montre les pertes engendrées dans les différents organes de la cheminée solaire. On utilise ce cycle pour déterminer les efficacités de ces organes et par la suite déterminer la puissance électrique que la cheminée solaire peut produire. La figure(II-4) illustre les différents processus du cycle réel de la cheminée solaire.

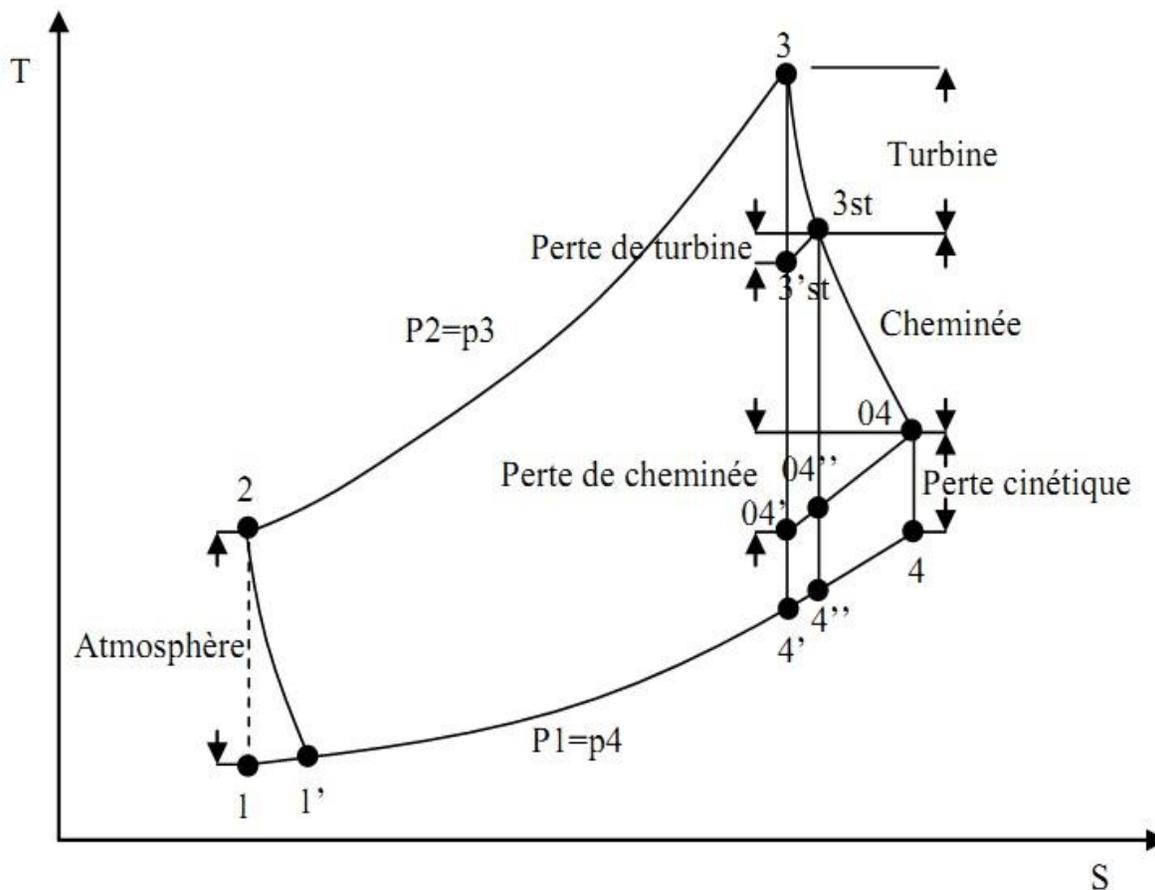


Fig. II.4 : Cycle réel de la cheminée solaire [75]

II.3.2. Modélisation de la performance de CCS :

Sur la base des travaux de Lal et al. [76], l'efficacité totale de la cheminée solaire est définie comme le produit entre l'efficacité du capteur, le rendement de la cheminée et le rendement de la turbine/générateur, en fonction de l'équation (1) :

$$\eta_{SCPP} = \eta_{coll} \cdot \eta_{Ch} \cdot \eta_{tg} \quad (1)$$

La puissance électrique totale produite par la cheminée solaire est donnée par Eq. (2) :

$$P_{SCPP} = Q_s \times \eta_{SCPP} \quad (2)$$

Où P_{SCPP} est la puissance électrique totale produite et est l'énergie solaire totale reçue par le capteur, calculée par l'équation. 3:

$$Q_s = I_s \cdot A_{Coll} \quad (3)$$

Où I_s est le rayonnement solaire mesuré et A_{Coll} est la surface du collecteur.

Pour obtenir l'efficacité individuelle de chaque composant du système, les équations sont développées dans la section suivante.

II.3.2.1. Le collecteur solaire

Le rendement du collecteur est calculé en divisant la quantité de chaleur transmise à l'air par le collecteur (Q_u) par la quantité de rayonnement solaire introduite par la surface du collecteur Q_s , selon l'équation 4 :

$$\eta_{Coll} = \frac{Q_u}{Q_s} \quad (4)$$

Le bilan énergétique du capteur solaire peut être calculé à l'aide de l'équation 5 :

$$Q_u = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T = \alpha \cdot A_{Coll} \cdot I_s - \beta \cdot \Delta T_0 \cdot A_{Coll} \quad (5)$$

Où, ΔT_0 est la différence de température entre la surface du capteur et l'air ambiant et la différence de température entre l'air chaud moyen dans le capteur et l'air ambiant, α est le Coefficient d'absorption effectif du collecteur, avec une valeur typique de 0,75 à 0,8; il s'agit d'un coefficient de transfert de chaleur ajusté qui permet de calculer les pertes par rayonnement et par convection, β est le débit massique d'air à l'intérieur du collecteur.

En remplaçant les équations (5) et (3) dans l'équation (4), l'efficacité du collecteur est donnée par l'équation 6 :

$$\eta_{coll} = \alpha - \frac{\beta \cdot \Delta T_0}{I_s} \quad (6)$$

Le calcul de la température moyenne de l'air chaud et la surface de l'absorbeur est délicate. L'hypothèse pour l'équation ci-dessus (7) est que la température de surface de l'absorbeur est égale à la température moyenne du flux d'air

$$\Delta T = \Delta T_0 \quad (7)$$

Où $\Delta T = T_f - T_a$ et $\Delta T_0 = T_f - T_a$ avec T_f , T_a et T_0 sont respectivement la température moyenne de l'air chaud dans le collecteur, la température de l'air ambiante et la température de sortie du collecteur.

II.3.2.2. La cheminée

La performance de la cheminée est donnée par l'équation 8 :

$$\eta_{ch} = \frac{P_{Ch}}{Q_u} \quad (8)$$

Où, P_{Ch} est la puissance contenue dans le flux d'air au bas de la cheminée et est donnée par [21] Schlaich, selon l'Équation .9:

$$P_{Ch} = \Delta p_{Ch} \cdot V_{Ch} \cdot A_{Ch} \quad (9)$$

Où, Δp_{Ch} est la différence de pression produite entre la base de la cheminée et l'air ambiant, selon Schlaich [21], la différence de pression et la vitesse maximale dans la cheminée sont données par les équations 10 et 11:

$$\Delta p_{Ch} = g \cdot \rho_{ch} \cdot k \cdot H_{ch} \cdot (T_0 - T_a) / T_a \quad (10)$$

$$V_{Ch} = \sqrt{2gH_{Ch}(T_0 - T_a) / T_a} \quad (11)$$

En remplaçant l'équation 10 et l'équation 11 par l'équation 9, nous obtenons l'équation 12 :

$$P_{Ch} = 1.414 \cdot \rho_{ch} \cdot A_{Ch} \cdot g^{3/2} \cdot H_{Ch}^{3/2} \cdot \left(\frac{T_0 - T_a}{T_a} \right)^{3/2} \quad (12)$$

Nous substituons la valeur de P_{Ch} , Eq. (12) et Q_u de l'équation (5) dans l'équation (8), nous obtenons la valeur du rendement de la cheminée. L'efficacité théorique de la cheminée est donnée par Eq. (13):

$$\eta_{Ch} = \frac{1.414 \cdot \rho_{ch} \cdot A_{Ch} \cdot g^{3/2} \cdot H_{Ch}^{3/2} \cdot \left(\frac{T_0 - T_a}{T_a} \right)^{3/2}}{A_{Coll} \cdot (\alpha \cdot I_s - \beta \cdot \Delta T_0)} \quad (13)$$

Selon Schlaich [21], une autre équation permettant de calculer plus facilement l'efficacité de la cheminée est donnée par Eq. 14 :

$$\eta_{Ch} = \frac{g \cdot H_{Ch}}{C_p \cdot T_a} \quad (14)$$

Ainsi, le rendement de la cheminée est directement proportionnel au rapport entre la hauteur de la cheminée et la température ambiante.

II.3.2.3. La Turbine

Les turbines à air verticales à basse vitesse ont toujours été situées à la base de la cheminée solaire, où l'air forcé convertit un maximum de 2/3 de flux d'air en puissance mécanique et

produit finalement de la puissance électrique [21], la puissance mécanique maximale produite par la turbine est donnée par Eq .15.

$$P_t = \frac{2}{3} P_{Ch} \quad (15)$$

Nous substituons la valeur P_{Ch} d'Eq. (8), Q_u à partir de l'équation (4), η_{ch} à partir de l'équation 14 et Q_s de l'équation (3) dans l'équation (15), nous obtenons la valeur de la puissance mécanique maximale produite par la turbine selon Eq. (16):

$$P_t = \frac{2}{3} \cdot \eta_{Coll} \cdot \frac{g}{C_p \cdot T_a} \cdot H_{Ch} \cdot A_{Coll} \cdot I_s \quad (16)$$

Encore, l'efficacité du générateur électrique est donnée par Eq. (17) et le rendement de la turbine/générateur est donné par Eq. 18:

$$\eta_g = \frac{P_{scpp}}{P_t} \quad (17)$$

$$\eta_{tg} = \frac{P_{scpp}}{P_{Ch}} \quad (18)$$

Le rendement de la turbo génératrice varie généralement entre 75% et 85%. Une valeur de 80% est utilisée tout au long de cette analyse [77], la puissance de sortie de la cheminée solaire est calculée en fonction de l'équation. (19):

$$P_{scpp} = \frac{2}{3} \cdot \eta_{Coll} \cdot \frac{g}{C_p \cdot T_a} \cdot H_{Ch} \cdot A_{Coll} \cdot I_s \cdot \eta_g \quad (19)$$

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, on présente la méthode numérique sur la cheminée solaire par l'utilisation de logiciel de simulation CFD ANSYS Fluent en 2D et aussi un modèle mathématique a été adopté afin d'évaluer la performance de la cheminée solaire. Dans la partie simulation nous avons utilisé le modèle de Boussinesq, sachant que ce modèle considère la densité comme une valeur

constante dans toutes les équations résolues, sauf pour évaluer le terme de la flottabilité dans l'équation du moment. Les écoulements turbulents sont fortement affectés par la présence des murs. La modélisation près des murs a un impact significatif sur la fidélité des solutions numériques, dans la mesure où les murs sont la principale source de tourbillon et de turbulence moyenne. Donc, la reproduction exacte de l'écoulement dans la zone proche des murs nécessite l'utilisation de l'approche par les fonctions murales. Ces dernières utilisent des formules semi-empiriques qui fournissent un champ d'écoulement approprié dans la zone affectée par la couche de viscosité ou limite.

On peut conclure que le but d'utiliser le modèle numérique par CFD ANSYS Fluent dans notre étude car tels systèmes doivent être très grands pour générer des quantités importantes d'énergie. En raison du coût de construction élevé de la cheminée solaire, de nombreux chercheurs ont choisi la méthode numérique dans leurs études, en particulier les méthodes numériques par CFD ANSYS FLUENT.

Chapitre-III-
EQUIPEMENTS ET DISPOSITIF
EXPERIMENTAL

III.1. Introduction

Afin de faire une étude détaillée sur le champ des températures et la vitesse de l'air mesurés dans une centrale à cheminée solaire, nous avons construit des prototypes à petite échelle à l'Université de Ouargla (sud de l'Algérie). Dans ce chapitre, on va présenter les différentes étapes de la construction de ces prototypes ainsi que Les différents paramètres enregistrés, et les équipements utilisés.

Dans notre étude on a construit trois prototypes comme suit :

- Prototype n°1 avec collecteur rectangulaire en plastique
- Prototype n°2 avec collecteur carré en verre
- Prototype n°3 avec collecteur circulaire en plastique

III.2. Les phases de construction des prototypes installés

III.2.1. Prototype n°1 avec collecteur rectangulaire en plastique

Dans notre étude expérimentale, on a entamé une investigation sur les différents paramètres cherchés par l'installation du premier prototype comme présenté dans la figure (III.1).

