

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FRERES MENTOURI CONSTANTINE 1

FACULTE DES SCIENCES EXACTES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

N° de Série :.....

N° d'ordre :.....

THESE

Présentée pour obtenir le diplôme de

DOCTORAT 3^{ème} CYCLE (LMD)

Spécialité : ENERGIES RENOUVELABLES

THEME

**SIMULATION DES EFFETS THERMIQUES ET
HYDROMECHANQUES D'UNE TURBINE INSTALLEE DANS
UNE CHEMINEE SOLAIRE**

Dirigée par **Mme. Abla Chaker**, Professeure à l'Université **Frères Mentouri. Constantine1**

Par

Mme RABEHI RAYAN

Soutenue le :

Devant le jury :

Président : Mr **M. Djeddar** Prof **Univ. Frères Mentouri. Constantine1**

Rapporteur : Mme **A. Chaker** Prof **Univ. Frères Mentouri. Constantine1**

Examineurs : Mr **A. Bouhdjar** Dr de recherche **CDER Alger**

Mr **B. Draoui** Prof **Univ. Tahri mohamed. Bechar**

Remerciements

*En premier lieu, je remercie sincèrement et très chaleureusement, ma directrice de thèse, Professeure Madame **CHAKER ABLA**, pour tous ses efforts, et les mots me manquent pour lui exprimer toute ma profonde gratitude, que ce soit pour sa disponibilité permanente, sa contribution majeure à l'orientation des travaux de recherche et ses idées originales qui ont servi à enrichir le contenu de cette thèse. J'ai agréablement aimé travailler avec elle, je suis fière d'être son étudiante.*

*Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à Monsieur **DJEZZAR Mahfoud**, Professeur à l'Université Frères Mentouri Constantine1, qui a bien voulu présider mon jury de thèse.*

*J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur **Bouhdjar Amor**, Directeur de recherche, au CDER, et au Professeur **Draoui Belkacem**, de l'Université Tahri mohamed de Bechar, qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail et de participer à mon jury de Thèse, malgré leurs multiples occupations.*

Mes remerciements à toute personne m'ayant aidé de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

Nomenclature

<i>Symbole de la lettre</i>	<i>Signification</i>	<i>Unité</i>
A_{ch}	Surface à l'entrée de la cheminée	m^2
β	Coefficient de dilatation thermique	$1/K$
C_p	Chaleur massique du fluide	$J/ kg K$
$C_{1\varepsilon}$	Constante du modèle de turbulence	---
$C_{2\varepsilon}$	Constante du modèle de turbulence	---
g	Accélération de la pesanteur	m /s^2
G	Rayonnement solaire	W/m^2
G_b	Génération d'énergie cinétique de turbulence due à la flottabilité	---
G_k	Génération d'énergie cinétique de turbulence due aux gradients de vitesse moyenne	---
H_{ch}	Hauteur de la cheminée	m
k	Energie cinétique de turbulence	J/kg
m	Débit massique	kg/s
M	Moment total des pales de la turbine	kg/m^2
n	Vitesse de rotation de la turbine	rpm
p	Pression statique	Pa
P_e	Energie électrique produite	W
P_m	Puissance mécanique absorbée par la turbine	W
P_{tot}	Puissance d'écoulement dans la cheminée	W
ΔP_t	Chute de pression de la turbine	Pa
ΔP_{tot}	Différence de pression entre l'entrée et la sortie de la tour	Pa
q_v	Débit volumique	m^3/s
Q	Chaleur générée par l'effet de serre dans le collecteur	J
r	Rayon du collecteur	m
t	Temps	s
T	Température	K
T_a	Température ambiante	K
ΔT	Ecart de température	$K, (^\circ C)$
u	Vitesse radiale	m/s
v	Vitesse axiale	m/s
v_0	Vitesse à la sortie du collecteur	m/s
V_{ch}	Vitesse à l'entrée de la cheminée	m/s
\vec{V}	Vecteur de vitesse	m/s
w	Vitesse verticale	m/s
W_t	Puissance produite	W
x, y, z	Coordonnées cartésiennes	m
q	Source de chaleur interne	J
ρ	Masse volumique du fluide	kg/ m^3

ρ_0	Masse volumique à T_0	kg/m^3
ν	Viscosité cinématique	m^2/s
α_k	Constante	---
α_ε	Constante	---
ε	Taux de dissipation	W/kg
μ_{eff}	Viscosité turbulente	$\text{kg/m}^2 \text{s}$
η_{sys}	Rendement du système	---
η_{col}	Rendement du collecteur	---
η_{ch}	Rendement de la cheminée	---
η_t	Rendement de la turbine	---
λ	Conductivité thermique	$\text{W/ m}^2\text{K}$
$\bar{\phi}$	Fonction de dissipation	---
CFD	Computational Fluid Dynamic	---
Ra	Nombre de Rayleigh	---

Liste des figures

- Figure I.1. La brochette de Léonard de Vinci (1452-1519)
- Figure. I. 2. Le prototype espagnol
- Figure. I .3. Le projet australien
- Figure.I.4. Principe de fonctionnement d'une cheminée solaire
- Figure. I.5. Système de stockage de la chaleur dans la cheminée solaire
- Figure. I.6. Prototypede la cheminée solairede Manzanares
- Figure. I.7. Construction de la cheminée
- Figure. I.8. Les différentes parties du prototype espagnol
- Figure. I.9. Heures de fonctionnementpour l'année 1987dela cheminée solairede Manzanares, Espagne
- Figure. II.1. Géométrie bidimensionnelle de la cheminée solaire
- Figure. II.2. Géométrie tridimensionnelle de la cheminée solaire couplée avec une turbine réelle
- Figure. II.3. Géométrie tridimensionnelle de la cheminée solaire en adoptant le modèle de ventilateur
- Figure. II.4. Conditions aux limites pour la géométrie bidimensionnelle
- Figure. III. 1. Procédure de modélisation et simulation
- Figure. III.2. Géométrie de la cheminée en 2D
- Figure. III.3. Géométrie de la cheminée solaire en 3D
- Figure. III.4. Le profil aérodynamique FX-77- W-153 A
- Figure. III.5. Géométrie des profils aérodynamiques, de la pale et de la turbine, réalisée par Gambit
- Figure. III.6. Maillage de la géométrie bidimensionnelle de la cheminée solaire

