

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté de Technologie

Département d'Electrotechnique



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT LMD

Spécialité : Electrotechnique des énergies renouvelables

Par

NOUAR HADDA

Thème :

Modélisation et Optimisation d'une Centrale de Cheminée Solaire à Chlef, Algérie

Soutenue le 11/07/2021, Devant le jury composé de:

Rachid TALEB	Professeur	Université de Chlef	Président
Toufik TAHRI	Professeur	Université de Chlef	Directeur de thèse
Younes CHIBA	MCA	Université de Médéa	Co- Directeur de thèse
Abdelhafid MOUALDIA	MCA	Université de Médéa	Examineur
Ali KHELIL	Professeur	Université de Chlef	Examineur
Djilali BENYOUCEF	Professeur	Université de Chlef	Invité

Remerciement

Je tiens particulièrement à remercier le professeur **TAHRI Toufik** mon directeur de thèse pour sa patience, sa disponibilité tout au long de la préparation de cette thèse, et surtout ses judicieux conseils et ses critiques constructives pour l'élaboration de ce travail.

Mes sincères remerciements vont à mon co-directeur de thèse le Docteur **CHIBA Younes** de l'Université de Médéa, Je tiens à le remercier pour son omniprésence et ses précieux conseils tout le long de ce travail.

Je suis très honorée que Monsieur le Professeur **Rachid TALEB** ait accepté la présidence du jury, que Messieurs le Docteur **Abdelhafid MOUALDIA** de l'Université de Médéa, le professeur **Ali KHELIL** de l'Université de Chlef aient accepté la charge de juger et d'examiner cette thèse. Leur présence m'apporte une incontestable caution scientifique.

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus profonds à **BENYOUCEF Djilali** professeur à l'université de Chlef, pour ses aides précieuses, ses conseils, son soutien et pour tous ses efforts et pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être membre invité du jury.

Je tiens à remercier vivement le Docteur **Abdelkader MORSLI**, qui a planté l'optimisme dans ma vie scientifique, et pour son soutien moral et son encouragement, et pour tous ses efforts.

Un grand merci au Dr **Abdelghani AZIZI** qu'il m'a donné des aides, des idées et des informations dans ce travail.

Mes remerciements vont également à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Dédicace

Dédicace

*Nous devons avant tout remercier ALLAH, le tout-puissant qui nous a
donné le courage et la volonté de mener à bien notre travail et la
patience d'aller jusqu'au bout du précieux rêve.*

De lever mes mains vers le ciel et de dire

" YA KAYOUM "

*À Mes très chers parents, mon paradis, **Ma mère parfaite**, et **mon père***

L'être le plus généreux, aucune dédicace ne saurait être assez

Eloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices

Que vous n'avez cessé de me faire depuis ma naissance, durant mon

Enfance Et même à l'âge adulte.

Que Dieu vous garde et protège

***Ma mère**, Ce succès aujourd'hui est votre succès J'ai réussi à*

réaliser votre rêve, merci infiniment.

À Mes Grands Père et Mères, A Mes Oncles Et Tantes Et Mes Cousins

À mes très chers frères

À mes très chères sœurs

A mes beaux frères

Mes petits-enfants

A Tous Mes Ami(e)s

*A Toutes La Famille « **Nouar** » et « **Bouchher** ».*

Résumé

L'objectif de ce travail est la modélisation et la simulation de l'effet des paramètres climatiques et géométriques sur la performance de la centrale à cheminée solaire afin d'optimiser son efficacité. La centrale à cheminée solaire (CCS) est un système efficace pour la production d'énergie électrique à partir de l'énergie solaire. La CCS convertit l'énergie solaire en énergie thermique et indirectement en énergie mécanique/électrique en utilisant l'air comme un fluide de travail pour entraîner une turbine connectée à un générateur. En général, une CCS est composée d'une grande serre (collecteur), d'une cheminée et d'une turbine/génératrice.

Dans le cadre de ces travaux, un modèle semi-empirique et un modèle numérique 2D ont été développés pour évaluer l'efficacité de la centrale à cheminée solaire à Chlef, en Algérie. L'air qui s'écoule à travers la cheminée solaire est considéré comme un fluide compressible contrairement au modèle Boussinesq. Ainsi, la modélisation numérique a été effectuée au moyen d'équations Reynolds Average Navier-Stokes (RANS) couplées au modèle de turbulence k-ε. Les paramètres météorologiques utilisés dans cette étude, tels que la température et le rayonnement solaire, ont été mesurés dans la région de Chlef, en 2018. La puissance produite à la sortie du CCS, la vitesse de l'air et la température ont été calculées et comparées aux résultats expérimentaux obtenus à partir du prototype de Manzanares pour valider le modèle. Le logiciel COMSOL Multiphysics a été utilisé dans cette étude pour simuler le comportement du flux de l'air dans la centrale à cheminée solaire. Les résultats de simulation obtenus en utilisant le modèle numérique 2D avec fluide compressible à travers la cheminée solaire sont plus précis que les résultats obtenus en utilisant le modèle Boussinesq. Les résultats démontrent que le modèle numérique proposé, dérivé des calculs techniques fondamentaux, est raisonnablement précis et qu'il peut être appliqué efficacement pour étudier la performance des centrales à cheminée solaire. L'étude a démontré que les paramètres géométriques et météorologiques ont un impact très significatif sur l'efficacité de la CCS.

Mots clés: *Cheminée solaire, Production d'électricité, Paramètres géométriques, Paramètres météorologiques, COMSOL Multiphysics, Chlef.*

Abstract

Abstract

The objective of this work is to modeling and simulates the effect of climatic and geometric parameters on the performance of the solar chimney power plant in order to optimize its efficiency. The Solar Chimney Power Plant (SCPP) is an efficient system for electricity production from solar energy. The SCPP converts solar energy into thermal energy then indirectly into mechanical/electrical energy by using air as a working fluid to train a turbine connected to a generator. Typically, a SCPP consists of a large greenhouse (collector), a chimney and a turbine/generator.

As part of this work, a semi-empirical model and a 2D numerical model were developed to assess the efficiency of the solar chimney power plant in Chlef, Algeria. The air flowing through the solar chimney is considered a compressible fluid in contrast to the Boussinesq model. Thus, numerical modeling was performed using Reynolds Average Navier-Stokes (RANS) equations coupled to the k - ϵ turbulence model. The meteorological parameters used in this study, such as temperature and solar radiation, were measured in the region of Chlef, in 2018. The power produced at the output of the SCPP, the air speed and the temperature were calculated and compared to the experimental results obtained from the Manzanares prototype to validate the model. The COMSOL Multiphysics software was used in this study to simulate the behavior of airflow in the solar chimney power plant. The numerical simulation results obtained using a compressible fluid through the solar chimney is more precise than the results obtained using the Boussinesq model. The results demonstrate that the proposed numerical model, derived from fundamental engineering calculations, is reasonably accurate and can be effectively applied to study the performance of the SCPP. The study demonstrated that geometric and meteorological parameters have a very significant impact on the efficiency of the SCPP.

Keywords: *Solar chimney, Electricity production, Geometric parameters, Meteorological parameters, COMSOL Multiphysics, Chlef.*

ملخص

الهدف من هذا العمل هو نمذجة ومحاكاة تأثير العوامل المناخية والهندسية على أداء محطة المدخنة الشمسية من أجل تحسين كفاءتها. تعتبر المداخل الشمسية نظاماً فعالاً لإنتاج الطاقة الكهربائية من الطاقة الشمسية. تقوم محطة المداخل الشمسية بتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية وبشكل غير مباشر إلى طاقة ميكانيكية / كهربائية باستخدام الهواء كسائل عامل لتشغيل التوربينات المتصلة بالمولد. بشكل عام، تتكون المداخل الشمسية من بيوت دفيئة كبيرة (مجمعة) ومدخنة وتوربين/مولد.

كجزء من هذا العمل ، تم تطوير نموذج شبه تجريبي ونموذج رقمي ثنائي الأبعاد لتقييم كفاءة المداخل الشمسية في الشلف بالجزائر. يعتبر الهواء المتدفق عبر المدخنة الشمسية سائلاً مضغوطاً على عكس نموذج Boussinesq. وهكذا ، تم إجراء النمذجة الرقمية باستخدام معادلات رينولدز متوسط نايفير-ستوكس (RANS) المقترنة بنموذج $k-\epsilon$ المضطرب. تم قياس المعلمات الجوية المستخدمة في هذه الدراسة، مثل درجة الحرارة والإشعاع الشمسي ، في منطقة الشلف في عام 2018. وتم حساب الطاقة المنتجة عند مخرج محطة المدخنة الشمسية وسرعة الهواء ودرجة الحرارة ومقارنتها بالنتائج التجريبية التي تم الحصول عليها من نموذج Manzanares للتحقق من صحة النموذج. تم استخدام برنامج COMSOL Multiphysics في هذه الدراسة لمحاكاة سلوك تدفق الهواء في محطة المدخنة الشمسية. نتائج المحاكاة العددية التي تم الحصول عليها باستخدام مائع قابل للانضغاط من خلال المدخنة الشمسية أكثر دقة من النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام نموذج Boussinesq. توضح النتائج أن النموذج العددي الرقمي ، المستمد من الحسابات الهندسية الأساسية ، دقيق بشكل معقول ويمكن تطبيقه بشكل فعال لدراسة أداء محطات المدخنة الشمسية. أوضحت الدراسة أن المعلمات الهندسية والجوية لها تأثير كبير على كفاءة محطات المدخنة الشمسية.

الكلمات المفتاحية: مدخنة شمسية ، إنتاج كهرباء ، معلمات هندسية ، معلمات جوية ، COMSOL

Multiphysics ، الشلف.

List des symboles

Symbole	Signification	Unité
<u>Symboles latins</u>		
A	Surface	m^2
C_p	Chaleur spécifique à pression constante	$J/kg.K$
f_t	rapport de chute optimal de la pression de la turbine	
F	Forces externes appliquées au fluide	N/m^3
g	Accélération gravitationnelle	m/s^2
G	Intensité du rayonnement solaire	W/m^2
H	Hauteur de la cheminée	m
k	Énergie cinétique turbulente	m^2/s^2
m	débit massique	Kg/s
P	Puissance	W
p	Pression	Pa
ΔP	Pressure différence	Pa
Q	Flux de chaleur	W/m^2
Q_s	énergie solaire totale	W
Q_u	quantité de chaleur	kJ
$R, r :$	Rayon	m
ΔT	Différence de température	K
T	Température	K
t	Temps	s
u	vitesse suivant r	m/s
V	Vitesse	m/s
v	vitesse suivant y	m/s
W_p	Travail de pression	N/m^2

List des symboles

Symbole grecques

α	Coefficient d'absorption efficace	
η	rendement	
β	Facteur de perte d'énergie par convection	$W/m^2.K$
ρ	Masse volumique de l'air	kg/m^3
ϑ	viscosité cinématique moléculaire	m^2/S
ε	taux de dissipation turbulent	m^2/S^3
μ	viscosité dynamique	$kg/m.S$

Nombres adimensionnels

G_r	Nombre de Grashof
P_r	Nombre de Prandtl
R_a	Nombre de Rayleigh

Indices

a	Ambiante
ch	Cheminée
t	Turbine
col	Collecteur
s	Solaire
tg	Turbine/générateur

Abréviation

CS	Cheminée Solaire
CCS	Centrale à Cheminée Solaire
SUT	Solar updraft velocity
CFD	Computational Fluid Dynamics
CSF	Cheminée Solaire Flottante

Liste des Figures

Chapitre I

Fig. I.1. Les centrales de cheminée solaire	6
Fig. I.2. Principe de fonctionnement d'une CS	7
Fig. I.3. Collecteur d'une cheminée solaire.....	8
Fig. I.4. La cheminée solaire	9
Fig. I.5. Turbine pour la cheminée solaire.....	10
Fi I.6. Stockage avec les tuyaux d'eau : (a) journée, (b) nuit	11
Fig. I.7. Effet du stockage de chaleur sous le toit du collecteur à l'aide de tubes noirs remplis d'eau.....	12
Fig. I.8. Production annuelle d'énergie de l'électricité par la cheminée solaire	17
Fig. I.9. Cheminée solaire flottante	20
Fig. I.10. Nouvelle centrale solaire thermique avec cheminée flottante rigidifiée à flanc de montagne, segment par segment	21
Fig. I.11. Schéma d'une centrale solaire à cheminée en pente	22
Fig. I.12. Diagramme schématique de la centrale de cheminée solaire cheminée solaire avec creuse montagne: (a) vue de dessus et (b) vue de côté	23
Fig. I.13. Diagramme schématique de la centrale de cheminée solaire pour récolter l'eau atmosphérique: (a) cyclone solaire (b) expansion cyclone séparateur	24
Fig. I.14. Schéma illustratif de l'opération effectué par une Tour Energétique	25

Chapitre II

Fig. II.1. Représentation de Leonardo-da Vinci	27
Fig. II.2. Projet de moteur solaire proposé par Isodoro Cabanyes.....	27
Fig. II.3. La cheminée solaire présentée par le professeur Dubos.....	28
Fig. II.4. Cheminées solaires dans le désert marocain.	28
Fig. II.5. Proposition de cheminée solaire présentée par Dubos.....	29
Fig. II.6. La tour solaire du professeur NAZARE	29
Fig. II.7. Prototype de Manzanares en Espagne	29
Fig. II.8. Photos de prototype de cheminée solaire installée à Manzanares (Espagne)	30
Fig. II.9. Centrale solaire à cheminée de Borunga	31
Fig. II.10. Schéma de la centrale électrique d'Enviromission	32

List des Figure

Fig. II.11. La Cheminée Solaire de Ciudad Real	33
Fig. II.12. Projet Namibien.....	34
Fig. II.13. Expérimental de cheminée solaire à HUST, en Chine	35
Fig. II.14. Expérimental de cheminée solaire à Téhéran	37
Chapitre III	
Fig. III.1. Représentation schématique de la centrale solaire à cheminée	48
Fig. III.2. La géométrie de la cheminée solaire étudiée	53
Fig. III.3. Le maillage bidimensionnelle 2D de la cheminée solaire CS étudié.....	55
Fig. III.4. Etapes de la simulation du CCS étudiée par COMSOL	56
Chapitre IV	
Fig. IV. Photo de la station météorologique (Vantage Pro 2)	59
Fig. IV.2. Rayonnement solaire et variation de la température de l'air ambiant à Chlef le 21 juin 2018.....	59
Fig. IV.3. Validation des résultats de puissance.....	60
Fig. IV.4. Validation de la vitesse du courant ascendant dans la cheminée	61
Fig. IV.5. Validation de la température dans le capteur et de la différence de température	62
Fig. IV.6. Distribution des champs de vitesse en 3D à 12h00, pour les dimensions géométriques de Manzanares et les données climatiques de Chlef.....	63
Fig.IV.7. Distribution des champs de Température en 3D à 13h00, pour les dimensions géométriques de Manzanares et les données climatiques de Chlef.....	63
Fig. IV.8. Variation de la puissance de sortie pour les dimensions géométriques de Manzanares et les données climatiques de Chlef	64
Fig. IV.9. La variation horaire de la différence de température (ΔT) et de la vitesse de l'air avec le rayonnement solaire	65
Fig.IV.10. Effets de la température ambiante sur la différence de température (ΔT) et la vitesse d'air	65
Fig. IV.11. Distribution de la vitesse pour différents rayons de collecteur	67
Fig. IV.12. Distribution de la température pour différents rayons de collecteur.....	68
Fig. IV.13. Variation de la vitesse et température pour différents rayons du collecteur	69
Fig. IV.14. Distribution de la vitesse pour différentes hauteurs de la cheminée	70
Fig. IV.15. Distribution de la température pour différentes hauteurs de cheminée	71

List des Figure

Fig. IV.16. Variation de la vitesse et température pour différent hauteur de cheminée.....	72
Fig. IV.17. Distribution de la Vitesse pour différentes hauteurs de collecteur.....	73
Fig. IV.18. Distribution de la température pour différentes hauteurs de collecteur.....	74
Fig. IV.19. Variation de la vitesse et température pour différentes hauteurs du collecteur	75
Fig. IV.20. Distribution de la vitesse pour différents rayons de cheminée	76
Fig. IV.21. Répartition de la température pour différents rayons de cheminée	77
Fig. IV.22. Variation de la vitesse et température pour différent rayon de la cheminée	78
Fig. IV.23. Distribuions de la vitesse de l'air en 3D pour différent angle d'inclinaison du toit du collecteur	79
Fig. IV.24. Distribution de la température de l'air en 3D pour différents angles d'inclinaison du collecteur (5°-20°).....	80
Fig. IV.25. Variation de la vitesse et température pour différents angles d'inclinaison du toit du collecteur	81
Fig. IV.26. Distribution de la vitesse de l'air en 3D pour différents angles divergence de la cheminée (1°-4°).....	82
Fig. IV.27. Distribution de la température de l'air en 3D pour différents angles divergence de la cheminée (1°-4°).....	83
Fig. IV.28. Variation de la vitesse et température pour différents angles divergence de la cheminée.....	84

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II.1: Les dimensions principales et les données techniques du prototype de Manzanares 31

Chapitre III

Table III.1. Dimensions de la CCS prototype de Manzanares en Espagne..... 53
Table III.2. Les conditions aux limites appliquées 54

Table des matières

Remerciement	I
Dédicace	II
Résumé	III
Abstract	IV
ملخص	V
List des symboles	VI
List des figures	VIII
List des tableaux	XI
Table de matières	XII

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre 1: Généralités sur les Centrales à Cheminée Solaire

I.1. Introduction	6
I.2. Principe de fonctionnement de la cheminée solaire	6
I.3. Composants principales de cheminée solaire	8
I.3.1. Collecteur solaire	8
I.3.2. cheminée solaire	9
I.3.3. Les turbine	10
I.4. Le stockage d'énergie	11
I.5. Les différents phénomènes intervenants dans la cheminée solaire	12
I.5.1. Effet de venturi	12
I.5.2. Effet de serre	12
I.5.3. Effet de la convection naturelle	13
I.6. Etude de la performance de la cheminée solaire	13
I.6.1. L'effet des paramètres climatiques.....	13
I.6.2. L'impact de l'humidité	14
I.6.3. L'effet du paramètre géométrique:	14
I.6.4. Effet de vitrage	16
I.7. Les domaines d'exploitation des cheminées solaire	17
I.8. Importance du projet de centrale solaire à cheminée	18

Table des matières

I.9. Défis de la centrale solaire à cheminée.....	18
I.10. Autres types de technologie d'alimentation de cheminée solaire	19
I.10.1. Technologie d'alimentation de cheminée solaire flottante	19
I.10.2. Technologie d'alimentation de cheminée solaire avec collecteur incliné.....	21
I.10.3. Technologie d'alimentation de cheminée solaire avec creux de montagne	22
I.10.4. Technologie d'alimentation de la cheminée solaire pour la récolte de l'eau atmosphérique.....	23
I.10.5. Tour Energétique	24
Conclusion.....	25

Chapitre II: Revue bibliographique sur les centrales à cheminée solaire

II.1. Introduction	27
II.2. développement de la centrale solaire à cheminée	27
II.3. Les centrales électriques de la cheminée solaire au monde	30
II.3.1. Premier prototype en Espagne	30
II.3.2. Le Projet Australien	31
II.3.3. Le projet d'Arizona	32
II.3.4. Le projet Espagnol	33
II.3.5. Le projet Namibien	33
II.4. Etudes expérimental	34
II.5. Etudes analytiques et de numérique	39
Conclusion.....	45

Chapitre III: Modélisation d'une centrale cheminée solaire

III.1. Introduction.....	47
III.2. Description du fonctionnement d'une cheminée solaire	47
III.3. Modélisation mathématique	47
III.3.1. Les Hypothèses Simplificatrices.....	47
III.3.2. Modèle semi-empirique de la CCS.....	48
III.3.2.1. Efficacité du collecteur solaire	49
III.3.2.2. Efficacité de la cheminée solaire	49
III.3.2.3. Efficacité de la turbine	50
III.3.3. Model numérique	51
III.3.3.1. Equations gouvernantes	51

Table des matières

III.4. Configuration géométrique de la cheminée solaire	52
III.4.2. Les étapes de simulation par COMSOL	53
III.4.2. Conditions aux limites	54
III.4.3. création de Maillage	55
III.4.4. Présentation de la centrale à cheminée solaire sous COMSOL Multiphysics	55
Conclusion	56

Chapitre IV: résultats de simulation et de discussion

IV.1. Introduction	58
IV.2. Mesure des paramètres environnementaux.....	58
IV.3. Validation des modèles numériques et semi-empiriques	60
IV.4. Les champs de vitesse et température et la puissance électrique de sortie pour le prototype de Manzanares.....	62
IV.5. Effet des facteurs climatiques sur la différence de la température (ΔT) et la vitesse de l'air	64
IV.6. L'effet des paramètres géométriques sur la distribution de la vitesse et de la température	66
IV.6.1. Influence du rayon du collecteur sur la vitesse et la température	66
IV.6.2. Influence de la hauteur de la cheminée sur la vitesse et la température	69
IV.6.3. Influence de la hauteur du collecteur sur la vitesse et la température	72
IV.6.4. Influence du rayon de la cheminée sur la vitesse et la température	75
IV.6.5. Influence de l'angle d'inclinaison du collecteur sur la vitesse et la température	78
IV.6.6. Influence de la divergence de la cheminée sur la vitesse et la température	81
Conclusion	84
Conclusion générale	87
Références Bibliographiques	90

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

Pendant le 21^{ème} siècle, l'humanité a confronté deux grands défis: la demande énorme d'énergie et la rareté relative des combustibles fossiles [1]. La croissance industrielle rapide a soulevé des préoccupations au sujet de la consommation élevée d'énergie dans le monde, ainsi que les appréhensions suscitées par les pays industriels face à la hausse des prix du pétrole, en particulier avec la demande croissante d'énergie des pays en développement [2]. Le pétrole et le gaz naturel ont récemment provoqué l'effondrement de l'économie mondiale en raison des fluctuations de leurs prix. Alors que la population mondiale augmente, il faut davantage d'énergie, dont la plus grande partie est fournie actuellement à partir de combustibles fossiles qui couvrent environ 66,3% de la production totale d'électricité. Par conséquent, la sur-utilisation des méthodes existantes utilisant des sources d'énergie à partir de combustibles fossiles comme; le charbon, le pétrole ou même le gaz naturel a rendu le monde entier inconscient de ses risques. Alors, l'environnement a rencontré des difficultés ; il s'est trouvé dans un cercle des phénomènes qui ne se sont pas produits auparavant; tels que les changements climatiques, le réchauffement climatique et les dommages causés à la couche d'ozone [3]. En raison de ce qui précède, les chercheurs sont récemment tournés vers des sources d'énergie renouvelables qui sont propres, bon marché dite « vertes » pour couvrir la demande d'énergie.

Le vent, l'eau et la lumière du soleil sont considérés les principales solutions d'énergie renouvelable pour la production d'électricité. L'énergie solaire est la plus efficace en raison de sa disponibilité continue et de sa stabilité. L'énergie solaire est utilisée sous deux formes. La première forme est la transformation directe du rayonnement solaire en électricité, appelée énergie solaire photovoltaïque, et la deuxième forme est l'énergie solaire thermique où l'énergie thermique du rayonnement solaire est utilisée dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz) et ensuite, l'énergie reçue par le fluide peut être utilisée directement (eau chaude sanitaire, chauffage, etc.) ou indirectement (production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique [4].

Parmi les technologies qui exploitent l'énergie solaire thermique, on trouve la cheminée solaire ou la tour solaire. Elle peut être utilisée pour convertir l'énergie solaire en énergie électrique à travers un certain nombre de cycles de phénomènes naturels. L'avantage supplémentaire de la centrale à cheminée solaire est la capacité de stocker l'énergie thermique pendant la journée qui permet de continuer à fonctionner pendant la nuit en utilisant l'énergie

stockée [5]. La centrale de cheminée solaire est également utilisée pour d'autres applications telles que la culture de fruits et légumes, la ventilation, le dessalement et la transformation des aliments agricoles. Un système typique de centrale solaire à cheminée contient principalement trois composants, un capteur solaire, une cheminée et une turbine couplée à une génératrice pour convertir l'énergie cinétique de l'air en énergie électrique. Les centrales à cheminée solaire permettent de produire de l'électricité sans pollution, ce qui favorise une croissance et un développement durables d'une économie verte et un environnement plus sûr [5; 6].

L'amélioration de la performance de la cheminée solaire fait toujours l'objet de nombreuses études théoriques et expérimentaux, et parmi les paramètres qui affectent l'efficacité de la cheminée solaire c'est les dimensions, à savoir: le diamètre du collecteur, le diamètre de la cheminée, la hauteur et l'angle d'inclinaison du toit du collecteur et la hauteur et l'angle d'inclinaison des parois de la cheminée.

L'utilisation de calcul numérique CFD pour la résolution des équations de la mécanique des fluides devient un outil d'informatique indispensable pour les ingénieurs. La simulation de la cheminée solaire par CFD fournit des informations détaillées sur le fonctionnement de la centrale et permet d'évaluer les modifications et les nouveaux concepts. La puissance de la centrale à cheminée solaire (CCS) peut être prédite avant la construction de la centrale. La simulation permet également aux ingénieurs de localiser et d'identifier les problèmes dans la conception et d'optimiser davantage le système avant la construction. Il est très approprié de simuler des produits à grande échelle tels que la centrale à cheminée solaire (CCS) et d'obtenir des résultats proches de la réalité sur la base des hypothèses formulées avant de construire le projet.

Dans ce travail, un modèle semi-empirique et un modèle numérique 2D ont été développés pour évaluer l'efficacité de la centrale solaire à cheminée (CCS) à Chlef, Algérie. Le logiciel COMSOL Multiphysics a été utilisé dans cette étude pour simuler le comportement du flux SCPP. Le flux d'air à travers la cheminée solaire est traité comme un flux compressible contrairement au modèle Boussinesq utilisé dans des travaux antérieurs. De plus, la pression et la température dans la cheminée solaire ne sont pas considérées comme constantes. Ainsi, la modélisation a été réalisée par les équations de Reynolds Moyennées de Navier-Stokes (RANS) couplées au modèle de turbulence k- ϵ . Les paramètres météorologiques utilisés dans cette étude tels que la température et le rayonnement solaire global ont été mesurés dans la région de Chlef, au cours de l'année 2018.

La présentation de cette thèse est articulée de la façon suivante:

Le premier chapitre, nous avons présente des généralités sur la centrales à cheminée solaire, sa composition, son principe de fonctionnement et les différents types de centrales.

Le deuxième chapitre, nous avons exposé l'histoire de développement des centrales à cheminée solaire ainsi qu'une étude sur les projets de centrales électriques à cheminée solaire dans le monde. Une étude bibliographique détaillée sur les travaux expérimentaux, analytiques et numériques antérieurs effectués durant les dernières décennies est présentée.

Le troisième chapitre comporte une description des deux modèles utilisés dans cette étude. Un modèle analytique (semi-empirique) a été développé pour évaluer l'efficacité énergétique des centrales à cheminée solaire. Un modèle numérique a été formulé, en utilisant les différentes formulations des équations gouvernantes et les hypothèses simplificatrices pour l'analyse du comportement de flux d'air dans la cheminée solaire. Le logiciel COMSOL Multiphysics 4.2 utilisé pour la simulation dans cette étude est présenté en détail.

Dans le chapitre quatre, on présente les principaux résultats de simulation obtenus à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics 4.2 et on compare ces résultats avec ceux obtenus par le modèle analytique et les résultats expérimentaux. Les analyses et les interprétations des divers résultats de ce travail sont également présentées.

Enfin ; nous allons achever notre travail par une conclusion qui va résumer les principaux résultats de cette thèse et les différent conclusions que l'on peut tirer.

**CHAPITRE I : GENERALITES SUR
LES CENTRALES A CHEMINEE
SOLAIRE**

I.1. Introduction

Diverses sources d'énergie renouvelable peuvent recevoir l'énergie solaire directement ou indirectement pour produire de l'électricité. Parmi les différents types, seule l'énergie solaire représente des ressources non polluantes et illimitées qui peuvent être exploitées économiquement pour répondre à tous les besoins du secteur. Selon le mode de fonctionnement, les radiations solaires peuvent être utilisées avec ou sans concentration pour produire de l'électricité thermique.

La centrale solaire à cheminée (Fig. I.1) parfois également appelée tour solaire, est l'un des projets à grande échelle qui convertissent les radiations solaires en électricité, en passant par un processus thermodynamique non concentré. La technologie de la cheminée solaire est un moyen très efficace afin de lutter contre l'effet de serre et les émissions de CO₂ dans l'atmosphère.

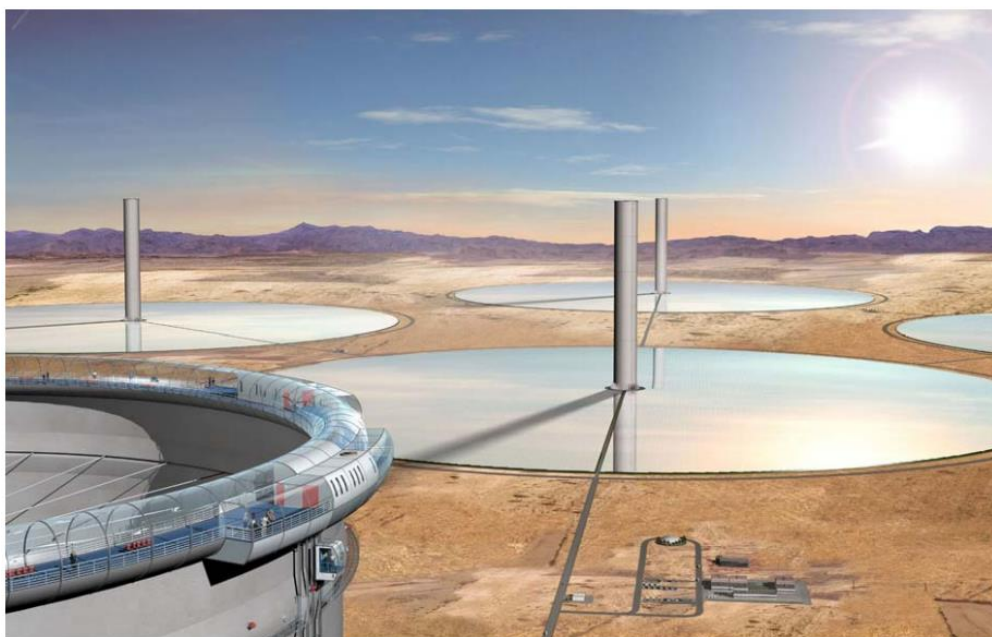


Fig. I.1. Les centrales de cheminée solaire.

I.2. Principe de fonctionnement de la cheminée solaire.

La centrale à cheminée solaire est constituée de trois éléments essentiels, à savoir, le collecteur solaire, la cheminée ou la tour et la turbine qui nous sont, séparément, familiers (Fig. I.2).

L'air est chauffé par le rayonnement solaire, sous une couverture transparente (plastique ou verre) du collecteur, puis s'écoule suivant un itinéraire constitué par le capteur et la cheminée.

La couverture transparente et le sol en dessous du couvercle constituent le collecteur solaire [2]. Au milieu du collecteur est placée une cheminée verticale avec une ouverture à sa base, d'où s'écoulera l'air sortant du collecteur. La jonction entre la couverture transparente et la base de la cheminée est hermétique. Le principe de fonctionnement de la CCS est basé sur le fait que l'air chaud étant plus léger que l'air froid, il monte dans la cheminée. L'aspiration de la cheminée aspire alors plus d'air chaud du collecteur, et l'air froid entre par le périmètre extérieur. Ainsi, le rayonnement solaire provoque un tirage ascendant constant dans la cheminée. L'air chaud est produit par l'effet de serre dans le collecteur qui peut s'étaler horizontalement sur plusieurs dizaines de mètres au-dessus de la surface du sol. La hauteur entre le capteur et le sol peut être augmentée dans la direction de la cheminée pour dévier le mouvement de l'air ascendant dans le but de minimiser les pertes due au frottement, et alors augmenter la vitesse de l'air au niveau de l'entrée de la cheminée. Donc, la tour (cheminée) convertit le flux de chaleur capté par le collecteur en énergie cinétique (courant de convection) et en énergie potentiel (chute de pression dans la turbine), ainsi la différence de densité de l'air causée par l'élévation de température dans le collecteur joue le rôle d'une force d'entraînement. Le déplacement de l'air permet à des turbines situées à l'embouchure de la cheminée de produire de l'électricité à travers des génératrices qui leurs sont couplées. La centrale à cheminée solaire reste opérationnelle en continue du fait que, le sol a la capacité d'emmagasiner la chaleur reçue durant le jour et de la libérer durant la nuit, suivant le gradient de température sol-air et les coefficients d'échange thermique [6,7].

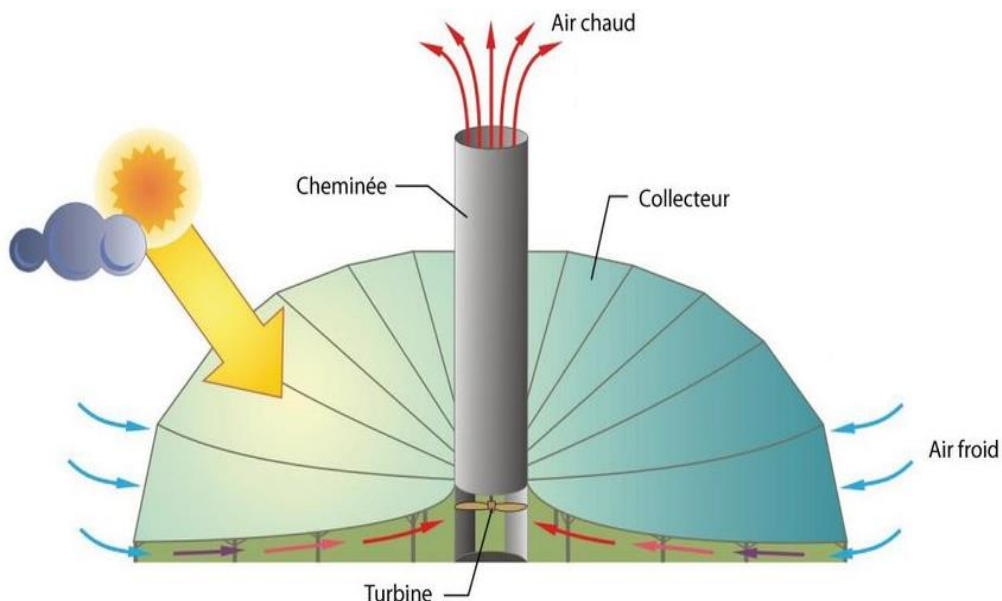


Fig. I.2. Principe de fonctionnement d'une CCS

I.3. Composants principales de cheminée solaire

La cheminée solaire se compose d'un collecteur solaire, d'une cheminée, d'une turbine connectée avec un générateur, la transmission est la même dans les autres centrales électriques. Les principaux composants de la centrale solaire à cheminée sont les suivants :

I.3.1. Collecteur solaire

Un grand collecteur d'air est formé deux parties distinctes; dans la première partie le sol est considéré comme un système de stockage de la chaleur. Ainsi, la deuxième partie est constituée par deux éléments; un toit en verre transparent ou en plastique situé en quelques mètres au-dessus du sol où les rayonnements solaires peuvent être transmis. Le deuxième élément peut considérer comme un domaine de circulation de l'air. Pour que le flux d'air soit guidé vers le centre du collecteur avec un minimum de frottements, la hauteur du toit doit être placée d'une manière inclinée.

Le sol sous le toit se réchauffe, à son tour il va réchauffer l'air circulant radialement au-dessus de lui. La surface du sol sous le couvercle du collecteur fonctionne comme un support de stockage, dans lequel il y a une partie du rayonnement solaire entrant pendant la journée et qui va se libérer plus tard pendant la nuit. Ce mécanisme est capable de fournir une alimentation électrique continue toute l'année (Fig. I.3) [8,9].