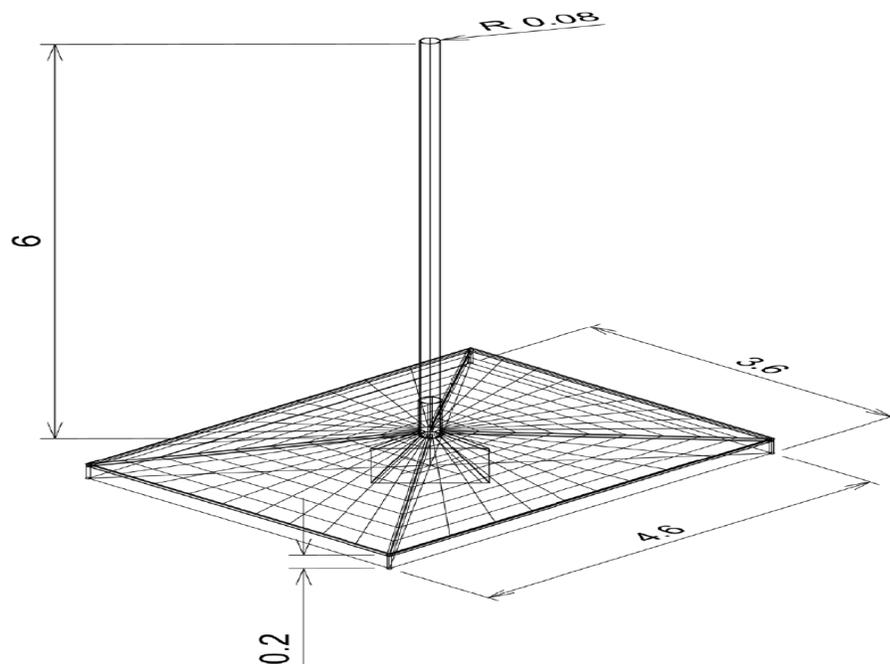


Fig. III.1 : Schéma dimensionnelle en 3D du prototype

III.2.1.1 Structure et composants

A- Collecteur

Le collecteur d'air solaire est un composant très important dans la centrale à cheminée solaire CCS. Le collecteur d'air solaire aide à piéger l'air chaud et guide l'air chaud vers la section turbine à l'aide du conduit de cheminée.

La forme géométrique du collecteur est rectangulaire avec des dimensions (3.6 x 4.6m) avec une ouverture de 0.2 m et la couverture utilisé dans ce premier prototype est de matière en plastique transparent de (PVC), le collecteur aussi déposé sur une fondation de plancher en bois de 15 cm d'épaisseur et recouvert d'une plastique noire matte pour favoriser l'absorption des rayons solaires. Les différentes photos du collecteur d'air solaire sont illustrées dans la figure (III.2-3).



Fig. III.2 : Fondation de Collecteur utilisée en bois



Fig. III.3 : Collecteur en pastique PVC utilisé

B- Cheminée

Dans ce prototype, on a utilisé un tube fabriqué en PVC de longueur 6 m et 16 cm de diamètre et pour favoriser l'isolation thermique on a utilisé aussi la laine de verre afin d'éviter la perte de chaleur. Le tube (Cheminée) est fixé sur un support en manchette pipe fabriqué en acier qui est à son tour fixé sur une plancher en bois et élevée de 0.4 m (Fig.III.4-5).



Fig. III.4 : La cheminée utilisée avec un support en acier



Fig. III.5 : Vue générale du prototype cheminée solaire n°1

II.2.2. Prototype n°2 avec collecteur carré en plastique

II.2.2.1. Structure et composants

Dans ce prototype, on a utilisé la fondation qui a été utilisée dans le prototype n°1 et on a uniquement fait des modifications sur les dimensions du collecteur afin d'obtenir un collecteur de forme carré (5x5m).aussi on a changé le type de la couverture du collecteur.

A- Collecteur

La forme géométrique du collecteur installé est carrée de dimensions (5 x 5m) avec une ouverture de 0.2 m et la matière de couverture utilisée dans ce prototype n° 2 est le verre transparent d'épaisseur de 4 mm, le collecteur de la deuxième expérience est présenté sur les figures (III.6-7).



Fig. III.6 : Préparation d'emplacement de couverture en verre



Fig. III.7 : Le collecteur carré (5x5 m) avec couverture en verre

B- Cheminée

Dans ce deuxième prototype, on a utilisé aussi le même tube de PVC du premier prototype qui a une longueur 6 m et 16 cm de diamètre, figures (III-7-8) :

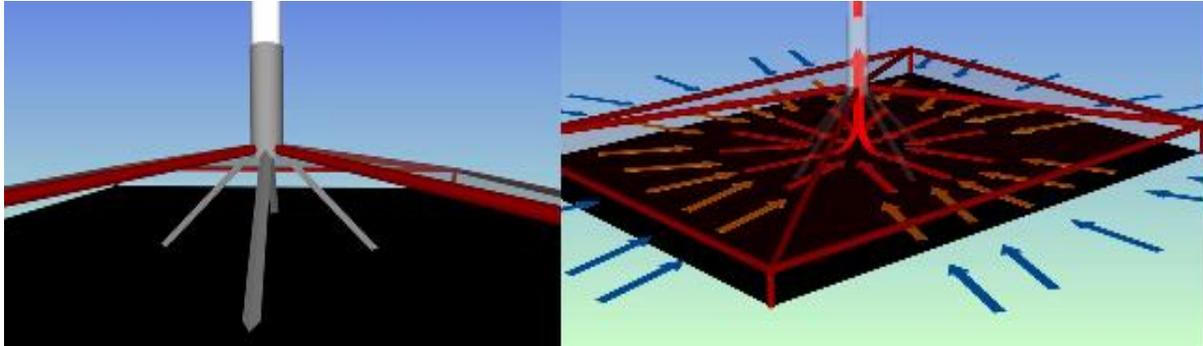


Fig. III.8 : Schéma 3D du support cheminé installé



Fig. III.9 : La cheminée de prototype n°2



Fig. III.10 : Vue générale du prototype cheminée solaire n°2

II.2.3. Prototype n°3 avec collecteur circulaire en plastique

La forme géométrique du troisième prototype est différente par rapport aux deux prototypes n°1 et n°2 installés, que ce soit dans les dimensions ou la forme géométrique du collecteur.

Les étapes de la construction du prototype n°3 sont présentées ci-dessous.

II.2.3.1. Structure et composants

A- Collecteur

Le collecteur installé est de forme circulaire avec 12 m de diamètre et une ouverture du collecteur de 0.4 m et la matière de couverture utilisée dans ce prototype est le plastique transparent, et pour le but d'améliorer le stockage d'énergie thermique sous la serre du collecteur la terre du collecteur qui a été construite d'une manière spéciale, les détails de préparation et de construction de la terre et de collecteur sont illustrés ci-dessous.

1- Description du terrain :

Pour préparer le terrain, on a fait une excavation de la terre de 0.3 m de profondeur afin de déposer les 7 couches du système d'isolation présenté dans les figures (III.11-17) :



Fig. III.11 : Couche de 0.05 m de gravier



Fig. III.12 : Couche de sable 0.05 m



Fig. III.13 : Couche en plastique transparent



Fig. III.14 : Couche en laine de verre 0.025 m



Fig. III.15 : Couche de gravier 0.1 m



Fig. III.16 : Couche de sable 0.1 m



Fig. III.17 : Couche de plastique noire

B- La Cheminée

On a utilisé un tube fabriquée en PVC de longueur 8 m et 20 cm de diamètre et aussi pour favoriser l'isolation thermique, on a utilisé la laine de verre afin d'éviter la perte de chaleur. Le tube (cheminée) est fixé sur un support fabriqué en acier qui est à son tour fixé sur la terre avec du béton armé et élevée de 0.85m. Les Figures (III.18-20) illustrent les étapes de construction de la cheminée.



Fig. III.18 : Le support de la cheminée fixé sur terre



Fig. III.19 : La cheminée installée dans le prototype n°3



Fig. III.20 : Vue générale du prototype cheminée solaire n°3

III.2.3.2. Système d'échange de chaleur intégré avec cheminée solaire

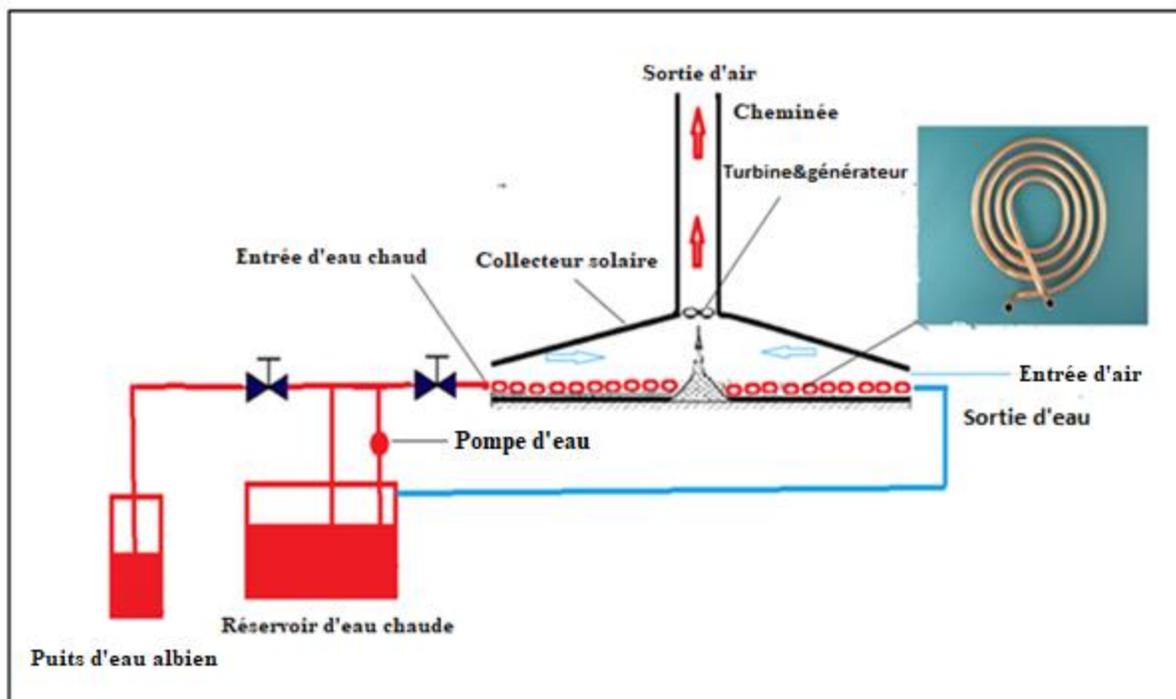


Fig.III.21 : Schéma de la centrale à cheminée solaire proposée intégrée avec la source géothermique d'eau albienne.

Suite à la difficulté d'installer l'énergie de la source géothermique (la nappe d'eau albienne) avec le prototype cheminée solaire, dans notre étude expérimentale et dans le but d'obtenir les mêmes conditions que la source géothermique, nous avons utilisé un réchauffeur d'eau électrique pour chauffer l'eau, qui circulera dans un serpentin en cuivre installée à l'intérieur du collecteur à l'aide d'une pompe électrique pour assurer la circulation pendant la phase expérimentale. La circulation de l'eau chaude dans ce serpentin en cuivre a motivé l'échange de chaleur entre l'eau et l'air à l'intérieur du collecteur, contribuant ainsi à maintenir la température élevée de l'air à l'intérieur du collecteur et à améliorer les performances de la cheminée solaire. L'objectif principal de cette intégration est de maintenir le bon fonctionnement de la cheminée solaire même pendant la nuit et également lorsqu'il y a un faible rayonnement solaire (Fig. III.21-23).



Fig. III.22 : Réchauffeur d'eau électrique intégré avec le prototype CCS



Fig. III.23 : Serpentin en cuivre installée à l'intérieur du collecteur de la CCS

II.3. Instruments de mesure utilisés

Afin de mesurer les paramètres suivants, nous avons utilisé les instruments qui sont détaillés ci-dessous :

- T_a : Température ambiante ($^{\circ}\text{C}$)
- T_e : Température à l'entrée du collecteur ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{ec} : Température au centre du collecteur ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{ech} : Température à l'entrée la cheminé ($^{\circ}\text{C}$)
- R : Rayonnement solaire (W/m^2)
- V_a : Vitesse d'air (m/s)

II.3.1. Mesure de la température

La mesure des températures s'effectue à l'aide des thermocouples de type K donnant les températures à différents endroits de la cheminée solaire. Pour obtenir ces données, nous avons utilisé plusieurs thermocouples, installés aux positions présentées dans la figure (III.24).