Figure. III.7. Conditions aux limites de la géométrie bidimensionnelle

Figure. III.8. Maillage de la géométrie tridimensionnelle (cas du modèle de ventilateur)

Figure. III.9. Maillage du système et de la turbine, en 3D

Figure. III.10. Condition aux limites de la géométrie tridimensionnelle

Figure. IV.1. Profil de vitesse de l'écoulement de l'air dans le collecteur

Figure. IV. 2. Profil de température de l'écoulement de l'air dans le collecteur

Figure. IV. 3. Profil de pression de l'air dans le collecteur

Figure. IV. 4. Distribution de la vitesse de l'écoulement de l'air dans le système

Figure. IV. 5. Distribution de la température de l'écoulement de l'air dans la cheminée solaire

Figure. IV. 6. Distribution de la pression de l'écoulement de l'air dans la cheminée solaire

Figure. IV. 7. Validation des résultats de simulation

Figure. IV.8. Distribution de la vitesse de l'écoulement d'air pour différentes valeurs de vitesse d'entrée de l'air

Figure. IV. 9. Profil de vitesse de l'écoulement de d'air en fonction du rayon du collecteur, pour différentes valeurs de vitesse d'entrée de l'air (température ambiante de 293K)

Figure. IV. 10 . Distribution de la pression de l'écoulement d'air pour différentes valeurs de vitesse d'entrée de l'air

Figure. IV. 11 . Profil de la pression de l'écoulement de l'air en fonction du rayon du collecteur pour différentes valeurs de vitesse d'entrée de l'air (température ambiante de 293K)

Figure. IV.12. Distribution de la température de l'écoulement d'air pour différentes valeurs de vitesse d'entrée de l'air

Figure. IV.13. Profil de la pression de l'écoulement de l'air en fonction du rayon du collecteur pour différentes valeurs de vitesse d'entrée de l'air (température ambiante de 293K)

Figure. IV.14. Distribution de la vitesse de l'écoulement d'air pour différentes valeurs de température ambiante

Figure. IV. 15. Profil de la vitesse de l'air à travers le collecteur pour différentes valeurs de la température ambiante(en appliquant la condition aux limites, de pression à l'entrée)

Figure. IV.16. Distribution de la pression statique de l'écoulement d'air pour différentes valeurs de température ambiante

Figure. IV.17. Profil de la pression statique de l'air en fonction du rayon du collecteur à différentes valeurs de température ambiante (en appliquant la condition aux limites de pression à l'entrée)

Figure. IV.18. Distribution de la température de l'écoulement d'air pour différentes valeurs de température ambiante.

Figure. IV.19. Profil de température de l'air en fonction du rayon du collecteur à différentes valeurs de température ambiante (en appliquant la condition aux limites de pression à l'entrée).

Figure. IV.20. Distribution de la vitesse de l'écoulement d'air pour différentes températures ambiantes et pour une vitesse d'entrée de l'air de 5 m/s

Figure. IV.21. Profil de vitesse de l'air à travers le collecteur pour différentes valeurs de température ambiante (vitesse d'entrée de l'air de 5 m/s)

Figure. IV. 22. Distribution de la pression statique de l'écoulement d'air pour différentes températures ambiantes et pour une vitesse d'entrée de l'air de 5 m/s

Figure. IV.23. Profil de la pression statique en fonction du rayon du collecteur pour différentes valeurs de température ambiante (vitesse d'entrée de l'air de 5m/s)

Figure. IV.24. Distribution de la température de l'écoulement d'air pour différentes températures ambiantes et pour une vitesse d'entrée de l'air de 5 m/s

Figure. IV.25. Profil de température en fonction du rayon du collecteur à différentes valeurs de température ambiante (vitesse d'entrée de l'air de 5m/s)

Figure. IV.26. Variation mensuelle du rayonnement solaire global pour les quatre régions choisies

Figure. IV.27. Variation mensuelle de la température ambiante pour les quatre régions

Figure. IV.28. Variation horaire du rayonnement solaire global dans les quatre régions (Journée du 21/ 03/ 2013)

Figure. IV.29. Variation horaire du rayonnement solaire global dans les quatre régions (Journée du 21/ 06/ 2013)

Figure. IV.30. Variation horaire du rayonnement solaire global dans les quatre régions (Journée du 21/ 11/ 2013)

Figure. IV. 31. Température ambiante horaire dans les quatre régions (Journée du 21/ 03/ 2013)

Figure. IV. 32. Température ambiante horaire dans les quatre régions (Journée du 21/ 06/ 2013)

Figure. IV. 33. Température ambiante horaire dans les quatre régions (Journée du 21/ 11/ 2013)

Figure. IV.34. Puissance électrique mensuelle pour les quatre régions

Figure. IV.35. Variation temporelle de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du collecteur (Journée du 21/03/2013)

Figure. IV.36. Variation temporelle de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du collecteur (Journée du 21/06/2013)

Figure. IV.37. Variation temporelle de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du collecteur (Journée de 21/11/2013)

Figure. IV.38. Puissance électrique horaire pour les quatre régions (Journée du 21/03/2013)

Figure. IV.39. Puissance électrique horaire pour les quatre régions (Journée du 21/06/2013)

Figure. IV.40. Puissance électrique horaire pour les quatre régions (Journée du 21/11/2013)

Figure. V.1. Comparaison des résultats de simulation en 3D, avec ceux de Manzanares

Figure. V.2. Distribution de la pression de l'air à travers le collecteur dans le cas du horscharge et durant le fonctionnement de la turbine

Figure. V.3. Distribution de la température dans le collecteur dans le cas du horscharge et durant le fonctionnement de la turbine

Figure. V.4. Distribution de la vitesse de l'air à travers le collecteur dans le cas du horscharge et durant le fonctionnement de la turbine

Figure. V.5. Effet du rayonnement solaire sur la vitesse moyenne de l'air à la sortie du collecteur et sur la différence de température de l'air entre l'intérieur et l'extérieur du collecteur.