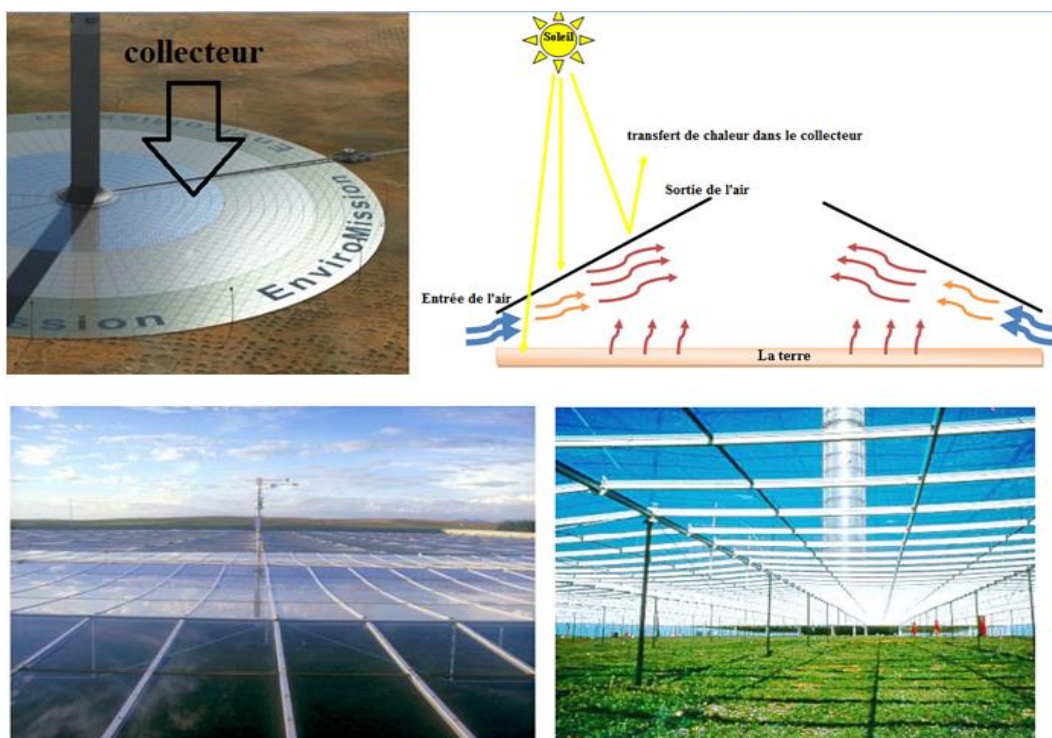


Fig. I.3. Collecteur d'une cheminée solaire.

I.3.2. Cheminée solaire

La tour solaire est le composant le plus important du système, est le véritable moteur thermique de système. Il s'agit d'un tube qui monte au centre du collecteur (Fig. I.4), un tube de pression à faible frottement pour entraîner l'écoulement d'air par un mouvement vers le haut. Le flux d'air chauffé dans le collecteur est approximativement proportionnel à l'élévation de la température de l'air dans le collecteur et à son débit volumétrique. La tour à courant d'air se compose de deux températures différentes, entre l'air plus chaud au bas de la tour et la température de l'air ambiant à la sortie de la tour. La différence de température crée la différence de densité qui génère la force motrice (flottabilité). De plus; le changement de densité produit à un changement d'altitude augmente la force de flottabilité. La différence de densité entre l'air à l'intérieur de la cheminée et l'air ambiant crée un potentiel de pression qui entraîne l'écoulement d'air à travers la cheminée solaire [10,11].

Ainsi, les cheminées solaires peuvent exploiter particulièrement la faible élévation de la température de l'air produite par la chaleur émise par le sol pendant la nuit et même le faible rayonnement solaire d'une journée d'hiver plus froide.

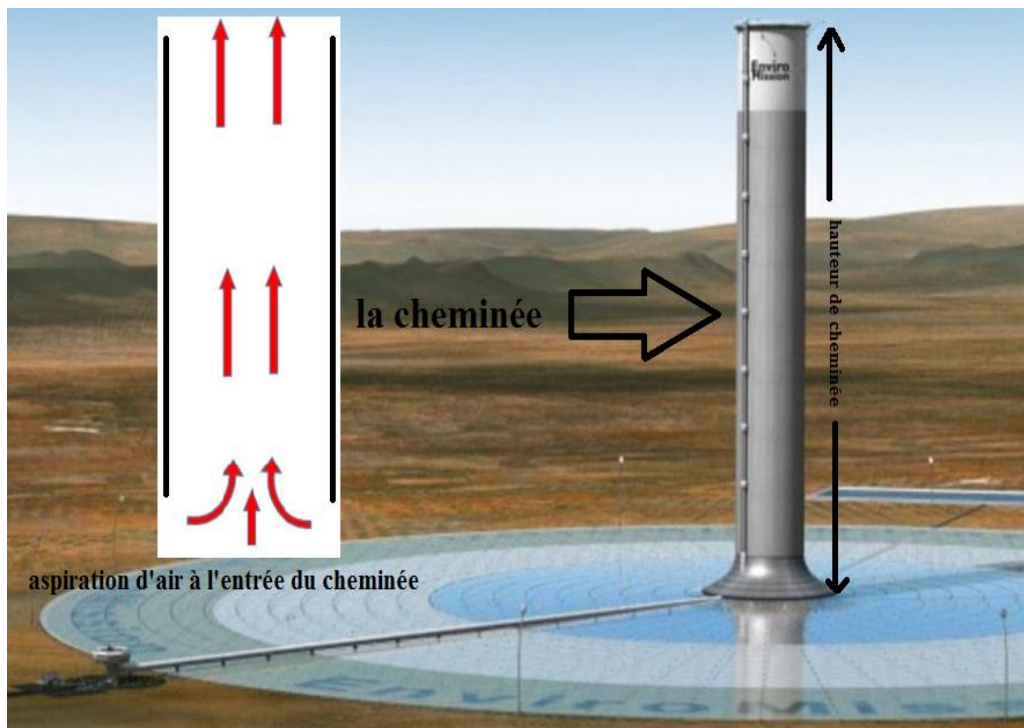


Fig. I.4. La cheminée solaire

I.3.3. Les turbines

Le courant d'air qui monte dans la cheminée grâce aux turbines, au niveau ou près du sommet de la cheminée convertit l'énergie cinétique en puissance mécanique sous forme d'énergie de rotation [9]. Lorsque l'air descend de la sortie du collecteur dans l'entrée de la turbine, il subit une accélération due à une zone basse décroissante. L'air circulant à travers l'entrée de la turbine subit également une chute de pression [12]. La turbine, qui capte la majeure partie de l'énergie cinétique de l'air, peut produire une puissance mécanique suffisante. Ensuite, il transfère la puissance mécanique au générateur qui se transforme en énergie électrique [13]. La puissance de sortie obtenue est proportionnelle au produit du débit volumique et de la perte de charge à travers la turbine. Nous pouvons modifier le débit d'air à travers la turbine en faisant varier l'angle de pas des pales de turbine [9]. La turbine a été classée comme le composant le plus efficace de la cheminée solaire en raison de l'emplacement de la turbine, ce qui conduit à une efficacité de conversion d'énergie de plus de 60% [13]. La figure (I.5) illustre la turbine de la cheminée solaire à Manzanares.

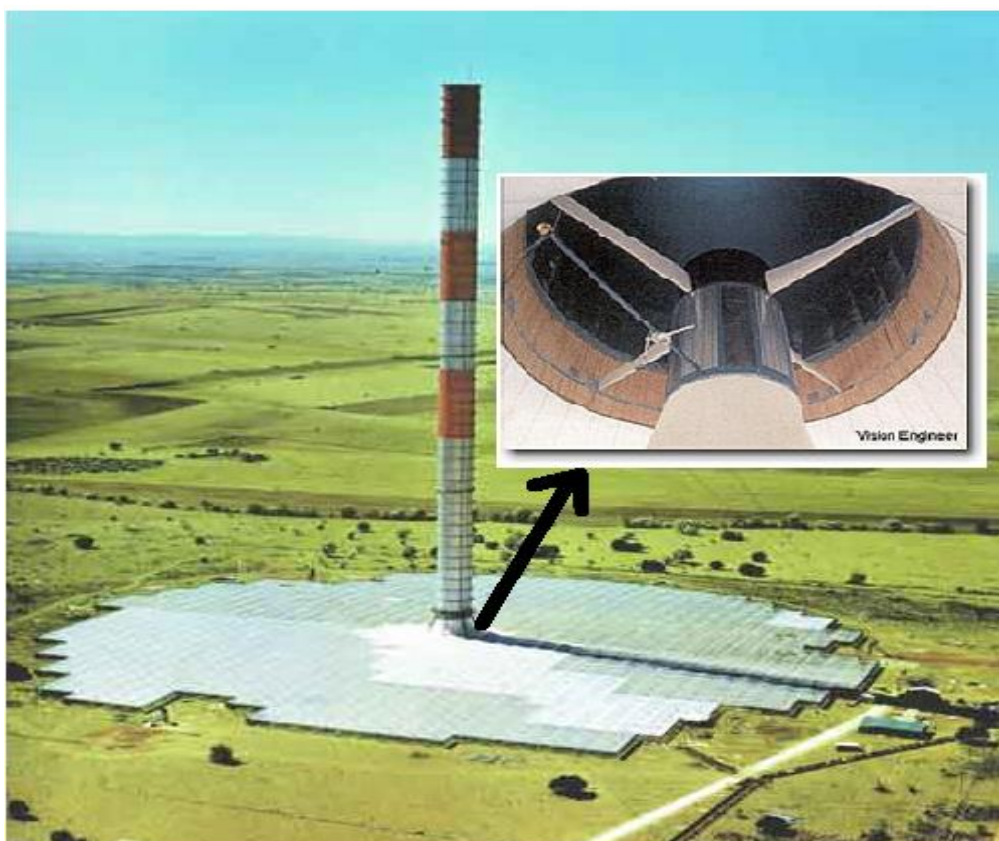


Fig. I.5. Turbine pour la cheminée solaire

I.4. Le stockage

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, du fait que, le sol a la capacité d'emmagasiner la chaleur reçue durant le jour et de la libérer suivant le gradient de température sol-air et les coefficients d'échange thermique [10].

Pour une meilleure capacité de stockage thermique, des tubes teintés en couleur noire et remplis d'eau sont posés sur le sol au-dessous du collecteur afin d'absorber le rayonnement solaire (Fig. I.6). Les tubes sont remplis d'eau une fois et restent fermés par la suite, de sorte qu'aucune évaporation ne peut avoir lieu [14]. Le volume d'eau dans les tubes est choisi de telle sorte que la profondeur de la couche d'eau de l'ordre de 5 à 20 cm [12].

- Pendant la journée, la cheminée solaire fonctionne d'une manière instantanée à l'aide du rayonnement solaire disponible. Le stockage de l'énergie solaire devient important pour vaincre la période de la nuit et éventuel perturbations météorologiques (Fig. I.6.a).
- La figure (I.6.b) montre que les tubes bien remplis d'eau, l'énergie peut être générée dans la nuit, mais avec une baisse quantité de l'énergie pendant les heures ensoleillées [15].

Lorsque l'air du collecteur commence à se refroidir, l'eau à l'intérieur des tubes libère la chaleur qu'elle a stockée pendant la journée (Fig. I.7). Le stockage de chaleur avec de l'eau fonctionne plus efficacement qu'avec le sol seul, car même à des faibles vitesses de l'eau - à partir de la convection naturelle dans les tubes, le transfert de chaleur entre les tubes d'eau et l'eau est beaucoup plus élevé que celui entre la surface du sol et les couches de sol en dessous, et depuis la capacité thermique de l'eau est environ cinq fois supérieure à celle du sol [16].

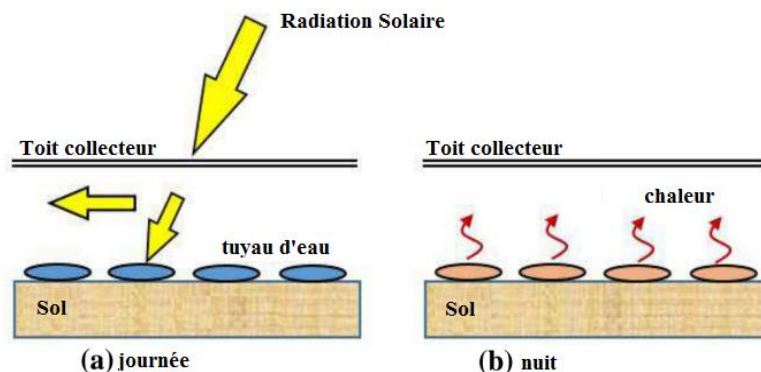


Fig. I.6. Stockage avec les tuyaux d'eau : (a) journée, (b) nuit

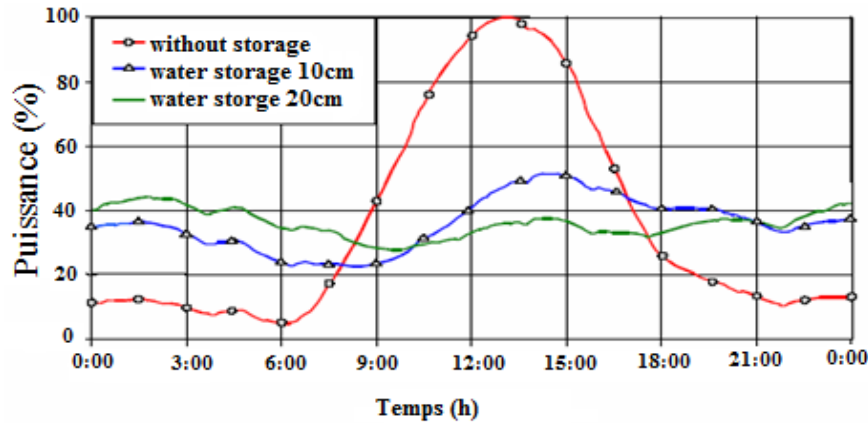


Fig. I.7. Effet du stockage de chaleur sous le toit du collecteur à l'aide de tubes teintés en couleur noir remplis d'eau [16].

I.5. Les différents phénomènes intervenants dans la cheminée solaire

I.5.1. Effet de venturi

Le nom de cet effet vient du nom du physicien Italien Giovanni Venturi, ce phénomène conduit à une accélération des particules gazeuses (dans ce cas-là: l'air) en raison du rétrécissement de sa zone de spin, ce qui provoque également une diminution de la pression (sur certaines cheminées, pour améliorer le tirage).

Daniel Bernoulli a décrit le principe de l'effet Venturi comme suit : lorsque la vitesse d'un fluide augmente, la pression qu'il exerce diminue. Cela veut dire que si la vitesse d'un fluide incompressible varie, il aura une différence de pression [14].

I.5.2. Effet de serre

L'air chaud de la tour solaire est produit par l'effet de serre dans un simple collecteur d'air constitué d'un vitrage en verre ou en plastique étiré horizontalement à plusieurs mètres au-dessus du sol. La hauteur du vitrage augmente à côté de la base de la tour, de sorte que l'air se détourne verticalement vers le haut de la cheminée. Ce mouvement est accompagné par une perte de charge minimale. Le vitrage admet la composante de rayonnement solaire et retient l'irradiation à ondes longues du sol chauffé. Ainsi le sol sous le toit se réchauffe et transfère sa chaleur à l'air circulant radialement au-dessus de lui de l'extérieur vers la tour [16].

L'efficacité de la centrale électrique de la tour solaire est inférieure à 2% et dépend principalement de la hauteur de la tour. En raison de la largeur de la couverture requise par le collecteur solaire, la tour solaire ne peut être construite que sur un terrain qui se trouve

généralement loin de la ville. Cependant, la zone sous le collecteur solaire peut être utilisée à des fins agricoles car elle utilise l'effet de serre [10].

I.5.3. Effet de la convection naturelle

Grace à la différence de température et de pression entre les deux niveaux, un mouvement de l'air aura lieu, de telle sorte que les particules chaudes sont plus légères que les particules froides, et ces particules se dilatent sous l'influence de la chaleur.

I.6. Etude de la performance de la cheminée solaire

L'étude de la performance de la cheminée a montré que les conditions climatiques (température et éclairage) et les dimensions de la cheminée (hauteur de la cheminée, diamètre du collecteur, hauteur du collecteur et le diamètre de la cheminée) ont un rôle très important dans la production de l'énergie électrique [17].

I.6.1. L'effet des paramètres climatiques

De nombreux chercheurs indiquent que la production d'énergie d'une centrale de cheminée solaire, en tant que technologie d'énergie solaire thermique, est positivement affectée par l'intensité du rayonnement solaire. La productivité de l'énergie électrique augmente avec l'augmentation de l'éclairage solaire et de la température ambiante, mais l'effet de l'éclairage solaire a plus d'importance par rapport à la température.

Cependant, d'autres paramètres météorologiques, tels que la température ambiante, l'humidité et le vent ambiant, ont également un effet complexe sur les performances du CCS et doivent donc être traités.

Les effets de la température ambiante sur les performances de CCS peuvent être analysés à partir du terme de flottabilité de l'équation de quantité de mouvement basée sur le modèle de Boussinesq:

$$(\rho - \rho_a)g \approx \rho_a \beta (T - T_a)g \quad (I.1)$$

où ρ_a est la densité de l'air ambiant, T_a est la température ambiante et β est le coefficient de l'expansion thermique. La densité de l'air ambiant et le coefficient de dilatation thermique diminuent à mesure que la température ambiante augmente, ce qui diminue la force de flottabilité [2]. Guo et al. [18] ont effectué des simulations numériques sur cet effet et ont constaté que l'augmentation de la température ambiante a entraîné une légère augmentation de la différence de température de l'air mais une diminution évidente de la vitesse de l'air. La puissance de sortie du CS dans le champ de températures diurnes commun est insensible à la

température ambiante. Choi et al. [19] et Kasaeian et al. [20] ont également conclu des résultats similaires dans leurs études théoriques.

I.6.2. L'impact de l'humidité

Etant donné qu'il est généralement suggéré que la centrale de cheminée solaire soit construite dans des zones arides et semi-arides, les effets de l'humidité sur les performances du système sont négligés dans la prévision des performances du CCS en raison de la faible humidité relative de ces zones. Alors que les recherches se poursuivent sur le système de CCS, en particulier une utilisation étendue pour l'agriculture, le dessalement et les tours de refroidissement, des connaissances détaillées sur l'influence de l'humidité semblent importantes. L'effet de l'humidité sur les performances du CCS dépend de conditions spécifiques, c'est-à-dire si l'humidification de l'air se produit dans le collecteur solaire et si la condensation d'humidité se produit dans la cheminée [21]. Si le processus d'humidification de l'air se produit dans le collecteur, alors la consommation de chaleur latente de vaporisation réduira évidemment la puissance de sortie, comme prouvé dans certains systèmes hybrides du CCS pour l'agriculture [22]. Si aucune condensation d'humidité ne se produit dans la cheminée, l'augmentation de l'humidité relative diminuera légèrement la puissance de sortie du CCS en raison des changements des propriétés thermiques de l'air. Lorsque l'humidité relative atteint une valeur critique ou que la cheminée est suffisamment élevée, une condensation d'humidité se produit et libère une grande quantité de chaleur latente. L'apport de chaleur sensible supplémentaire transformée à partir de la chaleur latente due à la condensation de vapeur augmente considérablement la production d'énergie. Xu et al. [23] ont aussi rapporté un niveau de condensation de levage d'environ 769 m de haut pour un système CCS dans les conditions climatiques humides de Wuhan, en Chine. Ming et al. [24] ont proposé un système de dessalement hybride innovant en collectant l'eau douce de l'air humide à l'intérieur de la cheminée solaire au-dessus du niveau de condensation de levage.

I.6.3. L'effet du paramètre géométrique:

La recherche s'est particulièrement concentrée sur les effets de divers paramètres géométriques sur les performances de centrale à cheminée solaire depuis le début des années 1980. Les paramètres dimensionnels les plus pertinents qui influencent la performance de la centrale à cheminée solaire comprennent la hauteur de la cheminée, la surface du collecteur et le diamètre de la cheminée, qui sont également les principaux facteurs qui déterminent le coût de construction du CCS. Dans les premières études sur la CCS, la puissance de sortie théorique était directement proportionnelle à la surface du collecteur et à la hauteur de la

cheminée.

Cependant, des limitations sur les dimensions de la zone du collecteur et la hauteur de la cheminée sont fixées pour la production d'électricité à partir de points pratiques. Etant donné que la température de l'air chaud montant à l'intérieur de la cheminée diminue plus rapidement que celle de l'air ambiant en raison de l'énergie potentielle gravitationnelle et des pertes de chaleur le long de la cheminée, l'efficacité de la flottabilité s'affaiblit avec l'augmentation de la hauteur de la cheminée. De plus, les pertes de débit dans la cheminée augmentent avec la hauteur de la cheminée. L'effet de flottabilité décroissant et les pertes de débit croissantes avec la hauteur de la cheminée ont conjointement limité la hauteur de la cheminée pour la puissance de sortie [2].

Zhou et al. [25] ont d'abord prouvé l'existence d'une hauteur maximale de cheminée en utilisant un modèle théorique et ont indiqué que la hauteur maximale augmente avec le rayon du collecteur. De plus, les influences du vent et sismiques sont les principaux risques naturels à prendre en compte lors de la construction d'une cheminée très haute. De même, la surface du collecteur a une limitation au-dessus de laquelle aucun profit évident de puissance de sortie ne peut être atteint en raison de l'équilibre thermique entre les pertes de chaleur dans le collecteur et le rayonnement solaire incident [26]. Guo et al. [27] ont rapporté la valeur de 380m comme rayon maximal du collecteur pour le prototype espagnol grâce à un programme MATLAB auto-développé.

L'effet du diamètre de la cheminée sur les performances du système est plus compliqué que ceux de la hauteur de la cheminée et de la zone du collecteur. Le rapport d'élancement de la cheminée, qui est le rapport de la hauteur de la cheminée à son diamètre, est généralement utilisé pour évaluer les effets du diamètre de la cheminée. Kashiwa et al. [28] mentionnent que si la cheminée n'est pas suffisamment élancée, la variation du vent au sommet de la cheminée peut avoir une forte influence sur l'air chaud montant de la cheminée. Hamdan [29] a rapporté que le diamètre de la cheminée a un effet important sur la puissance récoltée principalement quand il est en dessous d'une valeur critique. Si le diamètre de la cheminée est supérieur à la valeur du diamètre critique, alors l'effet du diamètre de la cheminée est minime. Un résultat similaire a été trouvé dans l'étude numérique de Ming et al. Sur les effets du rapport d'élancement de la cheminée sur les performances d'une CCS [30]. Leurs résultats numériques ont indiqué que la croissance du diamètre de la cheminée à moins de 100 m améliore grandement la production d'électricité, alors que son augmentation ne conduit à des changements minimes que lorsqu'elle est au-

delà de 100 m, révélant ainsi un rapport d'élancement optimal de la cheminée entre 6 et 8. Bien que des recherches approfondies aient été menées sur les paramètres géométriques du CCS, le problème lié au principe clair de conception optimale du CCS reste non résolu. Les chercheurs tentent de trouver les configurations CCS optimales en maximisant la puissance de sortie en tant que fonction objective [31,32]. Dehghani et Mohammadi [33] ont effectué une optimisation multi-objective pour sélectionner la configuration de la cheminée solaire CCS optimale en utilisant des techniques d'algorithme évolutif. La production d'électricité et le coût en capital ont été simultanément considérés comme les fonctions objectives.

Le toit du collecteur de la tour solaire doit non seulement avoir un revêtement transparent ou translucide, il doit également être durable et d'un prix raisonnable. Différents types de feuilles de plastique, ainsi que du verre, ont été sélectionnés afin de déterminer quel était le meilleur matériau-et à long terme, le plus rentable. Le verre a résisté aux fortes tempêtes pendant de nombreuses années sans dommage et s'est révélé autonettoyant grâce aux averses de pluie occasionnelles [16].

Il est avantageux d'augmenter la capacité du toit de collecteur, en fournissant un double vitrage. L'énergie produite par la cheminée solaire est proportionnelle aux nombres du vitrage du toit comme le montre la figure (I.8), on voit clairement que le toit de double vitrage permet d'augmenter la quantité de l'électricité produite d'une manière importante.

Toujours au meilleur coût: si le verre n'est pas cher et le béton cher alors le collecteur sera grand avec une forte proportion de double vitrage et une cheminée relativement faible, et si le verre est coûteux, il y aura un grand collecteur et un simple vitrage ou peut être un film de plastique avec une grande tour [17].

Les membranes en plastique sont fixées à un cadre et sollicitées jusqu'au sol au centre par l'utilisation d'une plaque avec des trous de drainage. Le coût d'investissement initial des membranes plastiques est inférieures à celui du verre, cependant, à Manzanares les membranes se sont cassées avec le temps et ont donc tendance à se déchirer. Matériau (température et stabilité aux UV) et des améliorations de conception atteint ces dernières années peut aider à surmonter cet inconvénient particulier [16].

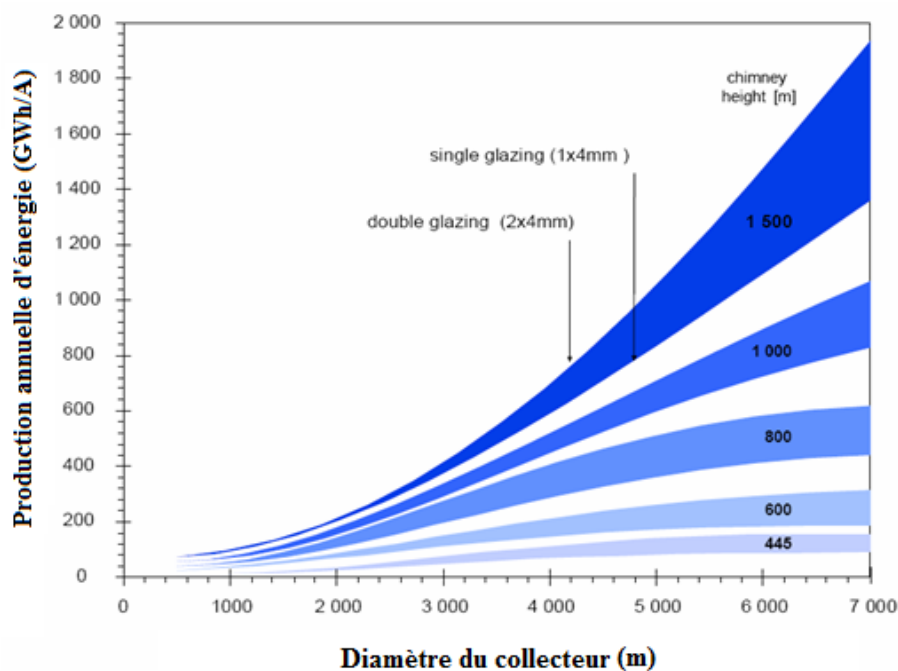


Fig. I.8. Production annuelle d'énergie de l'électricité par la cheminée solaire [17]

I.7. Les domaines d'exploitation des cheminées solaire

Plusieurs utilisations ont été identifiées. Ces utilisations se regroupent en deux grandes catégories [8]:

- 1- Dans le cadre de l'autonomie électrique:
 - la production d'électricité;
 - Alimentation de sites isolés;
- 2- Une filière cheminée solaire pourrait également répondre par la même occasion aux utilisations secondaires que sont :
 - La production agricole (maraîchère, sucrière, etc.);
 - La récupération des eaux de pluie;
 - L'attraction touristique;
 - le dessalement;
 - le refroidissement;
 - le séchage.

I.8. Importance du projet de centrale solaire à cheminée

Bien que l'efficacité globale de la centrale solaire à cheminée (CCS) soit faible, le problème de l'efficacité totale est encore bien toléré avec les faibles coûts de construction, d'exploitation et d'entretien de la centrale. Lorsque la CCS est comparé à d'autres types de systèmes de concentration d'énergie solaire, la CCS peut utiliser à la fois le rayonnement solaire diffus et direct.

Dans le scénario où le ciel est fréquemment couvert, la CCS peut encore fonctionner sous l'effet du rayonnement solaire diffus. De plus, la CCS s'appuie sur l'absorbeur du collecteur pour l'absorption de l'énergie solaire radiante et cet absorbeur est capable de stocker l'excès d'énergie thermique sans avoir à payer de frais supplémentaires. Pendant la journée, lorsque l'énergie solaire est disponible, une partie de l'énergie rayonnée serait stockée dans l'absorbeur et le dégagement d'énergie thermique aurait lieu pendant la nuit.

La CCS est également un système fiable pour la production d'électricité car il n'est pas susceptible de tomber en panne ou de mal fonctionner facilement, étant donné que les seules pièces mécaniques en mouvement sont la turbine et les composants du générateur. Les matériaux de construction peuvent également être achetés localement sans avoir besoin d'acheter des composants de haute technologie [34].

I.9. Défis de la centrale solaire à cheminée

Le principal défi de la technologie des CCS est le processus de conversion d'énergie en série conduisant à un faible rendement de l'usine. L'efficacité totale du CCS est le produit de l'efficacité des trois technologies de l'usine. Le collecteur solaire a un rendement d'environ 20% et se caractérise par des pertes thermiques élevées de plus de 30%. La turbine a été considérée comme le composant le plus efficace et le plus efficace du CCS en raison de l'emplacement de la turbine, ce qui conduit à une efficacité de conversion d'énergie de plus de 60%. La cheminée a le moins d'efficacité qui est due à la dépendance de la performance sur la hauteur de la cheminée où une cheminée de 1000 m de haut a une efficacité d'environ 3%. La plupart des publications ont suggéré que l'augmentation de la taille du CCS augmentera l'efficacité de l'usine, mais l'augmentation de la taille du collecteur augmente également les pertes thermiques tandis que l'augmentation de la hauteur de la cheminée augmente le coût d'investissement et le défi technique de la construction de la cheminée [34].

Dans l'ensemble, la CCS souffre d'un inconvénient en raison d'un faible rendement, qui est inférieur à 2%. Les principaux contributeurs au faible rendement de l'installation sont les pertes thermiques élevées du collecteur et le faible rendement de la cheminée. La différence de densité de l'air ambiant et de l'air du système crée la différence de pression qui favorise l'effet de cheminée dans la cheminée et améliore le taux d'évacuation de l'air flottant vers l'air ambiant: lorsque la température de l'air dépasse celle du couvercle transparent, il perd de la chaleur vers le couvercle transparent et par conséquent vers l'atmosphère affectant ainsi la pression dans le système [35]. De plus, l'efficacité du collecteur solaire est également affectée par les conditions climatiques de l'endroit géographique où la CCS est installé. Haaf et al. [35] ont montré qu'une température ambiante plus élevée conduit à une réduction de la puissance / performance du CCS étant donné que la force motrice est fonction de la différence de température entre l'air du système et les températures de l'air ambiant / environnant.

Dans la conception du CCS, le collecteur d'air solaire ouvert à une hauteur d'entrée fixe qui permet au système de fonctionner à des intensités de rayonnement solaire faibles et élevées. Pendant les heures de forte intensité de rayonnement solaire, le système subit des pertes thermiques excessives. Ceci s'applique à la centrale solaire à cheminée inclinée. Dans la cheminée solaire inclinée, cette situation peut être atténuée pour améliorer la puissance de sortie de l'usine. La CCS est également confronté au défi de peu ou pas de production d'électricité pendant la nuit en raison du manque d'approvisionnement en énergie du soleil ou de sources alternatives. L'énergie générée par la CCS fluctue au cours de la journée et varie avec la période de l'année en raison de la position du soleil à différents moments et saisons. La CCS conventionnel nécessite une grande étendue de terrain plat sans valeurs concurrentes. De plus, le débit massique d'air dans la CCS est limité à la taille du collecteur et à l'effet de cheminée de la cheminée [34].

I.10. Autres types de technologie d'alimentation de cheminée solaire

I.10.1. Technologie d'alimentation de cheminée solaire flottante

La cheminée solaire conventionnelle utilisée pour la production d'électricité est construite en béton armé. Bien qu'ayant une longue durée de vie, la cheminée solaire en béton armé, dont la hauteur doit être la plus élevée possible afin d'améliorer le rendement de la centrale solaire à cheminée, présente certains inconvénients. Les inconvénients comprennent un coût de construction élevé et une hauteur limitée en raison des contraintes technologiques et des

restrictions sur les matériaux de construction. Il existe également des limitations externes telles que d'éventuels tremblements de terre, qui peuvent facilement détruire une cheminée solaire très élevée. Sur la base de ces faits, Papageorgiou a proposé un concept de cheminée solaire flottante (Floating solar chimney FSC) à la place du béton armé cheminée solaire à utiliser pour de la centrale de cheminée solaire CCS.

La cheminée solaire flottante CSF se compose de trois parties: le corps principal, la base lourde et la partie inférieure rabattable (Fig. I.9). Le corps principal est composé d'anneaux de ballons cylindriques remplis de gaz flottants liés les uns aux autres à l'aide d'anneaux de support. Le corps principal est fixé au siège de la base lourde et la partie inférieure pliante est fixée à la partie inférieure de la base lourde, qui peut résister aux vents extérieurs en laissant l'air entrer et sortir librement de ses anneaux afin que la cheminée solaire flottante puisse recevoir toute déclinaison appropriée exposée au vent [15,36-38].

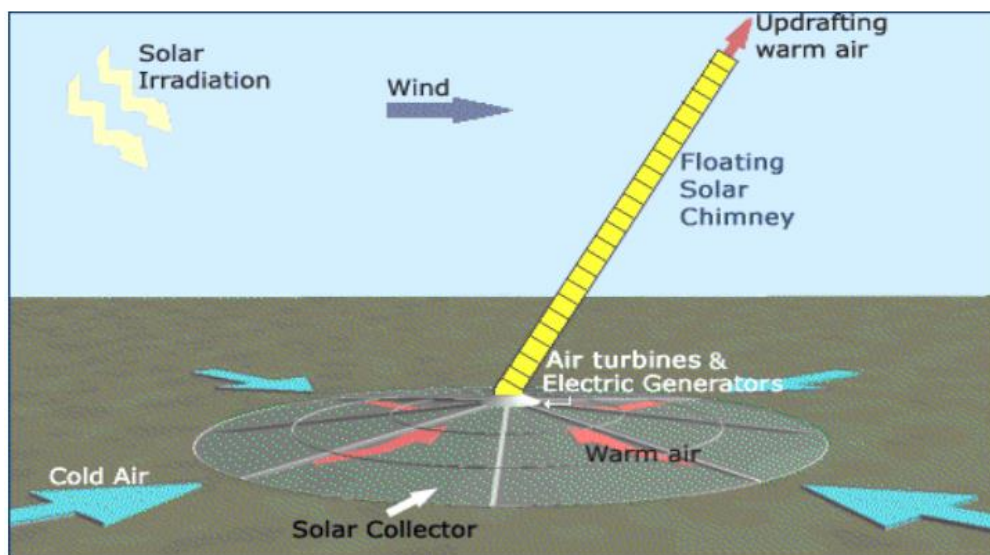


Fig. I.9. Cheminée solaire flottante [15]

Papageorgiou [39,40] a conçu la structure de la cheminée solaire flottante CSF et effectué des travaux sur la centrale électrique du CSF, y compris l'étude de l'effet du vent externe et la conception optimale de CCS. Zhou et al. [37] ont effectué une analyse économique de la centrale électrique CSF en utilisant un modèle économique. Plus tard, ils [41] ont proposé une nouvelle centrale solaire thermique avec CSF raidie sur un flanc de montagne, segment par segment (Fig. I.10) et ont estimé le potentiel de production d'électricité du système dans les déserts chinois.