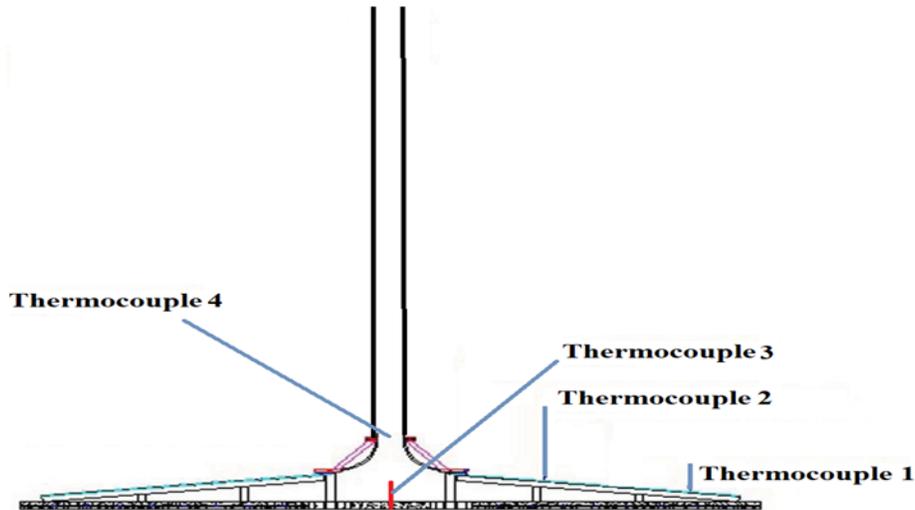


Fig. III.24 : Lieux d'installation des thermocouples pour mesure les températures. Sonde en inconel pour mesures dans les liquides ou de l'air, à très hautes températures a été utilisé dans notre expériences présenté dans le Tableau (III.1) et la Figure (III.25)

Table. III.1 : Caractéristiques techniques de thermocouple

Applications	Liquides, air, gaz
Température maxi (capteur)	1250°C
Temps de réponse (90% de la valeur finale)	10 secondes dans un liquide
Dimensions du capteur	Ø 1,5 mm
Limite d'erreur selon le plus élevé	2.2°C ou 2%



Fig. III.25 : Thermocouple type K utilisé

III.3.2. Mesure du rayonnement solaire global

C'est un appareil pour la mesure de rayonnement solaire qui donne des valeurs instantanées pour une intensité lumineuse de 0 ... 1 250W / m² et Température de - 40 ... + 85°C. Les mesures 130 x 90 x 30 mm permettent une utilisation confortable d'une seule main. Cela permet de mesurer en tout lieu, à savoir précisément le pourcentage de puissance que fournit notre module solaire. (Fig. III.26).



Fig. III.26 : Mac Solar pour mesure le rayonnement solaire

Table. III.2 : Caractéristiques techniques de l'appareil Mac Solar

Déviatiion maximale	< 2 % ±1 chiffre (Ptot) plage 100 ... 1000 W/m ² / AM1, 5 spectre / radiation axe normal (optionnel avec certificat ISO < 1 % ±1 chiffre)
Puissance nécessaire (sleep / active mode)	0,6 / 4 mW
Puissance nominale du module solaire intégré	180 mW
Capacité de la mémoire de données	64 kb
Transfert de données	interface de série RS 232
Plage de température ambiante	-20 ... +45 °C
Humidité maximale	95 % H.r.
Écran	écran LCD 13mm (ind. max. 199,9) contraste réglable
Alimentation	par cellule solaire propre
Dimensions	130 x 90 x 30 mm
Poids	170 g
Vérifications / Normes	CE / EN 50081, 50082, 55014, 55022, 60068, 60529, IEC68

II.3.3. Mesure de la vitesse de l'air

Pour mesurer la vitesse de l'air, on a utilisé deux instruments de mesure ayant meilleure précision comme suit :

- 1- Anémomètre à hélice
- 2- Anémomètre à fil chaud

III.3.3.1. L'anémomètre à hélice testo 416

Le testo 416 est un anémomètre compact avec sonde à hélice télescopique (long. max. 890 mm, diamètre 16 mm). Le débit dont le calcul est très précis ($0,6 \rightarrow 40$ m/s ($0 \rightarrow +60$ °C)), grâce à la possibilité de saisie avec exactitude la surface du conduit, est indiqué directement à l'affichage. Figure (III.27).



Fig. III.27 : Anémomètre à hélice testo 416 Pour mesure la vitesse de l'air

Table. III.3 : Caractéristiques techniques de l'appareil Anémomètre à hélice testo 416

Étendue de mesure	0,6 à 40 m/s
Précision	$\pm (0,2 \text{ m/s} + 1,5 \% \text{ v.m})$
Résolution	0,1 m/s
Dimensions	182 x 64 x 40 mm
Température de service	-20 à +50 °C
Type de pile	Pile 9 V, 6F22
Autonomie	80 h

III.3.3.2. Anémomètre à fil chaud appareil chauvin-Arnoux C.A 1051

L'appareil chauvin-Arnoux C.A 1051 offre toutes les mesures nécessaires pour effectuer le bilan complet des installations de climatisation, de chauffage et de ventilation. Ergonomique et précis, il se tient dans la main et présente un accès aisé aux différentes fonctions. A la fois thermo-anémomètre à fil chaud ou à hélice, le C.A 1051 mesure aussi les températures, figure (III.28).



Fig. III.28 : Appareil chauvin-Arnoux C.A 1051

Table. III.4 : Caractéristiques techniques de l'appareil chauvin-Arnoux C.A 1051

		Unités de mesure	Plages de	Exactitudes	Résolutions
THERMO-ANEMO A FIL CHAUD	Vitesse fil chaud	m/s, fpm	0 à 3 m/s 3,1 à 30 m/s	$\pm 3\%$ de la lecture $\pm 0,03$ m/s $\pm 3\%$ de la lecture $\pm 0,1$ m/s	0,01 m/s 0,1 m/s
	Température a ambiante	°C, °F, K	-20 à +80°C	$\pm 2\%$ de la lecture $\pm 0,1$ °C	0,1°C
	Débit	m ³ /h, cfm, l/s, m ³ /s	0 à 65000 m ³ /h	$\pm 3\%$ de la lecture ± 10 m ³ /h	1 m ³ /h

		Unités de mesure	Plages de	Exactitudes	Résolutions
THERMO-ANEMO A FIL CHAUD	Vitesse hélice Ø100 mm	m/s, fpm	0,20 à 3 m/s 3,1 à 35 m/s	$\pm 2\%$ de la lecture $\pm 0,06$ m/s $\pm 2\%$ de la lecture $\pm 0,2$ m/s	0,01 m/s 0,1 m/s
	Température a ambiante	°C, °F, K	-20 à +80°C	$\pm 2\%$ de la lecture $\pm 0,1$ °C	0,1°C
	Débit	m ³ /h, cfm, l/s, m ³ /s	0 à 65000 m ³ /h	$\pm 3\%$ de la lecture ± 10 m ³ /h	1 m ³ /h

Température 2 entrées Thermocouple K	°C, °F, K	-200 à +40°C	$\pm 1\%$ de la lecture $\pm 1,2$ °C	0,1°C
		-39 à +999°C	$\pm 0,5\%$ de la lecture $\pm 0,8$ °C	0,1°C
		+1000 à +1300°C	$\pm 1\%$ de la lecture $\pm 1,2$ °C	1°C

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes méthodes et étapes utilisées afin de construire les prototypes cheminés solaire de petite échelle qui ont été installés à l'université Kasdi Merbah d'Ouargla. A travers ces prototypes, on a pu tester et mesurer les paramètres principaux qui ont une influence importante sur la cheminée solaire. Puisque le collecteur d'air solaire est un composant très important dans la centrale à cheminée solaire, on a utilisé différents types de collecteur en plastique et en verre pour le but d'étudier l'efficacité de ce dernier, et vu la difficulté d'installer de l'énergie géothermique (source d'eau albiennne) avec la cheminée solaire dans nos études expérimentales et dans le but d'obtenir les mêmes conditions que la source d'énergie géothermique albiennne, nous avons utilisé dans notre étude un réchauffeur d'eau électrique. Cette installation nous a permis d'étudier la performance de la cheminée dans la période de la nuit. Nous avons aussi présenté les appareils de mesure qui ont été utilisés dans nos études expérimentales.

Chapitre-IV-
RÉSULTATS ET
DISCUSSION

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous voulons présenter quelques paramètres environnementaux et leurs effets sur le champ d'écoulement de l'air à l'intérieur de la cheminée solaire ainsi que sur leurs paramètres thermodynamiques pour les trois prototypes cheminée solaire comme suit :

- 1- Prototype n°1 avec collecteur rectangulaire en plastique :** On va Présenter les résultats expérimentaux est comparés à ceux obtenus par simulation à l'aide du modèle numérique CFD ANSYS FLUENT. On a discuté aussi l'influence de la hauteur de la cheminée sur la puissance produite et nous avons utilisé les paramètres géométriques du prototype de Manzanares pour estimer la puissance produite de la CCS avec les paramètres météorologiques de la ville de Ouargla.
- 2- Prototype n°2 avec collecteur carré en verre :** On va Présenter les résultats expérimentaux obtenus pour différents types de mesure.
- 3- Prototype n°3 avec collecteur circulaire en plastique :** On va présenter les résultats expérimentaux obtenus avec l'étude d'amélioration de la performance de la cheminée solaire par l'intégration de l'eau albienne simulée par le système de chauffage d'eau électrique.

À la fin, nous concluons le chapitre par le résumé des résultats obtenus et leurs importances

IV.2. Prototype n°1 avec collecteur rectangulaire en plastique

IV.2.1 Mesure des paramètres environnementaux

La figure (IV.1) montre les variations du rayonnement solaire mesuré (G) et de la température ambiante (Ta) en fonction du temps. Ces paramètres ont été enregistrés à Ouargla durant la journée du 31 Juillet 2016. Il a été observé que pendant les expériences, la température ambiante variait de 37 °C à 8h00 à 44,3 °C à 14h00 ; cela signifie que la valeur moyenne pour cette journée était de 40,65 °C. et le rayonnement solaire augmente après le lever du soleil qui atteint la valeur maximale de 992 W/m² à 14h00. Après ce pic, il diminue à nouveau jusqu'au coucher du soleil ; la valeur moyenne pour la journée était de 906 W/m². De ces résultats, on peut facilement déduire que cette région est caractérisée par un potentiel d'ensoleillement élevé et un emplacement idéal pour les installations solaires telles que les centrales à cheminée solaire.

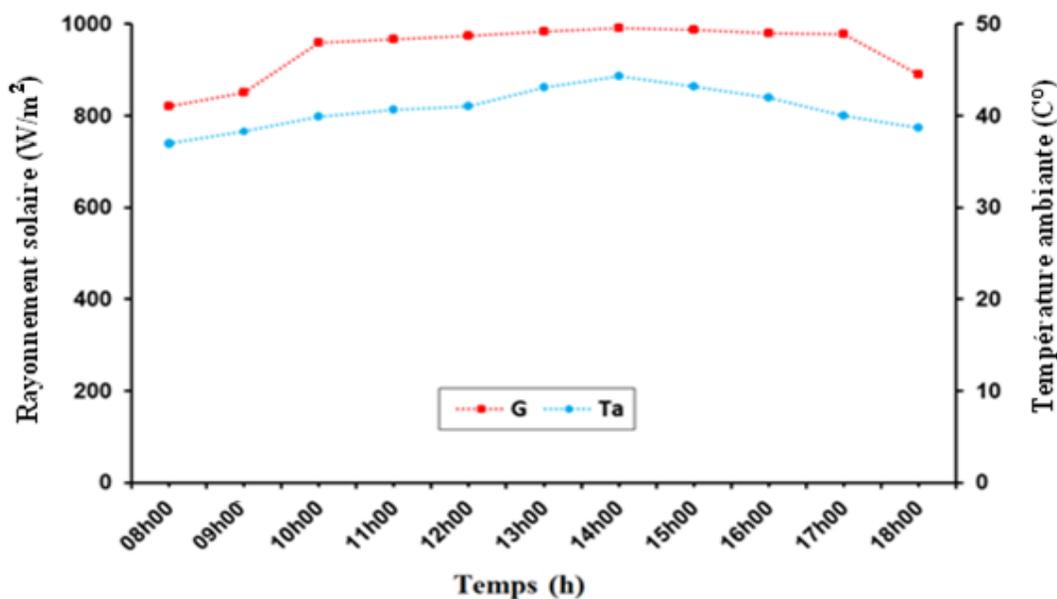


Fig. IV.1 : Variation du rayonnement solaire et température ambiante mesurés en fonction du temps (31 Juillet 2016)

IV.2.2. Validation de la vitesse de l'air prédictive du collecteur

La figure (VI.2) illustre la comparaison de la variation de la vitesse de l'air mesurée et de la vitesse de l'air prévue par le modèle CFD à l'entrée de la cheminée avec le rayonnement solaire en fonction du temps pendant une journée typique du 31 Juillet 2016. Il est observé que la vitesse maximale de l'air est obtenue à 14h00 pour les résultats expérimentaux et CFD de 1,87 m/s et 2,5 m / s, respectivement pour une température ambiante de 44,3 ° C et un éclairement énergétique de 992 W/m². L'écart entre la vitesse de l'air mesurée et la vitesse de l'air prévue de 08h00 à 10h00 était très étroit et de 11h00 à 17h00, l'écart augmentant avec l'augmentation du rayonnement solaire. La différence entre la CFD et les résultats expérimentaux dépend généralement de nombreux paramètres, tels que les pertes d'air dues au manque d'étanchéité dans la serre et les hypothèses utilisées dans le modèle CFD. Enfin, on peut en déduire que le modèle CFD est valide.