Figure. V. 6. Effet du rayonnement solaire sur la vitesse et sur la température moyenne de l'air à la sortie de la cheminée

Figure. V.7. Effet de la chute de pression de l'air à travers la turbine sur le rendement du collecteur pour différentes valeurs du rayonnement solaire

Figure. V.8. Effet de la chute de pression de l'air sur le débit volumique et sur la différence de température de l'air

Figure. V.9. Effet de la chute de pression de l'air à travers la turbine sur la puissance électrique produite par la cheminée solaire

Figure. V.10. Distribution de la pression de l'air dans la cheminée solaire, pour un rayonnement solaire de 800 W/m^2 et une chute de pression à travers la turbine de 80 Pa.

Figure. V.11. Distribution de la vitesse de l'air dans la cheminée solaire, pour un rayonnement solaire de 800 W/m^2 et une chute de pression à travers la turbine de 80 Pa.

Figure. V.12. Distribution de la température de l'air dans la cheminée solaire pour un rayonnement solaire de 800 W/m^2 et une chute de pression à travers la turbine de 80 Pa

Figure. V. 13. Profil de température de l'air à travers le collecteur pour différentes valeurs de vitesse de rotation de la turbine.

Figure. V. 14. Effet de la vitesse de rotation de la turbine sur la vitesse de l'écoulement d'air à travers le collecteur

Figure. V. 15. Effet de la vitesse de rotation de la turbine sur la pression statique de l'air à travers le collecteur

Figure. V.16. Profil de la vitesse de l'air à la sortie de la cheminée en fonction de la vitesse de rotation de la turbine

Figure. V.17. Profil de température de l'air à la sortie de la cheminée en fonction de la vitesse de rotation de la turbine

Figure. V. 18. Distribution de la température de l'air dans la cheminée solaire couplée avec une turbine réelle (rayonnement solaire de 800 W/m^2 / vitesse de rotation de la turbine de 80 rpm).

Figure. V. 19. Distribution de la vitesse de l'air dans la cheminée solaire couplée avec une turbine réelle (rayonnement solaire de 800 W/m^2 / vitesse de rotation de la turbine de 80 rpm).

Figure. V. 20. Influence de la vitesse de rotation de la turbine sur la puissance électrique produite par la cheminée solaire et sur le rendement de la turbine.

Liste des tableaux

Tableau. I.1. Les données techniques du prototype espagnol

Tableau. II. 1. Conditions aux limites pour le cas tridimensionnel modèle de ventilateur

Tableau. III.1. Paramètres du profil aérodynamique FX-77- W- 153A

Tableau. III.2. Section des pales

Tableau. II. 3. Variation de la valeur maximale du débit massique en fonction du nombre d'éléments (cas bidimensionnel)

Tableau. IV.1. Comparaison entre les résultats de simulation et ceux du prototype espagnol.

Tableau. V.1. Comparaison entre les résultats de simulation en 3D et ceux de Manzanares.

Sommaire

Remerciements

Nomenclature

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre I : Etat de l'art

I.1. Introduction 4

I.2. Historique 4

I.3. La centrale solaire à cheminée 7

I.3.1. Le collecteur 8

I.3.2. Le stockage de l'énergie 9

I.3.3. La cheminée 10

I.3.4. La turbine 10

I.4. Les matériaux mis en œuvre pour construire la cheminée solaire 10

I.5. Avantages et inconvénients de la cheminée solaire 10

I.6. Station de l'énergie hydroélectrique pour les déserts 12

I.7. Comparaison avec l'énergie éolienne 13

I.8. Le prototype de Manzanares 14

I.9. Les projets 19

I.9.1. Le projet australien 19

I.9.2. Le projet espagnol 20

I.9.3. Le projet namibien 20

I.9.4. Le projet chinois 21

I.10. Synthèse de travaux sur les centrales solaire à cheminée 21

I.10.1. Les études expérimentales 22

I.10.2. Les études théoriques 24

I.10.3. Les études de simulation et numérique 26

Chapitre II : Modélisation mathématique

II.1. Introduction 30

II.2. Modèle physique 30

II.3. Modélisation mathématique	32
II.3.1. Equations générales	32
a) Equation de continuité	32
b) Equations de quantité de mouvement	33
c) Equation de l'énergie	33
d) Hypothèses simplificatrices	33
II.3.2. Cas de la géométrie bidimensionnelle	34
a) Équation de continuité	34
b) Équation de la conservation de la quantité de mouvement	34
c) Equation de l'énergie	35
d) Modèle de turbulence $k - \varepsilon$	35
II.3.3. Cas de la géométrie tridimensionnelle	35
a) Equation de continuité	35
b) Équation de la conservation de la quantité de mouvement	36
c) Equation de l'énergie	36
d) Modèle de turbulence $k - \varepsilon$	36
II.3.4. Modélisation de la performance de la cheminée solaire	36
a) Le collecteur	37
b) La cheminée	37
c) La turbine	38
II.3.5. Conditions aux limites	40
II.3.5.1. Cas bidimensionnel	40
a) Pour l'entrée du collecteur	40
b) Pour le toit du collecteur	40
c) Pour le sol	40
d) Pour la sortie de la cheminée	40
e) Conditions aux limites Pour la paroi extérieure de la cheminée	40
f) Condition aux limites pour l'axe de symétrie	41
II.3.5.2. Cas tridimensionnel	41

Chapitre III : Simulation numérique

III.1. Introduction	43
III.2. Présentation des outils de simulation	45
III.2.1. Présentation du préprocesseur Gambit	45