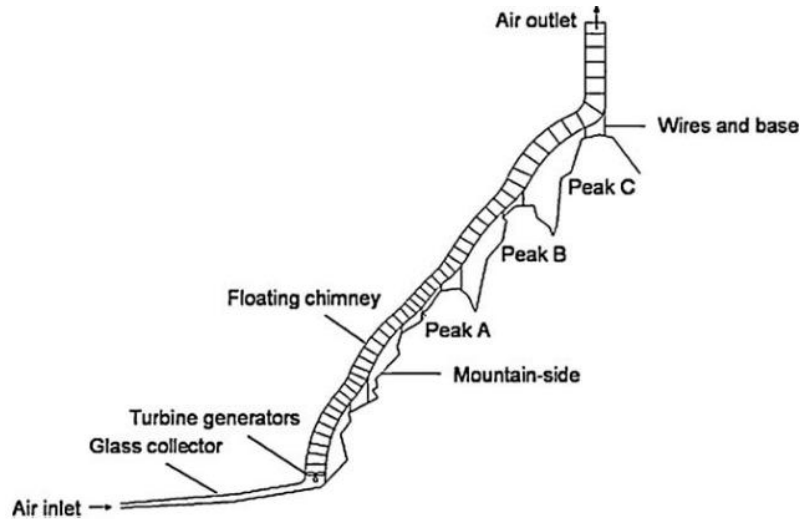


Fig. I.10. Nouvelle centrale solaire thermique avec cheminée flottante rigidifiée à flanc de montagne, segment par segment [41].

I.10.2. Technologie d'alimentation de cheminée solaire avec collecteur incliné

Le nouveau concept consistant en un collecteur incliné et une cheminée solaire courte a été proposé par Bilgen et Rheault [42], comme le montre la Figure (I.11). Le collecteur a une surface triangulaire avec une cheminée solaire à son sommet. Les côtés sont fermés et l'air entre par le côté inférieur et monte comme chauffé par le sol jusqu'au sommet où une courte cheminée solaire est installée verticalement. Pratiquement, ce collecteur incliné joue également un effet «cheminée solaire» du fait de la montée de l'absorbeur de pente sous le toit du collecteur.

Bilgen et Rheault [42] ont développé un modèle mathématique pour ce nouveau type de système d'alimentation cheminée solaire. En supposant que la densité de l'air change linéairement de l'entrée du collecteur à la sortie. Ils ont effectué une analyse paramétrique pour optimiser la pente du collecteur afin de maximiser l'insolation reçue par le collecteur solaire pour trois emplacements, respectivement Ottawa, Winnipeg et Edmonton à haute altitude, dont les latitudes sont passées de $45,58^\circ$ à $49,98^\circ$ à $53,68^\circ$. Les résultats ont montré que la pente optimale du collecteur devait être de 5 à 7° inférieures à l'altitude. Une étude de simulation thermodynamique a été menée pour déterminer les paramètres de conception et les données opérationnelles pour les centrales de cheminée solaire de 5 MW. La performance thermique de la technologie d'alimentation SC avec collecteur incliné est légèrement supérieure à celle du collecteur horizontal conventionnel.

Wei et al. [43] a également analysé l'effet de la pente pour recevoir l'insolation et étudié la pente optimale du collecteur dans centrale de cheminée solaire. Aux moyennes et hautes latitudes, le collecteur solaire horizontal classique ne peut pas recevoir le soleil perpendiculairement. Le collecteur sur une pente appropriée réduira l'angle d'incidence, augmentant ainsi l'insolation reçue par le collecteur. La technologie d'alimentation SC avec collecteur incliné peut être une technologie efficace appliquée aux latitudes moyennes et élevées.

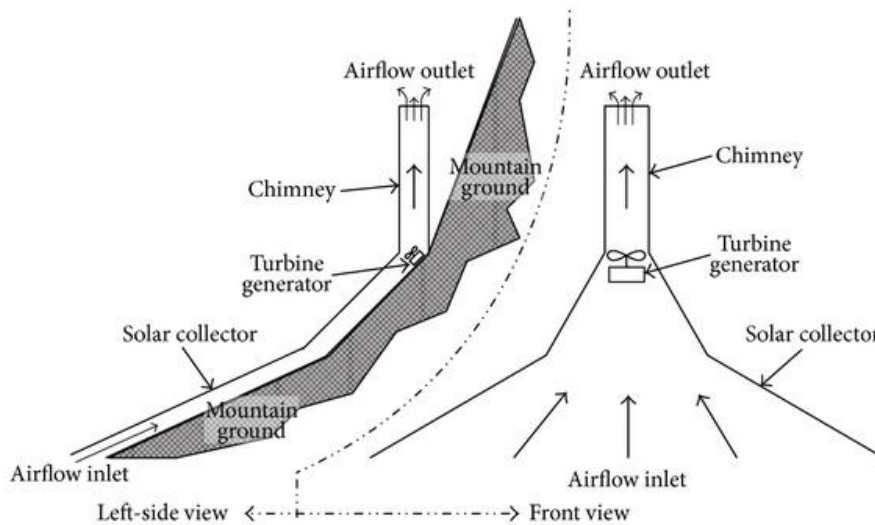


Fig. I.11. Schéma d'une centrale solaire à cheminée en pente

I.10.3. Technologie d'alimentation de cheminée solaire avec creux de montagne

Le nouveau concept consistant en une conception pour la construction d'un collecteur solaire géant entourant un espace creux creusé dans une montagne dans une région à géologie stable (Fig. I.12) a été proposé par Zhou et al. [44]. L'espace creux géant de la montagne est creusé sous forme de «cheminée solaire». Les figures (I.12.a) et (I.12.b), respectivement, ont donné une vue de dessus et une vue verticale d'un prototype avec le nouveau concept de production d'énergie intégrant un collecteur solaire avec un creux de montagne artificiel. L'espace creux peut être utilisé comme une «cheminée solaire» économique et sûre.

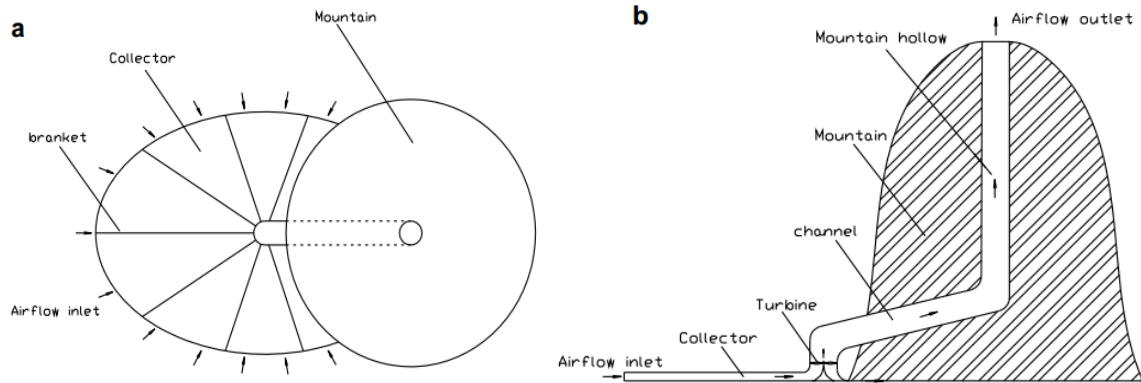


Fig. I.12. Diagramme schématique de la centrale de cheminée solaire creuse montagne [44] : (a) vue de dessus et (b) vue de côté

I.10.4. Technologie d'alimentation de la cheminée solaire pour la récolte de l'eau atmosphérique

Kashiwa et al. [45] ont proposé un nouveau concept de «cyclone solaire» pour exploiter l'énergie solaire et pour extraire l'eau douce de l'atmosphère à la surface de la terre, la figure (I.13.a) et (I.13.b) montre une configuration pour le cyclone solaire et illustre le principe de fonctionnement du séparateur à cyclone d'expansion. Par rapport à la centrale de cheminée solaire conventionnelle, un séparateur à cyclone d'expansion pour condenser et éliminer l'eau atmosphérique est placé derrière les turbines à la base du CS. Les pales de turbulence installées dans le collecteur entraînent la rotation du flux radial chaud. Les composantes radiale et tourbillonnaire de la vitesse du flux tourbillonnant augmenteront lors du déplacement vers la base de la CS. Ceci s'accompagne d'une réduction de la température, de la pression et de la densité. L'air entraînera les turbines pour alimenter les générateurs au centre, puis entrera verticalement dans le séparateur.

Le séparateur, qui consiste en un vortex fortement rotatif, a la forme d'une buse convergente-divergente, où l'afflux est en rotation. La température moyenne du flux d'air descend bien en dessous du point de rosée dans la partie convergente, où la condensation d'un brouillard se produit immédiatement à l'aide d'une certaine quantité de poussière toujours contenue dans l'air de surface, une turbulence intense provoque une croissance rapide des gouttelettes, l'action centrifuge se déplace gouttelettes vers la paroi dans la gorge de la buse où un film d'eau rotatif est guidé dans un piège de collecte. Une petite dépression, par rapport à la pression de col, est maintenue par un effet venturi dans le piège de collecte afin de favoriser l'écoulement du film dans le piège.

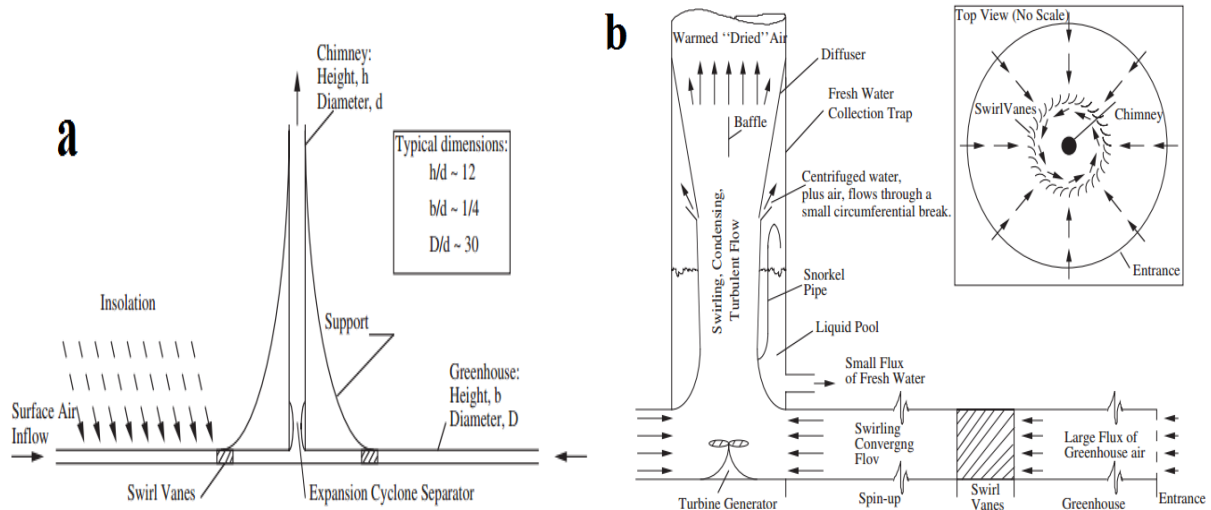


Fig. I.13. Diagramme schématisé de la centrale de cheminée solaire pour récolter l'eau atmosphérique [45] : (a) cyclone solaire (b) expansion cyclone séparateur

I.10.5. Tour Energétique

Un autre concept de cheminée est basé sur le phénomène inverse : l'air froid descend, ce qui fait que cette tour marche à l'envers des autres. Les anglophones l'ont dénommé down raft «Energy Tower» (Fig. I.14). Une Tour Energétique est une centrale à énergie renouvelable construite de manière à évaporer de l'eau de mer en haut d'une cheminée en la vaporisant l'aide de buses, sprays, micronisateurs, asperseurs ou nébulisateurs. Cela va refroidir l'air, qui va devenir plus dense et de ce fait va descendre, afin d'actionner des turbines situées en bas de la tour pour produire de l'électricité, mais aussi de l'humidité cela peut servir pour de l'irrigation. L'un des avantages est qu'il n'y a pas besoin de construire de serre au pied de la tour. Ce concept, inventé par Phillip R. Carlson en 1975 [7].

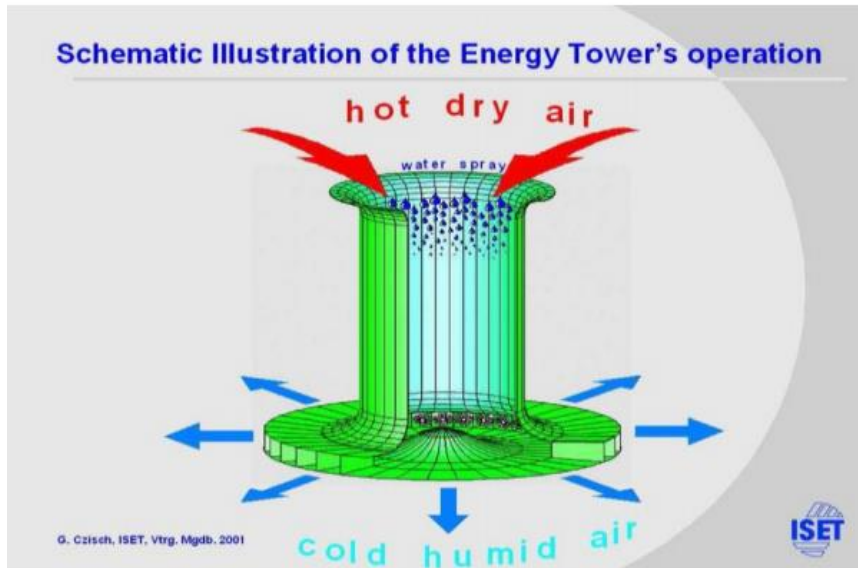


Fig. I.14. Schéma illustratif de l'opération effectuée par une Tour Energétique.

Conclusion

Les cheminées solaires (CS) sont des centrales à base d'énergie renouvelable, qui reposent sur deux grands principes physiques. Le premier est le mouvement vers le haut de l'air chauffé dû à la différence de densité, et le second est l'augmentation de mouvement de l'air due à la différence de pression entre l'entrée et la sortie de la cheminée.

Ce chapitre est consacré à la présentation générale des centrales de cheminée solaire. Nous avons commencé par le principe de fonctionnement et les composants principaux des centrales de cheminée solaire, suivi par les différents phénomènes et réponses physiques qui se produisent dans les centrales de cheminées solaires, ainsi, nous avons présenté une étude de performance de la cheminée solaire. L'analyse de la cheminée solaire montre qu'il y a beaucoup de paramètres qui gouvernent la production de l'énergie électrique, certains dépendent de la cheminée même telles que les dimensions de la cheminée (le diamètre du collecteur , la hauteur de la cheminée, la hauteur du collecteur, le diamètre de la cheminée et la nature du vitrage etc.) et d'autres dépendent des conditions climatiques (température ambiante et éclairage solaire).

Le chapitre a été clôturé par une présentation sur d'autres types de technologie d'alimentation de cheminée solaire. Dans le chapitre suivant sera une étude bibliographique approfondie sur centrale de cheminée solaire.

**CHAPITRE II : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE
SUR LES CENTRALES A CHEMINEE
SOLAIRE**

II.1. Introduction

L'utilisation accrue de l'énergie solaire a attiré l'attention des chercheurs spécialistes en développement de la technologie de la centrale à cheminée solaire (CCS) ces dernières années. De nombreuses études ont été menées dans ce domaine à la fois expérimentalement, numériquement et théoriquement, alors que les études expérimentales sont principalement axées sur les systèmes à petite échelle.

Ce chapitre fournit un scénario complet de la chronologie du développement de la technologie des CCS. Nous allons ainsi présenter un nombre non exhaustif de travaux réalisés dans les centrales d'énergie de cheminée solaire, qui visent à améliorer leurs performances et à bien contrôler les phénomènes qui s'y produisent.

II.2. développement de la centrale à cheminée solaire

La centrale à cheminée solaire est une technologie plutôt nouvelle proposée pour être un dispositif qui génère de l'électricité à grande échelle en transformant l'énergie solaire en énergie mécanique. De nombreux chercheurs du monde entier ont introduit des projets divers de tour solaire. Léonard de Vinci fit des croquis d'une tour solaire appelée « Smoke-jack » comme le montre la figure (II.1) [46].

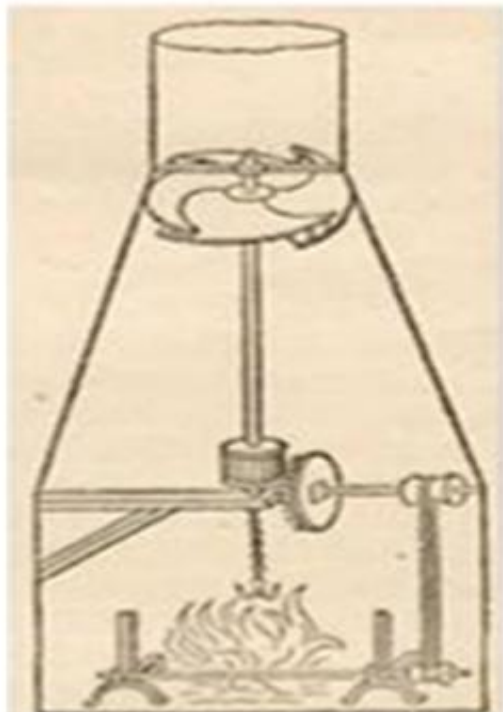


Fig. II.1. Représentation de Leonardo-da Vinci

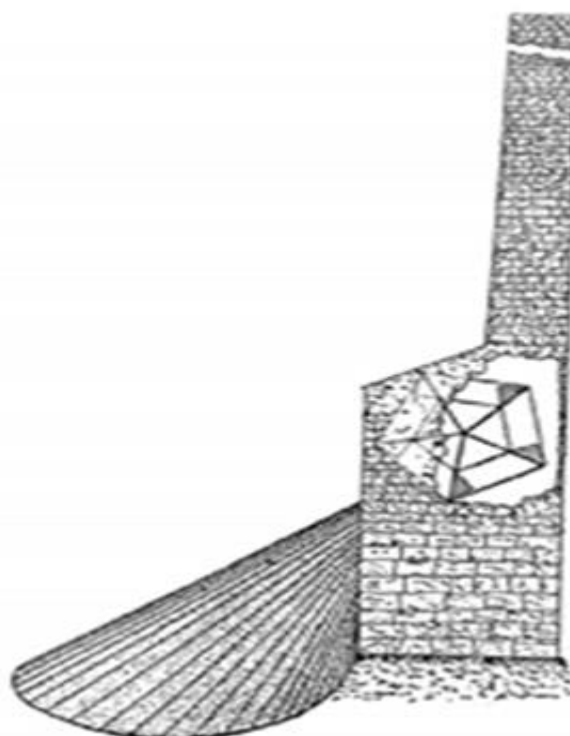


Fig. II.2. Projet de moteur solaire proposé par Isodoro Cabanyes

L'une des premières descriptions d'une CCS a été proposée en 1903 par Isidoro Cabanyes. Il a introduit un appareil constituant d'un aérotherme attaché à une maison avec une cheminée associée par une pale d'une turbine destinée pour la production de l'électricité, comme présenté dans la figure (II.2) [46-48].

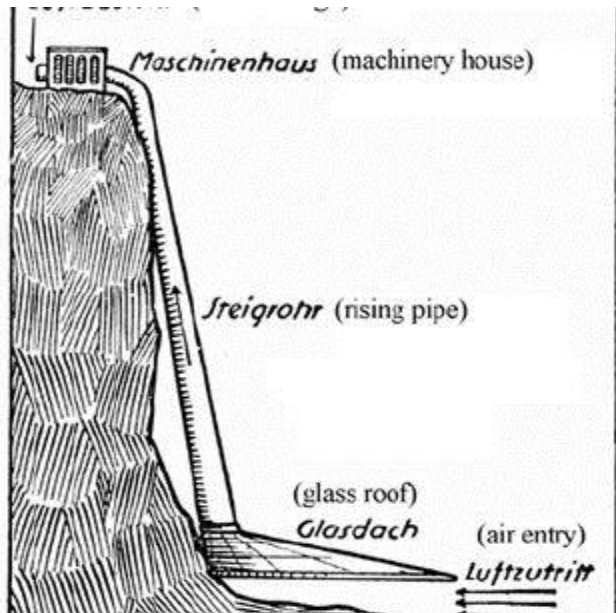


Fig. II.3. La cheminée solaire présentée par le professeur Dubos [46].



Fig.II.4. Cheminées solaires dans le désert marocain [46].

En 1926, Bernard Dubos a proposé à l'Académie française des sciences la construction d'une centrale solaire aéro-Électrique en Afrique du Nord dont sa cheminée solaire a été conçue au voisinage de la limite de la paroi latérale de la montagne comme illustré dans la figure (II.3). L'auteur de la cheminée affirme qu'une vitesse de vent de l'ordre de 50 m/s peut être atteinte afin d'assurer un bon fonctionnement de la turbine pour produire de l'énergie électrique [46].

L'une des premières représentations de la cheminée solaire a été rédigée en 1931 par Hanns Günther. La figure (II.4) présente une vue architecturale de la cheminée solaire présentée par Günther, 1931 [46,47]. La figure (II.5) montre une expérience proposée par Dubos, la plaque et la lampe à alcool représentent respectivement le désert du Sahara et la chaleur solaire. La petite turbine placée au-dessus représente les turbines. Si la lampe à alcool est positionnée sous la plaque, l'air chaud circule concentriquement à travers la plaque pour atteindre le tube. Par conséquent, le flux montant entraîne le fonctionnement de la turbine pour produire de l'électricité.

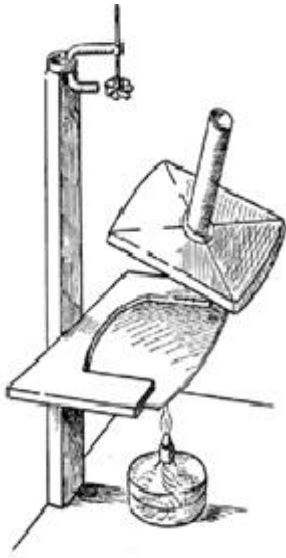


Fig. II.5. Proposition de cheminée solaire
Présentée par Dubos.

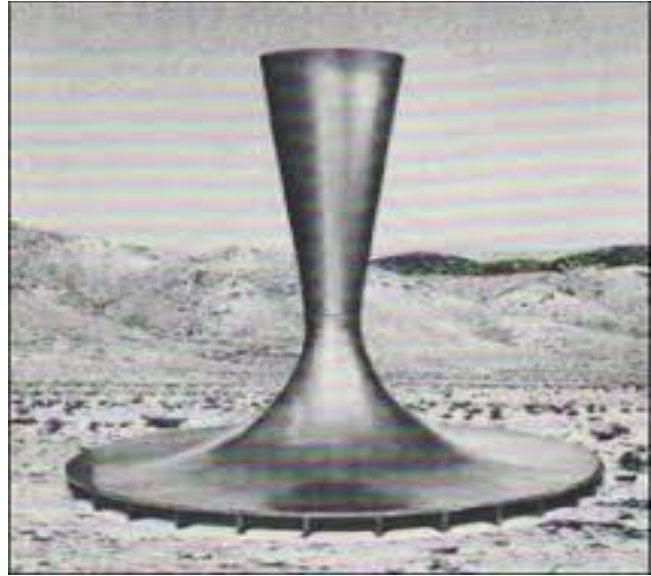


Fig. II.6. La tour solaire du professeur NAZARE
[46]

En 1956, le français Edgard Nazare dépose son brevet en Algérie. Il s'agissait générer artificiellement une ascendance atmosphérique tourbillonnaire dans une sorte de tour en forme de tuyère de Laval de forme ronde et de récupérer de l'énergie au moyen de turbines (Fig. II. 6) [47].

L'idée de la cheminée solaire a été proposée initialement en 1976 par les deux ingénieurs allemands, Jörg Schlaich et Rudolf Bergemann. Ils ont développé leur premier prototype avec une puissance de l'ordre de 50 kW à Manzanares en 1979, comme mentionné dans la figure (II.7), à environ 100 miles au sud de Madrid, en Espagne [48-50].



Fig. II.7. Prototype de Manzanares en Espagne

De nombreux chercheurs ont exprimé un vif intérêt de cette technologie. Des études portées sur l'optimisation de la performance de ce type de système de production d'énergie durable au moyen de travaux numériques, théoriques et expérimentaux.

II.3. Les centrales électriques de la cheminée solaire au monde

II.3.1. Premier prototype en Espagne

Une tour expérimentale a été construite en 1982 par le bureau d'étude allemand Schlaich Bergermann & Partners. Composée d'une cheminée cylindrique de 195 m de haut et son diamètre de 10 m. La surface du collecteur était de 46000 m². Le design de ce prototype a été présenté dans la figure (II.8) [51].



Fig. II.8. Photos de prototype de cheminée solaire installée à Manzanares (Espagne) [7-46]

L'objectif de ce projet de recherche est de vérifier, par des mesures sur le site, les performances projetées à partir de calculs basés sur la théorie et d'examiner l'influence de composants individuels sur le rendement et l'efficacité de l'usine dans des conditions techniques et météorologiques réalistes. Ces résultats montrent que les composants sont hautement fiables et que l'installation dans son ensemble est capable fonctionner très fiable. Le rayonnement solaire global unique est exploité et l'inertie thermodynamique est une caractéristique du système. Un fonctionnement continu tout au long de la journée est possible et même les fluctuations brusques de l'approvisionnement en énergie sont efficacement amorties, l'installation fonctionnant en continu même par temps nuageux, bien qu'à une puissance réduite [52]. Les dimensions principales et les données techniques de ce prototype sont récapitulées dans le Tableau II. 1.

Tableau II.1 : Les dimensions principales et les données techniques du prototype de Manazanares

Désignation	Valeur
Rayon de la cheminée	5.08 m
Rayon du collecteur	122 m
Hauteur de collecteur	1.85 m
Hauteur de la cheminée en acier	194.6 m
Nombre de pales de la turbine	4
Puissance nominale	50 kw
Partie en plastique de la couverture du collecteur	40000 m ²
Partie en verre de la couverture du collecteur	60000 m ²

II.3.2. Le projet Australien

La tour de Buronga se trouve en Australie (voir la figure II.9), à 630km au sud-ouest de Sydney, dans une zone aride et désertique située à la frontière des états de Nouvelle Galle du Sud de Victoria. Il s'agit d'une tour en béton de près de 1km de hauteur, un diamètre de la cheminée de 120m, un diamètre du collecteur de 7000m et d'une hauteur moyenne de la couverture de 1.85m. La centrale fournirait 200MW de puissance électrique [7].



Fig. II.9. Centrale à cheminée solaire de Borunga

II.3.3. Le projet d'Arizona

En 2001, une société appelée Enviromission a annoncé qu'elle prévoyait de construire une cheminée solaire de 200 mégawatts dans le sud-ouest de l'Australie qui pourrait générer 4000 fois plus d'électricité que le système Manzanares. La firme australienne collabore avec les consultants allemands Schlaich Bergmann. Mais pour obtenir ce type d'énergie, Enviromission est construit une cheminée solaire (voir la figure II.10) de 130 mètres de diamètre et 1000 mètres de hauteur, soit plus de 11 fois la hauteur de la statue de la liberté et près de deux fois plus haute que La tour du Canadien National à Toronto. Enviromission devrait battre un record du monde pour que sa cheminée solaire devienne une réalité. En outre, pour créer suffisamment d'air chaud pour traverser cette cheminée, il faudra une zone de collection solaire recouverte en plastique ou de verre pouvant atteindre 35 kilomètres carrés, soit à peu près l'équivalent de 5000 terrains de football de la National Football League. Le projet devrait coûter près d'un milliard de dollars [15].



Fig. II.10. Schéma de la centrale électrique d'enviromission [15]

II.3.4. Le projet Espagnol

En 2006, un plan de construction d'une centrale solaire nommée Ciudad Real Torre Solar à tour ascendante de 750 m de haut, de 3km de diamètre du collecteur et de 40 MW (voir la figure II.11) [53].



Fig. II.11. La Cheminée Solaire de Ciudad Real

II.3.5. Le projet Namibien

En 2008, le gouvernement Namibien a décidé de construire une centrale solaire de 400 MW appelée « Green Tower » avec une cheminée solaire (voir la figure II.12), d'une hauteur de 1500 m, une cheminée d'un diamètre de 280 m et un collecteur de 37 km² de superficie. Le collecteur est aussi envisagé pour être utilisé comme une serre pour des fins agricoles [11,15, 53].



Fig. II.12. Projet Namibien [11]

II.4. Etudes expérimentales

A base du prototype de Manzanares, de nombreux travaux de recherche sont en cours de réalisation et impliquent la construction de différents projets pour étudier le potentiel des cheminées solaires dans le monde entier. Entre les années 1982 et 1983, Haaf et al. [35] ont obtenu les résultats et les propriétés structurelles du prototype de l'échantillon expérimental testé à Manzanares. En 1997, Schlaich a mené des recherches sur la même centrale électrique, publié ses résultats et les a comparés aux résultats précédents [53].

En 2002, Zhou et al. [54,55] ont développé un modèle expérimental à petite échelle d'une cheminée solaire, avec un diamètre de collecteur de 10m et une hauteur de cheminée de 8m (Fig. II.13). Ils ont mesuré la distribution de la température dans la cheminée solaire comme objectif principal. De même, ils ont indiqué que la différence de température (ΔT) entre l'ambiance et celle du collecteur peut atteindre 24,1°C. Ce phénomène suffit à générer la force motrice du débit d'air dans le système. Ce prototype a été reconstruit plusieurs fois à des fins différentes.



Fig. II.13. Expérimental de cheminée solaire à HUST, en Chine [54].

En 2009, un prototype a été construit par Maia et al. [56] pour la validation de leur modèle mathématique et de leur méthodologie numérique au Brésil. Les auteurs ont évalué les effets des caractéristiques géométriques de base de la cheminée solaire sur la fonction du flux d'air en fonction des dimensions du prototype construit.

En 2011, Un prototype de cheminée solaire a été construit par Kasaeian et al. [57,58] sur le campus universitaire de Zanjan en Iran. La cheminée solaire était composée de deux couches de feuilles de polycarbonate, d'un collecteur revêtu de 10 m de diamètre et d'une tour contenant un tuyau en polyéthylène de 12 mm d'une hauteur de 13 m. Dans la même année, une petite cheminée solaire a été construite par Najmi et al. [59] à Kerman, en Iran. Les auteurs ont étudié des paramètres efficaces pour optimiser la performance de la cheminée solaire et ont effectué une analyse économique. Il a été suggéré que l'utilisation d'asphalte ou de caoutchouc au fond du collecteur, de verres à double vitrage sur le toit du collecteur, une hauteur de collecteur réduite à 1.3m, et l'installation de forme conique à l'entrée de la cheminée pourrait augmenter la puissance de sortie.

En 2012, Chappell et al. [60] ont conçu et fabriqué une cheminée solaire à petite échelle, visant à réduire le coût des matériaux et l'effort d'entretien sans utiliser de machinerie lourde. Une évaluation de l'emplacement probable de cette cheminée solaire a été effectuée dans le nord de la Mongolie au cours de l'été 2011.

En 2013, Aja et al. [61] ont étudié l'effet de la vitesse et de la direction du vent sur la performance d'une cheminée solaire inclinée orientée vers le sud. Il a été constaté que la

vitesse du vent avait un grand effet sur la perte de chaleur par convection via les murs et le couvercle.

En 2014, Al-Azawie et al. [62] ont étudié le potentiel de six matériaux de sol en Malaisie, de façon expérimentale et numérique. Ces matériaux comprenaient de la céramique, de la sciure, du sable, du bois peint vert foncé, de la pierre noire et des cailloux utilisés pour convertir le rayonnement solaire en énergie cinétique. Les résultats ont montré que la pierre noire et la céramique fonctionnaient mieux que d'autres matériaux. La céramique a une meilleure capacité de stockage de la chaleur, mais en raison de la disponibilité de la pierre noire, il a été suggéré comme matériau absorbant dans les cheminées solaires. Tan et Wong [63] ont évalué les effets de la vitesse de l'air ambiant et de la charge thermique interne sur l'environnement thermique des conduits de cheminée solaires. Ils ont déclaré avoir développé la vitesse de l'air dans la cheminée solaire pour la vitesse de l'air ambiant supérieure à 2,00 m/s.

En 2015, Shahreza et Imani [64] ont conçu et construit une cheminée solaire avec deux intensificateurs pour intensifier l'irradiance du soleil tout autour de la cheminée solaire. Il a été conclu que l'utilisation de ces intensificateurs autour de la cheminée solaire entraînait une augmentation de la vitesse de l'air et, par conséquent, augmentait considérablement la production d'électricité.

En 2016, Ghalamchi et al. [65,66] ont réalisé une étude expérimentale pour trouver de nouveaux résultats afin d'optimiser la CCS. Ils ont étudié une petite centrale électrique avec 3 m de hauteur de cheminée et 3 m de diamètre du collecteur (Fig. II.14). Ils ont constaté que l'aluminium produit un meilleur transfert de chaleur que le fer. Pour cette raison, ils ont utilisé l'aluminium dans la construction d'une centrale électrique et ont constaté que la différence de température (ΔT) la plus élevée entre le collecteur et l'environnement a atteint 27 °C et la vitesse maximale de l'air de 1,7m/s.

En 2017, Ghalamchi et al. [67] ont proposé une méthode optimisée pour améliorer l'efficacité de la cheminée solaire basée sur la géométrie du réseau et le système électrohydrodynamique. Cette recherche s'est appliquée à trois configurations électrohydrodynamiques différentes. Les résultats finaux ont montré que la méthode présentée améliore l'efficacité du système de la centrale à cheminée solaire. Dans le nord de la Tunisie, un prototype de CS a été créé par Jemli et al. [68] avec un diamètre de 8 m et une hauteur de 2 m. La production d'électricité est estimée à 0,3 W/m² en été et 0,1 W/m² en hiver ; le système de stockage est conçu pour faire fonctionner le modèle pendant la nuit.



Fig. II.14.Expérimental de cheminée solaire à Téhéran

En 2018, Hussain et Al-Sulaiman [69] ont développé une nouvelle conception pour une CCS, des réflecteurs ont été utilisés pour augmenter l'intensité solaire. Les résultats ont révélé une augmentation de la production et de la performance énergétiques de la centrale à cheminée solaire, respectivement, par rapport à la production conventionnelle. Dans la même année, Ahmed et Hussein [70] ont étudié une nouvelle conception de la centrale électrique à cheminée solaire. Ils ont expérimenté deux nouveaux modèles hybrides pour le collecteur solaire dans la centrale électrique. Ils ont examiné un système (système A) avec le verre collecteur et les panneaux photovoltaïques dans le sol pour absorber la chaleur et un autre système (système B) avec les panneaux photovoltaïques comme toit collecteur et le contreplaqué dans le sol comme absorbeur. Ils ont montré que le système A avait un meilleur gain thermique que le système B bien que le système B avait une puissance utile produite que le système A.

En 2019, Dans l'étude de Azizi et al. [71], un prototype à petite échelle de centrale à cheminée solaire a été construit et développé à l'Université de Ouargla, en Algérie. Le modèle numérique de turbulence standard de CFD a été adopté pour simuler le flux d'air dans le prototype de cheminée solaire. Les vitesses d'air mesurées à l'entrée de la cheminée sont en bon accord avec celles prévues par l'utilisation du modèle CFD. Une vitesse d'air maximale à l'entrée de la cheminée a été atteint de 1,6 m/s. ainsi, les résultats ont montré que la technologie de cheminée solaire est très approprié pour les zones chaudes et arides comme le

sud-est de l'Algérie. Nasraoui et al. [72] ont conçu et construit un prototype de la centrale à cheminée solaire à l'Ecole Nationale des Ingénieurs de Sfax, Tunisie. Afin d'identifier et d'analyser le comportement de la CCS. Ils ont proposé une nouvelle conception de cheminée de forme hyperbolique; la conception est optimisée en analysant l'impact du rayon de divergence de la cheminée sur la performance de la CCS en appliquant un code de calcul 2D de dynamique des fluides.

En 2020, Avci et al. [73] ont effectué une série d'analyses systématiques par simulation CFD dans le but d'optimiser la puissance de sortie en analysant le profil énergétique de la cheminée solaire. Leurs résultats numériques ont été validés par un essai expérimental utilisant un prototype (CCS) de 11m de longueur et 12 m de largeur.