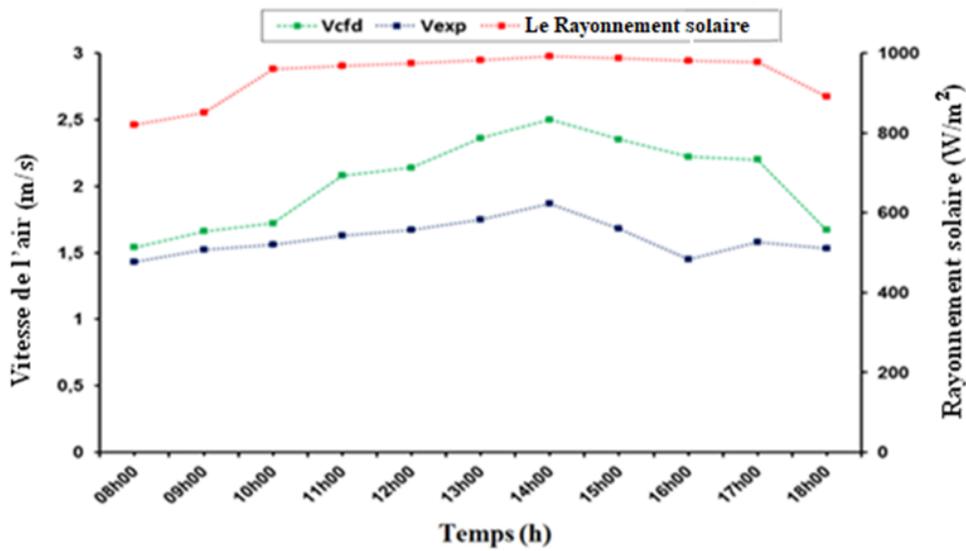


Fig. IV.2 : Comparaison de la vitesse de l'air calculée par CFD et de la vitesse de l'air mesurée à l'entrée de la cheminée avec le rayonnement solaire en fonction du temps (31 Juillet 2016)

IV.2.3. Flux d'air à l'intérieur de la cheminée

La figure (IV.3) décrit le champ de température et les lignes de courant obtenus par CFDANSYS Fluent. On peut observer la génération d'un écoulement de fluide ascendant dû à un sol chauffé. La température de l'air augmente progressivement dans le collecteur et le flux d'air est dirigé vers le haut à travers la cheminée.

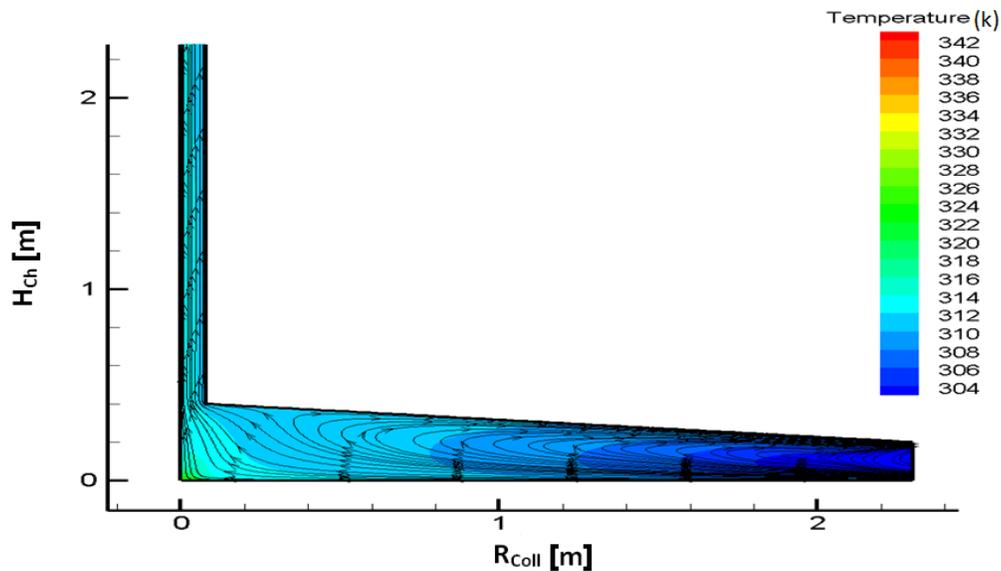


Fig. IV.3 : Lignes de courant d'air et champ de température à l'intérieur du prototype n°1 de cheminée solaire simulé par ANSYS Fluent CFD

L'observation la plus importante est la zone de recirculation à l'entrée du collecteur. Les vitesses négatives à l'entrée du collecteur entraînent une diminution des performances de la cheminée solaire. Une étude plus détaillée du comportement de l'air à l'entrée du collecteur est nécessaire pour améliorer le débit dans la cheminée.

Les figures (IV.4-5) montrent respectivement les champs de vitesse et les vecteurs de vitesse dans le prototype de la cheminée solaire. Comme indiqué, l'énergie cinétique des particules de fluide augmente en raison du phénomène de thermosiphon. Les vitesses atteignent donc leur maximum à travers l'entrée de la cheminée où sera placée l'éolienne. Nous remarquons que des vitesses d'air inférieures à 0,6 m / s se retrouvent à l'intérieur du collecteur, mais qu'elles atteignent un maximum de 1,6 m / s à l'entrée de la cheminée. A l'entrée de la cheminée, une zone de perturbation est observée et les particules d'air sont orientées de manière aléatoire. Cette désorganisation du champ de vitesse provoque une perte d'énergie cinétique par chute de pression. Une étude d'optimisation de la forme de raccordement du collecteur et de la cheminée est très importante pour améliorer les capacités et l'efficacité du prototype.

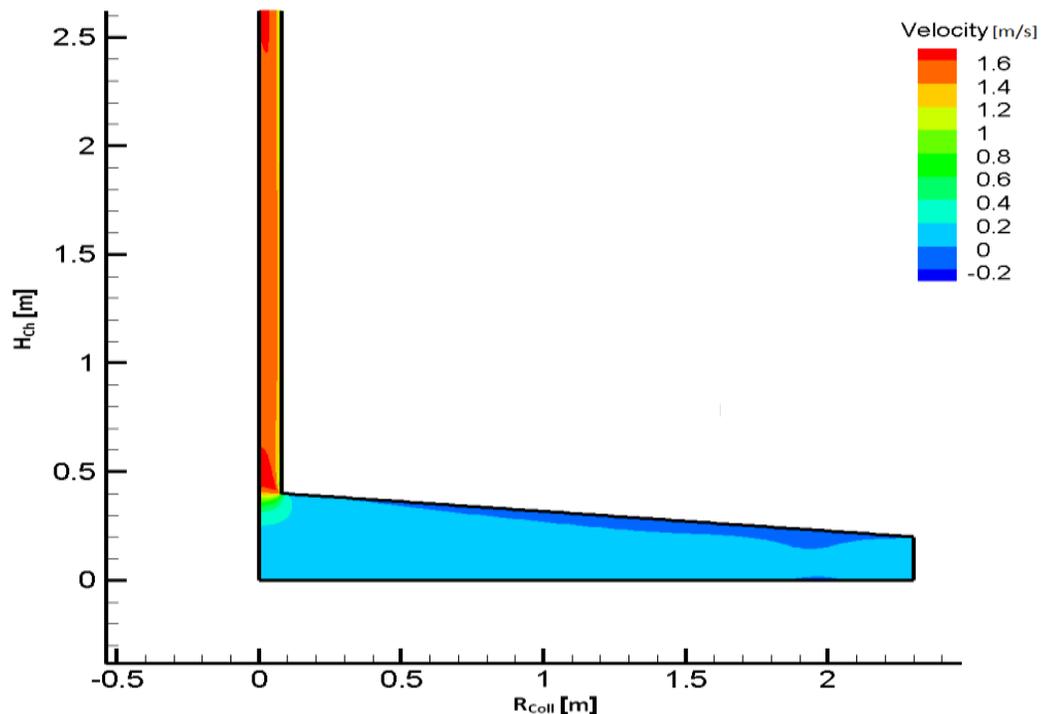


Fig. IV.4 : Champ de vitesse de l'air dans le prototype cheminée solaire par ANSYS Fluent CFD

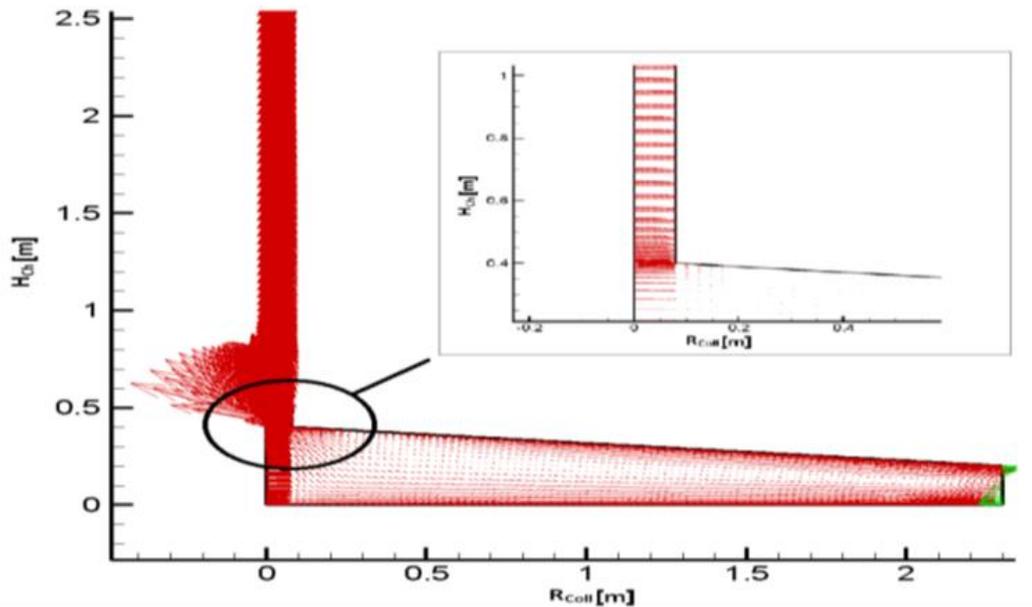


Fig. IV.5 : Vecteurs de vitesse de l'air dans le prototype CCS par ANSYS Fluent CFD

VI.2.4. Estimation de l'efficacité et de la puissance

La figure (IV.6) montre la puissance de sortie prévue de CCS à l'aide du modèle mathématique et du rayonnement solaire en fonction du temps du 31 Juillet 2016. Nous pouvons observer que la puissance de sortie de ce prototype atteint environ 1,10 W entre 14h00 et 17h00. Les résultats montrent qu'il existe un bon accord entre le rayonnement solaire et la puissance de sortie prévue de la cheminée solaire.

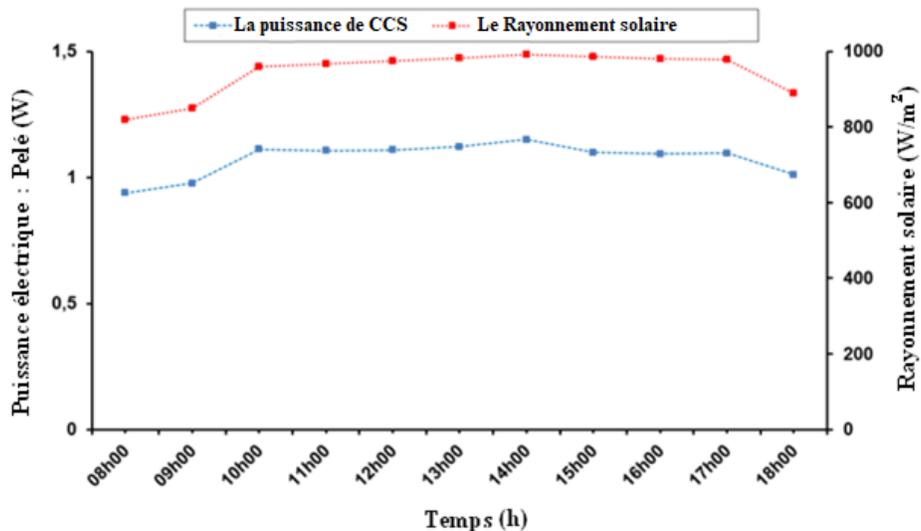


Fig. IV.6 : Variation de la puissance de CCS calculé par le modèle mathématique et du rayonnement solaire en fonction du temps (31 Juillet 2016)

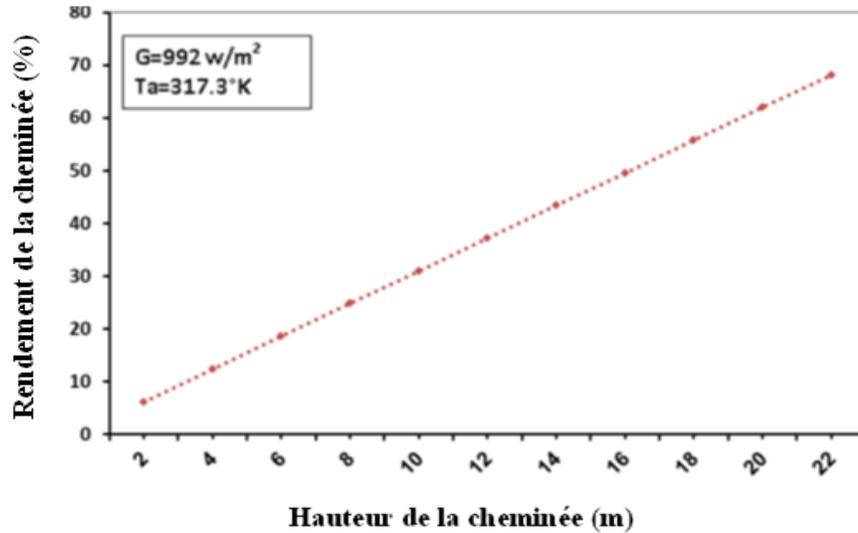


Fig. IV.7 : Effet de la hauteur de la cheminée sur l'efficacité de la cheminée calculée par le modèle mathématique (31 Juillet 2016)

La figure (IV.7) montre les variations de l'efficacité de la cheminée à l'aide du modèle mathématique en fonction de la hauteur de la cheminée pour le rayonnement solaire et de la température ambiante de 992 W/m^2 et $44,3^\circ\text{C}$, respectivement. Il est clairement observé qu'il existe une relation proportionnelle entre l'efficacité de la cheminée et la hauteur de la cheminée, l'efficacité augmentant avec l'augmentation de la hauteur de la cheminée.