III.2.1.1. Définition de la géométrie	46
a) Cas bidimensionnel de la cheminée solaire	46
b) Cas tridimensionnel de la cheminée solaire	47
III.2.1.2. Réalisation du maillage	50
III.2.1.2.1. Réalisation du maillage pour la géométrie bidimensionnelle de la cheminée solaire	51
a) Test de maillage	51
b) Définition des conditions aux limites	52
III.2.1.2.2. Réalisation du maillage pour la géométrie tridimensionnelle de la cheminée solaire	53
a) Test de maillage	54
b) Définition des conditions aux limites	55
III.2.2. Présentation du processeur (solver) Fluent	55
III.2.2.1. Définition du problème sur Fluent	56
a) Cas bidimensionnel	56
b) Cas tridimensionnel	56
III.3. Etapes de résolution du problème	56

Chapitre IV : Résultats et discussion (cas de la géométrie bidimensionnelle de la cheminée)

IV.1. Introduction	58
IV.2. Résultats et discussion	58
IV.2.1. Caractéristiques de l'écoulement dans le collecteur	58
❖ Comparaisons avec des données expérimentales du prototype espagnol	62
❖ Comparaisons avec les résultats numériques de Ming et al	63
IV.2.2. Effets de la vitesse d'entrée de l'air et la température ambiante	64
➤ Effet de la vitesse d'entrée de l'air	64
➤ Effet de la température ambiante	70
IV.2.3. Etude de la performance de la cheminée solaire : étude de cas en Algérie	82

Chapitre V : Résultats et discussion (cas de la cheminée solaire avec turbine, 3D)

V.1. Introduction	93
V.2. Validation des résultats	93

V.3. Résultats et discussion	94
V.3.1. Cas du modèle de ventilateur	94
V.3.1.1. Influence du rayonnement solaire sur les paramètres de la cheminée solaire	97
V.3.1.2. Influence de la chute de pression à travers la turbine sur les performances de la cheminée solaire	99
V. 3. 2. Cas de la cheminée solaire couplée avec une turbine réelle	104
V. 3. 2.1. Effet de la vitesse de rotation de la turbine sur la température et la vitesse de l'air à la sortie de la cheminée	106
V. 3. 2.2. Influence de la vitesse de rotation de la turbine sur la puissance et sur le rendement de la turbine	109
Conclusion	110
Annexe	113
Références bibliographique	128

Introduction générale

Introduction générale

L'approvisionnement énergétique mondial est aujourd'hui essentiellement basé sur l'utilisation des ressources, fossiles et nucléaires. 80% des besoins mondiaux en énergie, sont satisfaits par l'utilisation des combustibles carbonés, d'origine fossile, charbon, pétrole et gaz naturel. Cet état de fait a conduit non seulement à une pénurie progressive des ressources naturelles, mais également à de nombreux problèmes environnementaux. L'un des plus épineux est l'accroissement dangereux de l'effet de serre, causé par les émissions de dioxyde de carbone (CO₂), de méthane (CH₄) et d'oxyde nitreux (N₂O), ayant pour conséquence le réchauffement de la planète et les dérèglements climatiques. Les signes précurseurs de ce fléau climatique sont la désertification, la prolifération de maladies, la disparition de certaines espèces animales et végétales, l'évolution du niveau des mers, les canicules, le dégel des glaciers et banquises ... etc. Ajouté à cela, la pollution de l'environnement qui risque d'altérer gravement la santé de l'homme, jusqu'à présenter des dangers pour son avenir génétique.

Afin de palier à ces contraintes environnementales, qui prennent une ampleur démesurée, au fil des jours, les regards doivent s'orienter vers d'autres ressources. Les énergies renouvelables (solaire, éolien, hydraulique, géothermique et la biomasse) se présentent comme une alternative fortement intéressante, surtout dans les pays à fort ensoleillement.

L'Algérie, dont le potentiel solaire, se caractérise par une irradiation solaire importante, de l'ordre de 2500 kWh/m² par an et une durée d'ensoleillement qui dépasse les dix heures par jour, pendant plusieurs mois [1], pourrait encourager cette démarche, afin de couvrir une part significative de ses besoins en énergie, par des systèmes solaires, parmi lesquels la cheminée solaire.

De nos jours, de nombreuses études montrent que l'exploitation de l'énergie solaire, permet de créer un mouvement d'air, sous forme de vent artificiel, qui servirait à entraîner une ou plusieurs turbines éoliennes afin de produire de l'énergie électrique [2]. Constitué de trois composants principaux, la serre chaude ou collecteur solaire, la cheminée (une longue structure tubulaire) et la turbine éolienne, ce dispositif permet de convertir l'énergie solaire en énergie thermique dans le collecteur solaire, l'énergie générée est transformée en énergie

cinétique dans la cheminée et en fin de processus en une énergie électrique, via la combinaison d'une turbine et d'un générateur [3,4].

Bien que le principe de fonctionnement soit relativement simple, il n'en demeure pas moins que ce dispositif est le siège de différents modes d'échanges thermiques et massiques, dont la complexité est accentuée par les phénomènes dus à la présence de la turbine, qui retiennent encore l'attention de nombreux chercheurs.

Dans ce sens, les objectifs principaux de la présente thèse seront, dans un premier temps de contribuer à la compréhension du principe de fonctionnement d'une centrale à cheminée solaire, à travers une étude numérique en 2D. Dans un second temps une simulation numérique en 3D sera effectuée afin de mieux cerner les effets thermiques et hydrodynamiques, qui se produisent dans une turbine installée dans une cheminée solaire. Pour la simulation de la cheminée solaire nous envisagerons soit d'adopter le modèle de ventilateur, soit de coupler la cheminée solaire avec une turbine réelle. Dans le premier cas, la configuration détaillée de la turbine n'est pas prise en compte, elle est traitée comme un disque infiniment mince. Dans les deux cas, l'influence des paramètres, tels que le rayonnement solaire, la chute de pression à travers la turbine et la vitesse de rotation de la turbine sera examinée.