Dans la même année, Villar-Ramos et al. [74] ont présenté la conception, la construction, l'instrumentation et l'évaluation thermique d'une cheminée solaire à canal unique sous un climat chaud et humide. Ils ont effectué une étude paramétrique avec un total de 60 tests dans des conditions de laboratoire. Les résultats montrent qu'une cheminée solaire peut être utilisée comme système de ventilation passive, où jusqu'à 5 fois plus d'air peut être évacué dans une enceinte, et un rendement maximum de 88,9 %. Nasraoui et al. [75] ont proposé un nouveau modèle de collecteur pour améliorer la performance de la CCS. Une comparaison entre trois modèles (collecteur classique, collecteur à double passage avec flux parallèle et collecteur à double passage avec Contre-Flux) a été effectuée à l'aide de la méthodologie CFD. Les résultats montrent que les conceptions proposées affectent clairement le comportement de la CCS. En fait, le collecteur à contre-courant à double passage présente une solution efficace qui augmente le rendement du collecteur de 28 % par rapport au collecteur conventionnel.

Golzardi et al. [76] ont fabriqué deux configuration expérimentales intérieures pour une cheminée solaire avec différentes géométries de collecteur et ont effectué plusieurs essais avec différentes hauteurs d'entrée de collecteur. Les effets de la hauteur d'entrée du collecteur sur le transfert de chaleur et la vitesse et la température de l'air dans la cheminée ont été évalués. Sur la base des résultats obtenus, pour la géométrie conventionnelle de la cheminée solaire, la diminution de la hauteur d'entrée du collecteur de 20 à 10 cm améliore la vitesse de sortie et le taux de facteur de transfert d'énergie de 17 % et 62 %, respectivement; que, pour l'autre géométrie, la diminution de la hauteur d'entrée du collecteur de 16 à 8 cm entraîne une amélioration de 13 % et de 37 % des paramètres mentionnés.

Belkhode et al. [77] ont conçu une tour solaire avec tous les paramètres géométriques variables en considération et ont optimisé les performances de la CCS au moyen de données expérimentales ainsi que de simulation informatique avec la formulation d'un modèle

mathématique approximatif. Dans l'étude de Mehdipour, les performances thermiques des cheminées solaires ont été évaluées expérimentalement pour deux configurations expérimentales avec des géométries de collecteurs différentes. Un collecteur de type circulaire avec cheminée solaire a été comparé à un collecteur carré avec sa cheminée située d'un côté. Les résultats expérimentaux ont montré que dans les mêmes conditions de fonctionnement, le collecteur carré a de meilleures performances que le collecteur circulaire [78].

En 2021, Azizi et al. [79], ont construit un prototype de cheminée solaire dans la ville d'Ouargla, située dans le sud-est de l'Algérie pour évaluer l'amélioration des performances d'une cheminée solaire en la couplant à l'eau géothermique albiennaise. Étant donné l'absence de forage albien près du prototype de cheminée solaire, ils ont utilisé un chauffe-eau pour produire de l'eau à une température proche de celle de l'eau albiennaise naturelle. Les auteurs ont observé que ce système hybride de production d'énergie fonctionne pendant le jour et la nuit et assure une alimentation électrique ininterrompue. Le système proposé abaisse également la température de l'eau chaude, la rendant ainsi apte à l'irrigation.

II.5. Etudes analytiques et numérique

En 1987, Mullet [80] a mené une étude sur l'efficacité des CCS. En 1998, Pasumarthi et Sherif [81] ont proposé un modèle mathématique conçu pour examiner l'effet de divers paramètres sur la température, la vitesse et la sortie de puissance des cheminées solaires. De nombreux de recherche ont été effectués mathématiquement sur la modélisation de la performance des collecteurs de la CCS.

Backström et Gannon [82] ont présenté une approche unidimensionnelle du débit compressible pour calculer toutes les variables thermodynamiques en fonction de la hauteur de la cheminée, du frottement des parois, des pertes supplémentaires, du frottement intérieur et des changements de champ. Un système de cheminée solaire à grande échelle devrait être construit pour concevoir un système de cheminée solaire analytique complet et une vérification complète. D'autres études ont été menées par Gannon et al. [83], ils ont présenté une analyse thermodynamique pour l'exploitation d'une CCS. Ils ont utilisé le frottement de la cheminée, l'efficacité de la turbine et la perte d'énergie cinétique de sortie pour prédire la puissance d'une centrale électrique. Ils ont également montré que la prédiction précise est l'un des facteurs les plus importants dans une conception de turbine efficace.

En 2001, un modèle analytique avec des mécanismes thermomécaniques pour prédire les performances d'une CCS a été proposé par Chitsomboon [84] le modèle est différent, de manière significative, des modèles proposés dans la littérature dans lesquels, il considérait les

interactions d'écoulement dans la serre et l'écoulement dans la cheminée à travers la petite différence de pression. La même année, Weinrebe et Schiel [85] ont étudié et comparé une cheminée solaire et une centrale électrique à tirage descendant appelée «tour de l'énergie». Pour les besoins de cette étude, un modèle thermodynamique simple a été développé et les résultats ont montré qu'une cheminée solaire produit plus d'électricité (soit trois à cinq fois) qu'une tour solaire ayant les mêmes dimensions de cheminée.

En 2003, Bernardes et al. [86] ont effectué l'analyse thermique et technique à partir des résultats des solutions informatiques. Ils ont introduit un modèle analytique et numérique complet pour décrire le fonctionnement d'une cheminée solaire et ont examiné l'impact des conditions environnementales et des dimensions structurelles sur la puissance de sortie. Ils ont démontré que la chute de pression dans la turbine, la hauteur de la cheminée, le diamètre et les propriétés optiques du collecteur sont les facteurs les plus importants pour la conception de la centrale solaire.

En 2015, Gitan et al. [87] ont élaboré un modèle mathématique exhaustif pour évaluer l'effet du collecteur solaire de suivi sur la performance de cheminée solaire, ils ont découvert que la cheminée solaire fonctionne sous les conditions climatiques Malaisiennes et que la pente de 10° du collecteur fournit la plus grande puissance produite toute l'année.

Un modèle théorique détaillé a été élaboré par Koonsrisuk et Chitsomboon [88] pour évaluer la performance du système de la cheminée solaire. Ils ont présenté l'intervalle de fonctionnement de la turbine et ont montré que la taille de la centrale, le facteur de chute de pression à la turbine et le flux de chaleur solaire sont les paramètres importants pour l'amélioration des performances. Nizetic et Klarin [89], avec une approche analytique simplifiée, ont indiqué que les facteurs de chute de pression de la turbine se situaient entre 0,8 et 0,9 pour la CCS.

En 1999, la première tentative connue de résoudre par CFD (Computational Fluid Dynamics) le flux convectif dans une cheminée solaire est faite par Bernardes, et al. [90]. Ils ont présenté une solution pour les équations de Navier-Stokes et de l'énergie pour la convection naturelle laminaire en régime stationnaire. L'approche de la méthode des volumes finis en coordonnées généralisées a été employée.

En 2007, Une simulation numérique a été effectuée à l'aide d'un prototype espagnol par Huang et al. [91]. Le modèle de Boussinesq et le modèle de rayonnement ordonné discret (DO) ont été adoptés pour la convection naturelle et le rayonnement, respectivement. Ils ont conclu que l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire augmente la différence de température entre l'entrée et la sortie du collecteur et la pression différentielle de la section de

transition collecteur-cheminée. L'effet d'un angle incliné sur la sortie d'un système de la CCS a été étudié par Sun et al. [92]. Ils ont étudié une simulation numérique symétrique à deux axes bidimensionnels instable pour une hauteur de cheminée de 1km et un rayon collecteur de 2,5 km. Ils ont constaté que la diminution de l'angle incliné augmente le rendement du système et que la vitesse n'augmente pas clairement avec l'augmentation du flux de chaleur dans la paroi.

En 2008, Ming et al. [93] ont montré comment le rayonnement solaire protège la pression statique, la vitesse, la température et l'énergie de l'unité de stockage. Ils ont également montré qu'avec l'augmentation du rayonnement, la température et la vitesse augmentent et la pression diminue.

En 2009, Hammadi [94] a réalisé un modèle mathématique pour une cheminée solaire avec système de stockage de l'eau. Les résultats ont montré que le stockage de l'eau peut être augmenté et que la puissance de sortie maximale peut également être obtenue à partir du milieu de la journée.

En 2011, Hamdan [29] a présenté un modèle d'analyse thermodynamique pour un écoulement d'air stable à l'intérieur d'une cheminée solaire. Dans ce modèle, il a combiné la relation de Bernoulli avec le gaz idéal. Il a également évalué l'effet de paramètres géométriques comme la tête de pression de turbine et la hauteur de cheminée de la CCS. Il a indiqué que ces éléments sont les composants physiques les plus importants dans la conception de la centrale.

En 2012, Sangi [95] a évalué la CCS dans cinq régions d'Iran. Il a présenté un modèle mathématique basé sur l'équilibre énergétique et a constaté qu'Abadan a le plus haut potentiel de production d'énergie par rapport à d'autres parties.

En 2013, Hamdan [96] a présenté un modèle mathématique pour la stabilité de la centrale électrique en utilisant les équations de Bernoulli. Il a constaté que la tête de turbine a plus d'impact sur la production d'énergie. Ils ont également démontré que le rayon du collecteur, la tête de turbine, l'irradiation solaire et la hauteur de la cheminée sont des paramètres importants pour la conception de la CCS.

En 2014, Patel et al. [97] ont étudié les effets de l'ouverture d'entrée, du diamètre de sortie et du diamètre de la cheminée. La meilleure configuration a été obtenue en utilisant la cheminée avec un angle de divergence de 2° et un diamètre de cheminée de 0,25 m ainsi qu'une ouverture de collecteur de 0,05 m et un diamètre de sortie de collecteur de 1m. La température à l'intérieur du collecteur est plus élevée pour l'ouverture inférieure, ce qui entraîne un débit et une puissance plus élevés

En 2015, Guo et al. [98] ont développé un modèle 3D afin d'étudier une CCS avec une turbine réelle. En considérant une géométrie constante, ils ont étudié les effets de la variation de l'insolation solaire et de la vitesse de rotation de la turbine sur la turbine et l'efficacité globale du système, ainsi que la puissance de sortie de la turbine.

En 2016, Gholamalizadeh et al. [99] ont réalisé une étude paramétrique pour illustrer l'effet de la configuration du collecteur sur les performances de la centrale de Manzanares. À cette approche, l'inclinaison du toit est ajustée en augmentant la hauteur du collecteur de sortie, tandis que la hauteur du collecteur d'entrée est fixée à la hauteur du collecteur de la CCS à Manzanares. Les résultats ont montré que les changements dans l'inclinaison du toit du collecteur affectent le modèle de convection à travers le collecteur, ce qui entraîne une augmentation du débit massique du système.

En 2017, Asayesh et al. [100] ont optimisé la cheminée solaire à deux fins en raison de leur faible efficacité, qui comprend le dessalement et la production d'électricité. Pour ce faire, ils ont ajouté un nouveau système au collecteur solaire qui a été appelé système de dessalement solaire. Ils ont écrit un code unidimensionnel pour ce système et ont validé leur code avec le travail expérimental. Ils ont montré qu'il était préférable de recouvrir certaines parties importantes d'un bassin de dessalement plutôt que de recouvrir toutes les surfaces du sol. Hu et al. [101] ont effectué une étude de calcul pour présenter une comparaison entre trois formes de cheminée : cheminée divergente, cheminée conventionnelle avec une sortie divergente et cheminée conventionnelle avec une entrée divergente. Ils ont constaté que la cheminée divergente est meilleure que l'autre cheminée en termes d'amélioration de la puissance. Kasaeian et al. [48] ont mené une étude numérique pour l'optimisation géométrique d'un prototype de cheminée solaire au campus de l'Université de Téhéran. Ils ont montré que la hauteur et le diamètre de la cheminée sont les variables physiques les plus importantes pour la conception de la cheminée solaire.

En 2018, Najm et Shaaban [102] ont présenté un modèle numérique pour les cheminées solaires basé sur un modèle de rayonnement des ordonnées discrètes (DO). Leur simulation montre que le collecteur de cheminée a un rayon optimal qui dépend fortement du fonctionnement de l'irradiation solaire ainsi que de la chute de pression de la turbine. Fathi et al. [103] ont présenté la centrale nucléaire comme un cycle combiné pour la CCS afin d'améliorer l'efficacité. Ils ont indiqué d'utiliser l'excès de chaleur de la centrale nucléaire et de l'utiliser dans le collecteur de la centrale solaire pour augmenter la température de l'air à l'intérieur. Ils ont utilisé le modèle CFD et l'analyse thermique pour estimer la chaleur excédentaire de la centrale nucléaire. Ils ont également mesuré l'énergie cinétique de l'air

pour une turbine de cheminée solaire. Ayadi et al. [104] ont étudié et optimisé les caractéristiques d'une CCS numériquement et expérimentalement. La simulation numérique est effectuée en utilisant le code commercial "Ansys Fluent 17.0". L'installation expérimentale d'une CCS est développée à l'école nationale d'ingénieurs de Sfax, Université de Sfax, Tunisie en Afrique du Nord. Ils ont réalisé l'effet de la hauteur du toit du collecteur sur les performances de la cheminée solaire. Les résultats confirment que la hauteur du toit du collecteur est très influente sur l'optimisation de la CCS. En effet, une augmentation de la puissance générée est enregistrée tout en diminuant la hauteur du toit du collecteur.

Rabehi et al. [105] ont simulé une analyse numérique pour la CCS en tenant compte du modèle de ventilateur. Ils ont également fait le modèle mathématique pour décrire le flux et le transfert de chaleur. Ils ont utilisé le modèle CFD pour la simulation de la cheminée solaire et le modèle de turbulence k- ϵ . Ils ont montré que la température et la pression à l'intérieur du collecteur augmentent. Ils ont également constaté que la chute de pression de la turbine sur l'efficacité du collecteur est faible, mais pour la puissance de sortie, elle est considérable.

Ayadi et al. [106] ont analysé l'effet des paramètres du modèle numérique sur la précision des résultats de calcul, établis par le solveur ANSYS Fluent. Ils ont étudié l'effet du modèle de turbulence sur les caractéristiques du flux d'air dans une CCS solaire et ont fourni que le modèle standard k- ϵ est le meilleur pour prédire les caractéristiques de la CCS. Hassan et al. [107] ont analysé l'influence de l'angle divergent de la cheminée et de la pente du collecteur sur la performance de la CCS en fonction des dimensions du prototype de Manzanares. Ils ont indiqué que l'augmentation de la pente du collecteur évalue la température et la vitesse. Cependant, il réduit la puissance globale du système. En outre, ils ont noté qu'une CCS avec cheminée divergente est conçu pour être un bon accord pour améliorer la puissance de sortie.

Bouabidi et al. [108] ont évalué une série de simulations numériques pour analyser la CCS avec diverses configurations de cheminée. L'étude s'est concentrée sur l'étude des CCS avec: cheminée standard, divergente, convergente et opposée. Les résultats ont révélé que la forme de la cheminée affecte le comportement de la vitesse de l'air. La vitesse maximale émerge avec une configuration divergente. Cependant, les autres configurations ajustent l'emplacement de la vitesse maximale, au centre de la cheminée pour la configuration opposée et au sommet de la cheminée pour la configuration convergente. Cette variation est due à la distribution de la pression statique affectée par le changement de configuration de la cheminée.

En 2019, Li et al. [109] ont proposé un nouveau modèle de collecteur pour combiner la cheminée solaire avec la production agricole. Ils ont fait ce travail expérimentalement et

numériquement. Ils ont constaté que mettre la plaque d'absorbeur de chaleur au milieu du collecteur peut améliorer les performances. Ils ont également divisé le canal de flux d'air en canaux supérieurs et inférieurs pour augmenter la zone de transfert de chaleur et améliorer le transfert de chaleur dans le canal. Ils ont montré que la plaque d'absorbeur de chaleur poreuse avec une caractéristique de porosité spéciale peut fournir de meilleures performances dans le transfert de chaleur par rapport à la plaque d'absorbeur de chaleur complète.

Das et al. [110] ont étudié numériquement les effets de la hauteur de la cheminée et l'angle du collecteur sur la performance des cheminées solaires. Ils ont constaté que l'augmentation de l'angle du collecteur entraîne une augmentation de la vitesse de l'air et une réduction de la température de l'air. Ils ont affirmé qu'une augmentation de la hauteur de la cheminée de 3 à 8 m entraîne une augmentation de 31% de la vitesse de l'air. Al-Kayiem et al. [111] ont évalué expérimentalement et numériquement la performance de la cheminée solaire hybride. Ils ont utilisé ANSYS Fluent pour la simulation de la cheminée solaire hybride. Ils ont utilisé des canaux de gaz de feu pour fournir de l'air dans le passage collecteur. Ils ont montré que l'utilisation d'un système hybride peut améliorer les performances de la cheminée solaire. Ils ont également observé une amélioration de la vitesse et de la température de 6,87 % et de 6,3 % respectivement à l'entrée de la cheminée.

Elwekeel et al. [112] ont comparé plusieurs conceptions de la CCS avec différentes formes de rugosité du toit collecteur. L'effet de la forme de la couverture avec des rainures lisses, triangulaires, carrées et courbes sur la performance de la CCS a été analysé. Ils ont noté que le collecteur avec des rainures triangulaires donne la performance optimale. Jameei et al. [113] ont étudié numériquement l'effet des cheminées sur la performance de la cheminée solaire. En raison de l'importance de la puissance cinétique de l'air chauffé dans la cheminée sur la production d'énergie à partir de la CCS, 15 des murs de la cheminée ont été simulés à partir d'un modèle cylindrique à une forme équivalente. Les résultats ont indiqué qu'en changeant la forme cylindrique du cône coupé par la paroi d'espacement, le flux d'air à l'intérieur de la cheminée augmentait régulièrement et la vitesse maximale de l'air était enregistrée à la base de la cheminée.

Une analyse numérique a également été réalisée par Kebabsa et al. [114]. Ils ont illustré dans leur étude l'effet de la géométrie de l'entrée du collecteur (pente, distance de pente) sur les performances et les modèles d'écoulement dans une tour solaire (Solar Updraft Tower). Leurs conclusions ont montré que la conception proposée est un moyen efficace d'améliorer les performances du (SUT). En outre, un (SUT) avec une pente de collecteur appropriée peut produire 16,36% de puissance par rapport à des collecteurs à pente nulle.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu des travaux menés par des scientifiques et des chercheurs, depuis l'émergence de ce projet. Tout est commencé par des idées différentes, et puis l'application du professeur allemand (Jörg Schlaich). Par la suite ; des programmes d'application ont eu lieu. Nous avons vu aussi quelques exemples utilisés dans les études et les simulations théoriques. Les résultats de la plupart des travaux sont brièvement rapportés pour montrer un concept général de chaque travail.

Le troisième chapitre portera sur: la modélisation de la CCS et la description des grandeurs de la simulation numérique par le logiciel de COMSOL Multiphysics.

CHAPITRE III:
MODELISATION DE LA CENTRALE
A CHEMINEE SOLAIRE

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous intéressons au développement d'un modèle numérique et semi-empirique afin d'étudier les caractéristiques thermodynamiques du flux d'air et d'évaluer les performances du système mise en œuvre pour prédire l'efficacité de la centrale à cheminée solaire.

Pour ce faire, un outil de calcul CFD a été proposé pour analyser le comportement de l'écoulement du fluide et les phénomènes d'échanges thermiques en régime transitoire dans la cheminée solaire en deux dimensions via le logiciel de COMSOL Multiphysics version 4.2.

III.2. Description du fonctionnement d'une cheminée solaire

Dans la cheminée solaire le rayonnement solaire incident va chauffer l'air s'écoulant à l'intérieur du collecteur de la cheminée solaire par convection en provoquant l'élévation de la température de l'air par le phénomène de l'effet de serre sous le toit transparent (couvercle du collecteur) qui agit principalement sur le flux de chaleur absorbée à ne pas quitter la structure du collecteur. Et en raison des différences de température entre la température à la base de la cheminée solaire et la température de l'atmosphère (température ambiante), l'air est aspiré d'une manière continue à travers de la périphérie du collecteur ouverte dans la cheminée en raison de l'effet flottabilité. Une turbine est placée à la base de la cheminée dans laquelle l'air chaud passe pour convertir une partie de l'énergie utile de l'air circulant en électricité.

La figure (III.1) illustre la configuration géométrique du domaine étudiée. Il s'agit d'un collecteur de 244 m de diamètre et 1.85 m de la hauteur, avec une cheminée cylindrique de 194.6 m de hauteur et de 5 m de diamètre.

III.3. Modélisation mathématique

III.3.1 Les hypothèses simplificatrices:

La modélisation mathématique de la cheminée solaire est basée sur certaines hypothèses simplificatrices, qu'on peut les cités ci-dessous:

- L'écoulement d'air dans la cheminée solaire est supposé compressible;
- Le système fonctionne en régime transitoire;
- La modélisation de la centrale de cheminée solaire est bidimensionnelle axisymétrique;
- Les parois de la cheminée solaire sont considérés adiabatiques;

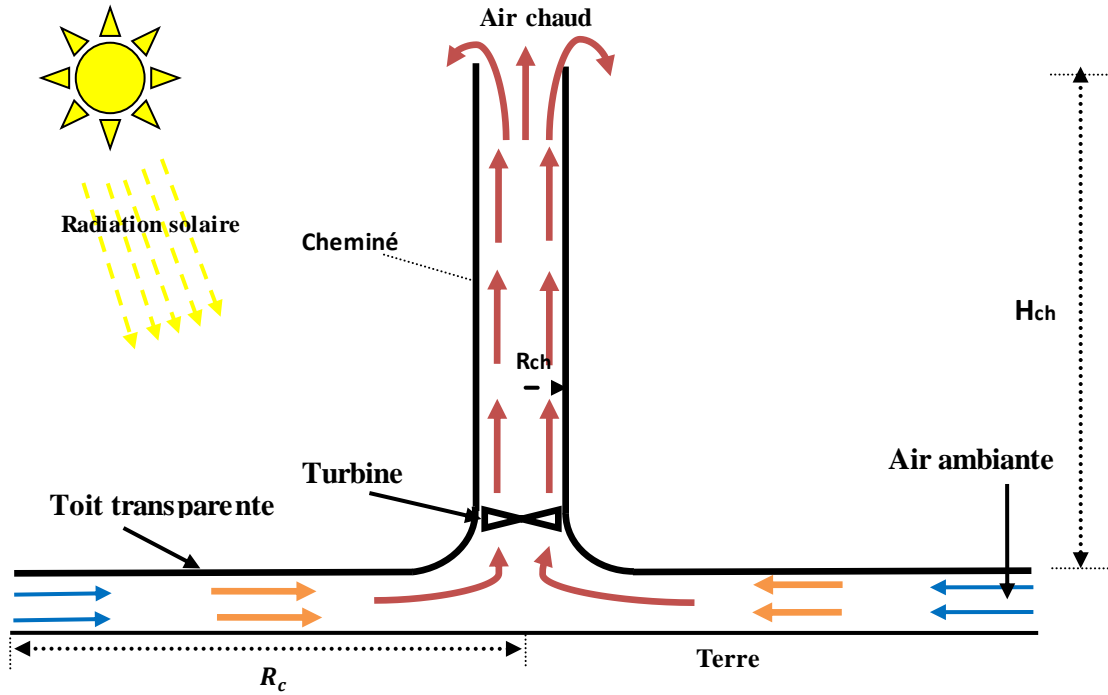


Fig. III.1. Représentation schématique de la centrale solaire à cheminée

- Les effets dus aux fluctuations du vent sont négligés;
- La température du sol à 1m de profondeur de la surface du sol dans le collecteur est constante;

III.3.2. Modèle semi-empirique de la CCS

Basé sur les travaux de Guo et al. [115], l'efficacité totale (η_{SC}) de la centrale de cheminée solaire peut être calculée par la relation suivante:

$$\eta_{SC} = \eta_{ch}\eta_{tg}\eta_{col}f_t \quad (III.1)$$

où, η_{ch} est efficacité de la cheminée, η_{tg} est l'efficacité du générateur de turbine, η_{col} est l'efficacité du collecteur et f_t est le rapport de chute optimal de la pression de la turbine donné par:

$$f_t = \frac{2-m}{3} \quad (III.2)$$

La valeur de m est donné par:

$$m = -18.8354 \times T_a^{-0.6143} \times G^{0.0504} \quad (III.3)$$

où, T_a est la température ambiante, et G est le rayonnement solaire.

La puissance électrique totale (P_{SC}) de la centrale de cheminée solaire est donnée par:

$$P_{SC} = Q_s \cdot \eta_{SC} \quad (III.4)$$

où, Q_s est l'énergie solaire totale reçu par le collecteur, dont l'expression est donnée par la relation:

$$Q_s = G \cdot A_c \quad (\text{III.5})$$

où, A_c est la surface du collecteur.

La performance de la CCS est déterminée par l'efficacité de chacun des éléments suivants :

- Efficacité du collecteur solaire
- Efficacité de la cheminée solaire
- Efficacité de la turbine

III.3.2.1. Efficacité du collecteur solaire

La performance du collecteur solaire est évaluée en tenant compte de l'efficacité du collecteur et de la différence de température entre l'entrée et la sortie du collecteur [109].

L'efficacité du collecteur de la centrale de cheminée solaire est donné par:

$$\eta_{col} = \frac{Q_u}{Q_s} \quad (\text{III.6})$$

où Q_u est la quantité de chaleur transmise à l'air par le collecteur, calculée par l'équation :

$$Q_u = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T = A_c [\alpha \cdot G - \beta \cdot \Delta T] \quad (\text{III.7})$$

où, \dot{m} , ΔT , α et β représentent le débit massique d'air à l'intérieur du collecteur, la différence de température moyenne entre l'air chaud dans le collecteur et l'air ambiant, le coefficient d'absorption effectif du collecteur, avec une valeur typique de [0,75 à 0,8] et le coefficient de transfert de chaleur par convection ajusté respectivement.

Le rapport entre les équations (III.5) et (III.7) nous a permis de définir l'efficacité du collecteur comme suit;

$$\eta_{col} = \alpha - \frac{\beta \Delta T}{G} \quad (\text{III.8})$$

III.3.2.2. Efficacité de la cheminée solaire

L'efficacité de la cheminée solaire est exprimée par la relation:

$$\eta_{ch} = \frac{P_{ch}}{Q_u} \quad (\text{III.9})$$

où, P_{ch} est la puissance contenue dans le flux d'air au bas de la cheminée [116] et elle est définie par l'expression suivante:

$$P_{ch} = \Delta P_{ch} \cdot V_{ch} \cdot A_{ch} \quad (\text{III.10})$$

où ΔP_{ch} est la différence de pression produite entre la cheminée et le sol, qui est donnée par Schlaich [116]:

$$\Delta P_{ch} = g \cdot \rho_{ch} \cdot k \cdot H_{ch} \cdot \frac{(T_0 - T_a)}{T_a} \quad (III.11)$$

La vitesse maximale dans la cheminée est donnée par:

$$V_{ch} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{ch} \cdot \frac{(T_0 - T_a)}{T_a}} \quad (III.12)$$

En introduisant l'équation (III.11) et (III.12) dans l'équation (III.10), nous obtenons:

$$P_{ch} = \sqrt{2} \cdot \rho_{ch} \cdot A_{ch} \cdot g^{3/2} \cdot H_{ch}^{3/2} \cdot \left(\frac{T_0 - T_a}{T_a}\right)^{3/2} \quad (III.13)$$

En substituant l'équation (III.13) et (III.7) dans l'équation (III.9), nous obtenons l'efficacité théorique de la cheminée solaire comme suit :

$$\eta_{ch} = \frac{\sqrt{2} \cdot \rho_{ch} \cdot A_{ch} \cdot g^{3/2} \cdot H_{ch}^{3/2} \cdot \left(\frac{T_0 - T_a}{T_a}\right)^{3/2}}{\alpha \cdot A_c \cdot G - \beta \cdot \Delta T_0 \cdot A_c} \quad (III.14)$$

Selon Shariatzadeh et al. [117], l'équation (III.15) peut être utilisée pour calculer l'efficacité de la cheminée d'une manière plus facile, tel que l'efficacité de la cheminée est proportionnel au rapport entre la hauteur de la cheminée et la température ambiante:

$$\eta_{ch} = \frac{g \cdot H_{ch}}{C_p \cdot T_a} \quad (III.15)$$

III.3.2.3. Efficacité de la turbine

Les turbines verticales à faible vitesse sont toujours utilisé à la base d'une cheminée solaire où la force de l'air chaud convertit au maximum les deux tiers ($t=2/3$) du flux d'air en puissance mécanique (P_t), qui produit finalement la puissance électrique [101,116].

La puissance mécanique maximale produite par la turbine est calculée comme suit:

$$P_t = \frac{2}{3} P_{ch} = \frac{2}{3} \frac{g \cdot H_{ch}}{C_p \cdot T_a} \cdot \eta_{col} \cdot A_c \cdot G \quad (III.16)$$

L'efficacité du générateur (η_g) est définie comme étant le rapport entre la puissance électrique générée et la puissance mécanique:

$$\eta_g = \frac{P_{SC}}{P_t} \quad (III.17)$$

Le rendement de la turbine/générateur est donné par l'équation suivante:

$$\eta_{tg} = \frac{P_{SC}}{P_{ch}} \quad (\text{III.18})$$

Le rendement de la turbine/générateur varie généralement entre 75% et 85%. Une valeur de 80% est utilisée tout au long de cette analyse, la puissance de sortie de la cheminée solaire [35] est calculée en fonction de l'équation suivante:

$$P_{SC} = \frac{g \cdot H_{ch}}{c_p \cdot T_a} \cdot \eta_{col} \cdot A_c \cdot G \cdot \eta_{tg} \cdot f_t \quad (\text{III.19})$$

III.3.3. Model numérique

Dans cette partie, l'écoulement d'air est caractérisé par le nombre adimensionnel de Rayleigh (Ra) pour étudier le phénomène de la convection naturelle à l'intérieur du domaine considéré.

Le nombre de Rayleigh est exprimé comme suit:

$$R_a = \frac{g\beta\Delta TH_c^3\rho}{\mu\alpha} = G_r \cdot P_r \quad (\text{III.20})$$

où, H_c , G_r et P_r représentent la hauteur moyenne du collecteur, nombre de Grashof et le nombre de Prandtl respectivement. Le nombre de Rayleigh du prototype de cheminée solaire CCS espagnol est nettement supérieur à 10^9 , de telle sorte que le flux d'air à l'intérieur du système est considéré comme turbulent.

III.3.3.1. Equations gouvernantes

Les équations qui régissent l'écoulement de l'air et le transfert convectif à travers la cheminée solaire s'expriment comme suit:

Équation de la continuité (conservation de la masse) est donnée par:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (\text{III.21})$$

Équation de quantité de mouvement (conservation de la quantité de mouvement) est donnée par:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla) = \nabla \cdot \left[-PI + (\mu + \mu_T)(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}(\mu + \mu_T)(\nabla \cdot u)I - \rho KI \right] + F \quad (\text{III.22})$$

où, F , u , P et ρ représentent la forces volumiques, la vitesse radiale, la pression et la masse volumique respectivement.

Équation de l'énergie est donnée par:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (K \nabla T) + Q + Q_{vh} + W_p \quad (\text{III.23})$$

où, W_p est le travail de pression

Le taux de dissipation ε et l'énergie cinétique de turbulence k sont obtenus comme suit:

Équation de l'énergie cinétique turbulente est la suivante :

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (\text{III.24})$$

Équation du taux de dissipation turbulent est la suivante :

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{III.25})$$

où, $\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ est la viscosité turbulente et $\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{L_T}$ est la dissipation d'énergie.

Les constantes des équations ci-dessus pour le modèle turbulent sont considérées comme suit:

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44; C_{\varepsilon 2} = 1.92; \sigma_\varepsilon = 1.3; \sigma_K = 1; C_\mu = 0.09$$

P_k est la génération d'énergie cinétique turbulente induite par les gradients de la vitesse moyenne, qui est donné par l'équation suivante:

$$P_k = \mu_T \left[\nabla u : (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u)^2 \right] - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot u \quad (\text{III.26})$$

III.4. Configuration géométrique de la cheminée solaire

Dans le cadre de notre travail, nous avons opté pour le logiciel COMSOL Multiphysics afin de pouvoir simuler numériquement les performances thermiques de la cheminée solaire. La modélisation a pour but d'aller plus loin dans l'effet de la géométrie et les paramètres météorologiques sur les performances du système étudié. Pour cette étude, le système de centrale à cheminée solaire est construit et simulé dans le logiciel COMSOL Multiphysics 4.2 en utilisant les dimensions géométriques du prototype de Manzanares en Espagne (Fig. III.2).

Des simulations numériques sont effectuées pour prédire la performance de la centrale à cheminée solaire en résolvant les équations de Navier-Stokes (RNS) moyennés par Reynolds. Le Tableau (III.1) illustre les principales dimensions du prototype de Manzanares en Espagne utilisées dans ce travail.

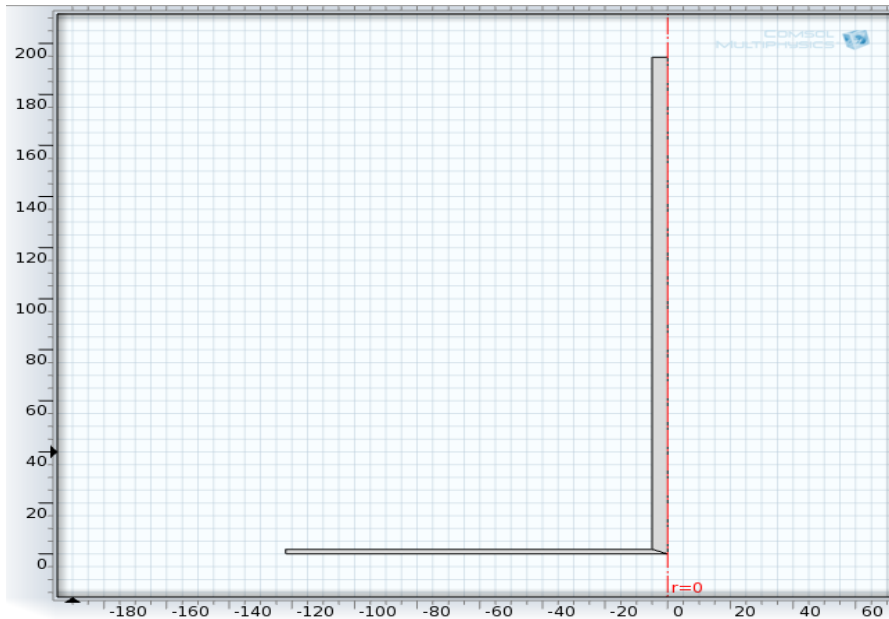


Fig. III.2. La géométrie de la cheminée solaire étudiée.

Table III.1. Dimensions de la CCS prototype de Manzanares en Espagne [35].

paramètre	Valeur [m]
Rayon de collecteur R_c	122
Rayon de la cheminée R_{ch}	5.08
Hauteur du collecteur H_c	1.85
Hauteur de la cheminée H_{ch}	194.6

III.4.1. Les étapes de simulation par COMSOL

Les principales étapes de la simulation numérique sont :

- 1- Choix de la dimension: due à la complexité de la géométrie du modèle nous avons choisi la géométrie 2D axisymétrique;
- 2- Choix des modèles physiques: notre étude thermique est basée sur deux modèles CFD, le transfert de chaleur et l'écoulement de fluide;
- 3- Construction de la géométrie: à partir des outils de dessin intégré dans la bibliothèque de Logiciel COMSOL, on construit notre géométrie de cheminée;
- 4- Choix des matériaux: à la fin de la construction de chaque partie de dessin, on choisit le type de matériaux, et on introduisant les caractéristiques physiques de chaque partie;
- 5- Définitions des conditions aux limites;
- 6- Paramétrage et calcul de maillage: on choisit le type de maillage sous la forme triangulaire fine;

7- Représentation graphique des résultats;

III.4.2. Les conditions aux limites

Les conditions aux limites imposées aux frontières de la centrale solaire à cheminée sont des conditions dynamiques représentées par la pression d'entrée, la pression de sortie imposée à la surface libre, et la condition de paroi.