La figure (IV.8) montre les variations de la puissance prédite à l'aide du modèle mathématique en fonction de la hauteur de la cheminée pour un rayonnement solaire de 992 W/m^2 et une température ambiante de $44,3^\circ\text{C}$, respectivement.

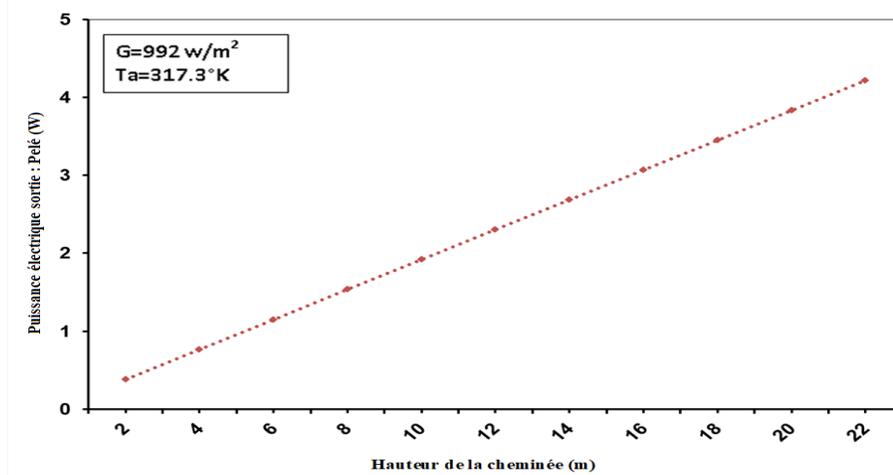


Fig. IV.8 : Effet de la hauteur de la cheminée sur la puissance de CCS calculée par modèle mathématique (31 Juillet 2016)

La courbe traduit l'existence d'une relation proportionnelle entre la puissance de sortie et la hauteur de la cheminée.

La figure (IV.9) illustre la variation de la puissance prédite à l'aide du modèle mathématique pour les dimensions du CCS de Manzanares (tableau 2) et le rayonnement solaire en fonction du temps, à l'aide des paramètres météorologiques de la journée type du 31 Juillet 2016 à Ouargla. Il est clairement observé que la puissance produite avec les dimensions du prototype Manzanares a atteint environ 104 kW entre 10h00 et 17h00. Il est important de mentionner que l'énergie électrique pouvant être produite dans la ville de Ouargla sera supérieure à celle de la ville de Manzanares (75 W) lorsque nous utiliserons les mêmes paramètres géométriques. La forme de la courbe de puissance prédictive confirme la validité du modèle mathématique.

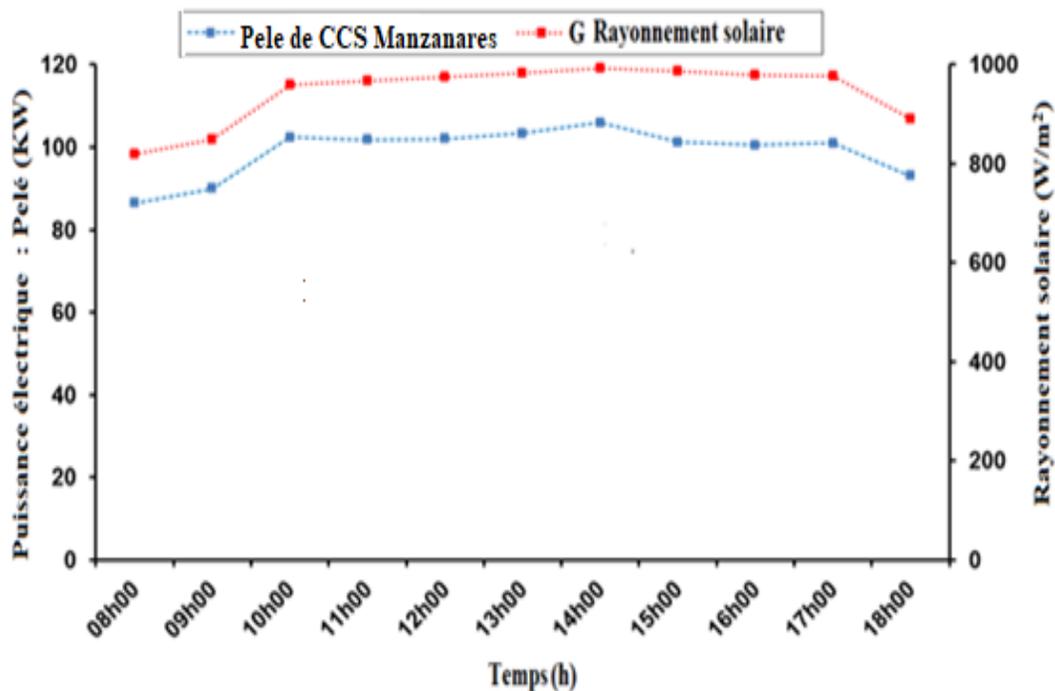


Fig. IV.9 : Variation de la puissance calculée par le modèle mathématique en utilisant les dimensions du CCS de Manzanares et le rayonnement solaire en fonction du temps (31 Juillet 2016)

IV.3. Prototype n°2 avec collecteur carré en verre

IV.3.1. Mesure des températures dans la cheminée solaire

La figure (IV.10) illustre la distribution des températures de l'air dans la serre du collecteur solaire. Il est clair que la température augmente avec le changement de la position des

thermocouples en fonction du temps, et l'endroit le plus chaud cité au centre du collecteur et ça confirme le bon fonctionnement de la serre installée dans notre expérience. Sachant que la différence max entre la température entrée collecteur et la température centre de collecteur arrive presque à 15 C° pour le jour de 15/03/2017 à 14h00.

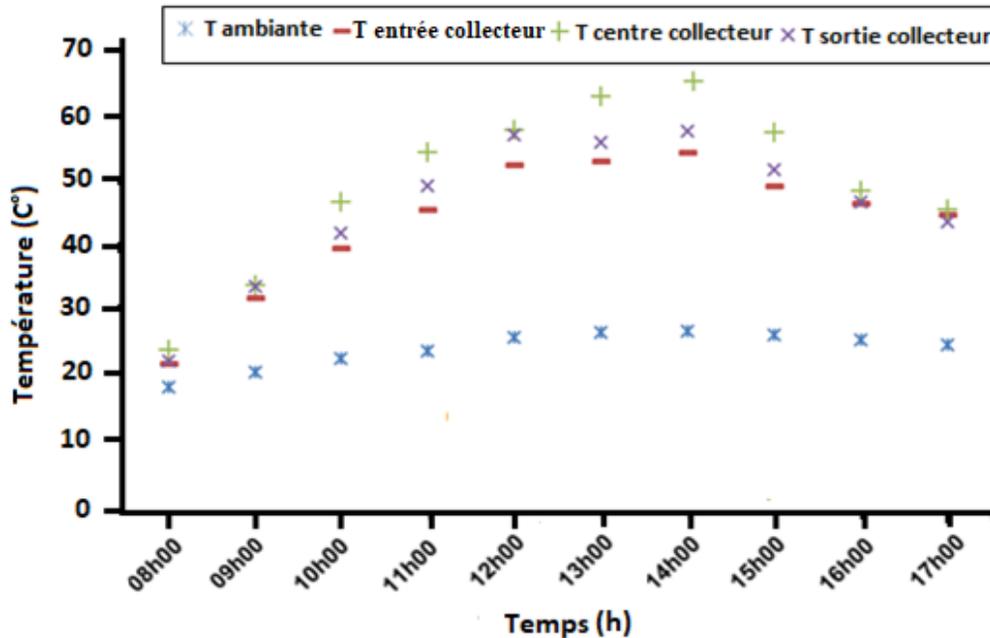


Fig. IV.10 : Distributions des températures dans le prototype n°2 en fonction du temps (15/03/2017)

IV.3.2. Mesure la vitesse de l'air et rayonnement solaire

La figure (IV.11) montre les variations du rayonnement solaire mesuré (G) et de la vitesse de l'air en fonction du temps. Ces paramètres ont été enregistrés à Ouargla au cours de la journée du 15 Mars 2017. Il est clairement observé que la vitesse de l'air et le rayonnement solaire ont une relation proportionnelle et ont à peu près la même forme de courbe. Par conséquent, lorsque le rayonnement solaire augmente, la vitesse de l'air augmente jusqu'à atteindre la valeur maximale de $3,4\text{ m/s}$ pour une valeur de rayonnement solaire de 970 W/m^2 à 14h00, et commence à diminuer jusqu'à $1,7\text{ m/s}$ pour une valeur de rayonnement solaire de 840 W/m^2 à 17h00.

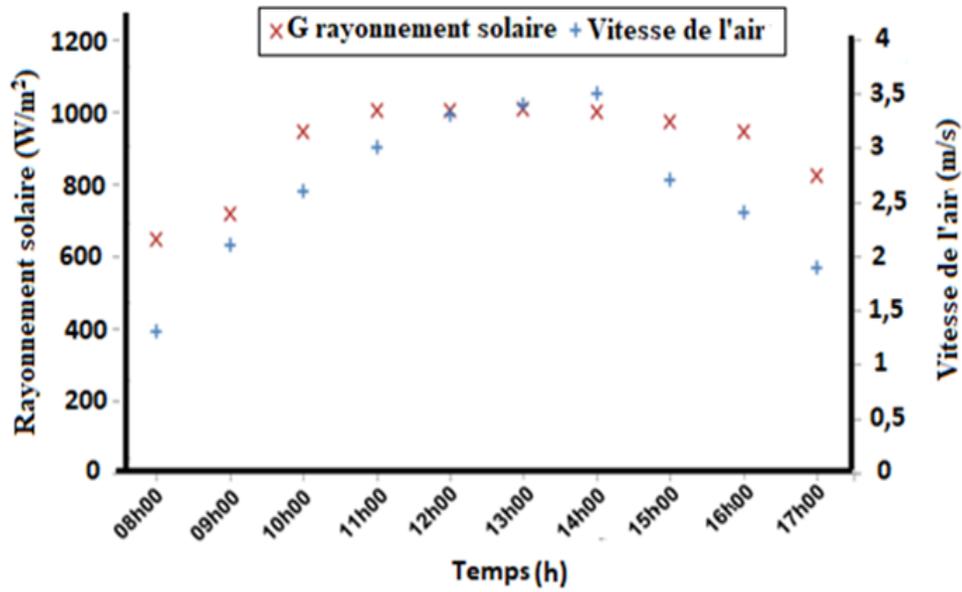


Fig. IV.11 : Variation de la Vitesse de l'air mesurée à la sortie du collecteur et le rayonnement solaire en fonction du temps (15/03/2017)

La figure (IV.12) montre les variations de température ambiante mesurée (T_a) et de la vitesse de l'air en fonction du temps. Ces paramètres ont été enregistrés à Ouargla au cours de la journée du 15 Mars 2017.

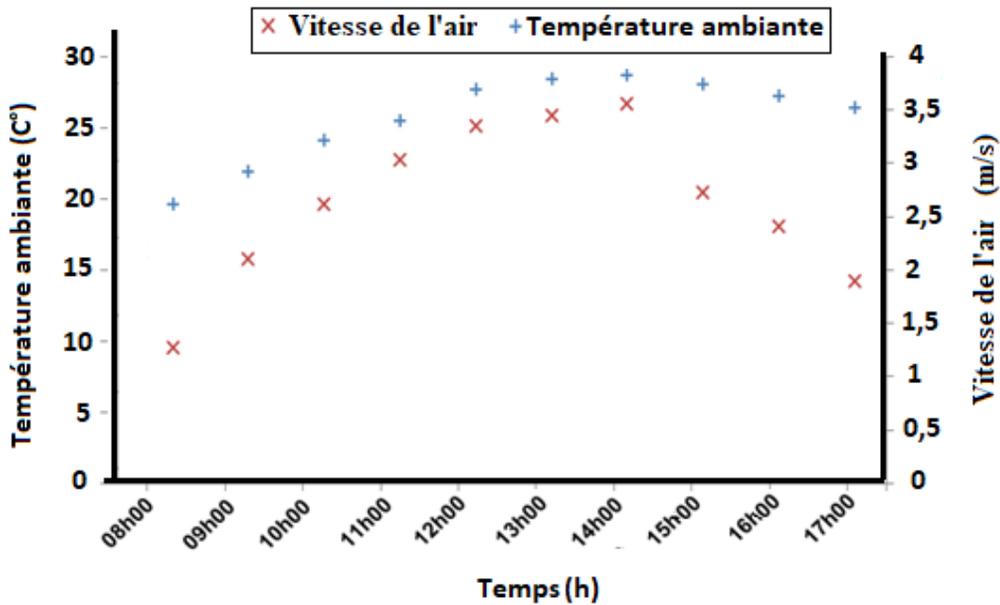


Fig. IV.12 : Variation de la Vitesse de l'air mesurée à la sortie du collecteur et la température ambiante solaire en fonction du temps (15/03/2017)

Il est facilement observé que lorsque la température ambiante augmente la vitesse de l'air augmente jusqu'à atteindre la valeur maximale de 3,4 m/s pour une valeur de température ambiante de 27 C° à 14h00, et commence à diminuer jusqu'à 1,7 m/s pour une valeur de température ambiante de 23 C° à 17h00. Donc on peut dire aussi que la vitesse de l'air et la température ambiante ont une relation proportionnelle.