Les simulations numériques bidimensionnelle et tridimensionnelle ont été effectuées à l'aide des logiciels FLUENT et ANSYS FLUENT, pour la géométrie du prototype de Manzanares, en Espagne.

Le manuscrit est organisé en cinq chapitres, précédés d'une introduction et complétés par une conclusion générale.

- Dans le premier chapitre, un large éventail de travaux analytiques, numériques et expérimentaux, en rapport avec les cheminées solaires est rapporté. Il permettra d'une part au lecteur d'avoir une vision approfondie du sujet et nous donnera, d'autre part, la possibilité de valider nos résultats numériques.
- Le second chapitre est consacré au modèle physique et mathématique qui décrit les phénomènes physiques impliqués dans le système, en 2D et 3D, avec et sans turbine ainsi que les hypothèses simplificatrices. Les équations de continuité, de quantité de mouvement (équations de Navier- Stokes), de l'énergie et l'équation du modèle de

turbulence $k - \varepsilon$ standard avec les conditions aux limites, en utilisant la formulation la mieux appropriée pour l'étude de notre système, sont exposés.

- Le troisième chapitre traite de la simulation numérique, à l'aide des logiciels Fluent et Ansys Fluent.
- Les résultats de la simulation de la cheminée solaire en 2D sans turbine sont présentés dans le quatrième chapitre. Ils seront traités en termes de vitesse, de température et de pression, ensuite, une étude de cas en Algérie est exposée.
- Les résultats de la simulation de la cheminée solaire en 3D avec turbine, font l'objet du dernier chapitre. Dans cette partie nous avons traité deux modèles de turbine, d'abord en adoptant le modèle de ventilateur, puis en couplant la cheminée solaire avec une turbine réelle de quatre pales. En outre, l'influence de divers paramètres sur le fonctionnement de la turbine a été analysée. La puissance générée par le système ainsi que les rendements du collecteur et de la turbine sont présentés.

Chapitre I : Etat de l'art

I. 1. Introduction

Le premier chapitre relate, l'historique de la cheminée solaire à travers les âges et les principaux projets réalisés, à travers le monde de ce système. Le lecteur y trouvera également les études théoriques, expérimentales et les simulations numériques, les plus significatives de la cheminée solaire.

De nombreux chercheurs portent un intérêt de plus en plus croissant aux énergies renouvelables, notamment aux technologies solaires, dont le développement reste néanmoins tributaire de la résolution d'un certain nombre de problèmes, à savoir :

- La pollution générée lors de la fabrication du système lui-même (pollution décentralisée).
- Le recyclage des éléments constituant le système, qui est souvent difficile et très cher.
- Elles ont en général une seule fonction, qui est la production de l'énergie.

A l'heure actuelle, les regards se tournent vers la cheminée solaire (centrale à cheminée solaire), un système de production d'énergie qui n'engendre pas les précédentes problématiques. Le premier prototype a été proposé par le professeur J. Schlaich de Stuttgart, en 1968. L'idée fut basée sur la possibilité d'engendrer un mouvement d'air, sous forme de vent artificiel, à partir de l'énergie solaire, et de l'utiliser pour entraîner une ou plusieurs turbines éoliennes, afin de produire de l'énergie électrique [2].

I.2. Historique

En fait, l'idée n'est nouvelle. En effet, au fil du temps, de nombreux chercheurs ont exploré l'utilisation d'un flux d'air chaud pour générer de l'énergie. Leonardo Da Vinci a créé de nombreux croquis au début des années 1500. L'un de ses objets dessinés, le «fumigène», utilisait de la fumée et de l'air chaud créés à partir d'un feu, pour alimenter une turbine qui faisait ensuite tourner la viande pendant la cuisson (figure. I.1). Bien que l'appareil n'utilise pas le rayonnement solaire, Da Vinci a initié l'idée selon laquelle l'air chaud monte, principe fondamental de la cheminée solaire [6].

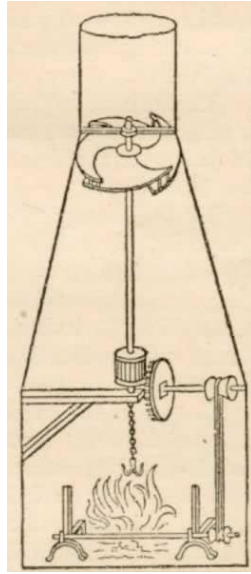


Figure. I.1. La brochette de Léonard de Vinci (1452-1519)

En 1903, l'ingénieur espagnol Isodoro Cabanyesa a proposé, pour la première fois, d'utiliser une cheminée solaire pour produire de l'électricité, dans son article intitulé « Projecto de motorsolar » [7]. Puis, en 1926, Bernard Dubos, un ingénieur français, a lancé la création d'une centrale solaire aéro-électrique en Afrique du Nord. Son projet était de construire la centrale électrique le long de la pente de l'Atlas, ce qui, selon lui, augmenterait la vitesse de l'air ascendant jusqu'à 50 m/s.

Un concept similaire à celui de la cheminée solaire est trouvé dans un brevet de Ridley déposé en 1956. L'inventeur a suggéré de créer un vortex en ajoutant un tourbillon au flux d'air, dans le collecteur et en injectant un courant d'air froid au centre de la cheminée. Il espérait qu'avec l'aide des forces de Coriolis, le vortex créé pourrait être maintenu même au-delà de l'évacuation de la cheminée, ce qui conduirait à de bonnes performances du système sans la nécessité d'une cheminée très haute [7].