- La condition à l'entrée du collecteur dont le fluide entre à des conditions atmosphériques (pression atmosphérique en fonction de l'altitude et température ambiante).
- La deuxième condition est appliquée au niveau de la sortie de la cheminée (pression dynamique + pression statique).
- La troisième condition (paroi) est une condition de température imposée et du flux imposé. Elle est appliquée au niveau des parois du système comme suit :
 - Flux nul (paroi adiabatique), pour la surface de la cheminée
 - la température ambiante pour le toit du collecteur.
- La température du sol à 1 m de profondeur de la surface du sol dans le collecteur est constante.

Les conditions limites utilisées sont décrites à partir des données météorologiques liées à l'emplacement de la région de Chlef, où l'irradiation solaire et la température ambiante sont prises pour un jour typique de l'année. Les principales conditions aux limites du domaine de calcul sont résumées dans le Tableau (III.2).

Table III.2. Les Condition aux limites appliquées

Surface	Condition aux limites	Valeur
L'entrée	Pression d'entrée	$P_{entrée} = P_0 * e^{\left(\frac{-M_m * g * z}{R_g * T_{am}(t)}\right)} ; T_{entrée} = T_{am}$
La sortie	Pression de sortie	$P_{sortie} = \left(\frac{1}{2} \rho w^2 + P_0 \left(1 - \left(0.0065 \frac{H_{ch}}{T_{am}(t)}\right)\right)^{5.2585}\right)$
Collecteur	Paroi semi-transparent	$h = 5W/m^2k ; T_{am}$
La paroi de la cheminée	Paroi isolé	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, u = 0, v = 0$
Sol	paroi	$u=0, v=0, T_{sol} = 307 K$

III.4.3. Création du maillage

Toute simulation CFD commence par la réalisation de la géométrie en 2D ou 3D. La génération du maillage en (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu son influence sur la solution. Dans notre cas, le maillage triangulaire composé de 12655 éléments avec une densité d'éléments plus concentrée à l'entrée; dans les zones de sortie et dans les zones de jonction est utilisé. La figure (III.3) montre le maillage utilisé dans cette étude.

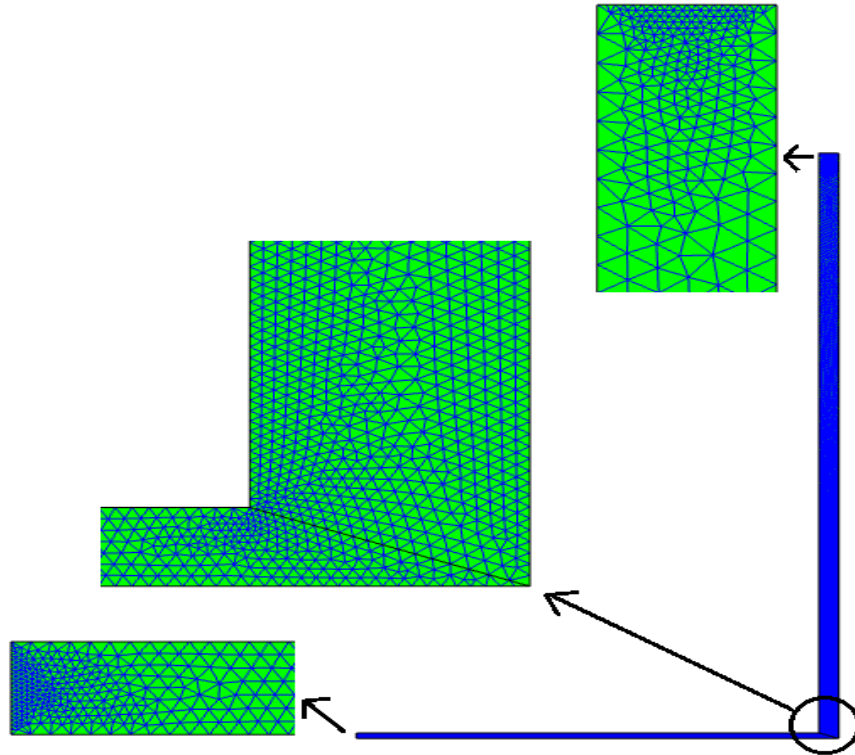


Fig. III.3.Le maillage bidimensionnel 2D de la cheminée solaire CS étudié.

III.4.5. Présentation de la centrale à cheminée solaire sous COMSOL Multiphysics

La figure (III.4) présente la centrale à cheminée solaire CCS avec les étapes de la simulation par COMSOL Multiphysics 4.2 en utilisant les dimensions géométriques de la centrale à cheminée solaire de Manzanares et les données climatiques de Chlef.

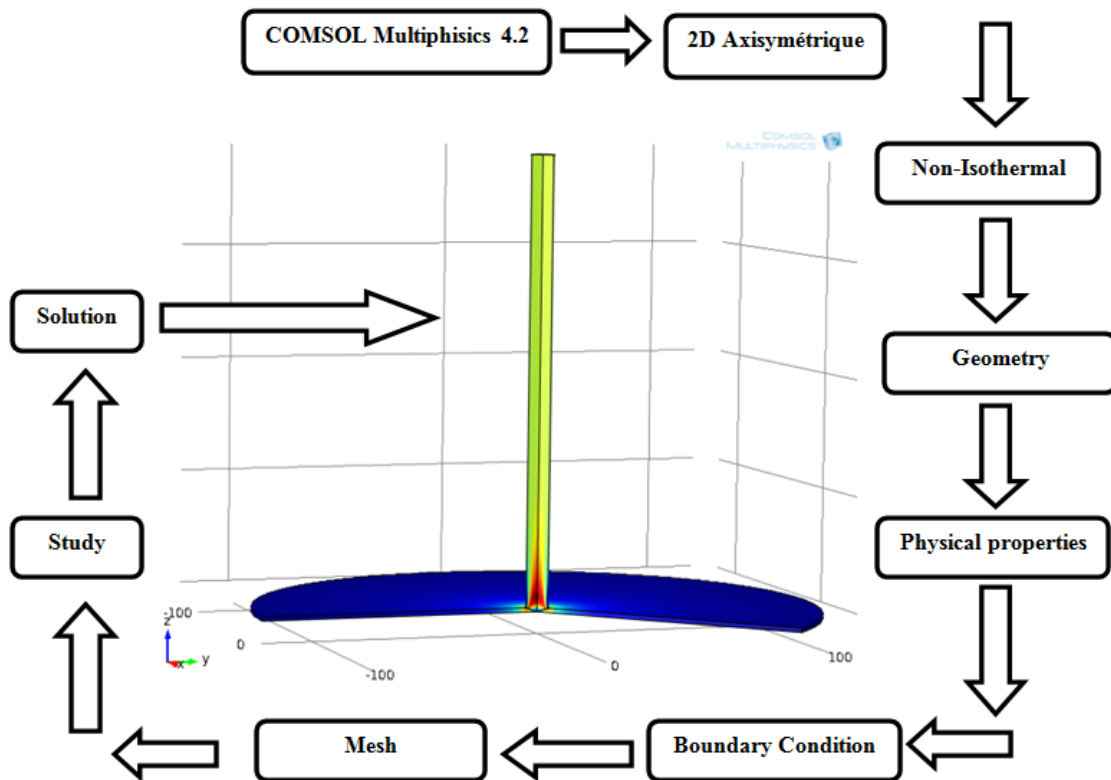


Fig. III.4. Etapes de la simulation du CCS étudiée par COMSOL

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation de la centrale à cheminée solaire dans la région de Chlef en Algérie. Deux modèles ont été développés pour décrire la dynamique de la cheminée solaire à l'aide des approches numériques et semi-empirique. Le logiciel COMSOL Multiphysics a été utilisé dans cette étude pour simuler le système de la cheminée solaire CCS. Le flux d'air est traité comme un flux compressible à travers la cheminée solaire.

Dans le chapitre suivant sera une présentation des principaux résultats de simulation et des interprétations de ce travail.

CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous avons effectué des simulations en prenant la température ambiante et le rayonnement solaire pour la région de la wilaya de Chlef en Algérie, et les dimensions du prototype de Manzanares en Espagne pour examiner le comportement du flux d'air à l'intérieur de la cheminée solaire afin de calculer la puissance électrique à la sortie.

Notre objectif est d'analyser l'effet de la géométrie et les paramètres climatiques sur l'écoulement de l'air dans la centrale à cheminée solaire. Pour cette raison, nous avons présenté les résultats numériques pour l'effet des paramètres climatiques (rayonnement solaire, température ambiante) et géométriques (le diamètre du collecteur, le diamètre de la cheminée, la hauteur et l'angle d'inclinaison du toit du collecteur et la hauteur et l'angle d'inclinaison des parois de la cheminée) sur la distribution de la vitesse et de la température dans la cheminée solaire.

IV.2. Mesure des paramètres environnementaux

Les coordonnées géographiques du site de collecte des données de la région de Chlef sont 36°23' de latitude nord, 23°1' de longitude ouest et 143 m d'altitude au-dessus du niveau de la mer. Les paramètres environnementaux tels que le rayonnement solaire et la température ambiante sont enregistrés par la station météo "Vantage Pro2" (Fig. IV.1) au pôle universitaire de Chlef située dans la ville d'Ouled Fares à partir du premier Janvier 2018.

La figure (IV.2) illustre la variation du rayonnement solaire et de la température de l'air mesurés de la journée de 21 juin 2018. Elle montre que la température de l'air ambiante varie entre 20 °C et 31 °C, bien que le rayonnement solaire augmente du 6:00 au 13:00 puis se diminue du 13:00 au 20:15.



Fig. IV.1. Photo de la station météorologique (Vantage Pro 2).

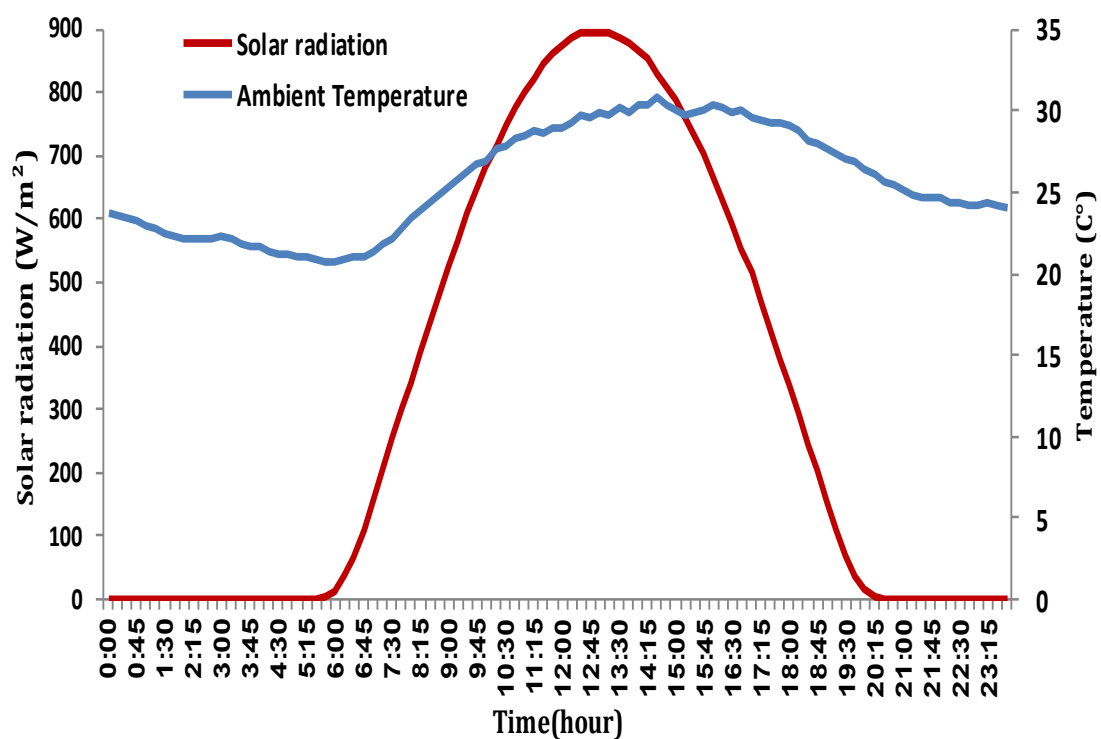


Fig. IV.2. Variation du rayonnement solaire et de la température de l'air ambiante à Chlef pour le 21 juin 2018

IV.3. Validation des modèles numériques et semi-empiriques

Dans cette étude, les résultats du modèle numérique et le modèle semi-empirique sont comparés avec les résultats expérimentaux du prototype de Manzanares afin de les valider. Les résultats de comparaisons sont représentés sur les figures (IV.3), (IV.4) et (IV.5).

La figure (IV.3) présente la variation de la puissance de sortie du modèle CFD, le modèle analytique, le modèle Boussinesq de Guo et al. [115] et les résultats expérimentaux en fonction de l'intensité globale du rayonnement solaire. On observe que les résultats numériques sont très proches aux résultats expérimentaux, tandis que les résultats analytiques sont un peu loin d'eux. Nous pouvons conclure que le modèle proposé est plus précis par rapport au modèle de Boussinesq utilisé dans l'étude de Guo et al. [115].

La figure (IV.4), illustre la variation des données expérimentales, CFD et Guo et al. [18] de la vitesse d'air à l'entrée de la cheminée en fonction du rayonnement solaire. Les résultats numériques sont très proches aux résultats expérimentaux. Ce qui indique que les résultats numériques de notre modèle sont plus précis par rapport de Guo et al. [18-115] en utilisant le modèle de Boussinesq.

D'après ces résultats, il est clair que les deux figures (IV.3) et (IV.4) indiquent un bon accord entre les résultats numériques et expérimentaux.

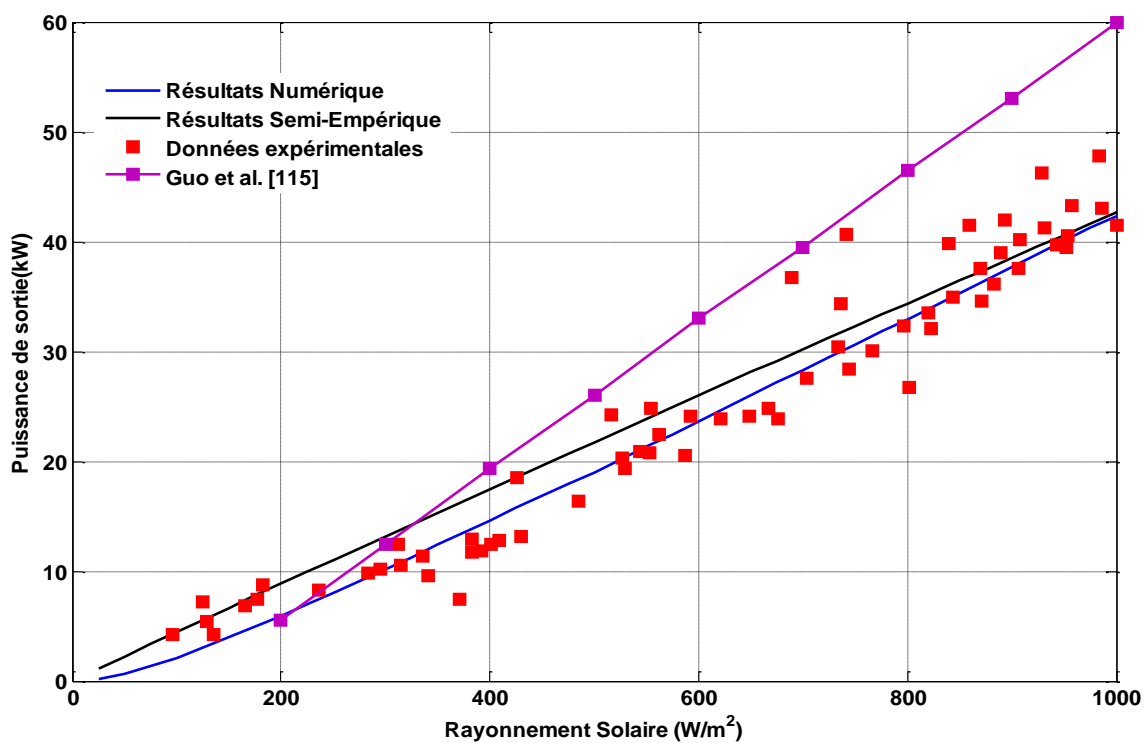


Fig. IV.3. Validation des résultats de la puissance de sortie.

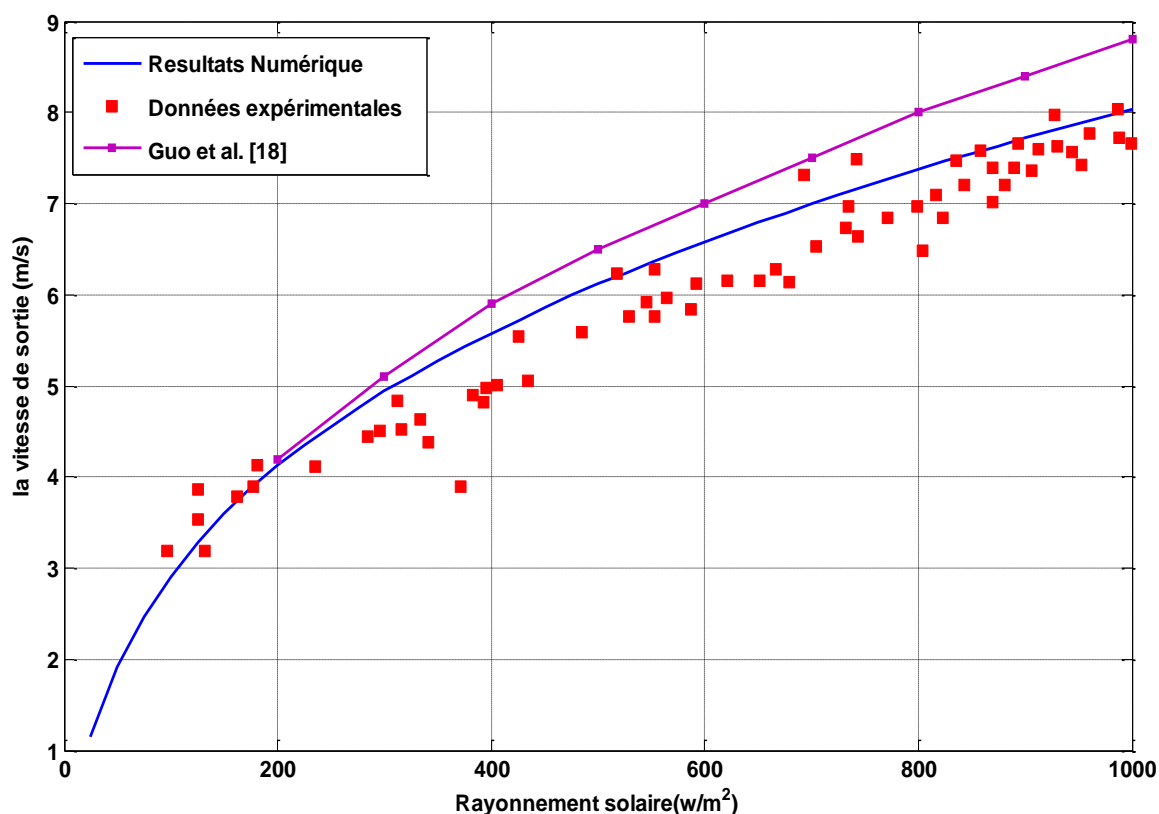


Fig. IV.4. Validation de la vitesse de sortie de la cheminée solaire.

La figure (IV.5) montre une comparaison des données expérimentales et numériques de la température dans le collecteur et la différence de température (ΔT) entre la surface du collecteur et l'air ambiant. Nous observons que les données expérimentales sont très cohérentes avec les résultats du CFD de 7h à 24h.

La comparaison entre ces résultats confirme que la méthode numérique adoptée est une approche appropriée pour les calculs techniques et peut être utilisée pour étudier le rendement des centrales de la cheminée solaire CCS.

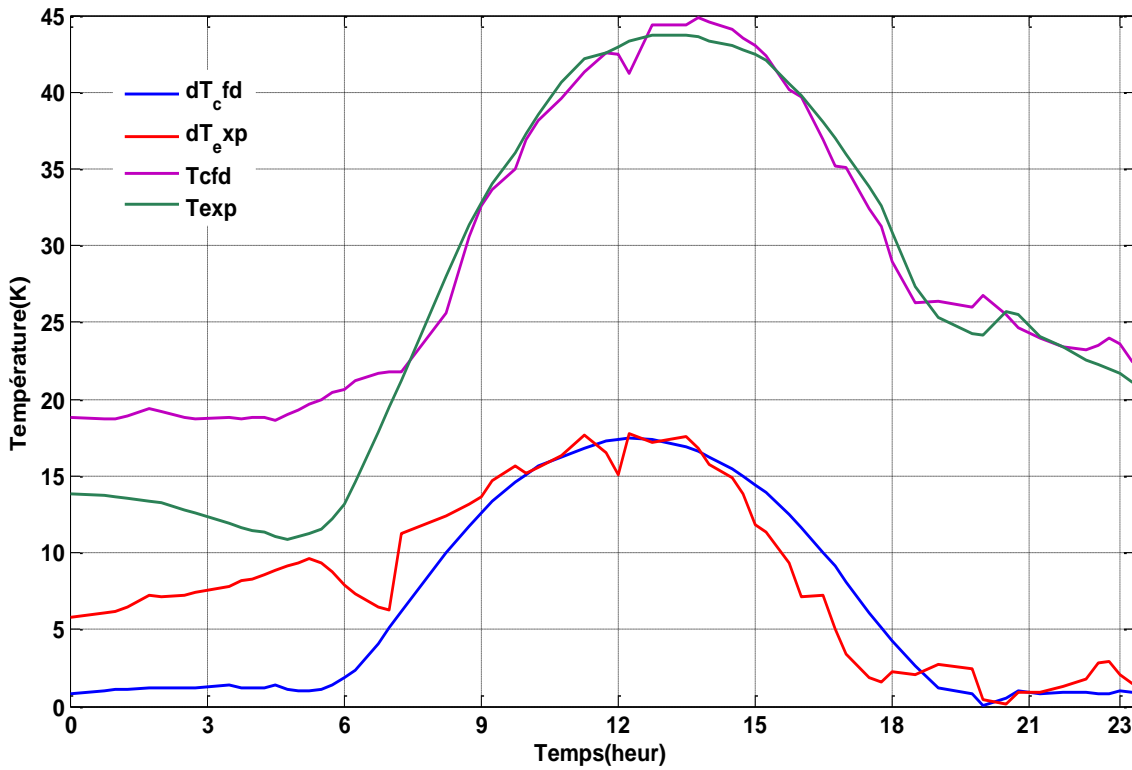


Fig. IV.5. Validation de la température dans le collecteur et de la différence de température (ΔT).

IV.4. Les champs de vitesse, de température et de la puissance électrique de sortie pour le prototype de Manzanares

Dans cette section, Nous allons estimer la vitesse maximale et la distribution de la température dans la cheminée solaire par simulation à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics en utilisant les dimensions du prototype Manzanares ainsi les données climatiques de Chlef. Puis, nous allons calculer la puissance électrique produite par la CCS à la sortie.

La distribution de champ de la vitesse d'air dans le système à cheminée solaire (CCS) est illustrée dans la figure (IV.6). La vitesse maximale se trouve à la base de la cheminée où la turbine est installée, alors qu'elle est très faible dans le collecteur et augmente progressivement jusqu'à une valeur maximale de 13,93 m/s.

La figure (IV.7) indique la distribution de la température de l'air à l'intérieur de la cheminée solaire. Les valeurs minimales de la température se trouvent à l'entrée du collecteur, puis elles s'augmentent graduellement jusqu'à une valeur maximale au centre du collecteur de 317,11 K.

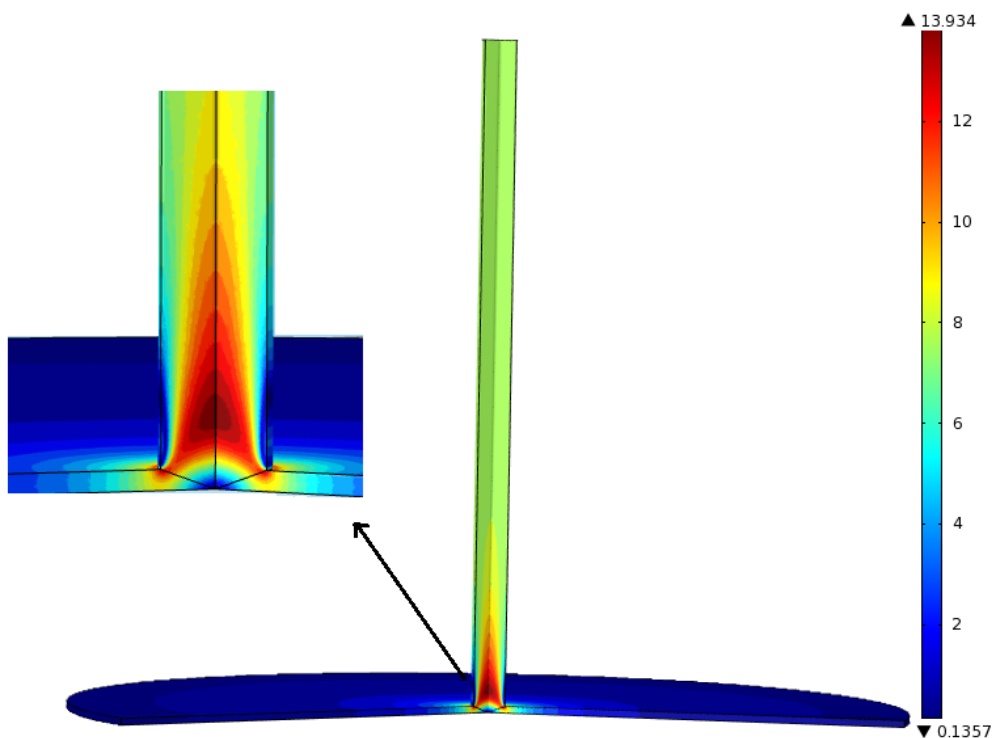


Fig. IV.6. Distribution des champs de vitesse en 3D à 12h00, pour les dimensions géométriques de Manzanares et les données climatiques de Chlef.

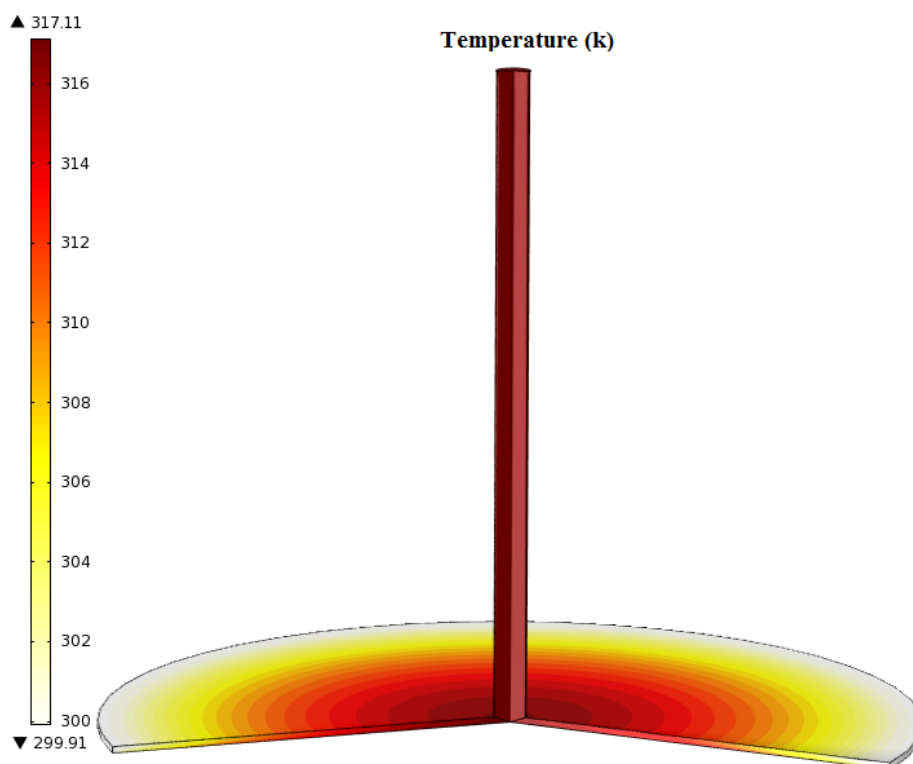


Fig.IV.7. Distribution des champs de Température en 3D à 13h00, pour les dimensions géométriques de Manzanares et les données climatiques de Chlef

La puissance de sortie pour les dimensions géométriques de Manzanares et les données climatiques de Chlef est représentée dans la figure (IV.8). On constate que l'énergie électrique produite par la cheminée solaire à Chlef est très importante en 21 juin 2018 (187 kW à 13h30). En outre, nous observons que la puissance de sortie suit la même tendance du rayonnement solaire.

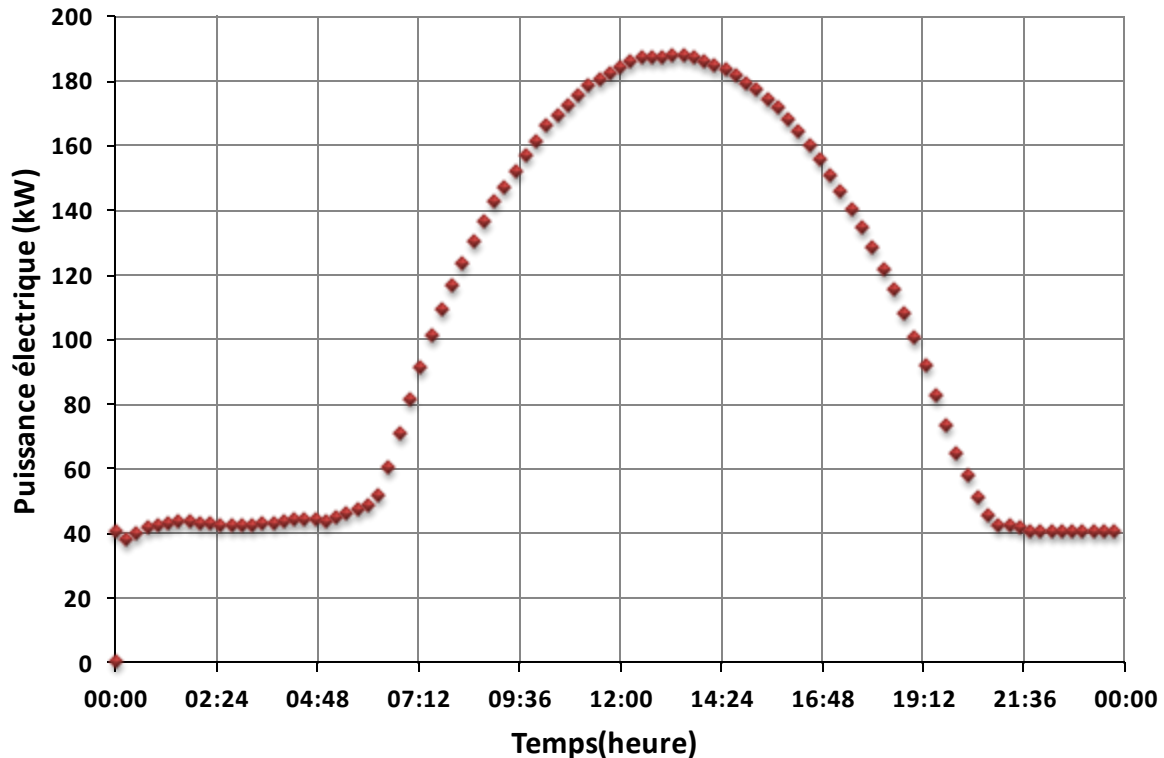


Fig. IV.8. Variation de la puissance de sortie pour les dimensions géométriques de Manzanares et les données climatiques de Chlef.

IV.5. Effet des facteurs climatiques sur la différence de la température (ΔT) et la vitesse de l'air

La variation de la température d'air provoque une disparité de densité, ce qui contribue à l'écoulement d'air. Dans cette partie, nous avons étudié l'effet des facteurs climatiques sur la différence de la température (ΔT) et la vitesse de l'air.

Selon l'heure de la journée du 21 juin 2018, la variation horaire de la vitesse de l'air et la différence de la température (ΔT) avec l'intensité du rayonnement solaire sont présentés dans la figure (IV.9). On note que les deux parcelles suivent la même tendance du rayonnement solaire. En outre, comme le rayonnement solaire augmente à 893 W/m^2 à la fois la vitesse et la différence de température (ΔT) atteignent une valeur maximale de $13,94 \text{ m/s}$ et $17,45 \text{ }^\circ\text{C}$.

respectivement à 13h00. Sur la base de ces observations, il est clair que la vitesse et la différence de la température sont étroitement liées au rayonnement solaire.

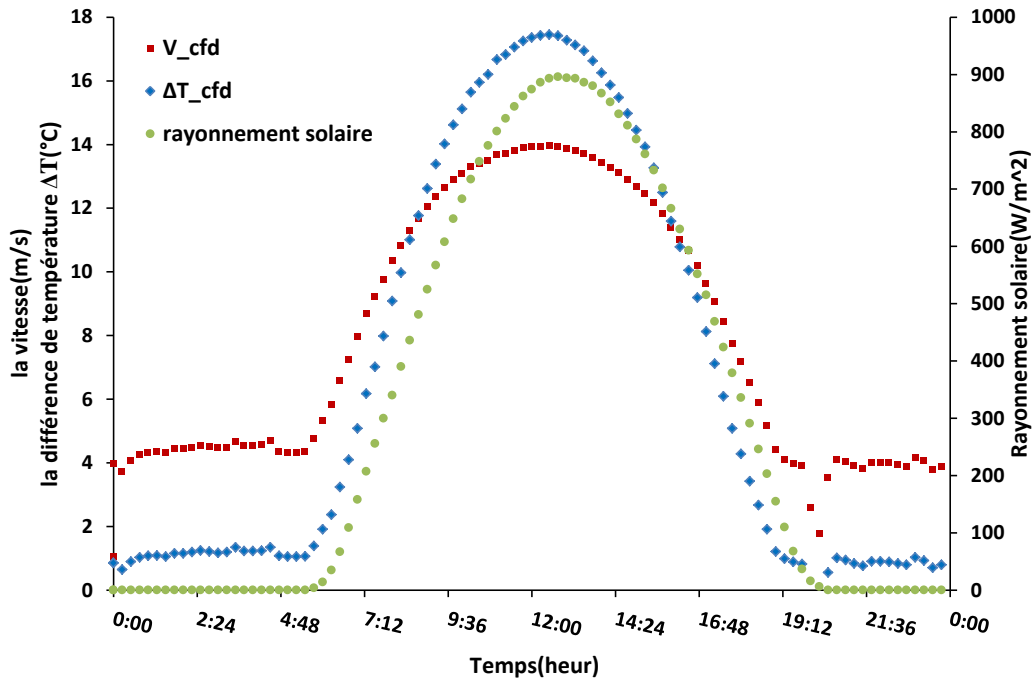


Fig. IV.9. La variation horaire de la différence de température (ΔT) et de la vitesse de l'air avec le rayonnement solaire

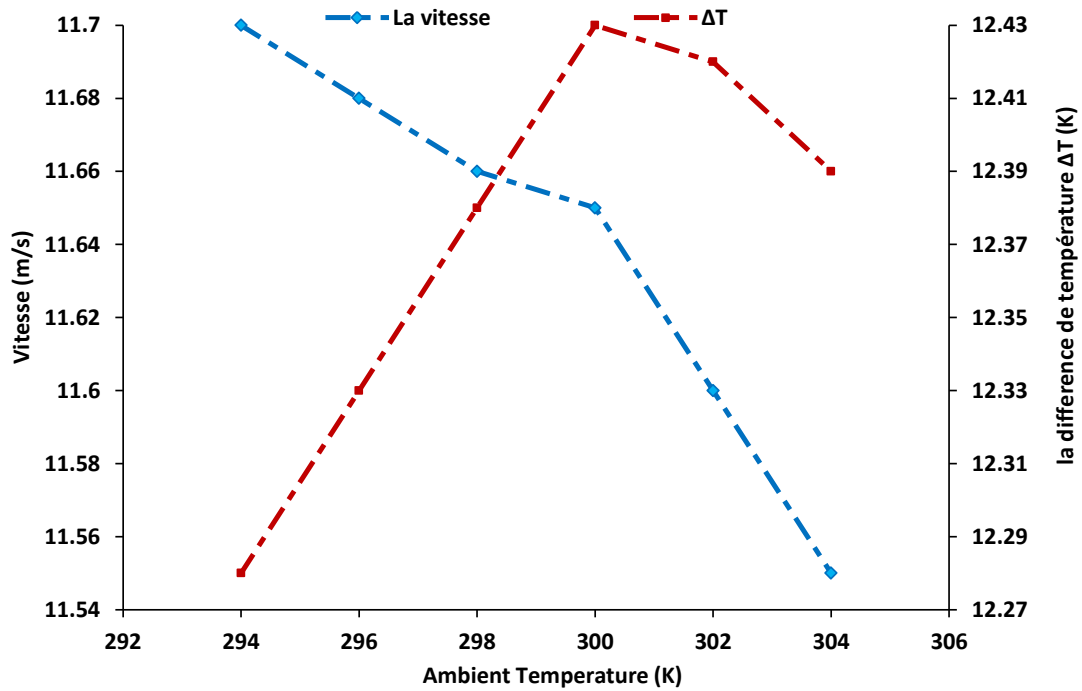


Fig. IV.10. Effets de la température ambiante sur la différence de température (ΔT) et la vitesse d'air.