IV.4. Prototype n°3 avec collecteur circulaire en plastique

IV.4.1. L'effet des paramètres environnementaux dans la vitesse d'entrée cheminée sans et avec l'intégration du réchauffeur d'eau électrique.

La figure (IV.13) montre la variation de rayonnement solaire et de la vitesse de l'air mesurées en fonction du temps pour le 8 Février 2017, sans intégration du réchauffeur-eau électrique. Il est clairement observé que le rayonnement solaire et la vitesse de l'air ont une relation proportionnelle dans laquelle les valeurs enregistrées après le lever du soleil sont respectivement de 539 W/ m² et 1,24 m/s. Ces valeurs continuent d'augmenter jusqu'à atteindre les valeurs maximales de 1085 W/m² et 4,9 m/s à 14h00, et diminuent jusqu'au coucher du soleil. On peut déduire que le rayonnement solaire à une bonne influence sur l'efficacité de la cheminée solaire.

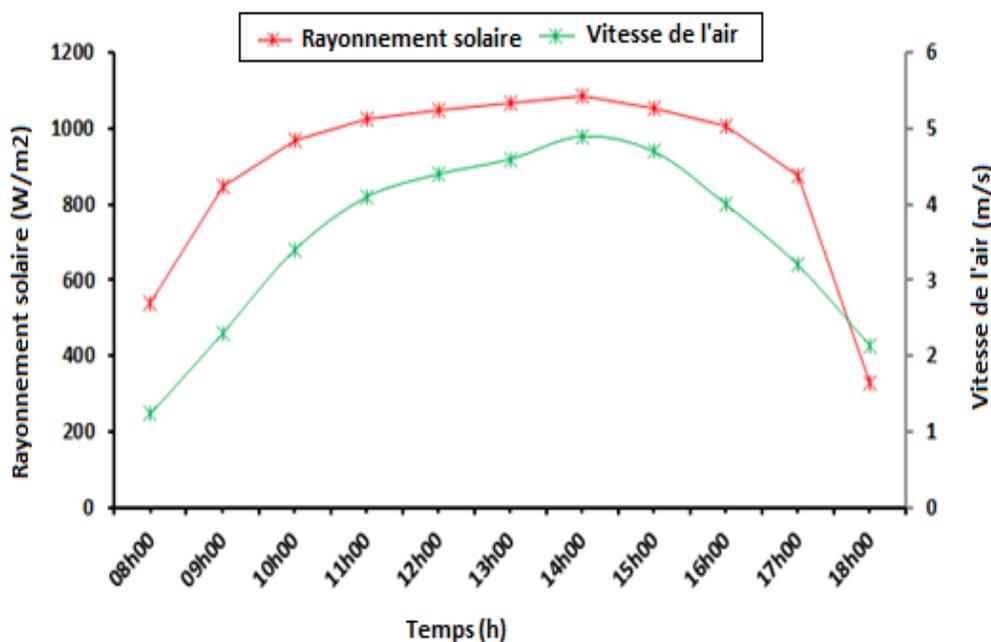


Fig. IV.13 : Variation de la vitesse de l'air mesuré et le rayonnement solaire en fonction du temps sans intégration de réchauffe d'eau électrique (8 Février 2017)

La figure (IV.14) présente la variation de la température ambiante et de la vitesse de l'air mesurées en fonction du temps pour le 8 Février 2017, sans intégration du réchauffeur d'eau. On constate que la vitesse de l'air augmente avec la température ambiante, où les valeurs maximales et minimales de température sont respectivement de 24,9 et 13,4 ° C. Il semble qu'il existe également une relation proportionnelle entre la température ambiante et la vitesse de l'air, mais elle n'est pas très claire par rapport au rayonnement solaire dans la figure (IV 13), où ces deux paramètres ont un effet direct sur la performance de la cheminée solaire.

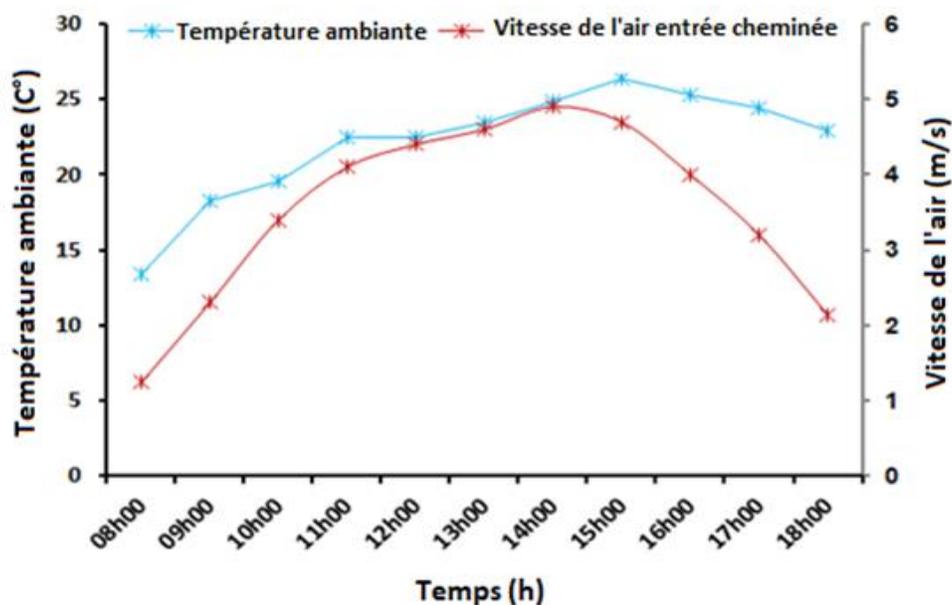


Fig. IV.14 : Variation de la vitesse de l'air mesuré et la température ambiante en fonction du temps sans l'intégration de réchauffeur d'eau électrique (8 Février 2017).

IV.4.2. L'effet du réchauffeur d'eau électrique intégré avec la cheminée solaire

La figure (IV.15) montre la variation de la température mesurée, telle que la température ambiante, la température d'entrée et de sortie de l'eau et la vitesse de l'air en fonction du temps pour les deux jours de 27 et 28 Février 2017, avec l'intégration du réchauffeur d'eau électrique. Il est clairement observé qu'il y a une bonne amélioration de la vitesse de l'air avec intégration du réchauffeur d'eau, elle atteint la valeur de 3,4 m/s, par conséquent, la valeur de la vitesse de l'air atteinte 1,24 m/s sans intégration de réchauffeur d'eau. On peut déduire que d'intégration du réchauffeur d'eau électrique avec le prototype améliore la vitesse de l'air donc améliore les performances de la CCS

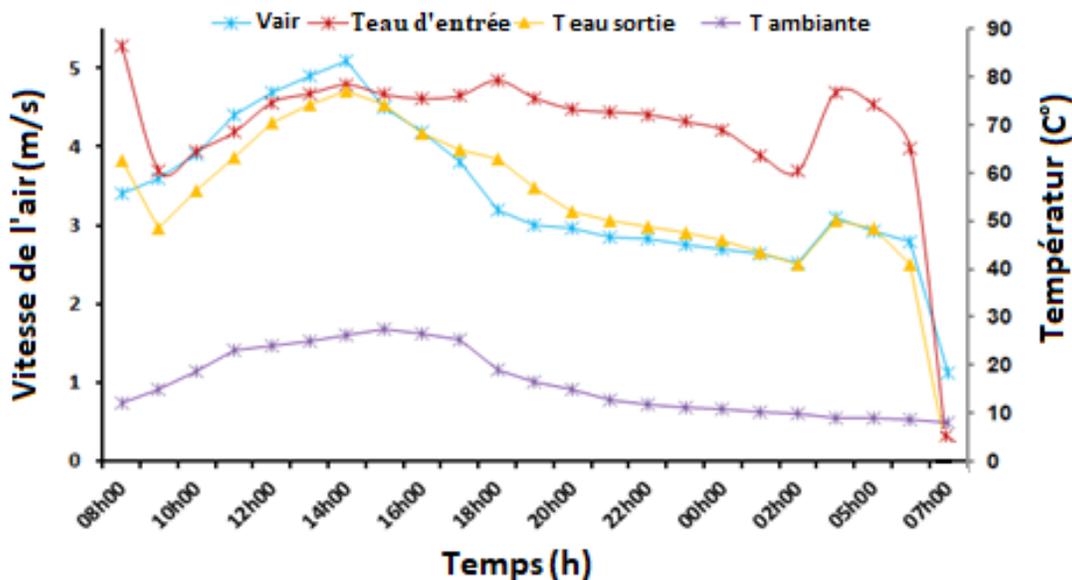


Fig. IV.15 : Variation de la vitesse de l'air et les températures de l'eau entrée et sortie du collecteur en fonction du temps avec intégration du réchauffeur d'eau électrique (27 et 28 février 2017).

La figure (IV.16) montre également la variation des températures ambiantes et le rayonnement solaire mesurées pour les deux jours de 8, 27 Février 2017, en fonction du temps, sans et avec l'intégration du chauffe-eau.

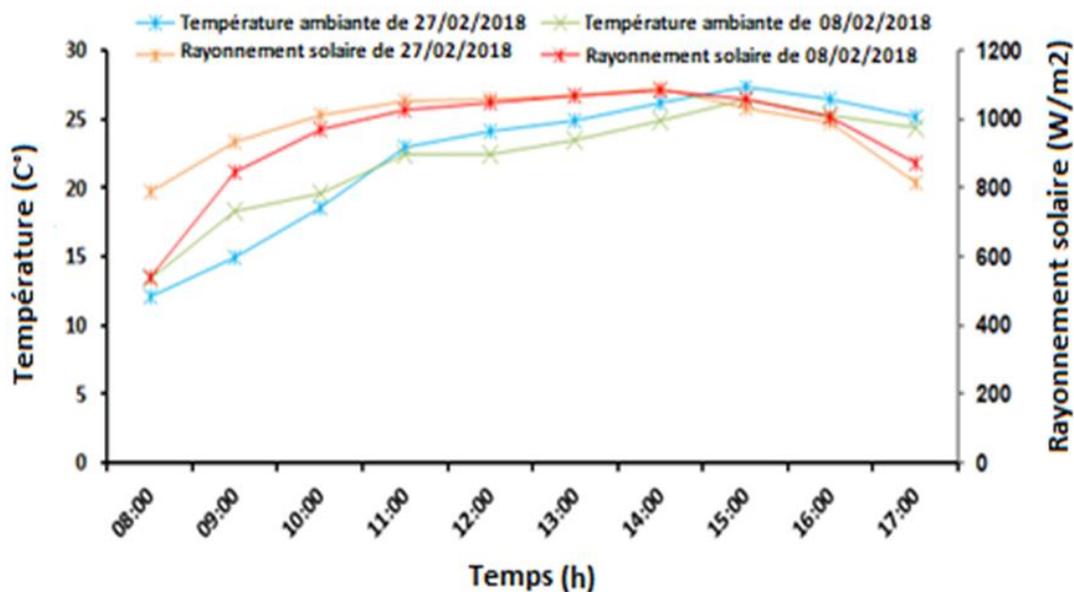


Fig. IV.16 : Comparaison des paramètres météorologiques pour les deux jours (le 8 et 27 février 2017).

L'objectif de présenter ces valeurs est de comparer les mesures enregistrées pour les deux jours et de confirmer qu'il n'y a pas de grande différence entre les paramètres météorologiques et que cela nous permette de comparer la puissance électrique de cheminée solaire sans et avec intégration du réchauffeur d'eau électrique présentée dans la figure suivante (**Fig. IV.18**). Il est observé que les mesures des paramètres météorologiques pour des deux jours sont approximativement les mêmes.