Le premier prototype de cheminée solaire a été conçu par le Professeur J. Schlaich de Stuttgart, en 1968. Après 12 ans de calcul et de théorie, et avec des fonds fournis par le ministère allemand de la recherche et de la technologie, la construction a commencé à Manzanares (150 km environ au sud de Madrid). Une station expérimentale constituée d'une cheminée de 195 m de hauteur et 10 m de diamètre a été construite, entourée par un collecteur de 240 m de diamètre et de 2 m de hauteur, pour une production électrique de 50 kW (figure. I.2) [3]. En 1983, l'ensemble des organes principaux de la cheminée solaire ont été améliorés

grâce aux études menées sur leurs performances. Les résultats obtenus à partir de ce prototype ont prouvé que les centrales à cheminée solaire peuvent être une technologie de production d'électricité viable, bien qu'elles dépendent fortement des conditions environnementales (soleil, météo) et nécessitent une grande superficie de terrain [5].

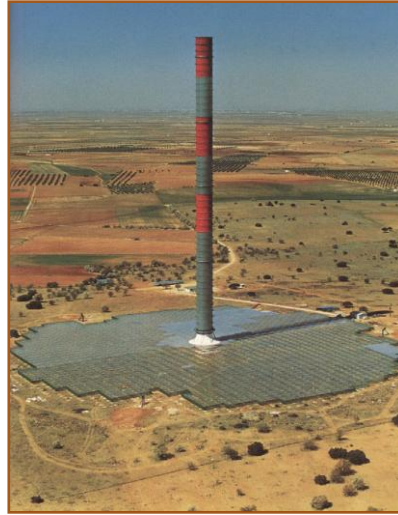


Figure. I. 2. Le prototype espagnol

En 2010, la société EnviroMission a commencé la construction de la première cheminée solaire à grande échelle, au monde. Le projet de cette société était de construire une centrale de 200 MW, avec une tour de plus de 990 m de haut et un diamètre de collecteur de 7 km (figure. I.3). En plus de pouvoir alimenter environ 100 000 foyers, cette usine permettrait une réduction de plus de 900 000 tonnes d'émissions de CO₂ à effet de serre par an. EnviroMission a choisi de placer trente-deux turbines de 6.25 MW sous la cheminée, captant ainsi le flux d'air horizontal, lorsqu'il est aspiré vers l'intérieur. La taille gigantesque et la réalisation de la structure attirèrent l'attention du monde entier et créèrent une attraction touristique populaire [8]. Les coûts de construction drastiques et les réglementations gouvernementales ont été néanmoins de gros obstacles pour la société, et ce projet ambitieux de la centrale à cheminée solaire, n'a pas encore vu le jour.



Figure. I .3.Le projet australien

En Chine, une tour solaire d'une puissance de 200 kW a été mise en fonctionnement le 27 décembre 2012.

D'autres projets voient le jour un peu partout dans le monde [6]. De nombreux pays comptent sur l'apport énergétique de cette technologie pour diminuer leurs émissions de gaz à effet de serre, conformément aux accords de Kyoto. D'autres souhaitent seulement obtenir l'énergie la moins chère et la moins polluante du marché, qui reviendrait aux alentours de 2 centimes d'euros le kWh.

D'autres techniques de cheminées solaires [6], telles que la construction de cheminées appuyées sur des falaises ou creusées dans une falaise ou encore la construction des cheminées solaires flottantes, sont utilisées.

Cette technologie peut également être intégrée à une maison ou à un bâtiment. Le but étant de créer une aération naturelle grâce à la convection naturelle et de récupérer l'énergie suivant la puissance engendrée par le flux d'air.

I.3. La centrale solaire à cheminée

La centrale à cheminée solaire est un système de production d'énergie électrique à partir du rayonnement solaire seul. Elle est constituée principalement d'un collecteur solaire ou serre, d'une cheminée ou tour, et d'une turbine éolienne. Le principe de

fonctionnement de ce système (figure. I.4), est basé sur l'utilisation du mouvement de l'air chauffé par le soleil.

Sous l'effet du rayonnement solaire, l'air contenu dans le collecteur s'échauffe, la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur produit un gradient de la masse volumique de l'air interne, qui s'élève dans la cheminée localisée au centre du collecteur.

Les turbines sont toujours placées à la base de la cheminée où la vitesse d'écoulement d'air est plus élevée, pour transformer le maximum d'énergie cinétique en énergie mécanique. Le générateur entraîné par la turbine transforme l'énergie mécanique en énergie électrique [4, 5]. Le nombre de turbines utilisées est, soit une turbine dont les pales couvrent la coupe transversale de la cheminée, soit des petites turbines distribuées sur toute la section de la cheminée. Il est possible également de placer entre le collecteur et la base de la cheminée, un grand nombre de petites turbines avec des axes horizontaux.

Cette simplicité confère des avantages majeurs en termes de coûts de construction, de maintenance, de robustesse, de durée de vie et d'accessibilité aux pays en voie de développement.

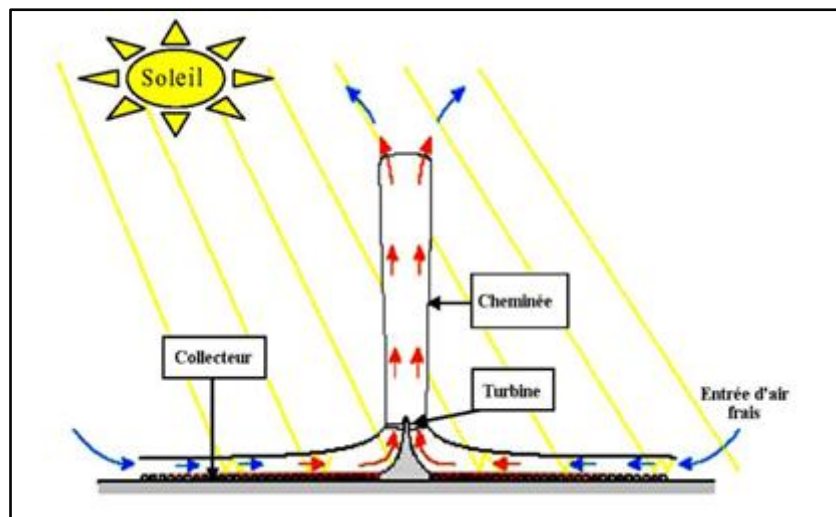


Figure. I.4. Principe de fonctionnement d'une cheminée solaire

I.3.1. Le collecteur

Partie chargée de chauffer l'air entrant dans la tour grâce à l'effet de serre, le collecteur est constitué uniquement d'un verre ou d'un film plastique recouvrant étiré horizontalement de deux à six mètres au-dessus du sol. Ce revêtement admet la composante « courte longueur

d'onde » du rayonnement solaire et retient la partie « grande longueur d'onde » émise par le sol chauffé. Ainsi, il s'échauffe et transfère sa chaleur à l'air qui s'écoule radialement au-dessus de l'extérieur de la cheminée.