La figure (IV.10) montre les effets de la température ambiante sur la vitesse de l'air et la différence de la température (ΔT) dans la cheminée. La variation de la température ambiante a un effet apparent sur la vitesse alors qu'elle n'a pas un effet très important sur la différence de la température (ΔT). La vitesse de l'air diminue avec l'augmentation de la température ambiante, tandis que la différence de la température (ΔT) augmente légèrement avec l'augmentation de la température ambiante et puis elle diminue légèrement après le point correspond à la température 300K.

IV.6. L'effet des paramètres géométriques sur la distribution de la vitesse et de la température

Le modèle numérique est utilisé pour effectuer une simulation paramétrique sur l'effet des dimensions du collecteur et la cheminée sur les quantités de sortie principales, à savoir la vitesse de sortie et la température de l'air.

IV.6.1. Influence du rayon du collecteur sur la vitesse et la température

Dans cette partie, nous avons étudié l'effet du rayon du collecteur sur les variables d'écoulement (vitesse et température). Les variables suivantes ont été maintenues constantes ($G=893 \text{ W/m}^2$; $T_a = 304 \text{ K}$; $H_{ch} = 194.6 \text{ m}$; $R_{ch}=5 \text{ m}$; $H_{col}=1.85 \text{ m}$).

La distribution de la vitesse dans le système à cheminée solaire pour divers cas de rayon de collecteur est représentée sur la figure (IV.11). On remarque que la vitesse augmente de 10,66 m/s à 21,65 m/s avec une augmentation du rayon du collecteur de 100 m à 250 m.

La figure (IV.12) montre la distribution de la température dans le système à cheminée solaire pour différents cas du rayon du collecteur. On constate que la valeur de température augmente de $T = 313,79 \text{ K}$ à $T = 346,52 \text{ K}$ en augmentant le rayon du collecteur de 100 m à 250 m.

Les profils de la vitesse et de la température de l'air pour différents cas du rayon du collecteur sont représentés sur la figure (IV.13). On constate que le rayon du collecteur a un effet apparent sur la distribution de la vitesse et de la température dans la cheminée solaire. Par conséquent, une augmentation de la surface collectrice conduit à une augmentation de l'absorption de l'énergie solaire. Ainsi, l'espace pour le collecteur doit être aussi vaste que possible tout en respectant l'espace et en tenant compte des coûts de construction. Donc nous pouvons conclure que le rayon de collecteur approprié présentant les performances les plus élevées dans cette étude est de 250 m.

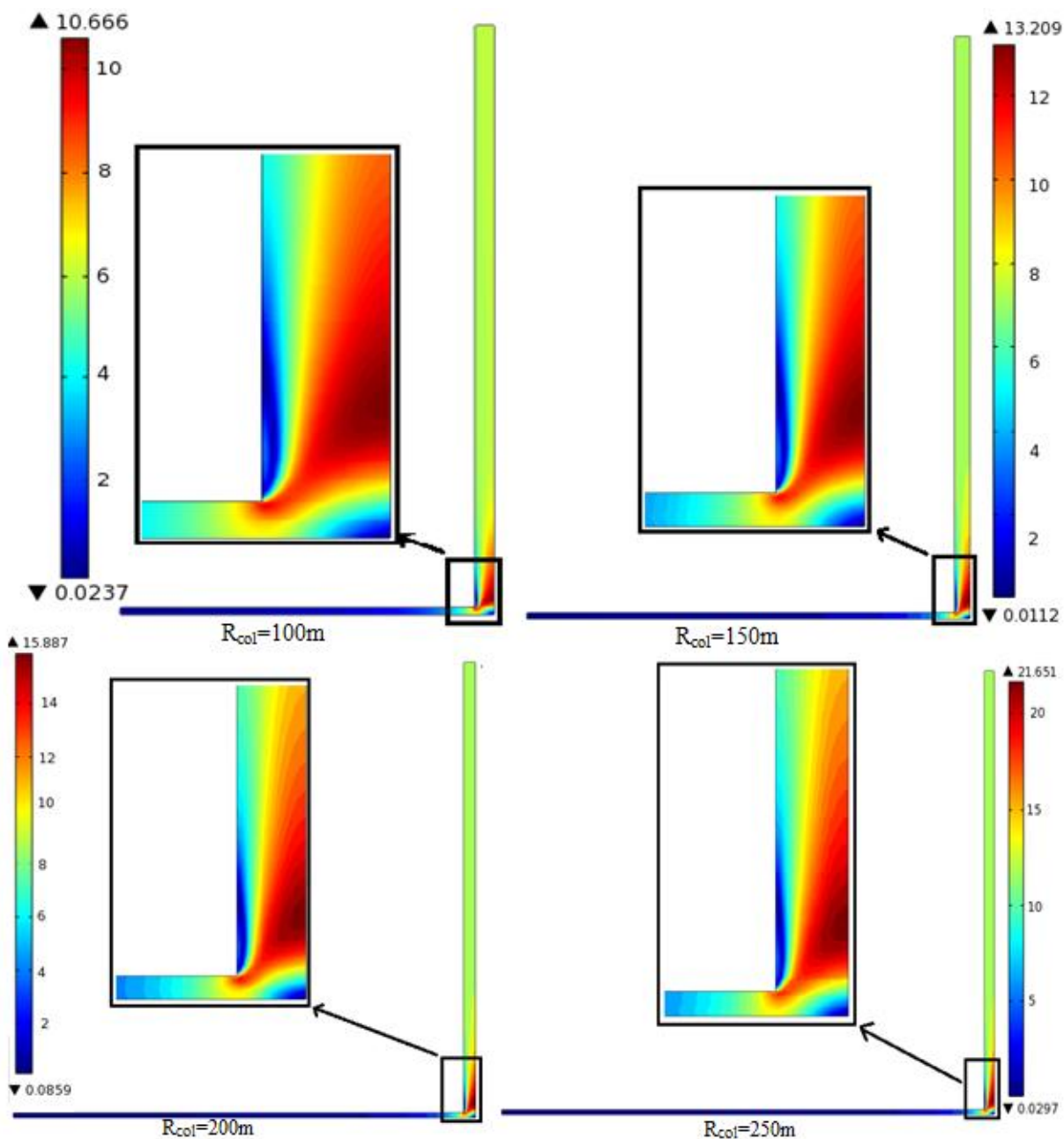


Fig. IV.11. Distribution de la vitesse pour différents rayons de collecteur.

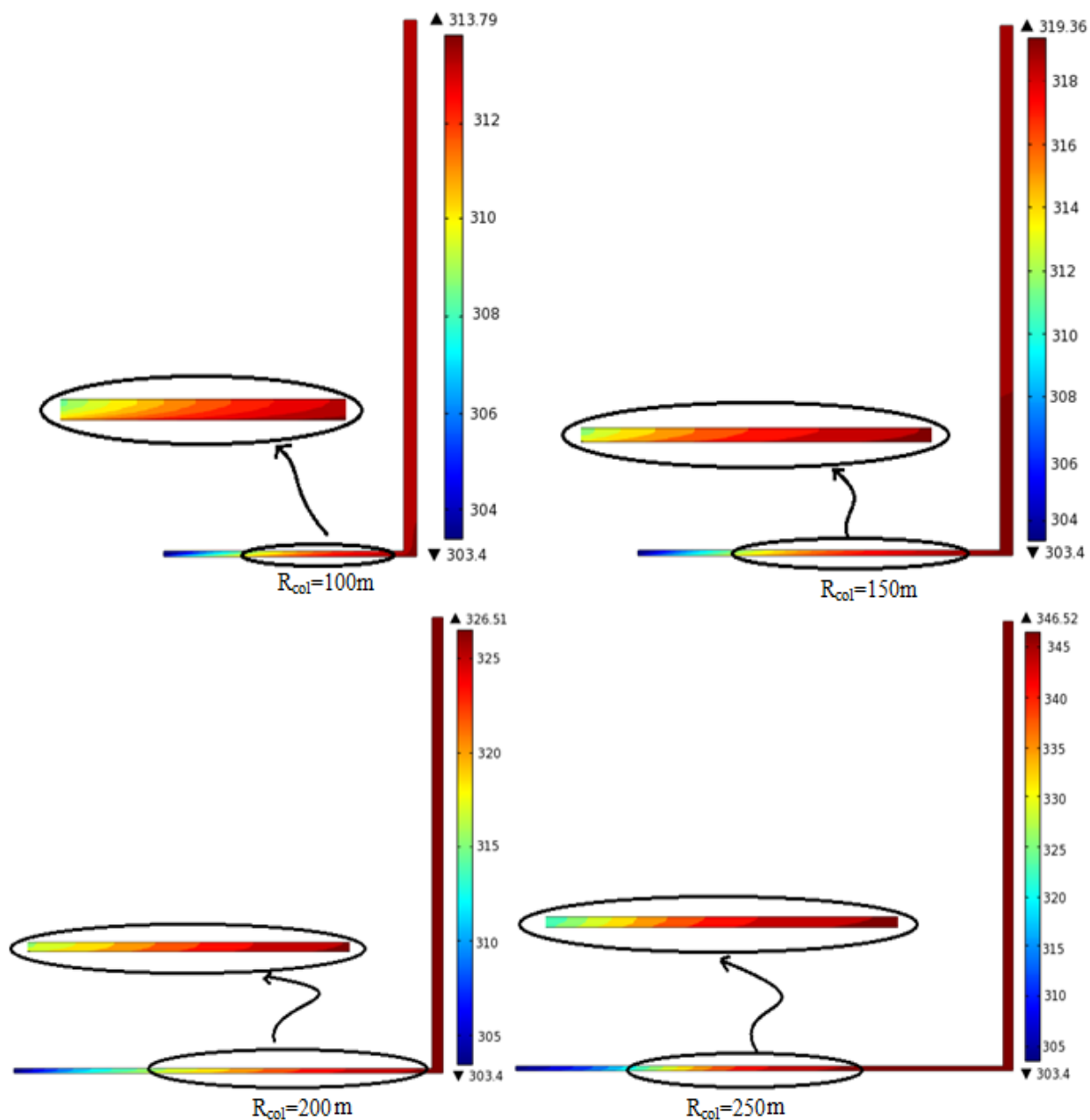


Fig. IV.12. Distribution de la température pour différents rayons de collecteur.

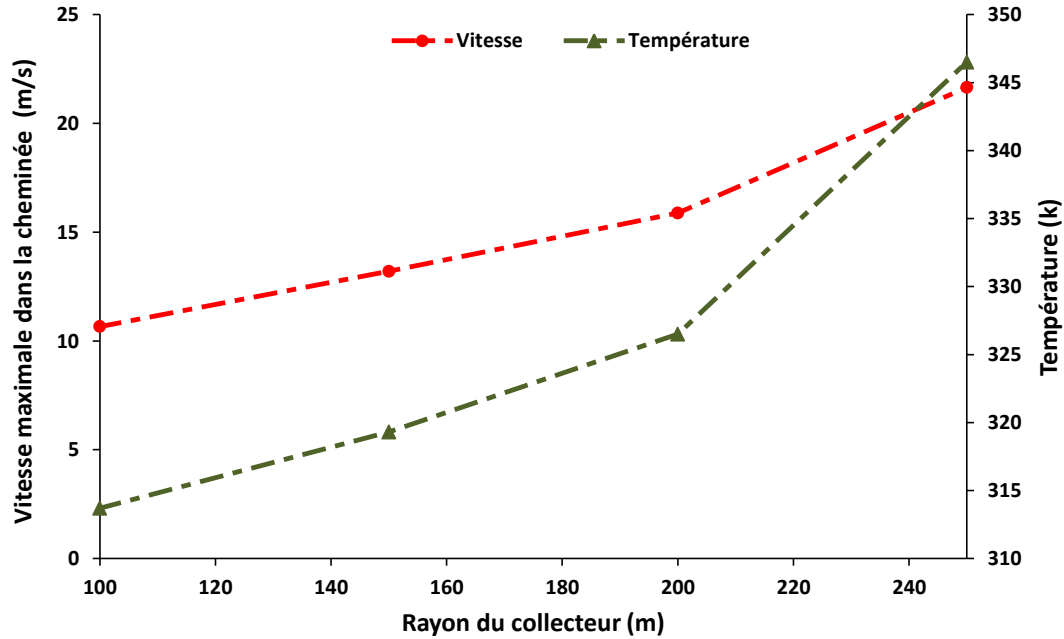


Fig. IV.13. Variation de la vitesse et de la température pour différents rayons du collecteur

IV.6.2. Influence de la hauteur de la cheminée sur la vitesse et la température

Nous avons étudié l'effet de la hauteur de la cheminée sur les variables d'écoulement (vitesse et température). Les variables suivantes ont été maintenues constantes ($G=893 \text{ W/m}^2$; $T_a = 304 \text{ K}$; $R_{col}=122 \text{ m}$; $R_{ch}=5 \text{ m}$; $H_{col}=1.85 \text{ m}$).

La distribution de la vitesse de l'air pour différentes hauteurs de la cheminée de 200 m à 500 m est représentée sur la figure (IV.14). Le champ de la vitesse du fluide est très faible à l'entrée du collecteur, puis augmente progressivement entre l'entrée et la sortie du collecteur; elle atteint alors sa valeur maximale dans la base de la cheminée pour différentes hauteurs de la cheminée. On constate que la vitesse de l'air augmente avec l'augmentation de la hauteur de la cheminée.

La figure (IV.15) montre la distribution de la température dans le système à la cheminée solaire pour les différents cas de la hauteur de la cheminée. Les valeurs minimales de la température sont situées à l'entrée du collecteur puis elles s'augmentent progressivement à une valeur maximale dans le centre du collecteur pour les différents cas. Ainsi, les valeurs maximales de la température à l'intérieur du collecteur se diminuent légèrement avec l'augmentation de la hauteur de la cheminée.

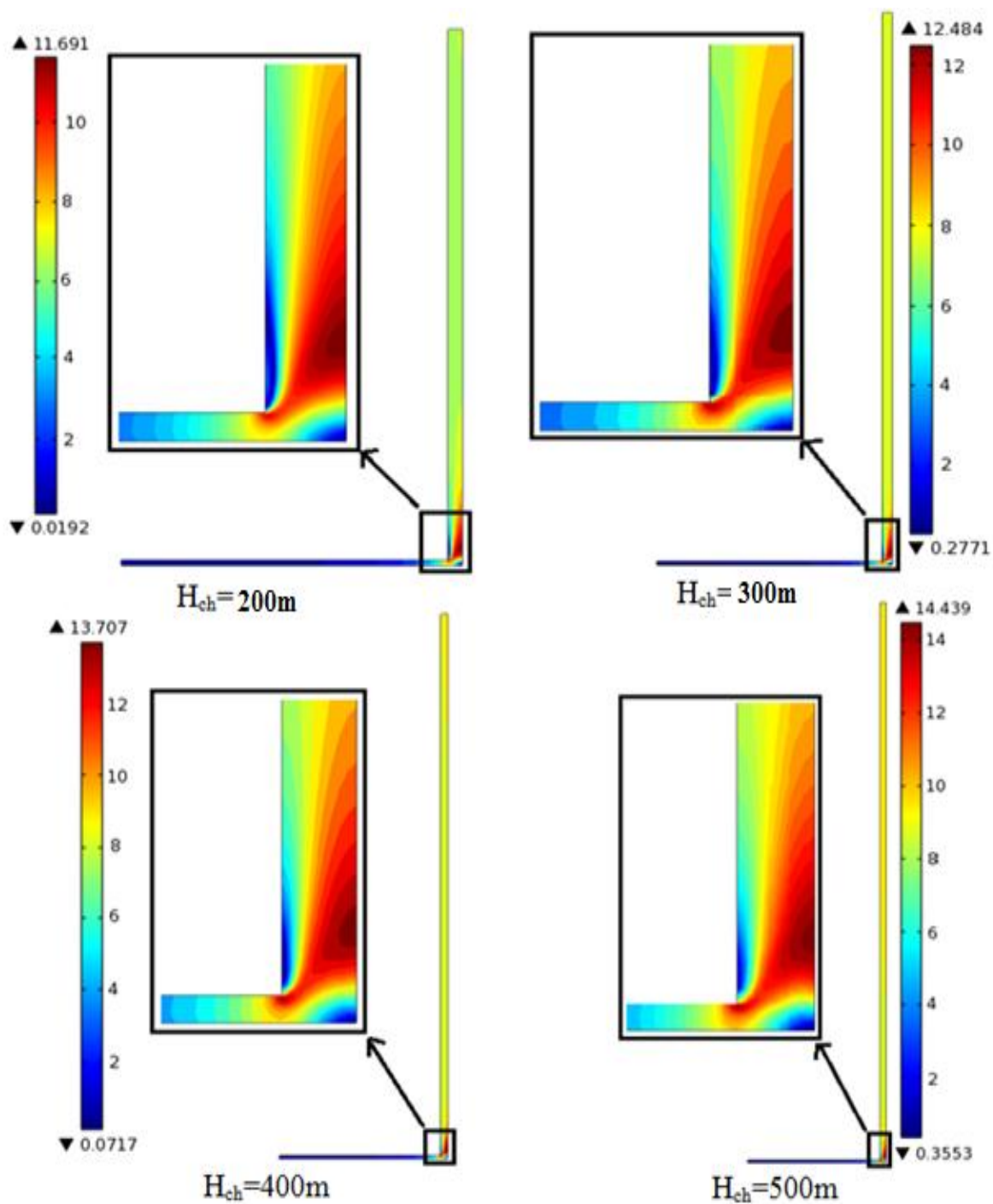


Fig. IV.14. Distribution de la vitesse pour différentes hauteurs de la cheminée.

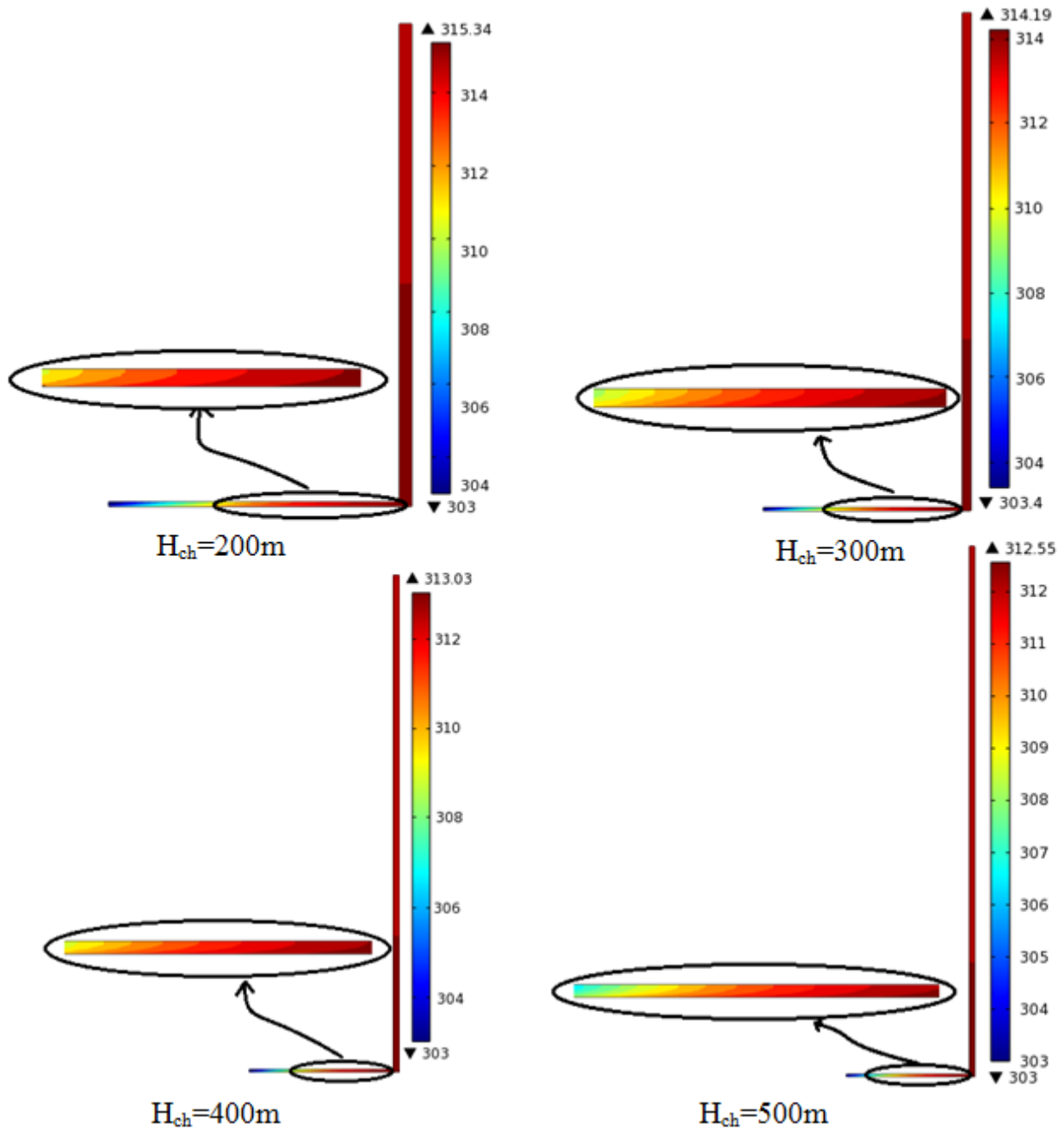


Fig. IV.15. Distribution de la température pour différentes hauteurs de la cheminée.

Les profils de la température et la vitesse de l'air pour différentes hauteurs de la cheminée sont représentés sur la figure (IV.16). On constate que la hauteur de la cheminée a un grand effet sur la vitesse, alors qu'elle a un effet opposé sur la température. Par conséquent, la hauteur de la cheminée devrait être aussi élevée que possible tout en respectant les contraintes structurelles et les coûts. Dans cette étude, nous pouvons conclure que la hauteur de cheminée appropriée avec la performance la plus élevée est de 500 m.

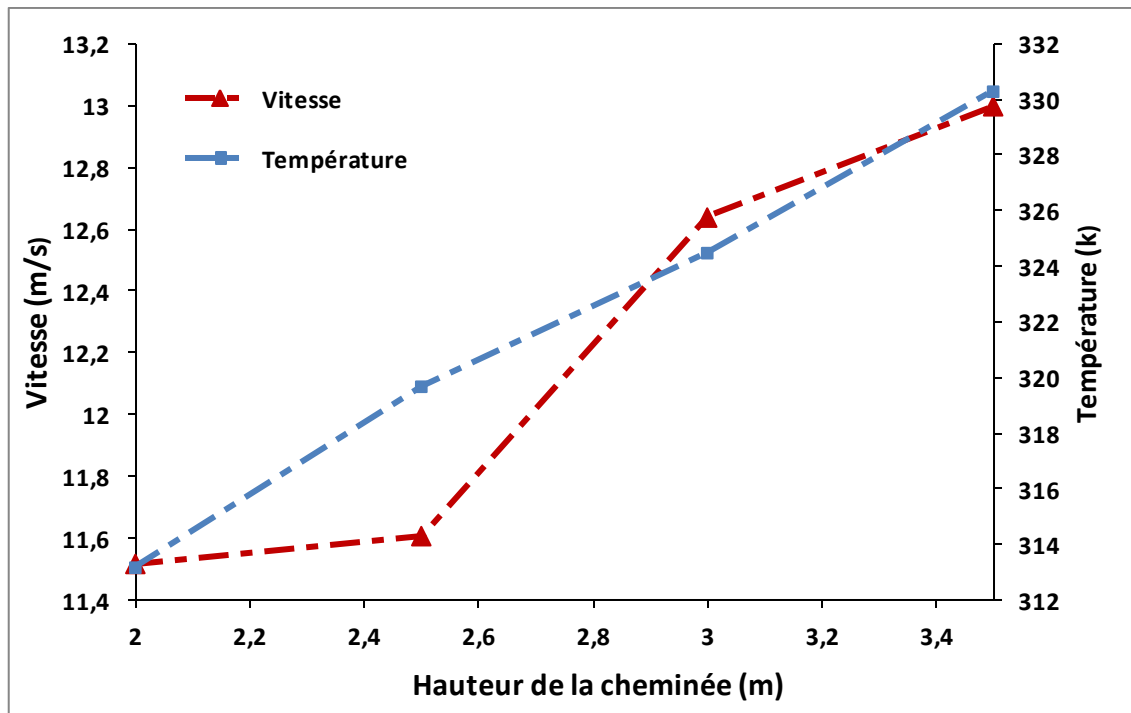


Fig. IV.16. Variation de la vitesse et de la température pour différentes hauteurs de la cheminée

IV.6.3. Influence de la hauteur du collecteur sur la vitesse et la température

Nous avons étudié l'effet de la hauteur du collecteur sur les variables d'écoulement (vitesse et température). Les variables suivantes ont été maintenues constantes ($G=893 \text{ W/m}^2$; $T_a = 304 \text{ K}$; $R_{col}=122 \text{ m}$; $R_{ch}=5 \text{ m}$; $H_{ch}=194.6 \text{ m}$).

La distribution de la vitesse dans le système de la cheminée solaire pour différents cas de la hauteur du collecteur est représentée sur la figure (IV.17). On trouve que la vitesse maximale pour le premier et le deuxième cas est de $11,52 \text{ m/s}$ et de $11,61 \text{ m/s}$ respectivement, et pour le troisième et le quatrième cas, les vitesses sont de $12,64 \text{ m/s}$ et $13,01 \text{ m/s}$ respectivement. La valeur de la température du fluide augmente légèrement avec l'augmentation de hauteur du collecteur.

La figure (IV.18) illustre la distribution de la température dans le système de cheminée solaire pour les différents cas de la hauteur du collecteur. On constate que la valeur de température augmente en augmentant la hauteur du collecteur.

Les profils de température et de vitesse pour différentes hauteurs du collecteur sont représentés sur la figure (IV.19). On constate que la hauteur du collecteur a un effet négligeable sur la vitesse alors qu'elle a un impact substantiel sur la température. Dans cette étude, nous pouvons conclure que la hauteur optimale et appropriée du collecteur est de 3 m .

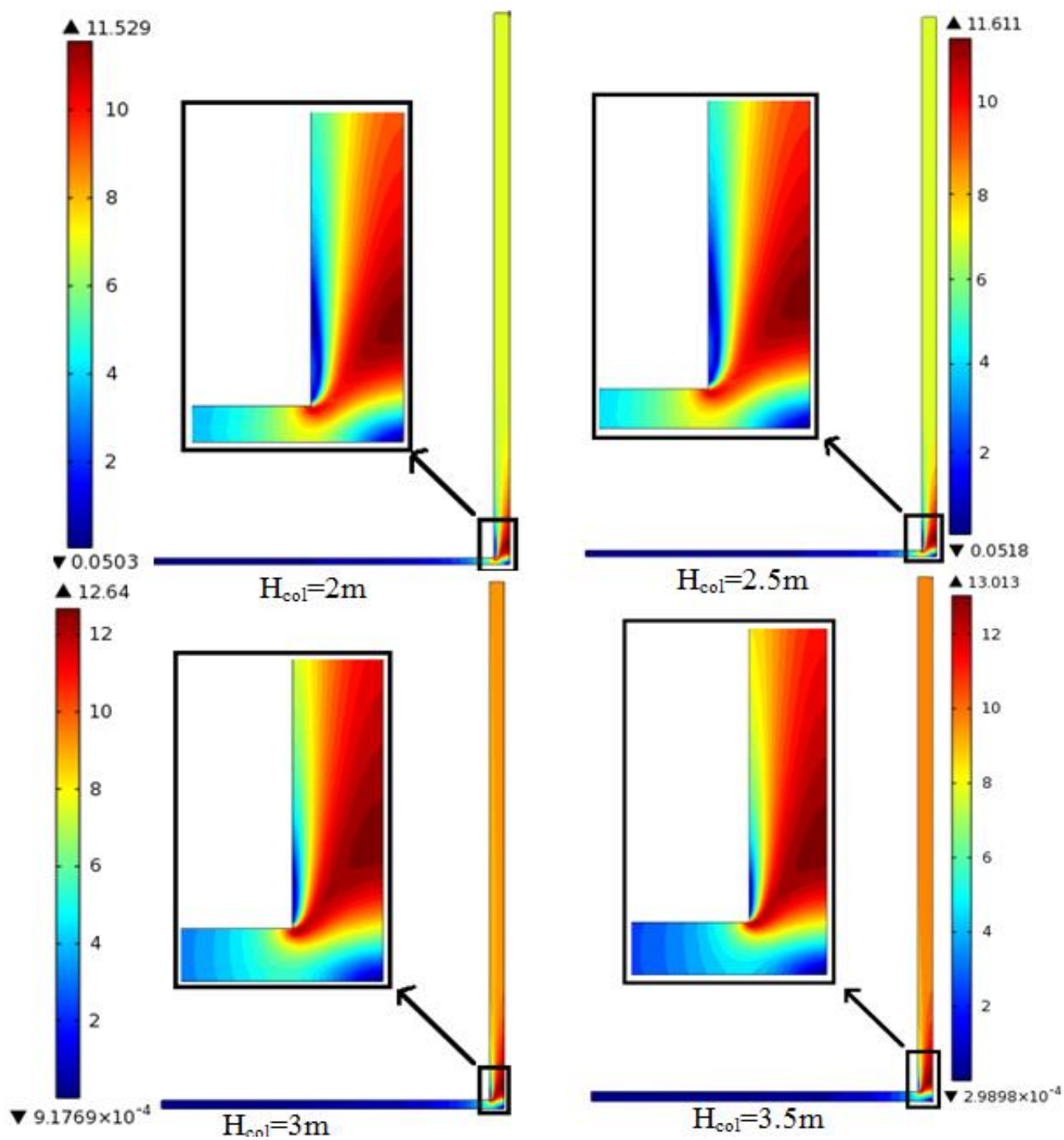


Fig. IV.17. Distribution de la vitesse pour différentes hauteurs de collecteur.

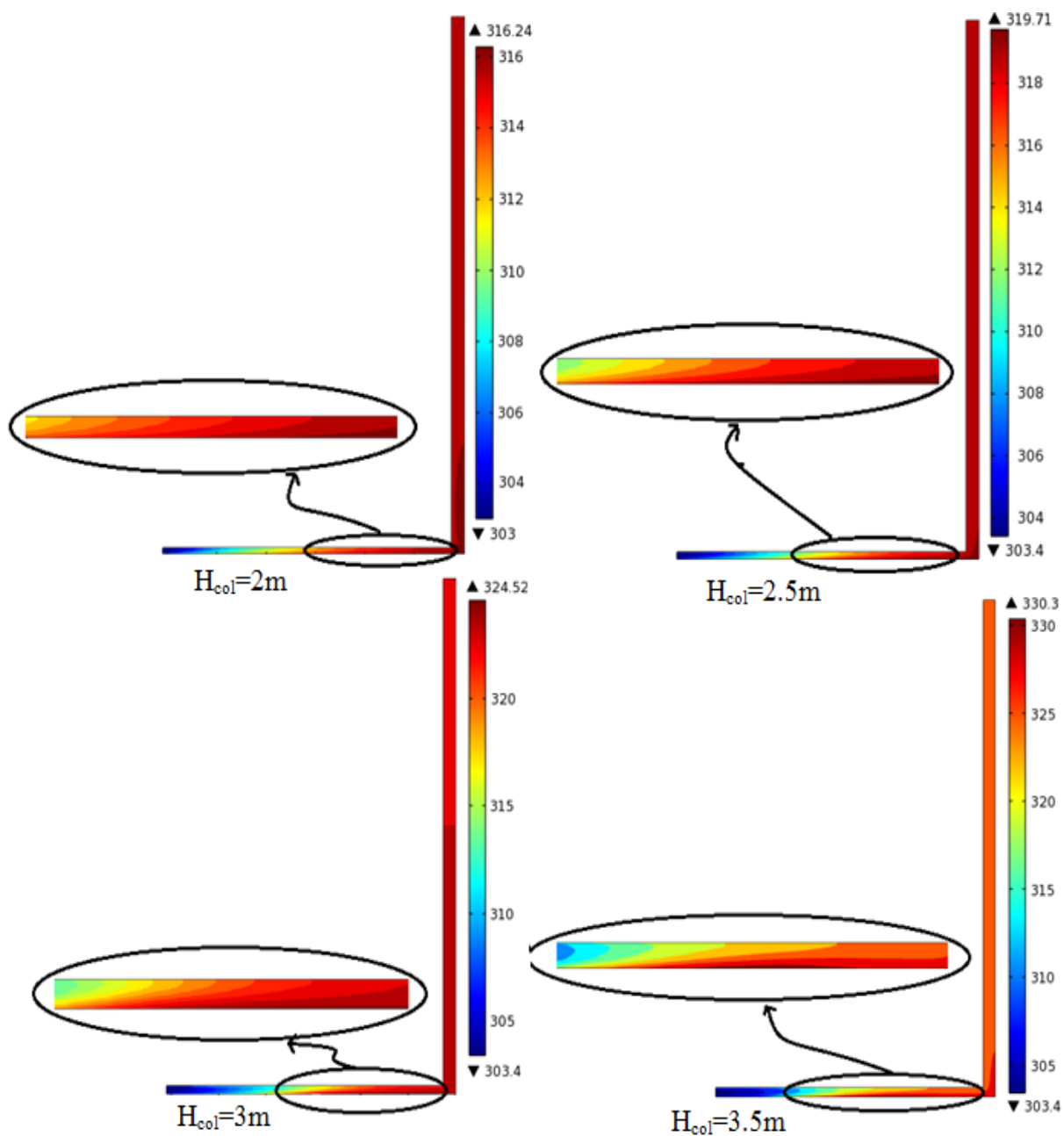


Fig. IV.18. Distribution de la température pour différentes hauteurs de collecteur.