La figure (**IV.17**) montre la variation de la vitesse de l'air en fonction du temps pour les deux jours de 8, 27 Février 2017, avec et sans intégration du chauffe-eau. Il est clairement observé qu'après le lever du soleil et lorsque la température ambiante est basse, les valeurs de la vitesse de l'air sont très améliorées en utilisant l'intégration du réchauffeur d'eau électrique où les valeurs enregistrées sans et avec l'intégration du réchauffeur d'eau sont respectivement 1,24 et 3,4. Et les valeurs de la vitesse après le coucher du soleil sans l'utilisation de réchauffeur d'eau a disparu jusqu'à zéro, mais avec l'utilisation de réchauffeur d'eau électrique, reste existée même avec des valeurs faible dans pendant la période de nuit qui confirme l'efficacité de l'intégration de système de réchauffeur d'eau avec la CCS

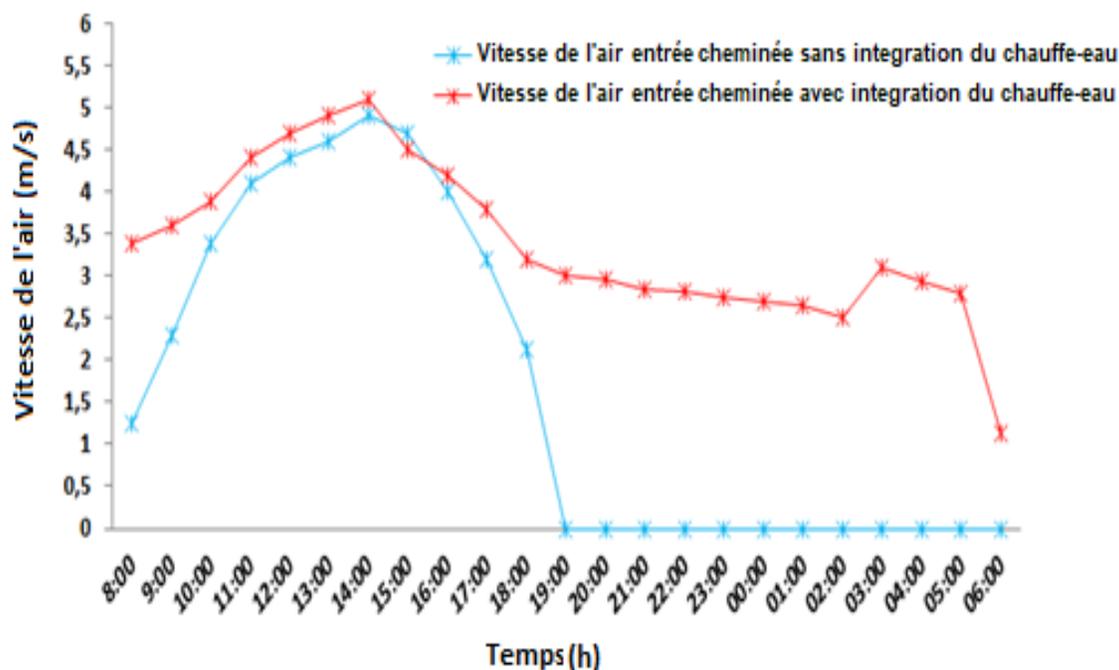


Fig. IV.17 : Variation de la vitesse de l'air à l'entrée de la cheminée avec et sans intégration du chauffe-eau électrique (8 et 27 février 2017)

IV.4.3. Estimation de la puissance de la cheminée solaire

La figure (IV.18) illustre la variation de la puissance de produite en fonction de temps pour les deux jours de 8, 27 Février 2017, avec et sans l'intégration de réchauffeur d'eau électrique. On a observé que la puissance au lever du soleil et avec l'utilisation de réchauffeur d'eau est élevée par sans l'utilisation de réchauffeur d'eau, et les valeurs maximales sans et avec réchauffeur d'eau sont respectivement 66.32, 79.87W. On a aussi observé que au coucher du soleil, les valeurs de puissance de sortie sans intégration de réchauffeur d'eau deviennent nulles mais avec l'intégration du système restées en production toute la nuit jusqu'à l'arrêt total de réchauffeur d'eau. Il est clair que cette intégration améliore l'efficacité de CCS et de maintenir la production pendant 24h/24h, donc on peut déduire que cette intégration peut être une solution pour le problème de stockage d'énergie thermique dans la cheminée solaire dans la région où la grande source d'énergie disponible, pour éviter le problème de discontinue du production d'énergie électrique.

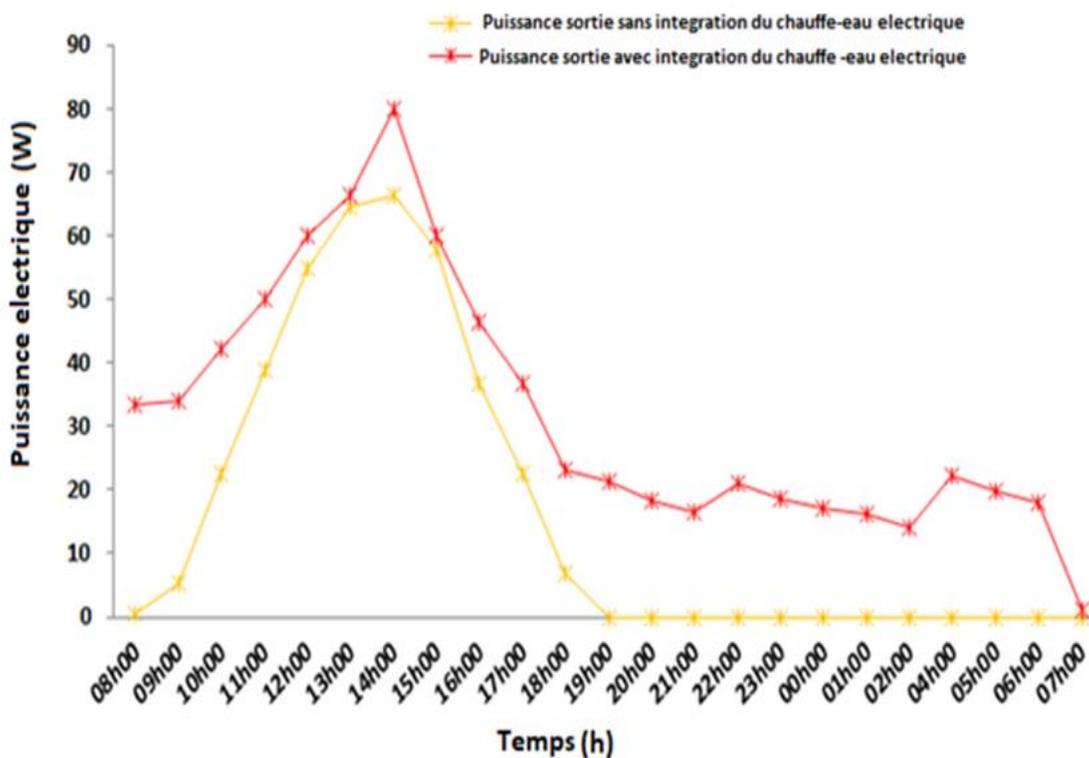


Fig. IV.18 : Variation de la puissance de CCS avec et sans intégration de réchauffeur d'eau électrique

IV.5. Conclusion

Ce chapitre présente les résultats ainsi que leurs discussions pour l'étude expérimentale des prototypes cheminée solaire à petite échelle et aussi les résultats de l'étude théorique par l'utilisation de modèle numérique ANSYS FLUENT CFD et modèle mathématique pour le calcul de la puissance. On peut résumer les résultats trouvés dans notre étude comme suit :

Les valeurs de météorologique enregistrées pour le jour typique du 31 Juillet 2016 sont Le rayonnement solaire maximal et les températures ambiantes maximales respectivement de 992 W/m^2 et $44,3 \text{ }^\circ\text{C}$ à 14h00. Pour le prototype n°1, La vitesse de l'air moyenne mesurée est de $1,6 \text{ m/s}$ et la vitesse de l'air calculée par ANSYS FLUENT CFD est de 2 m/s , et la valeur de la puissance électrique calculée par le modèle mathématique pour le prototype n°1 de $1,10 \text{ W}$, nous avons constaté que l'efficacité de la cheminée a une relation proportionnelle avec le rayonnement solaire ainsi que la hauteur de la cheminée. On a calculé la puissance électrique de la CCS de Manzanares avec l'utilisation des paramètres météorologiques de la ville d'Ouargla, et la puissance calculée est de 104 KW . On peut déduire que la Wilaya de Ouargla est plus avantageuse que la ville de Manzanares ou la puissance électrique a atteint uniquement 75 KW .

Afin d'étudier l'efficacité de la matière de la couverture du collecteur, nous avons utilisé dans le prototype n°2 une collecteur en verre au lieu le plastique, et la valeur de la vitesse de l'air maximale a atteint de $3,4 \text{ m/s}$ avec un rayonnement solaire de 970 W/m^2 à 14h00, pour le jour typique de 15 Mars 2017, qui confirme l'efficacité de verre par rapport l'utilisation de couverture en plastique dans le prototype 1 qui a atteint uniquement la valeur max de la vitesse de l'air de 1.8 m/s .

Une autre étude expérimentale a été effectuée afin de trouver la solution sur le problème du fonctionnement continu de la centrale électrique à cheminée pendant la période de nuit ou en cas de faible rayonnement solaires. Nous avons construit un prototype n°3 plus grand par rapport aux prototypes n°1 et 2, la proposition est d'utiliser une source de chaleur externe et durable pour conserver la température dans la serre de collecteur pendant la nuit et en cas de ciel nuageux, avec l'intégration d'une source géothermique de l'eau de la nappe Albienne. En raison de coût et de la difficulté de réalisation de cette étude expérimentale à l'Université Kasdi Merbah d'Ouargla, nous avons utilisé un réchauffeur d'eau électrique pour remplacer la source géothermique d'eau albienne. Suite aux résultats trouvés, on peut déduire que cette intégration a

amélioré les performances et l'efficacité de la CCS et maintenant le fonctionnement continu de la centrale, sachant que la vitesse de l'air maximale mesurée sans et avec l'intégration du chauffe-eau est respectivement de 4,9, 5,1 m/s, et les valeurs maximales de la puissance obtenue sont respectivement de 66,3W et 79,8W.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale

La production d'électricité à l'aide d'une cheminée solaire n'est pas un nouveau sujet de recherche dans le monde. De nombreux projets ont été réalisés dans le but d'étudier les possibilités d'installation du système de cheminée solaire. Ce travail présente une étude expérimentale des prototypes de petite échelle de cheminée solaire et une étude théorique utilisant un modèle numérique de CFD et un modèle mathématique. Ces prototypes ont été installés à l'Université de Ouargla, au sud-est de l'Algérie. Les mesures des paramètres qui ont un effet direct sur la vitesse du flux de l'air et la puissance ont été enregistrées.

Les résultats enregistrés pour le prototype n°1 où le rayonnement solaire maximal et la température ambiante maximale sont respectivement de 992 W/m^2 et $44,3 \text{ }^\circ\text{C}$ à 14h00 pour le jour typique du 31 Juillet 2016. La vitesse de l'air maximale mesurée dans le prototype est de $1,87 \text{ m/s}$, et la vitesse de l'air calculée par le modèle numérique CFD est de $2,5 \text{ m/s}$ pour les mêmes conditions. Et également, on a utilisé un modèle théorique afin d'estimer la puissance produite par le prototype n°1 où la puissance électrique a atteint $1,10 \text{ W}$ entre 10h00 et 17h00. Et enfin, on a utilisé un modèle mathématique pour calculer la puissance du CCS de Manzanares avec les paramètres météorologiques de la ville d'Ouargla. La puissance produite a atteint 104 kW . On peut en conclure que la ville d'Ouargla est plus avantagée que la ville de Manzanares du point de vue climatique. Dans le même contexte, on a étudié l'influence des différents paramètres sur la performance du prototype n°2, sachant qu'on a utilisé dans ce prototype un collecteur en verre.

Afin d'étudier l'efficacité de la matière sur transfert de chaleur dans le collecteur ainsi que de la vitesse de l'air à l'entrée de la cheminée. On a observé que la vitesse de l'air et le rayonnement solaire ont une relation proportionnelle, et atteignent la valeur maximale de $3,4 \text{ m/s}$. pour un rayonnement solaire de 970 W / m^2 à 14h00.

En raison du problème de fonctionnement continu pendant la nuit ou en cas de manque des radiations solaires, le prototype n°3 et semble être une solution à ce problème. L'idée proposée est d'utiliser d'une source de chaleur externe qui remplace l'énergie solaire pendant la nuit et en cas de ciel nuageux, grâce à l'intégration d'une source d'eau géothermique, à savoir : l'eau de la nappe albiennaise qui existe en grande quantité dans la Wilaya d'Ouargla où le prototype expérimental a été installé. Et en raison du problème du coût et la difficulté de la réalisation de ce prototype avec une source géothermique, on a utilisé dans notre étude expérimentale un

réchauffeur d'eau électrique pour remplacer la source géothermique de l'eau Albienne. Les résultats de cette étude révèlent que l'utilisation de cette intégration améliore la performance et l'efficacité tout en maintenant le fonctionnement continu de la centrale 24h/24h. La vitesse de l'air maximale mesurée sans et avec l'intégration du réchauffeur d'eau électrique est respectivement de 4,9 et 5,1 m/s, et les valeurs maximales de la puissance obtenue sont respectivement de 66,3W et 79,8W.

Finalement, on peut déduire suivant les résultats trouvés dans notre étude expérimentale et par la simulation que la production d'électricité par CCS est faisable. Par conséquent, la ville d'Ouargla est un lieu typique pour les installations à énergie solaire telles que les centrales à cheminée solaire.