I.3.2. Stockage de l'énergie

Il existe plusieurs méthodes de stockage d'énergie dans la cheminée solaire pendant la nuit. L'une d'elles, est le stockage de la chaleur par chauffage du sable, qui absorbe la chaleur du soleil pendant la journée et la libère pendant la nuit, ce qui permet le fonctionnement continu de la turbine et la production d'électricité 24h/24.

Une autre méthode consiste à stocker de l'énergie dans des tubes noirs remplis d'eau et mis côte à côte sur le sol. Ces derniers sont remplis d'eau une seule fois et restent par la suite fermés, de sorte que l'évaporation ne peut avoir lieu. Le volume d'eau dans les tubes est choisi pour correspondre à une couche d'eau d'une profondeur de 5 à 20cm, selon la puissance de production nocturne souhaitée (figure. I.5).

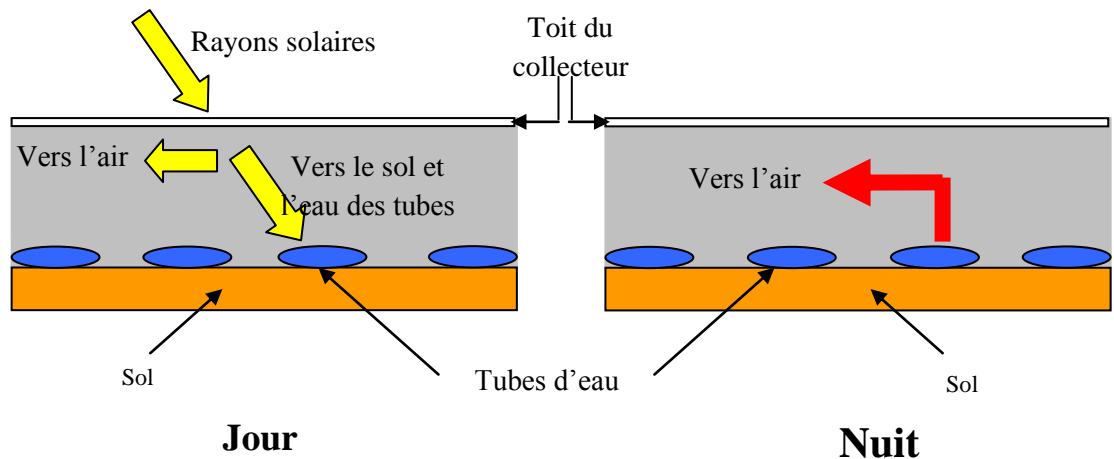


Figure. I.5. Système de stockage de la chaleur dans la cheminée solaire

Le transfert de chaleur entre l'eau contenue dans les tubes et l'air est beaucoup plus important que celui entre le sable et l'air. Ceci s'explique par la forte capacité calorifique de l'eau ($C_p = 4.185 \text{ kJ/kg. K}$), comparée à celle du sable ($C_p = 0.835 \text{ kJ/kg. K}$). L'eau à l'intérieur

des tubes peut stocker de la chaleur à partir du rayonnement solaire le jour et la libérer pendant les premières heures de la nuit à l'air, se dirigeant vers la turbine.

I.3.3. La Cheminée

La cheminée est délimitée par une paroi au centre de laquelle se situe la zone d'écoulement du fluide. Celle-ci crée un appel d'air à la sortie du collecteur et le potentiel de pression entre le haut et le bas de cette dernière entraîne le fluide, qui porte l'énergie cinétique et thermique, dans un mouvement ascendant.

I.3.4. La turbine

La turbine est située sur le parcours de l'écoulement du fluide. Elle transforme l'énergie cinétique du fluide en énergie mécanique, qui sera ensuite transformée en énergie électrique par le biais d'un générateur.

I.4. Les matériaux mis en œuvre pour construire de la cheminée solaire

Les premiers avantages, qui compensent l'inconvénient du gigantisme, sont ceux de la simplicité du principe de fonctionnement et le faible coût des matériaux mis en œuvre.

En plus de la lumière du soleil, « matériau » quasi-gratuit qui est naturellement à la base du fonctionnement d'un tel système, les matériaux de construction de la cheminée solaire sont :

- Le verre, ou éventuellement le polycarbonate, matériaux bien connus des maraichers et jardiniers pour la confection des serres, et qui joueront ici exactement le même rôle.
- Le béton pour la tour (qui peut être de l'acier), comme pour les tours de refroidissement des centrales nucléaires.
- L'eau et le plastique, pour le stockage de la chaleur entre le jour et la nuit.
- L'air, comme fluide moteur.

I.5. Avantages et inconvénients de la cheminée solaire

➤ Les avantages des cheminées solaires sont :

1. Le collecteur qui peut utiliser tout le rayonnement solaire, (direct et diffus). Ce qui est crucial pour les pays tropicaux où le ciel est souvent couvert. Le collecteur lui-même peut

également être utilisé comme une serre, ce qui pourrait être par conséquent, profitable à la production agricole.

2. Les centrales solaires à cheminée sont particulièrement adaptées pour produire de l'électricité dans les déserts et les terrains vagues ensoleillés.