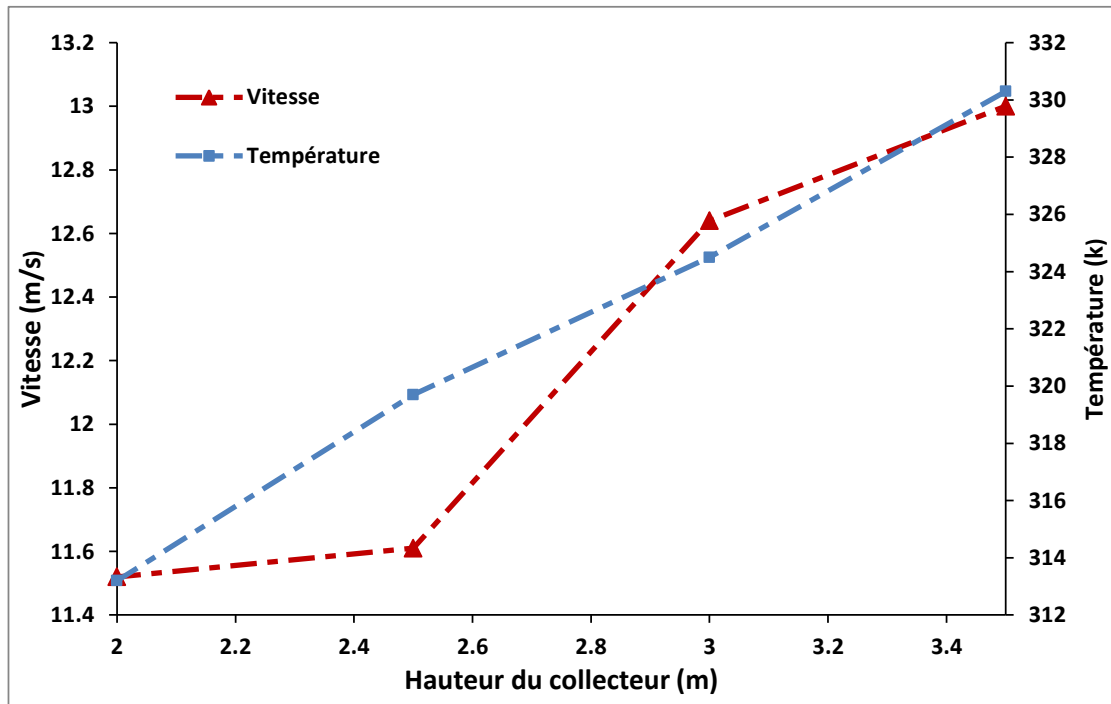


Fig. IV.19. Profils de vitesse et de la température pour différentes hauteurs du collecteur.

IV.6.4. Influence du rayon de la cheminée sur la vitesse et la température

Nous avons étudié l'effet du rayon de la cheminée sur les variables d'écoulement (vitesse et température). Les variables suivantes ont été maintenues constantes ($G=893 \text{ W/m}^2$; $T_a = 304 \text{ K}$; $R_{col}=122 \text{ m}$; $H_{coll}=1.85 \text{ m}$; $H_{ch}=194.6 \text{ m}$).

La distribution de la vitesse dans le système à cheminée solaire pour différents cas de rayon de la cheminée est représentée sur la figure (IV.20). On trouve que la vitesse de l'air diminue légèrement en augmentant le rayon de la cheminée.

La figure (IV.21) montre la distribution de la température dans le système à cheminée solaire pour les différents cas de rayon de cheminée. Nous observons que l'augmentation du rayon de la cheminée a produit une légère diminution de la valeur de température.

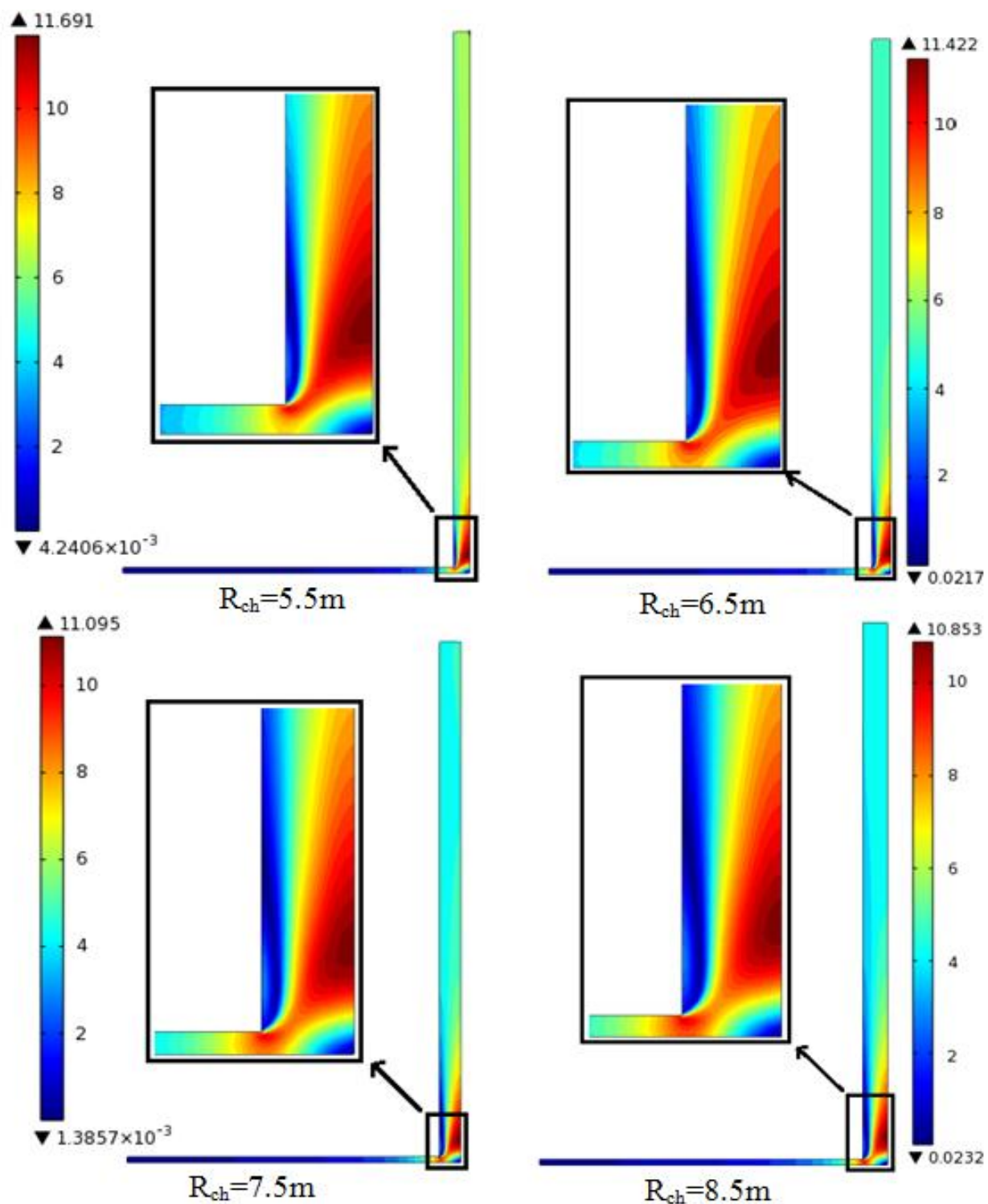


Fig. IV.20. Distribution de la vitesse pour différents rayons de cheminée.

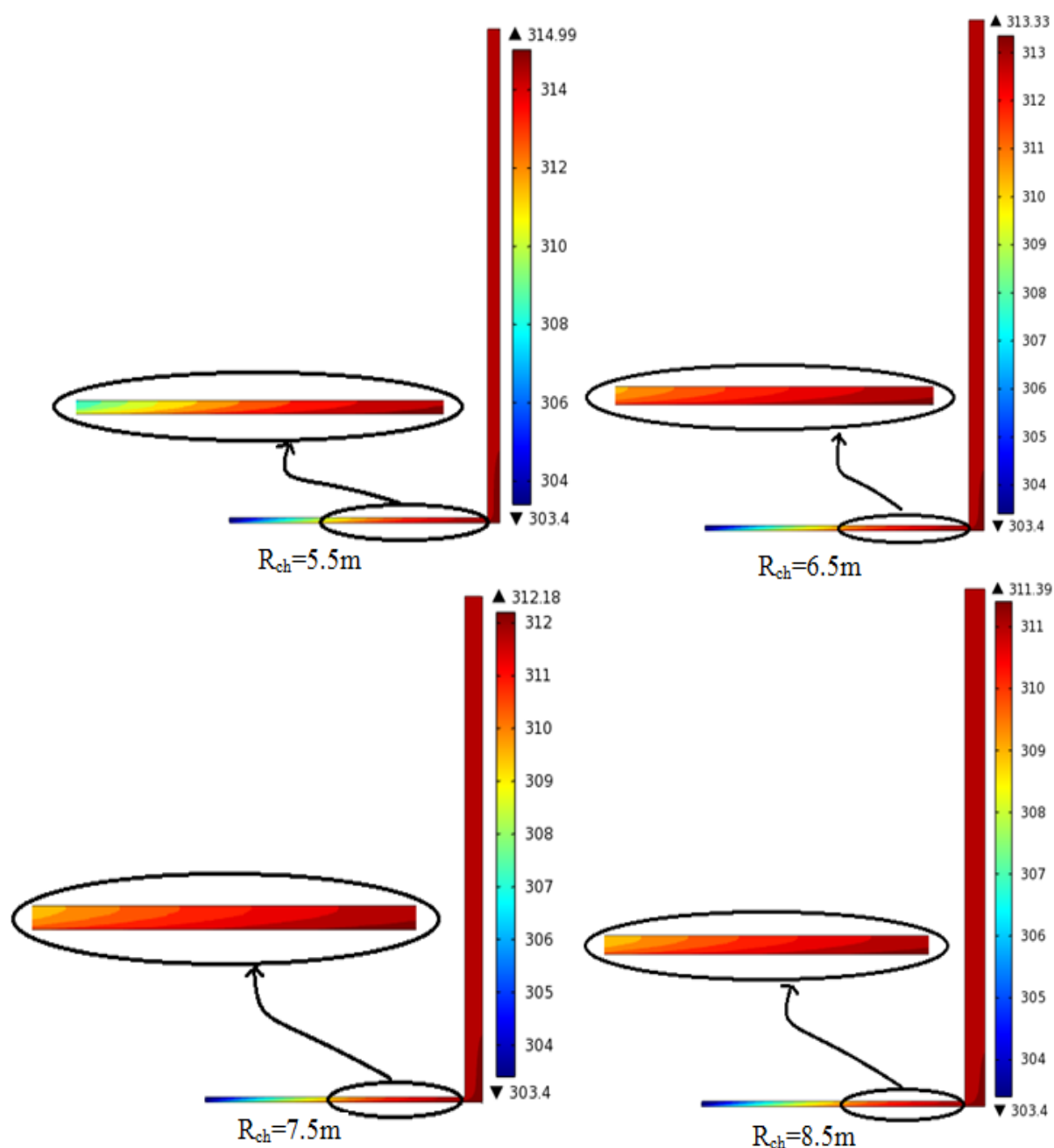


Fig. IV.21. Distribution de la température pour différents rayons de la cheminée.

Les profils de la vitesse et de la température de l'air pour différents rayons de la cheminée sont représentés sur la figure (IV.22). On trouve que le rayon de la cheminée a un effet négligeable sur la vitesse et sur la température au-delà d'un certain point. A travers les profils, nous pouvons conclure que le rayon de la cheminée approprié avec la plus haute performance est de 5,5m.

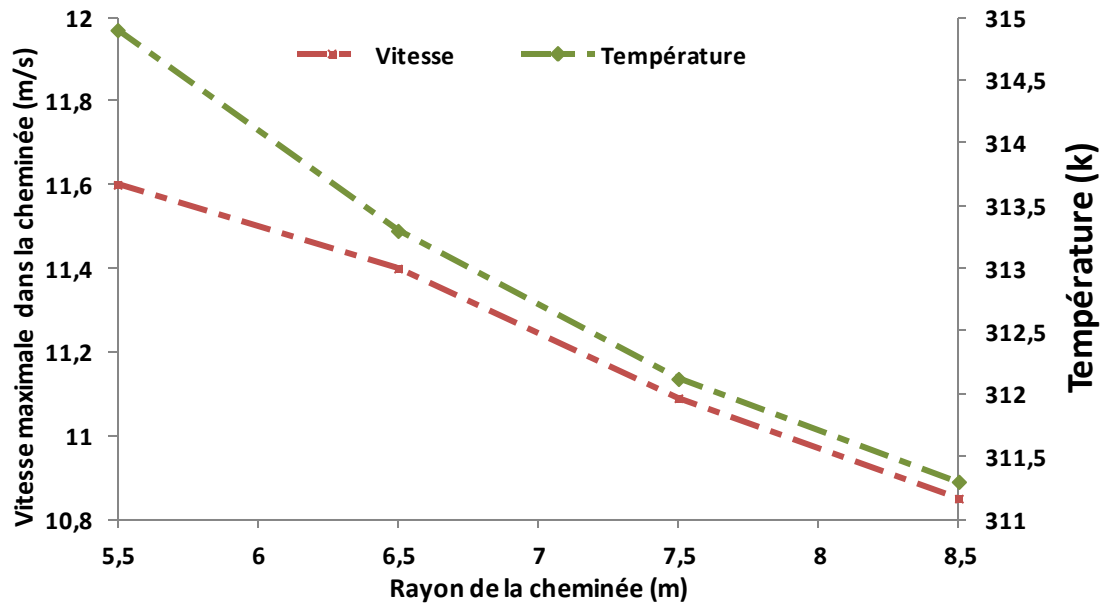


Fig. IV.22. Variation de la vitesse et température pour différents rayons de la cheminée.

IV.6.5. Influence de l'angle d'inclinaison du collecteur sur la vitesse et la température

Dans cette partie, nous avons étudié l'effet de l'angle du toit du collecteur sur les variables d'écoulement (vitesse et température). Les variables suivantes ont été maintenues constantes ($G=893 \text{ W/m}^2$; $T_a = 304 \text{ K}$; $H_{ch} = 194.6 \text{ m}$; $R_{col}=122 \text{ m}$; $R_{ch}=5 \text{ m}$; $H_{col}=1.85 \text{ m}$).

La distribution de la vitesse dans le système à cheminée solaire en 3D pour différents angles d'inclinaison du toit du collecteur est représentée sur la figure (IV.23). Les valeurs de la vitesse à la base de la cheminée augmentent avec l'augmentation de l'angle du toit du collecteur et diminuent après un certain point lorsque l'angle du toit égal 15° .

La figure (IV.24) montre la distribution de la température de l'air en 3D pour différents angles d'inclinaison du collecteur de 5° à 20° . La température augmente progressivement le long de la direction radiale du collecteur jusqu'à atteindre sa valeur maximale à l'entrée de la cheminée, puis diminue faiblement le long de la cheminée jusqu'à la sortie. La température maximale est située près du sol dans le collecteur.

Nous observons que: pour des angles du toit de 5° , 10° et 15° la température maximale sont 330 K , 340 K et 339.9 K respectivement, et pour un angle de 20° la température est 237 K . Alors, on peut dire que la température augmente avec l'augmentation de l'angle du toit et diminue après un certain point lorsque l'angle du toit égal 15° .

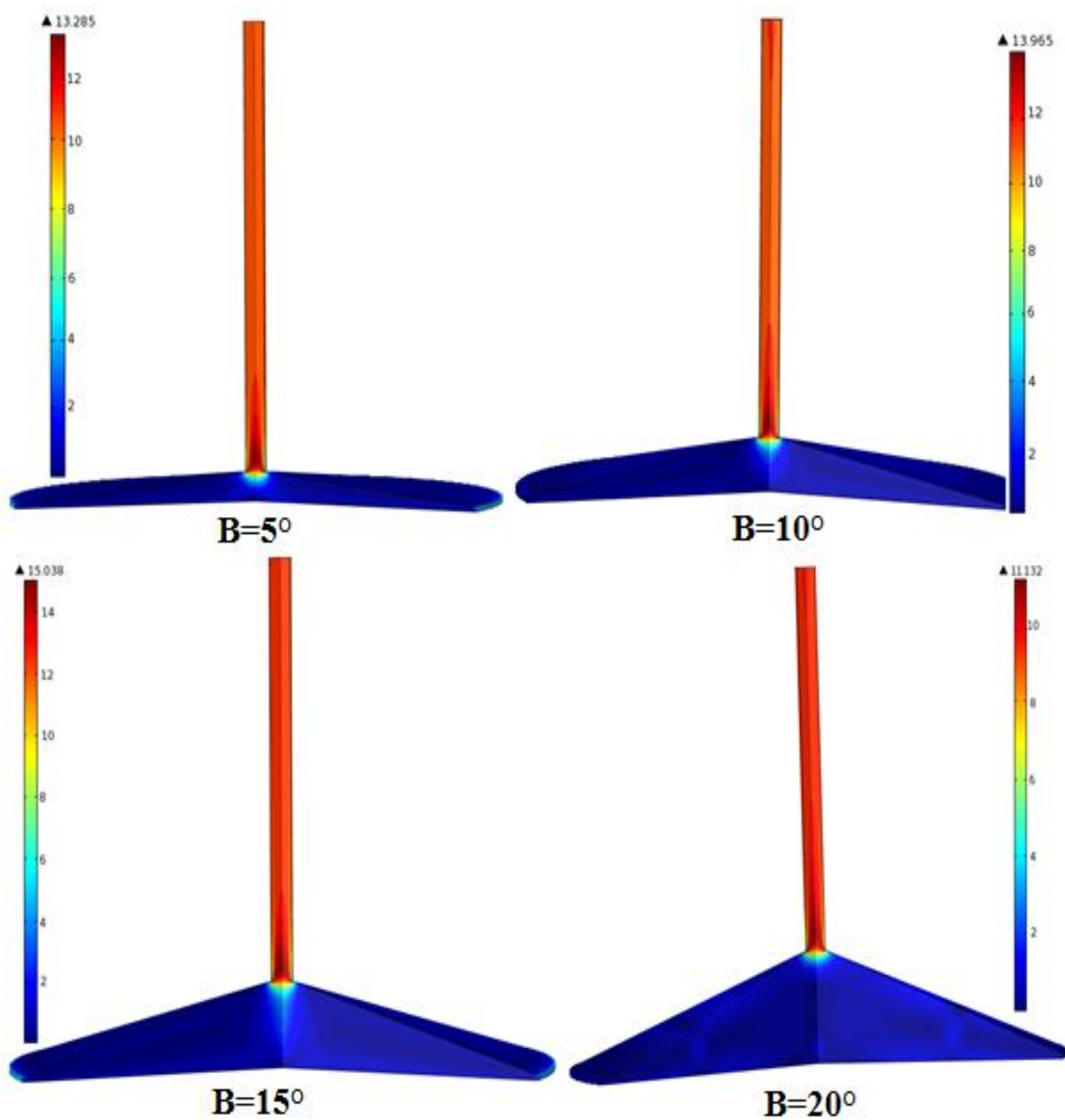


Fig. IV.23. Distributions de la vitesse de l'air en 3D pour différents angles d'inclinaison du toit collecteur.

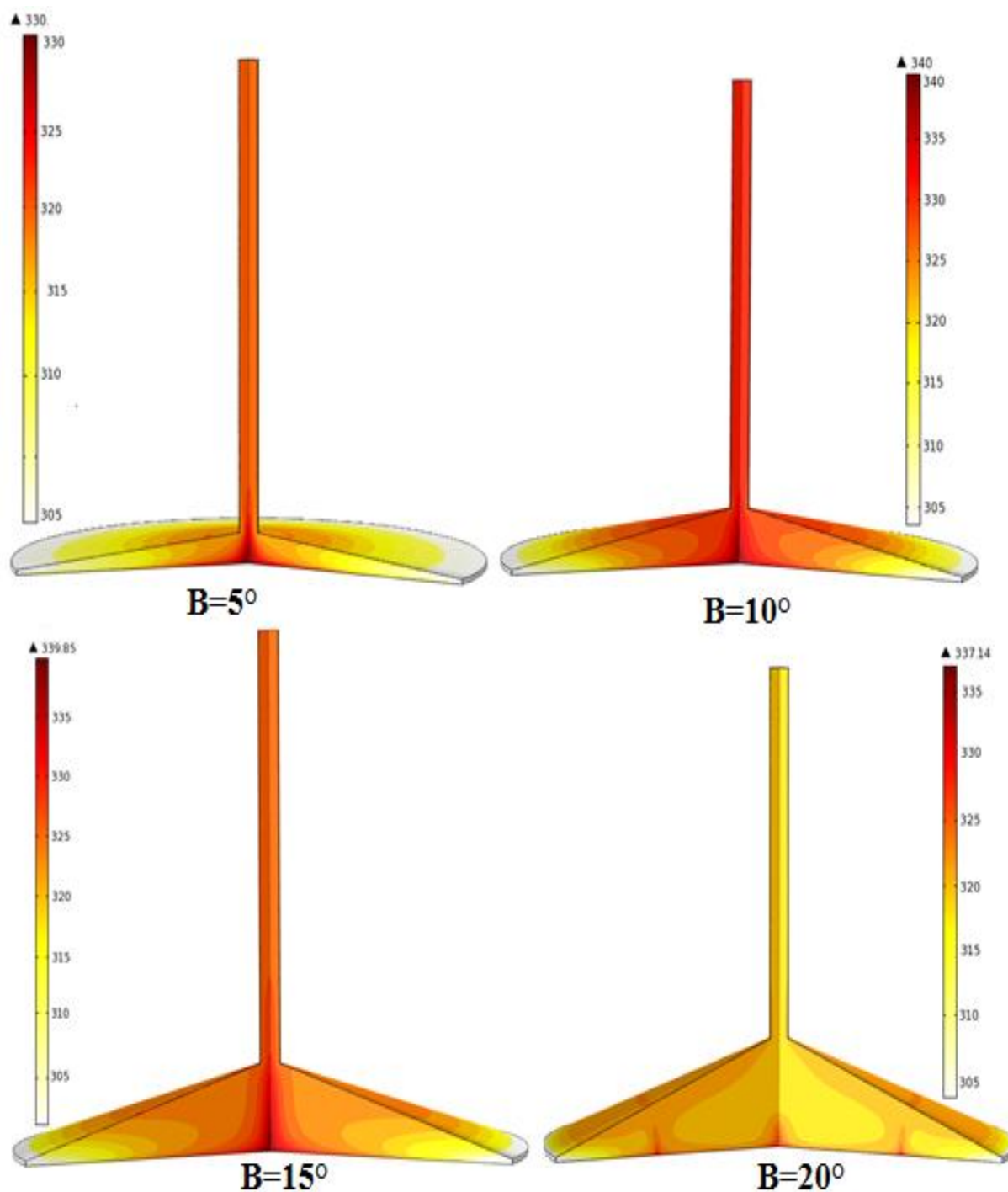


Fig. IV.24. Distribution de la température de l'air en 3D pour différents angles d'inclinaison du collecteur (5° - 20°)

Les profils de la vitesse et de la température du fluide pour différents angles d'inclinaison du toit collecteur sont représentés sur la figure (IV.25). On constate que la vitesse et la température dépendent considérablement de l'angle d'inclinaison du toit collecteur. Alors, nous pouvons conclure que: pour une efficacité optimale, le meilleur angle d'inclinaison est de 15° .

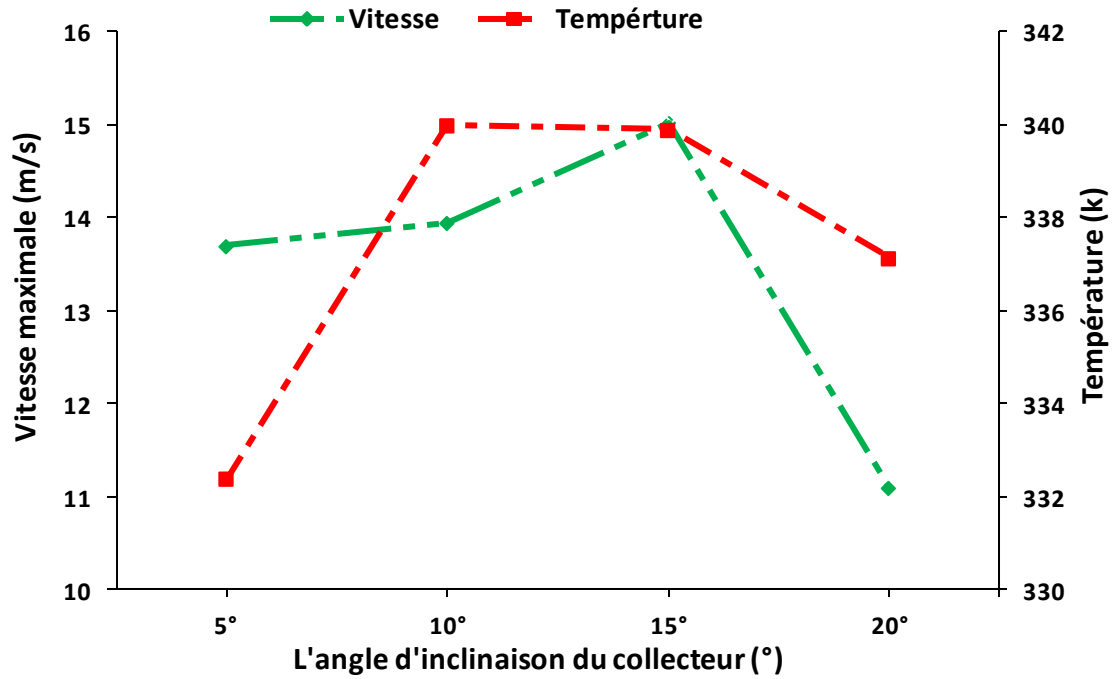


Fig. IV.25. Variation de la vitesse et température pour différents angles d'inclinaison du toit collecteur.

IV.6.6. Influence de la divergence de la cheminée sur la vitesse et la température

Nous avons étudié l'effet de la divergence de la cheminée sur les variables d'écoulement (vitesse et température). Les variables suivantes ont été maintenues constantes ($G=893 \text{ W/m}^2$; $T_a = 304 \text{ K}$; $H_{ch} = 194.6 \text{ m}$; $R_{col}=122 \text{ m}$; $R_{ch}=5 \text{ m}$; $H_{col}=1.85 \text{ m}$).

La distribution de la vitesse en 3D pour différents angles divergence de la cheminée (1° - 4°) est représentée sur la figure (IV.26). On remarque que la distribution de la vitesse et la forme des contours changent également de manière significative lorsque Φ_{ch} augmente.

L'augmentation de Φ_{ch} crée un effet opposé sur la vitesse d'écoulement après Φ_{ch} de 2° , lorsque la vitesse diminue progressivement en augmentant la divergence de cheminée. Les vitesses de l'air estimées à la base de cheminée sont: 20.05, 20.77, 19.03 et 13.4 m/s pour des Φ_{ch} qui sont 1° , 2° , 3° et 4° respectivement.

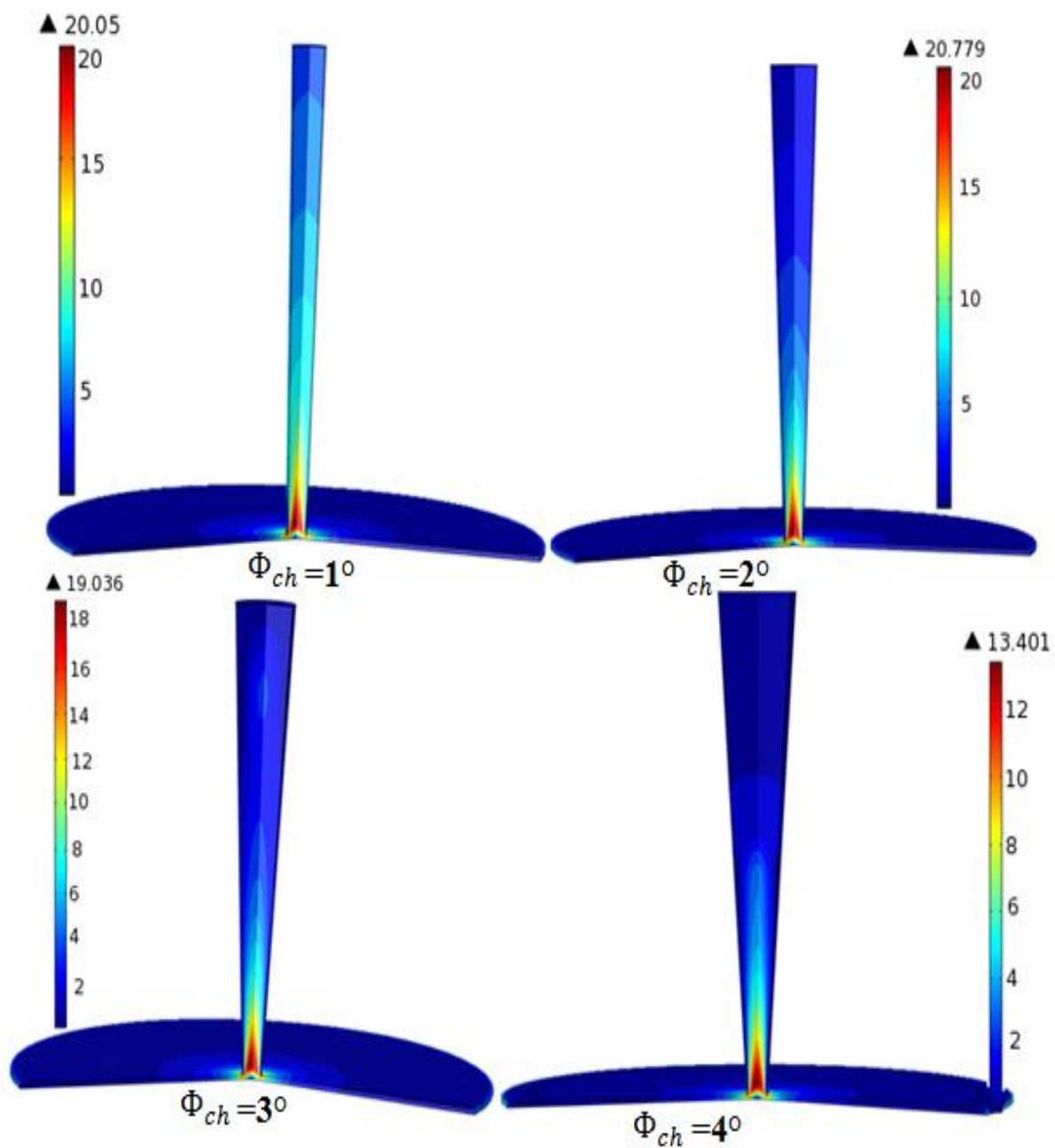


Fig. IV.26. Distribution de la vitesse de l'air en 3D pour différents angles divergence de la cheminée (1° - 4°).

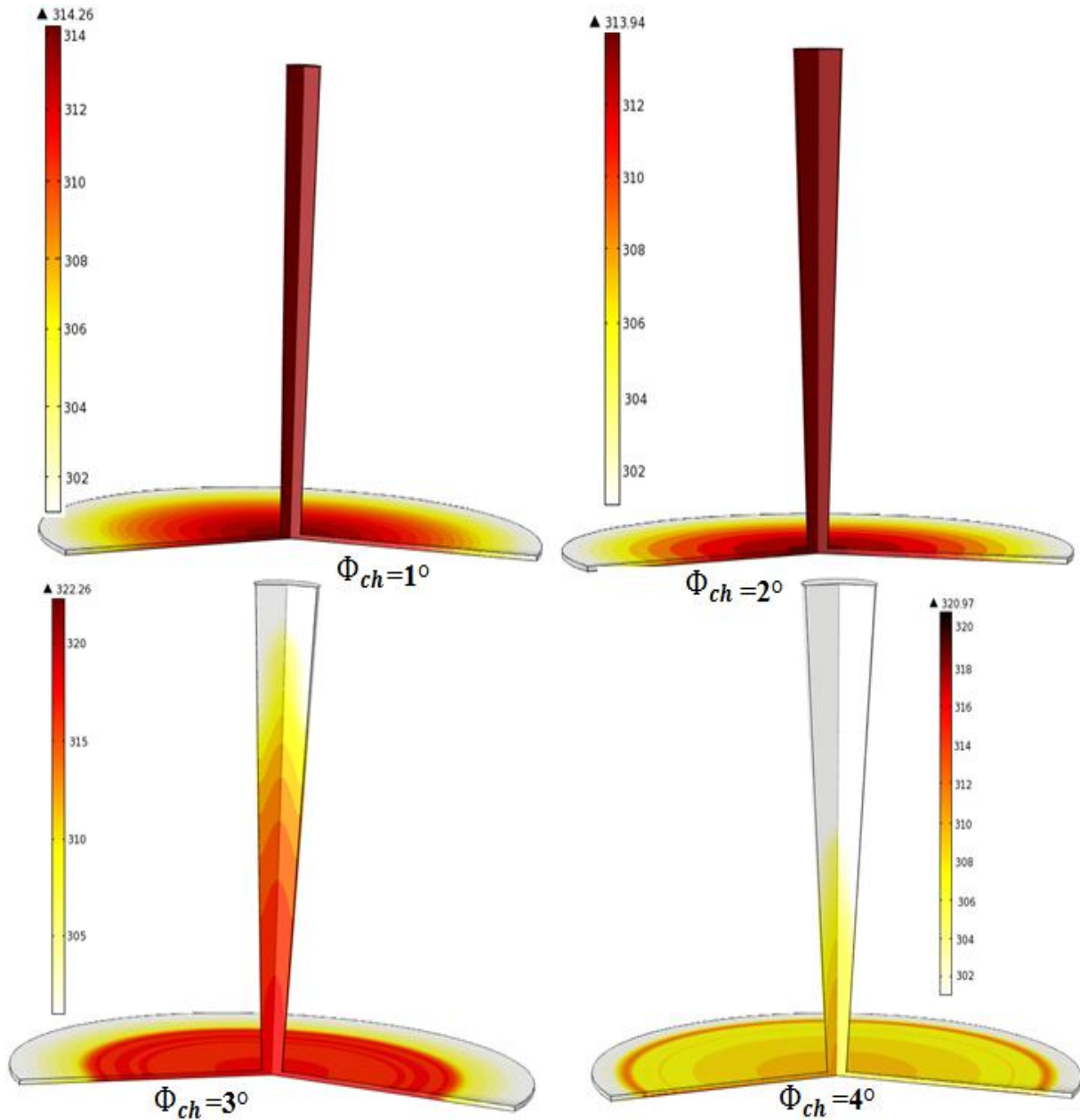


Fig. IV.27. Distribution de la température de l'air en 3D pour différents angles divergence de la cheminée (1° - 4°).

La figure (IV.27) montre la distribution de la température de l'air en 3D dans le système à cheminée solaire pour les différents cas de la divergence de la cheminée. Les valeurs minimales de la température sont situées à l'entrée du collecteur puis elles augmentent progressivement à une valeur maximale dans le centre du collecteur pour le premier et le deuxième cas de $T=314.2$ K et de $T=313.9$ K respectivement, et reste constante dans la cheminée. Alors que, le troisième cas de $\Phi_{ch} = 3^\circ$, la température augmente graduellement de l'entrée à la sortie du collecteur ($T=300$ K à $T=312$ K), puis descend progressivement vers la sortie de la cheminée (318 K à 300 K), et pour le quatrième cas $\Phi_{ch} = 4^\circ$, la température est

maximale après quelque mètre du collecteur puis diminue progressivement à la sortie de la cheminée.

Les profils de la vitesse et de la température pour différents angles de divergence de la cheminée, sont représentés sur la figure (IV.28). On constate que l'angle de divergence de la cheminée a un effet remarquable sur la vitesse et la température après certain point où l'angle est égal 2° . Alors, nous pouvons conclure que la divergence de la cheminée optimale et appropriée est de l'angle 2° .