Perspectives

- Simuler par CFD le prototype cheminée solaire N° 2 avec collecteur carré en verre
- Simuler par CFD le prototype cheminée solaire N°3 avec collecteur circulaire en plastique
- Changer dans le prototype cheminée solaire N°3 le type de couverture du collecteur en verre
- Réaliser une étude expérimentale sur la possibilité d'installation de turbogénérateur à petite échelle dans les prototypes cheminée solaire

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

- [1] A. Asnaghi, S.M. Ladjevardi, Solar chimney power plant performance in Iran, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 16 (2012) 3383–3390.
- [2] R.M. Nejad, A survey on performance of photovoltaic systems in Iran, *Iran J. Energy Environ.*, 6 (2015) 77–85.
- [3] Dhahri, Amel et Omri, Ahmed. A review of solar chimney power generation technology. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2013, vol. 2, no 3, p. 1-17.
- [4] H.H. Al-Kayiem, O.C. Aja, Historic and recent progress in solar chimney power plant enhancing technologies, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 58 (2016) 1269–1292.
- [5] L. Zuo, Y. Yuan, Z. Li, Y. Zheng, Experimental research on solar chimneys integrated with seawater desalination under practical weather condition, *Desalination*, 298 (2012) 22–33.
- [6] A.G. Ferreira, C.B. Maia, M.F.B. Cortez, R.M. Valle, Technical feasibility assessment of a solar chimney for food drying, *Sol. Energy*, 82 (2008) 198–205.
- [7] M.H. Sellami, K. Loudiyi, Electrolytes behavior during hydrogen production by solar energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70 (2017) 1331-1335.
- [8] Schlaich Bergermann und Partner (2006).
- [9] Schlaich, J. (1994). *The Solar Chimney: Electricity from the Sun*. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart. (Cited on pages 13, 16, 34, 55, 82, 84, 101, and 103.)
- [10] Trieb, F., Langniß, O. and Klaiß, H. (1997). Solar electricity generation - a comparative view of technologies, costs and environmental impact. *Solar Energy*, vol. 59, no. 1-3, pp. 8899. (Cited on page 13)
- [11] Gannon, A.J. (2002). *Solar Chimney Turbine Performance*. Ph.D. thesis, University of Stellenbosch, Stellenbosch, South Africa. (Cited on pages 14 and 17.)
- [12] Martin Kaltschmitt, Wolfgang Streicher, *Renewable energy: technology economics and environment*, Edition Springer, 2007.
- [13] R. Wengenmayr and T. Bührke, *Renewable Energy*. John Wiley & Sons, 2011.
- [14] C. Ngo and J. Natowitz, *Our Energy Future: Resources, Alternatives and the Environment*. John Wiley & Sons, pp.184-186, 2009.
- [15] C.M. Meyer "Towers of power the solar updraft tower", *energize* - September 2008
- [16] T. Hamilton, *Mad Like Tesla: Underdog Inventors and Their Relentless Pursuit of Clean*

- Energy. ECW Press, pp.93-103, 2011.
- [17] W. Ley, *Engineers' dreams*. Viking Press, 1954.
- [18] T. W. Von Backström, R. Harte, R. Höffer, W. B. Krätzig, D. G. Kröger, H.-J. Niemann, and G. P. a. G. Van Zijl, *State and Recent Advances in Research and Design of Solar Chimney Power Plant Technology*, VGB powertech, vol. 88, no 7, 2008, pp.64-71.
- [19] I. S. F. Jones, *Engineering Strategies for Greenhouse Gas Mitigation*. Cambridge University Press, 2011.
- [20] A. Demirbas, *Biofuels: Securing the Planet's Future Energy Needs*. Springer, pp.27-28, 2008.
- [21] J. Schlaich, *Solar Chimney: Electricity from the Sun*. Stuttgart; Edition Axel Menges, p.16, 1995
- [22] Pasumarthi, N. and S.A. Sherif, *Performance of a demonstration solar chimney model for power generation*, in Proc. the 35th Heat Transfer and Fluid Mechanics, June 1997, Sacramento, USA., pp.203-240.
- [23] T. P. Fluri, *Turbine Layout for and Optimization of Solar Chimney Power Conversion Units*. University of Stellenbosch, 2008.
- [24] A. J. Gannon, *Solar chimney turbine performance*, Thesis, Stellenbosch: University of Stellenbosch, 2002.
- [25] I.F.Lombaard and D.G.Kröger, *Solar collector performance*, R AND D Journal, vol 18, n°3, 2002.
- [26] M. O. Hamdan, *Analysis of a solar chimney power plant in the Arabian Gulf region II*, *Renewable Energy*, vol. 36, no 10, pp. 2593-2598, 2011.
- [27] A. O. Babaleye, *Design and Thermodynamic Analysis of Solar Updraft Tower*, 2011.
- [28] J. P. Pretorius and D. G. Kröger, *Critical evaluation of solar chimney power plant performanceII*, *Solar Energy*, vol. 80, no 5, pp. 535-544, 2006.
- [29] N. Ninic, *Available energy of the air in solar chimneys and the possibility of its ground- level concentration,II* *Solar Energy*, vol. 80, no 7, pp. 804-811, 2006.
- [30] A. Koonsrisuk, *Mathematical modelling of sloped solar chimney power plants*, *Energy*, vol. 47, no 1, pp. 582-589, 2012.
- [31] A.J.Gannon and T.W.Von Backström, *Solar chimney cycle analysis with system loss and solar collector performance*, *Journal of Solar Energy Engineering*, 122, pp.133–7, 2000.
- [32] X. Zhou, F. Wang, J. Fan, and R. M. Ochieng, *Performance of solar chimney power plant in*

- Qinghai-Tibet Plateau ,|| Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 14, no 8, p. 2249-2255, 2010.
- [33] M. A. dos S. Bernardes, A. Voß, and G. Weinrebe, Thermal and technical analyses of solar chimneys, *Solar Energy*, vol. 75, no 6, p. 511-524, 2003.
- [34] Bonnelle D. Solar chimney, water spraying energy tower, and linked renew-able energy conversion devices: presentation, criticism and proposals. Doctoral thesis. Lyon 1, France: University Claude Bernard; July 2004. Registration Number: 129-2004.
- [35] S. Bernardes and M. A. Dos, Technical, economic and ecological analysis of wind power plants, mai 2004.
- [36] J. Schlaich, Tension structures for solar electricity generation, *Engineering Structures*, vol. 21 , pp. 658-668, 1999.
- [37] M. Kaltschmitt, W. Streicher, and A. Wiese, *Renewable energy: technology, economics, and environment*, Springer, 2007.
- [38] X. Zhou, F. Wang, and R.M. Ochieng, A review of solar chimney power technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 2315-2338, 2010.
- [39] Z. R. Yabuz and K. Delikanlı, Güneş bacasında konstrüktif iyileştirme çalışmalarına performans artırıcı yöntemle araştırılması. SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
- [40] G.Schwarz and H.Knauss, Fluidic design of the wind power plant Manzanares (Aerodynamic design of the SCPP in Manzanares). Tech.Rep. Institute Fur Aerodynamik, Universität Stuttgart on German), 1981.
- [41] J.Schlaich, .Schiel, K.Friedrich, G.Schwarz, P.Wehowsky, W.Meinecke and M.Kiera, the solar chimney: Transferability of results from the Manzanares solar chimney plant to large scale plants, Tech.Rep. Schlaich Bergermann und Partner CEs, Stuttgart 1995.
- [42] F. Denantes and E. Bilgen, —Counter-rotating turbines for solar chimney power plants, *Renewable Energy*, vol. 31, no 12, p. 1873-1891, 2006.
- [43] J.P. Pretorius, *Solar Tower Power Plant Performance*, Thesis, Stellenbosch: University of Stellenbosch, 2004.
- [44] A. J. Gannon and m, Solar Chimney Turbine Performance, *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 125, no 1, p. 101, 2003.
- [45] T. W. von Backström and A. J. Gannon, Solar chimney turbine characteristics , *Solar Energy*, vol. 76, pp. 235-241, 2004.

- [46] T. W. von Backström and T. P. Fluri, "Maximum fluid power condition in solar chimney power plants-An analytical approach", *Solar Energy*, vol. 80, n° 11, pp. 1417-1423, 2006.
- [47] M. Thirugnanasambandam, S. Iniyar, and R. Goic, A review of solar thermal technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no 1, pp. 312-322, 2010.
- [48] S. Nizetic and B. Klarin, A simplified analytical approach for evaluation of the optimal ratio of pressure drop across the turbine in solar chimney power plants, *Applied Energy*, vol.87, no 2, pp.587-591, 2010.
- [49] T.P.Fluri and T.W.von Backström, Performance analysis of the power conversion unit of a solar chimney power plant, *Solar Energy*, 82, pp.999–1008, 2008.
- [50] A. O. Chikere, H. H. Al-Kayiem, and Z. A. Abdul Kari, Review on the Enhancement Techniques and Introduction of an Alternate Enhancement Technique of Solar Chimney Power Plant , *Journal of Applied Sciences*, vol. 11, no 11, pp. 1877-1884, 2011.
- [51] The Solar Chimney. The energy storage. Retrieved 1 December 2001
- [52] 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, *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 127, no 1, p. 117, 2005.
- [53] R. A. Hedderwick, Performance evaluation of a solar chimney power plant, Thesis, Stellenbosch: University of Stellenbosch, 2000.
- [54] Y. Zheng, T. Z. Ming, Z. Zhou, X. F. Yu, H. Y. Wang, Y. Pan, and W. Liu,.Unsteady numerical simulation of solar chimney power plant system with energy storage layer , *Journal of the Energy Institute*, vol. 83, no 2, p. 86-92, 2010.
- [55] Ming Ting, Liu Wei, and Huang Xiaoming, Unsteady coupled numerical analysis of solar thermal airflow power generation system , *Journal of Engineering Thermophysics*, vol. 30, n° 2, p. 4, 2009
- [56] C. Yisheng, "2, YANG Yan 1, WEI Yali 2, YANG Jing hui 1, TIAN yanrong1 (1. School of Environment and Energy, Inner Mongolia University of Science and Technology, BaoTou 014010, China; 2. Institute of New Energy Power Generation, Inner Mongolia University of Science and Technology, BaoTou 014010, China); Solar hot air-flows power generation and its application in Wuhai of Inner Mongolia [J]," *Energy Research and Information*, vol. 2, 2010.
- [57] X. Zhou, J. Yang, B. Xiao, and G. Hou, Experimental study of temperature field in a solar

- chimney power setup ,Applied Thermal Engineering, vol. 27, no 11-12, pp. 2044-2050, 2007.
- [58] X. Zhou, J. Yang, B. Xiao, and G. Hou, Simulation of a pilot solar chimney thermal power generating equipment, Renewable Energy, vol. 32, no 10, pp. 1637-1644, 2007.
- [59] İ.Üçgül et A. Koyun, Experimental review of the design parameters and performance of the Solar Chimney, Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, vol. 16, no 3, 2011
- [60] 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, pp. 2005-2012, 2008.
- [61] Z. R. Yabuz and K. Delikanlı, Güneş Constructive improvement works in chimney and investigation of performance enhancer methods. SDU Institute of Science and Technology, 2009.
- [62] T. A. Sabah and T. C. Miqdam, A study of free Convection in a solar chimney model, Eng.&Tech. Journal ,Vol. 29, N°. 14, 2011.
- [63] 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, Computers & Fluids, vol. 38, no 3, pp. 625-636, 2009.
- [64] T. Cebeci, J. P. Shao, F. Kafyeke, and E. Laurendeau, Computational Fluid Dynamics for Engineers: From Panel to Navier-Stokes Methods with Computer Programs. Springer, 2005.
- [65] O. H. Mohammad and R. Obada, experimental solar chimney data with analytical model prediction, World Renewable Energy Forum Denver, CO May 13-17, 2012.
- [66] M. Najmi, A. Nazari, H. Mansouri, and G. Zahedi, Feasibility study on optimization of a typical solar chimney power plant , Heat Mass Transfer, vol. 48, no 3, pp. 475-485, 2012.
- [67] A. Al-Dabbas, A performance analysis of solar chimney thermal power systems ,Thermal Science, vol. 15, no 3, pp. 619-642, 2011.
- [68] A. B. Kasaeian, E. Heidari, and S. N. Vatan, Experimental investigation of climatic effects on the efficiency of a solar chimney pilot power plant , Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, no 9, pp. 5202-5206, 2011
- [69] Z.Ibrahim, etude et réalisation expérimentale du fonctionnement d'une tour solaire, Master thesis, Gafsa University-Tunisia, 2009.
- [70] A.Hussain, 2007, Hybrid geothermal/solar energy technology for power generation, Higher

Institute of Engineering.

- [71] A. Inc., "CFX-Solver Modelling Guide," ed, 2011.
- [72] Chergui T., Lebbi M., Bouhdjar A., Boualit H., Boutina I. Effet du Rayon du Collecteur et de la Hauteur de la Tour sur le Comportement Thermo-hydrodynamique d'une Centrale à Cheminée Solaire. 1ère Conférence Nationale sur les Energies Renouvelables et leurs Applications 18-19 février 2014, Adrar, Algérie.
- [73] T. Chergui T, S. Larbi & A. Bouhdjar. Thermo-hydrodynamic aspect analysis of flows in solar chimney power plants A case study. *Renew Sustain Energy Rev* (2010).
- [74] B.E. Launder and D.B. Spalding. The numerical computation of turbulent flows. *Comput. Methods Appl. Mech.*; 3:269–89. 1974.
- [75] S. Nizetic, B. Klarin, A simplified analytical approach for evaluation of the optimal ratio of pressure drop across the turbine in solar chimney power plants, *Applied Energy*, mai 2009.
- [76] S. Lal, S.C. Kaushik, R. Hans, Experimental investigation and CFD simulation studies of a laboratory scale solar chimney for power generation, *Sustain. Energy Technol. Assess.*, 13 (2016) 13–22.
- [77] N. Pasumarthi, S.A. Sherif, Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney model part I: mathematical model development, *Int. J. Energy Res.*, 22 (1998) 277–288.