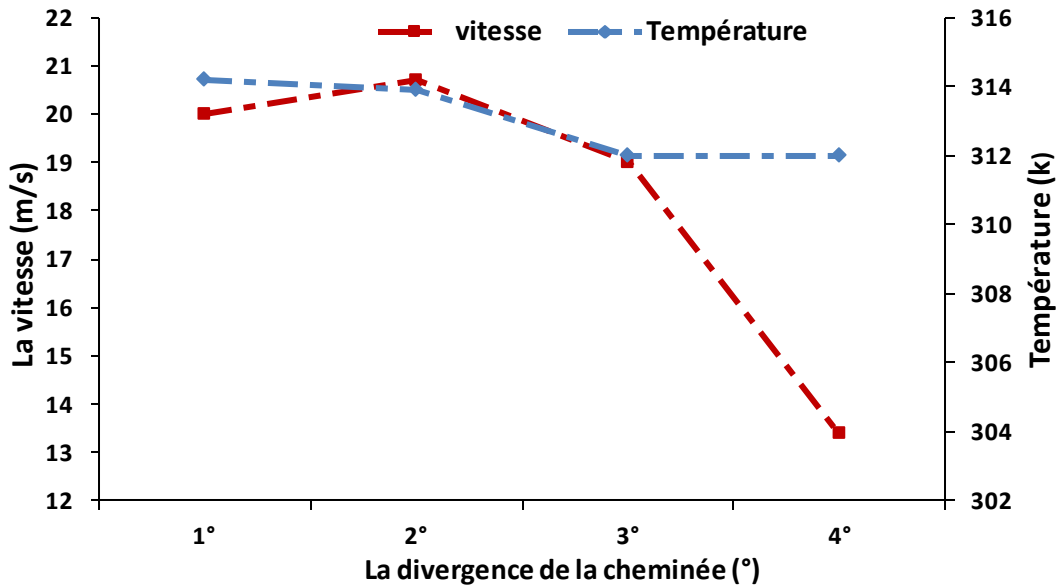


Fig. IV.28. Variation de la vitesse et température pour différents angles divergence de la cheminée.

Conclusion

Ce chapitre a traité la simulation et la validation expérimentale d'une CCS pour la région de Chlef en Algérie. La puissance de sortie, la vitesse et la température calculées analytiquement et numériquement sont comparés avec les résultats expérimentaux du prototype de la CCS de Manzanares pour valider les deux modèles.

De plus, le modèle CFD a été utilisé pour estimer :

- ❖ la puissance électrique de sortie en utilisant les dimensions typiques de la cheminée solaire Manzanares et les données météorologiques de la région de Chlef;
- ❖ L'effet des paramètres géométriques sur la distribution de la vitesse et de la température;

À partir de cette étude, nous pouvons conclure ce qui suit :

- Les modèles numériques et semi-empiriques sont très précis comparativement au modèle des réf [18] et [115] qui est basé sur le modèle de Boussinesq;
- La vitesse maximale se trouve à la base de la cheminée où la turbine sera placée ;
- La puissance électrique produite par la cheminée solaire peut atteindre la valeur de 187kW à 13h30 en Juin;
- La vitesse d'air et la différence de température (ΔT) sont étroitement liées au rayonnement solaire;
- La température de l'air ambiant a un effet négligeable sur la différence de température (ΔT) tout en ayant un effet apparent sur la vitesse de l'air;
- Le diamètre du collecteur a un effet considérable sur la distribution de la vitesse et de la température dans la CCS. la vitesse de l'air à la base de la cheminée passe de 10,66 m/s à 21,65 m/s lorsque le rayon du collecteur passe de 100 m à 250 m;
- La hauteur de la cheminée a un effet important sur la vitesse de l'air, alors qu'elle a un effet négligeable sur la température. les valeurs maximales de vitesse augmentent de 11 m/s à 14 m/s lorsque la hauteur de cheminée augmente de 200 m à 500 m;
- La hauteur du collecteur a un effet négligeable sur la distribution de la vitesse alors qu'elle a un impact évident sur la température;
- Le rayon de la cheminée n'a pas d'effet significatif sur la distribution de la vitesse et de la température au-delà d'un certain point;
- la vitesse et la température dépendent considérablement de l'angle d'inclinaison du toit du collecteur;
- L'augmentation de la divergence de la cheminée Φ_{ch} crée un effet opposé sur la vitesse et la température d'écoulement après $\Phi_{ch}=2^\circ$;

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

La centrale à cheminée solaire est un convertisseur d'énergie solaire qui peut nous servir comme un système de production d'énergie pour réduire les émissions de gaz à effet de serre en tant qu'énergie renouvelable. C'est une technologie idéale qui peut être adoptée dans des régions chaudes comme la wilaya de Chlef, en Algérie où l'intensité du rayonnement solaire est très élevée.

L'objectif principal de notre étude est de trouver les dimensions de conception optimales et appropriées d'une cheminée solaire afin d'obtenir une efficacité thermique élevée pour chauffer l'air afin de produire une vitesse maximale pour faire tourner la turbine.

Un modèle analytique et un modèle numérique 2D ont été présentés pour des paramètres géométriques de la centrale à cheminée solaire de Manzanares et des conditions climatiques de la wilaya de Chlef.

Nous avons simulé numériquement le mouvement d'air en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics basé sur la résolution numérique des équations de Reynolds Moyennées de Navier-Stokes (RANS) couplées au modèle de turbulence $k-\epsilon$ de l'écoulement. Le flux d'air à travers la cheminée solaire est traité comme un flux compressible contrairement au modèle Boussinesq utilisé dans des travaux antérieurs. De plus ; la pression et la température dans la cheminée solaire ne sont pas considérées comme constantes.

La puissance de sortie, la vitesse et la température calculées analytiquement et numériquement sont comparées avec les résultats expérimentaux du prototype de la centrale à cheminée solaire de Manzanares pour valider les deux modèles. De plus, une étude paramétrique est réalisée à l'aide du modèle numérique développé. Les effets des paramètres climatiques et des paramètres géométriques sur le comportement de l'écoulement à l'intérieur du système ont été analysés.

Les résultats des simulations numériques ont montré que:

- Les modèles numériques et analytique (semi-empiriques) sont très précis comparativement au modèle des réf [18] et [115] basé sur le l'approximation de Boussinesq.
- Le modèle développé a permis de déterminer les champs des vitesses et de la température à l'intérieur des cheminées solaires et de calculée analytiquement la puissance électrique

dépendamment des dimensions de Manzanaras et les données météorologiques de la wilaya de Chlef en Algérie.

- L'évolution de la vitesse est importante au centre de la cheminée, où son maximum atteint à la jonction (la base de la cheminée), où l'endroit idéal pour l'emplacement de la turbine;
- La puissance électrique produite par la cheminée solaire peut atteindre la valeur de 187 kW à 13h30 en Juin;
- Le logiciel COMSOL Multiphysics semble être un outil utile de simulation pour la conception et le fonctionnement des cheminées solaires, permettant la détermination des paramètres les plus appropriés dans les différentes conditions;
- L'analyse a montré que les bonnes conditions climatiques comme la température ambiante et le rayonnement solaire sont des paramètres qui contrôlent tout le fonctionnement de la cheminée;
- Une augmentation en hauteur et diamètre de la cheminée produit une augmentation de la vitesse et une diminution de la température d'écoulement le long de la cheminée solaire;
- Une augmentation en hauteur et diamètre du collecteur produit une augmentation de la vitesse et la température d'écoulement le long de la cheminée solaire;
- L'angle d'inclinaison a influence importante sur la dynamique de l'écoulement de sorte que la vitesse et la température sont accroissent quand l'angle augmente, a certain valeur d'inclinaison du toit, la vitesse et la température sont réduites;
- L'influence de l'angle divergence de la cheminée sur la dynamique de l'écoulement est opposée après un certain angle. En effet il y'a une diminution de la vitesse lorsque l'angle augmente;
- L'étude confirme que la cheminée solaire est une technologie potentiellement viable pour la production d'électricité dans la région de Chlef, en Algérie.

En perspective des travaux futurs on propose:

- Réalisation d'une simulation numérique 3D d'une serre agricole multicellulaire avec une technologie de cheminée solaire dans la région de Chlef, en utilisant le logiciel commercial COMSOL Multiphysics.
- L'utilisation de la cheminée solaire dans la ventilation de la serre multicellulaire et la production de l'électricité.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références

- [1] Das P., Chandramohan V.P., Performance characteristics of divergent chimney solar updraft tower plant. *International Journal of Energy Research*. pp. 1-16., 2020.
- [2] Guo P., Li T., Xu B., Xu X., Li J. Questions and current understanding about solar chimney power plant: A review., *Energy conversion and management*. Vol. 182, pp. 21-33, 2019.
- [3] Muhammed H.A., Atrooshi S.A., Modeling solar chimney for geometry optimization., *Renewable Energy*. Vol. 138, pp. 212-223, 2019.
- [4] Nouar H., Tahri T., Benyoucef D., Chiba Y., Dani M., Azizi A. Investigation of Climate Effects on the Performance of Solar Chimney Power Plants Using Numerical and Analytical Models: A Case Study for Chlef, Algeria, *Przeglad Elektrotechniczny*. N°3, pp. 113-118, 2021.
- [5] Das P., Chandramohan V.P., 3D numerical study on estimating flow and performance parameters of solar updraft tower (SUT) plant: Impact of divergent angle of chimney, ambient temperature, solar flux and turbine efficiency., *Journal of Cleaner Production*. Vol. 256, 2020.
- [6] Khidhir D.K., Atrooshi S.A., Performance of a Solar Chimney with a Modified Collector Geometry: A Case Study from Erbil to the North of Iraq. *Journal of Solar Energy Engineering*. Vol. 142, N°1, 2020.
- [7] Benlahcene D., Etude des phénomènes de transfert dans un système thermodynamique ouvert: application aux écosystèmes constitués de cultures sous serre comme le collecteur d'une cheminée solaire, Thèse Doctorat en Sciences., Université Hadj Lakhdar - BATNA 1, 2019.
- [8] Taybi T. Processus de la convection naturelle laminaire dans une cheminée solaire, Thèse de Magister en Physique, Université Mentouri Constantine, 2010.
- [9] Bansod P.J., Thakre S.B., Wankhade N.A., Solar Chimney Power Plant-A Review. *International Journal of Modern Engineering Research*. Vol. 4, N° 11, pp. 18-33, 2014.
- [10] Too J.H.Y, Azwadi C.S.N., Numerical analysis for optimizing solar updraft tower design using computational fluid dynamics (CFD). *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. Vol. 229, N°1, pp. 8-36, 2016.
- [11] Azizi A. Contribution à l'étude et l'optimisation d'une cheminée solaire cas du Sahara Algérien. Thèse de Doctorat. Université Hassiba Ben Bouali, Chlef, 2019.

- [12] Pretorius J.P., Solar Tower Power Plant Performance Characteristics. Thesis of Master of Mechanical Engineering. University of Stellenbosch, 2004.
- [13] A-Elmagid W.M., István K., Ildiko M., Esmail M.F.C., Tarek M. Studying the collector performance of updraft solar chimney power plant. *Journal of Engineering and Technology*. Vol. 11, pp. 8, 2020.
- [14] Gabriel J., Hanus V., Conception d'un système d'aspiration Venturi pour les épandeurs de lisier. *Revue Scientifique des Instituts Supérieurs Industriels Libres Francophones Belges*, 2017.
- [15] Nasraoui H., Bsisa M., Driss Z., Solar Chimney Power Plants: Numerical Investigations and Experimental Validation. Bentham Science Publishers. Vol. 4, 2020.
- [16] Schlaich J.R., Bergermann R., Schiel W., Weinrebe G., Design of commercial solar updraft tower systems__utilization of solar induced convective flows for power generation. *Journal of Solar Energy Engineering*. Vol. 127, N°1, pp. 117-124, 2005.
- [17] Belahia H., Analyse de la turbulence dans un domaine curviligne par la méthode k-epsilon RNG application à la cheminée solaire. Mémoire de Magistère. Université d'Ouargla, 2008.
- [18] Guo P.H., Li J.Y., Wang Y., Numerical simulations of solar chimney power plant with radiation model. *Renewable energy*. Vol. 62, pp. 24-30, 2014.
- [19] Choi Y.J., Kam D.H., Park Y.W., Jeong Y.H., Development of analytical model for solar chimney power plant with and without water storage system. *Energy*. Vol. 112, pp. 200-7. 2017.
- [20] Kasaeian A.B., Amirifard M., Ahmadi M.H., Fasaieian K., Investigation of the effects of ambient temperature and dimensional parameters on the performance of solar chimney power plants. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. Vol. 12, pp. 335-48, 2017.
- [21] Ninic N., Available energy of the air in solar chimneys and the possibility of its ground-level concentration. *Solar Energy*. Vol. 80, pp. 804-11, 2006.
- [22] Pretorius J.P., Optimization and control of a large-scale solar chimney power plant. University of Stellenbosch., PhD Thesis. University of Stellenbosch, 2007.
- [23] Xu Y.Y., Zhou X.P., Cheng Q., Performance of a large-scale solar updraft power plant in a moist climate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 91, pp. 619-29, 2015.

- [24] Ming T.Z., Gong T.R., Richter R.K.D., Liu W., Koonsrisuk A., Freshwater generation from a solar chimney power plant. *Energy Conversion Management*. Vol. 113, pp. 189–200, 2016.
- [25] Zhou X.P., Yang J.K., Xiao B., Hou G.X., Xing F., Analysis of chimney height for solar chimney power plant. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 29, N°1, pp. 178–85, 2009.
- [26] Guo P.H., Wang Y., Meng Q.L., Li J.Y., Experimental study on an indoor scale solar chimney setup in an artificial environment simulation laboratory. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 107, pp. 818–26, 2016.
- [27] Li J.Y., Guo P.H., Wang Y., Effects of collector radius and chimney height on power output of a solar chimney power plant with turbines. *Renewable Energy*. Vol. 47, pp. 21–8, 2012.
- [28] Kashiwa B.A., Kashiwa C.B., The solar cyclone: a solar chimney for harvesting atmospheric water. *Energy*. Vol. 33, N°2, pp. 331–9, 2008.
- [29] Hamdan M.O., Analysis of a solar chimney power plant in the Arabian Gulf region. *Renewable Energy*. Vol. 36, N°10, pp. 2593–8, 2011.
- [30] Ming T., de Richter R.K., Meng F., Pan Y., Liu W., Chimney shape numerical study for solar chimney power generating systems. *International Journal Energy Research*. Vol. 37, pp. 310–22, 2011.
- [31] Shirvan K.M., Mirzakhani S., Mamourian M., Kalogirou S.A., Optimization of effective parameters on solar updraft tower to achieve potential maximum power output: a sensitivity analysis and numerical simulation. *Applied Energy*. Vol. 195, pp. 725–37, 2017.
- [32] Sciuto G.L., Cammarata G., Capizzi G., Petrone G., Design optimization of solar chimney power plant by finite elements based numerical model and cascade neural networks. In: *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, Anacapri, Italy. pp. 1016-1022, 2016.
- [33] Dehghani S., Mohammadi A.H., Optimum dimension of geometric parameters of solar chimney power plants-A multi-objective optimization approach. *Sol Energy*. Vol. 105, pp. 603–12, 2014.
- [34] Phua W.P.Y.Z., Performance Enhancement of Inclined Solar Chimney Power Plant Using Underneath Air-Vents and Thermal Storage Medium. Phd thesis. Curtin University, 2018.

- [35] Haaf W., Friedrich K., Mayr G., Schlaich J., Solar chimneys part I: principle and construction of the pilot plant in Manzanares. *International Journal of Solar Energy*. Vol. 2, N°1, pp. 3-20, 1983.
- [36] Papageorgiou C., Floating solar chimney technology. *Solar energy*. pp. 187-222, 2010.
- [37] Zhou X.P., Yang J.K., Wang F., Xiao B., Economic analysis of power generation from floating solar chimney power plant. *Renewable Sustainable Energy Reviews*. Vol. 13, N°4, pp. 736-49, 2009.
- [38] Papageorgiou C.D., External wind effects on floating solar chimney. *IASTED proceedings of power and energy systems, EuroPES*. Vol. 159, 2004.
- [39] Papageorgiou C.D., Floating solar chimney versus concrete solar chimney power plants. In *2007 International Conference on Clean Electrical Power, IEEE*. pp. 760-765, May 2007.
- [40] Papageorgiou C., Floating solar chimney technology: a solar proposal for China. In *Proceedings of ISES World Congress 2007.*, Springer, Berlin, Heidelberg.. Vol. I-Vol. V, pp. 172-176. 2008.
- [41] Zhou X., Yang J., A novel solar thermal power plant with floating chimney stiffened onto a mountainside and potential of the power generation in China's deserts. *Heat Transfer Engineering*. Vol. 30, N°5, pp. 400-407, 2009.
- [42] Bilgen E., Rheault J., Solar chimney power plants for high latitudes. *Solar Energy*. Vol. 79, N°5, pp. 449-458, 2005.
- [43] Jing W., Fenghao W., Liang Z., Research on the best slope gradient of slope solar induced convective flows power generation system. In *Proceedings of ISES World Congress 2007*. Springer, Berlin, Heidelberg. Vol. I-Vol. V, pp. 1795-1799, 2008.
- [44] Zhou X., Yang J., Wang J., Xiao B., Novel concept for producing energy integrating a solar collector with a man made mountain hollow. *Energy Conversion and Management*. Vol. 50, N°3, pp. 847-854, 2009.
- [45] Kashiwa B.A., Kashiwa C.B., The solar cyclone: A solar chimney for harvesting atmospheric water. *Energy*. Vol. 33, N°2, pp. 331-339, 2008.
- [46] Dhahri A., Omri A., A review of solar chimney power generation technology. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. Vol. 2, N°3, pp. 1-17, 2013.
- [47] Bernardes M.A.D.S., Solar chimney power plants—developments and advancements. *Solar Energy*. Vol. 84, N°6, pp. 978-953, 2010.

- [48] Kasaeian A.B., Molana S., Rahmani K., Wen D. A review on solar chimney systems. *Renewable and sustainable energy reviews*. Vol. 67, pp. 954-987, 2017.
- [49] Ouedraogo W. P. G., Sié K.A.M., Ouedraogo B., Bathiebo D. J. Étude expérimentale de l'écoulement de l'air en convection naturelle dans une tour solaire. *Afrique Science*. Vol. 12, N°6, pp. 213-222, 2016.
- [50] Zuo L., Liu Z., Ding L., Qu N., Dai P., Xu B., Yuan Y. Performance analysis of a wind supercharging solar chimney power plant combined with thermal plant for power and freshwater generation. *Energy Conversion and Management*. Vol. 204, pp. 112282, 2020.
- [51] Wu Y., Ming T., de Richter R., Höffer R., Niemann H.J. Large-scale freshwater generation from the humid air using the modified solar chimney. *Renewable Energy*. Vol. 146, pp. 1325-1336, 2020.
- [52] Bansod P.J., Thakre S.B., Wankhade N.A. Solar Chimney Power Plant-A Review. *International Journal of Modern Engineering Research*. Vol. 4, N°1, pp. 18-33, 2014.
- [53] Arzpeyma M., Mekhilef S., Newaz K.M.S., Horan B., Seyedmahmoudian M., Akram N., Stojcevski A. Solar chimney power plant and its correlation with ambient wind effect. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. Vol. 141, N°2, pp. 649-668, 2020.
- [54] Zhou X., Yang J., Xiao B., Hou G. Experimental study of temperature field in a solar chimney power setup. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 27, pp. 11-12, 2007.
- [55] Zhou X., Yang J., Xiao B., Hou G. Simulation of a pilot solar chimney thermal power generating equipment. *Renewable Energy*. Vol. 32, N°10, pp. 1637-1644, 2007.
- [56] Maia C.B., Ferreira A.G., Valle R.M., Cortez M.F. Theoretical evaluation of the influence of geometric parameters and materials on the behavior of the airflow in a solar chimney. *Computers and Fluids*. Vol. 38, N°3, pp. 625-636, 2009.
- [57] Kasaeian A.B., Heidari E., Vatan S.N. Experimental investigation of climatic effects on the efficiency of a solar chimney pilot power plant. *Renewable and Sustainable energy reviews*. Vol. 15, N°9, pp. 5202-5206, 2011.
- [58] Kasaeian A., Ghalamchi M., Ghalamchi M. Simulation and optimization of geometric parameters of a solar chimney in Tehran. *Energy conversion and management*. Vol. 83, pp. 28-34, 2014.
- [59] Najmi M., Nazari A., Mansouri H., Zahedi G. Feasibility study on optimization of a typical solar chimney power plant. *Heat and Mass Transfer*. Vol. 48, N°3, pp. 475-485, 2012.

- [60] Chappell R.D., Congdon M.J., French, J.J. Design, construction, and testing of a small scale solar chimney for nomadic herdsman. *Energy Sustainability*. American Society of Mechanical Engineers. Vol. 44816, pp. 33-38, 2012.
- [61] Aja O.C., Al-Kayiem H.H., Karim Z.A. Experimental investigation of the effect of wind speed and wind direction on a solar chimney power plant. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. Vol. 179, pp. 945-955, 2013.
- [62] Al-Azawie S.S., Hassan S., Zammeri M.F. Experimental and numerical study on ground material absorptivity for solar chimney power applications. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. Vol. 186, pp. 219-230, 2014.
- [63] Tan A.Y.K., Wong N. H. Influences of ambient air speed and internal heat load on the performance of solar chimney in the tropics. *Solar Energy*. Vol. 102, pp. 116-125, 2014.
- [64] Shahreza A.R., Imani H. Experimental and numerical investigation on an innovative solar chimney. *Energy Conversion and Management*. Vol. 95, pp. 446-452, 2015.
- [65] Ghalamchi M., Kasaeian A., Ghalamchi M., Mirzahosseini A.H. An experimental study on the thermal performance of a solar chimney with different dimensional parameters. *Renewable Energy*. Vol. 91, pp. 477-483, 2016.
- [66] Ghalamchi M., Kasaeian A., Ghalamchi M. Experimental study of geometrical and climate effects on the performance of a small solar chimney. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 43, pp. 425-431, 2015.
- [67] Ghalamchi M., Kasaeian A., Fadaei, N., Daneshazarian R. Optimizing of solar chimney performance using electrohydrodynamic system based on array geometry. *Energy Conversion and Management*. Vol. 135, pp. 261-269, 2017.
- [68] Jemli M.R., Naili N., Farhat A., Guizani A. Experimental investigation of solar tower with chimney effect installed in CRTEn, Tunisia. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 42, N°13, pp. 8650-8660, 2017.
- [69] Hussain F.M., Al-Sulaiman F.A. Performance analysis of a solar chimney power plant design aided with reflectors. *Energy Conversion and Management*. Vol. 177, pp. 30-42, 2018.
- [70] Ahmed O.K., Hussein A.S. New design of solar chimney (case study). *Case studies in thermal engineering*. Vol. 11, pp. 105-112, 2018.
- [71] Azizi A., Tahri T., Sellami M.H., Segni L., Belakroum R., Loudiyi K. Experimental and CFD investigation of small-scale solar chimney for power generation. Case study: southeast of Algeria, *Desalination and Water Treatment*. Vol. 160, pp.1-8, 2019.

- [72] Nasraoui H., Driss Z., Ayedi A., Kchaou H. Numerical and experimental study of the aerothermal characteristics in solar chimney power plant with hyperbolic chimney shape, *Arabian Journal for Science and Engineering*. Vol. 44, N°9, pp. 7491-7504, 2019.
- [73] Avcı A.S., Karakaya H., Durmuş A. Numerical and experimental investigation of solar chimney power plant system performance. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. pp. 1-19, 2020.
- [74] Villar-Ramos M.M., Macias-Melo E.V., Aguilar-Castro K.M., Hernández-Pérez I., Arce J., Serrano-Arellano J., López-Manrique L.M. Parametric analysis of the thermal behavior of a single-channel solar chimney. *Solar Energy*. Vol. 209, pp. 602-617, 2020.
- [75] Nasraoui H., Driss Z., Kchaou H. Novel collector design for enhancing the performance of solar chimney power plant, *Renewable Energy*. Vol. 145, pp. 1658-1671, 2020.
- [76] Golzardi S., Mehdipour R., Baniamerian Z. How collector entrance influences the solar chimney performance: experimental assessment. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. pp. 1-14, 2020.
- [77] Belkhode P., Sakhale C., Bejalwar A. Evaluation of the experimental data to determine the performance of a solar chimney power plant. *Materials Today: Proceedings*. Vol. 27, pp. 102-106, 2020
- [78] Mehdipour R., Baniamerian Z., Golzardi S., Murshed S.S. Geometry modification of solar collector to improve performance of solar chimneys. *Renewable Energy*. Vol. 162, pp. 160-170, 2020.
- [79] Azizi A., Tahri T., Belakroum R., Segni M.H.L., Loudiyie K., Sellami. Evaluation of solar chimney performance enhancement using energy produced by Albian geothermal water in southeastern Algeria., *Desalination and Water Treatment*. Vol. 210, pp. 152-163, 2021.
- [80] Mullett L. The solar chimney—overall efficiency, design and performance. *International Journal of Ambient Energy*. Vol. 8, pp. 35-40, 1987.
- [81] Pasumarthi N., Sherif S.A. Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney model-part I: Mathematical model development. *International Journal of Energy Research*. N°3, pp. 277–88, 1998.
- [82] Backström T.W., Gannon A.J. Compressible flow through solar power plant chimneys. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*122, N°3, pp. 138–45, 2000.
- [83] Gannon A., von Backström T. Solar chimney cycle analysis with system loss and solar collector performance. *Journal of Solar Energy Engineering*. Vol. 122, pp. 133–7, 2000.

- [84] Chitsomboon T. A validated analytical model for flow in solar chimney. *International Journal of Renewable Energy Engineering*. Vol. 3, pp. 339-46, 2001.
- [85] Weinrebe G., Schiel W. Up-draught solar chimney and down-draught energy tower—a comparison. In *ISES: Solar World Congress*. pp. 1-14, 2001.
- [86] Bernardes D.M.A.S., Voß A., Weinrebe G. Thermal and technical analyses of solar chimneys. *Solar Energy*. Vol. 75, N°6, pp. 511–24, 2003.
- [87] Gitan A.A., Abdulmalek S.H., Dhrab S.S. Tracking collector consideration of tilted collector solar updraft tower power plant under Malaysia climate conditions. *Energy*, Vol. 93, pp. 1467–77, 2015.
- [88] Koonsrisuk A., Chitsomboon T. Theoretical turbine power yield in solar chimney power plants. *Thermal Issues in Emerging Technologies Theory and Applications (ThETA)*, 3rd International Conference on: IEEE., pp. 339-46, 2010.
- [89] Nizetic S., Klarin B. 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, pp. 587-91, 2010.
- [90] Bernardes M.A.D.S., Molina V.R., Cortez M.F.B. Numerical analysis of natural laminar convection in a radial solar heater. *International journal of thermal sciences*. Vol. 38, pp. 42-50, 1999.
- [91] Huang H., Zhang H., Huang Y., Lu F. Simulation calculation on solar Chimney power plant system. *Challenges of Power Engineering and Environment: Springer*. pp. 1158-61, 2007.
- [92] Sun J., Yang M., Shan Y. The Effect of the Inclined Angel on the Output in a Solar Chimney Power Plant System. *Challenges of Power Engineering and Environment: Springer*; pp. 1192-5, 2007.
- [93] Ming T., Liu W., Pan Y., Xu G. Numerical analysis of flow and heat transfer Characteristics in solar chimney power plants with energy storage layer. *Energy Conversion and Management*. Vol. 49, pp. 2872-9, 2008.
- [94] Hammadi S.H. Solar updraft tower power plant with thermal storage. *Basrah Journal for Engineering Research*. Vol. 9, N°1, pp. 9–16, 2009.
- [95] Sangi R. Performance evaluation of solar chimney power plants in Iran. *Renewable and Sustainable energy reviews*. Vol. 16, N°1, pp. 704–10, 2012.
- [96] Hamdan MO. Analysis of solar chimney power plant utilizing chimney discrete model. *Renewable Energy*. Vol. 56, pp. 50–4, 2013.

- [97] Patel S.K., Prasad D., Ahmed M.R. Computational studies on the effect of geometric parameters on the performance of a solar chimney power plant. *Energy Conversion Management*. Vol. 77, pp. 424–31, 2014.
- [98] Guo P., Li J., Wang Y., Wang Y. Numerical study on the performance of a solar chimney power plant. *Energy Conversion Management*. Vol. 105, pp. 197–205, 2015.
- [99] Gholamalizadeh E, Kim M.H. CFD (computational fluid dynamics) analysis of a solar chimney power plant with inclined collector roof. *Energy*. Vol. 107, pp. 661–667, 2016.
- [100] Asayesh M, Kasaeian A, Ataei A. Optimization of a combined solar chimney for desalination and power generation. *Energy Conversion and Management*. Vol. 150, pp. 72–80, 2017.
- [101] Hu S., Leung D.Y., Chan J.C. Numerical modelling and comparison of the performance of diffuser-type solar chimneys for power generation. *Applied Energy*. Vol. 204, pp. 948–975, 2017.
- [102] Najm O.A., Shaaban S. Numerical investigation and optimization of the solar chimney collector performance and power density. *Energy Conversion and Management*. Vol. 168, pp. 150-161, 2018.
- [103] Fathi N., McDaniel P., Aleyasin S.S., Robinson M., Vorobieff P., Rodriguez S., de Oliveira C. Efficiency enhancement of solar chimney power plant by use of waste heat from nuclear power plant. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 180, pp. 407-416, 2018.
- [104] Ayadi A., Bouabidi A., Driss Z., Abid M.S. Experimental and numerical analysis of the collector roof height effect on the solar chimney performance. *Renewable energy*. Vol. 115, pp. 649-662, 2018.
- [105] Rabehi R., Chaker A., Ming T., Gong T. Numerical simulation of solar chimney power plant adopting the fan model. *Renewable Energy*. Vol. 126, pp. 1093-1101, 2018.
- [106] Ayadi A., Nasraoui H., Bouabidi A., Driss Z., Bsisa M., Abid M.S. Effect of the turbulence model on the simulation of the air flow in a solar chimney. *International Journal of Thermal Sciences*. Vol. 130, pp. 423-434, 2018.
- [107] Hassan A., Ali M., Waqas A. Numerical investigation on performance of solar chimney power plant by varying collector slope and chimney diverging angle. *Energy*. Vol. 142, pp. 411-425, 2018.
- [108] Bouabidi A., Ayadi A., Nasraoui H., Driss Z., Abid M.S. Study of solar chimney in Tunisia: Effect of the chimney configurations on the local flow characteristics. *Energy and Buildings*. Vol. 169, pp. 27-38, 2018.

- [109] Li G., Huang H., Zhang J., Zhang H. Study on the performance of a solar collector with heat collection and storage. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 147, pp. 380-389, 2019.
- [110] Das P., Chandramohan V.P. Effect of chimney height and collector roof angle on flow parameters of solar updraft tower (SUT) plant. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. Vol. 136, N°1, pp. 133-145, 2019.
- [111] Al-Kayiem H.H., Aurybi M.A., Gilani S.I., Ismaeel A.A., Mohammad S.T. Performance evaluation of hybrid solar chimney for uninterrupted power generation. *Energy*. Vol. 166, pp. 490–505, 2019.
- [112] Elwekeel F.N., Abdala A.M., Rahman M.M. Effects of novel collector roof on solar chimney power plant performance, *Journal of Solar Energy Engineering*. Vol. 141, N°3, 2019.
- [113] Jameei A., Akbarzadeh P., Zolfagharzadeh H., Eghbali S.R. Numerical study of the influence of geometric form of chimney on the performance of a solar updraft tower power plant. *Energy & Environment*. Vol. 30, N°4, pp. 685–706, 2019.
- [114] Kebabsa H., Lounici M. S., Lebbi M., Daimallah A. Thermo-hydrodynamic behavior of an innovative solar chimney. *Renewable Energy*. Vol. 145, pp. 2074–90, 2020.
- [115] Guo P., Li J., Wang Y., Evaluation of the optimal turbine pressure drop ratio for a solar chimney power plant, *Energy Conversion and Management*. Vol. 108, pp.14-22, 2016.
- [116] Schlaich J. *The solar chimney: electricity from the sun*: Edition Axel Menges; 1995.
- [117] Shariatzadeh O.J., Refahi A.H., Abolhassani S.S., Rahmani M. Modelling and optimization of a novel solar chimney cogeneration power plant combined with solid oxide electrolysis/fuel cell, *Energy Conversion and Management*. Vol.105, pp. 423–432, 2015.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو نمذجة ومحاكاة تأثير العوامل المناخية والهندسية على أداء محطة المدخنة الشمسية من أجل تحسين كفاءتها. تعتبر المداخل الشمسية نظاماً فعالاً لإنتاج الطاقة الكهربائية من الطاقة الشمسية. تقوم محطة المداخل الشمسية بتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية وبشكل غير مباشر إلى طاقة ميكانيكية / كهربائية باستخدام الهواء كسائل عامل لتشغيل التوربينات المتصلة بالمولد. بشكل عام، تتكون المداخل الشمسية من بيوت دفيئة كبيرة (مجمعة) ومدخنة وتوربين/مولد.

كجزء من هذا العمل ، تم تطوير نموذج شبه تجريبي ونموذج رقمي ثنائي الأبعاد لتقييم كفاءة المداخل الشمسية في الشلف بالجزائر. يعتبر الهواء المتدفق عبر المدخنة الشمسية سائلاً مضغوطاً على عكس نموذج Boussinesq. وهكذا ، تم إجراء النمذجة الرقمية باستخدام معادلات رينولدز متوسط نايفير-ستوكس (RANS) المقترنة بنموذج $k-\epsilon$ المضطرب. تم قياس المعلمات الجوية المستخدمة في هذه الدراسة، مثل درجة الحرارة والإشعاع الشمسي ، في منطقة الشلف في عام 2018. وتم حساب الطاقة المنتجة عند مخرج محطة المدخنة الشمسية وسرعة الهواء ودرجة الحرارة ومقارنتها بالنتائج التجريبية التي تم الحصول عليها من نموذج Manzanares للتحقق من صحة النموذج. تم استخدام برنامج COMSOL Multiphysics في هذه الدراسة لمحاكاة سلوك تدفق الهواء في محطة المدخنة الشمسية. نتائج المحاكاة العددية التي تم الحصول عليها باستخدام مائع قابل للانضغاط من خلال المدخنة الشمسية أكثر دقة من النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام نموذج Boussinesq. توضح النتائج أن النموذج العددي الرقمي ، المستمد من الحسابات الهندسية الأساسية ، دقيق بشكل معقول ويمكن تطبيقه بشكل فعال لدراسة أداء محطات المدخنة الشمسية. أوضحت الدراسة أن المعلمات الهندسية والجوية لها تأثير كبير على كفاءة محطات المدخنة الشمسية.

الكلمات المفتاحية: مدخنة شمسية ، إنتاج كهرباء ، معلمات هندسية ، معلمات جوية ، COMSOL

Multiphysics ، الشلف.

Abstract

Abstract

The objective of this work is to modeling and simulates the effect of climatic and geometric parameters on the performance of the solar chimney power plant in order to optimize its efficiency. The Solar Chimney Power Plant (SCPP) is an efficient system for electricity production from solar energy. The SCPP converts solar energy into thermal energy then indirectly into mechanical/electrical energy by using air as a working fluid to train a turbine connected to a generator. Typically, a SCPP consists of a large greenhouse (collector), a chimney and a turbine/generator.

As part of this work, a semi-empirical model and a 2D numerical model were developed to assess the efficiency of the solar chimney power plant in Chlef, Algeria. The air flowing through the solar chimney is considered a compressible fluid in contrast to the Boussinesq model. Thus, numerical modeling was performed using Reynolds Average Navier-Stokes (RANS) equations coupled to the k - ϵ turbulence model. The meteorological parameters used in this study, such as temperature and solar radiation, were measured in the region of Chlef, in 2018. The power produced at the output of the SCPP, the air speed and the temperature were calculated and compared to the experimental results obtained from the Manzanares prototype to validate the model. The COMSOL Multiphysics software was used in this study to simulate the behavior of airflow in the solar chimney power plant. The numerical simulation results obtained using a compressible fluid through the solar chimney is more precise than the results obtained using the Boussinesq model. The results demonstrate that the proposed numerical model, derived from fundamental engineering calculations, is reasonably accurate and can be effectively applied to study the performance of the SCPP. The study demonstrated that geometric and meteorological parameters have a very significant impact on the efficiency of the SCPP.

Keywords: *Solar chimney, Electricity production, Geometric parameters, Meteorological parameters, COMSOL Multiphysics, Chlef.*