3. Grâce au système de stockage de la chaleur, la cheminée solaire fonctionne 24 h par l'énergie solaire seule. Les tubes d'eau posés sous la verrière absorbent une partie de l'énergie rayonnée pendant la journée et la restituent dans le collecteur, la nuit.

4. Les cheminées solaires sont particulièrement fiables et non susceptibles de s'effondrer, en comparaison avec d'autres centrales électriques solaires. Les turbines, la transmission et la génératrice, soumis à un flux constant d'air, sont juste des pièces mobiles de l'usine. Cette structure simple et robuste garantit un fonctionnement qui nécessite peu d'entretien et pas de combustible.

5. Contrairement aux centrales électriques conventionnelles et également à d'autres installations solaires thermiques telles que les centrales solaires à concentration, les cheminées solaires n'ont pas besoin d'eau de refroidissement. Ceci est un avantage clé dans les nombreux pays ensoleillés qui ont déjà des problèmes majeurs de disponibilité d'eau potable.

6. Les matériaux de construction nécessaires pour les cheminées solaires, principalement le béton et le verre, sont disponibles partout en quantités suffisantes. Aucun dommage écologique et pas de consommation de ressources.

7. Les cheminées solaires peuvent être construites, aujourd'hui, même dans les pays les moins industrialisés. L'industrie locale disponible est tout à fait adaptée à leurs besoins et l'investissement dans une usine de fabrication de haute technologie n'est donc pas nécessaire.

8. Même dans les pays pauvres, il est possible de construire une grande centrale à cheminée, en utilisant les ressources et main-d'œuvre locales, ce qui contribue à la création d'emplois, et réduit considérablement les dépenses en devises étrangères et le coût de la production d'électricité.

- Les inconvénients sont :
 - Le coût de production d'électricité à partir d'une cheminée solaire est six fois plus élevé que celui produit par une centrale électrique au charbon [9]. Bien que le combustible ne soit pas nécessaire, le coût d'investissement est important.
 - Elle ne peut pas concurrencer le nucléaire en termes de puissance, (7 fois moins puissante qu'un réacteur nucléaire, pour les plus grandes tours, soit 200MW contre 1500MW) [10].

I.6. Station de l'énergie hydroélectrique pour les déserts

Les cheminées solaires sont techniquement très similaires aux centrales hydroélectriques, qui fournissant la seule source d'énergie renouvelable, réellement importante et efficace jusqu'à présent. Le toit du collecteur est l'équivalent du réservoir et la cheminée, de la cascade.

Les deux systèmes de production d'énergie comportent des turbines, qui ont toutes les deux, un faible coût de production d'énergie en raison de leur très longue durée de vie et du faible coût d'exploitation.

Bien que le collecteur et le réservoir soient similaires en termes de superficie, le collecteur peut être construit dans des zones arides sans difficulté.

Les cheminées solaires fonctionnent à l'air sec, à l'inverse des centrales hydroélectriques dont l'exploitation génère la corrosion et la cavitation, généralement causées par l'eau. Cependant, l'énergie électrique produite quotidiennement est faible par rapport aux centrales hydroélectriques où un faible pourcentage de la lumière solaire captée est converti en électricité, inconvénient qui peut être compensé par ses structures robustes et peu coûteuses, en plus de ses faibles coûts d'entretien.

Ces centrales solaires à cheminée requièrent de grandes surfaces pour l'installation du collecteur. Les déserts et les grandes zones inhabitées, où le rayonnement solaire est très élevé peuvent répondre à cette exigence. Bien que les déserts soient dispersés dans de nombreuses régions du monde, ils sont considérés comme un environnement complexe et difficile en raison de leurs conditions climatiques, ce qui nécessite un entretien permanent de tous les composants de la cheminée solaire.

I.7. Comparaison avec l'énergie éolienne

Les caractéristiques de l'unité de transmission de puissance (turbine et générateur d'électricité), pour les centrales à cheminées solaire, sont similaires dans de nombreux aspects à ceux des grandes éoliennes. La tâche de ces dernières et de l'unité de transmission de puissance est de convertir une quantité d'énergie dans le flux d'air en énergie électrique et d'alimenter un réseau.

Il existe néanmoins plusieurs différences importantes. En effet, le courant d'air dans le collecteur de la cheminée solaire est beaucoup plus régulier que le vent naturel, ce qui permet à la fois d'éviter le temps "calme" pendant lequel une éolienne ne produit pratiquement rien. De plus, l'éolienne doit être conçue pour résister aux rafales de vent et aux fortes tempêtes qui peuvent l'endommager, alors que les grands volumes du collecteur et de la cheminée agissent comme un tampon empêchant de grandes fluctuations de la vitesse du flux d'air, c'est-à-dire que les charges dynamiques sur les aubes de la turbine et tous les autres composants rotatifs sont plus faibles.

En outre, la turbine dans la cheminée solaire est fixe et la direction du flux d'air entrant est connue et reste constante, alors que le rotor de l'éolienne change de direction jusqu'à ce qu'il soit perpendiculaire à la direction du vent, pour capter sa force motrice maximale. Une éolienne ne peut produire de l'électricité que lorsque le vent venant en sens inverse a une vitesse minimale d'environ 4 m/s, (soit 14.5 km/h). Une boîte de vitesse est alors nécessaire pour augmenter la vitesse de rotation, en raison des faibles vitesses à proximité de l'axe, ce qui engendre une diminution de l'efficacité de l'alternateur.

Par ailleurs, il faut noter que la centrale à cheminée solaire peut produire de l'électricité toute la journée, même par temps nuageux, ainsi que pendant la nuit, grâce au stockage thermique.

Les éoliennes sont des turbines libres, ce qui réduit la puissance maximale pouvant être extraite du vent (59.3% de la puissance disponible dans le vent), alors que dans le cas des centrales à cheminées solaire, la turbine située dans la base de la cheminée est dans la trajectoire de l'écoulement d'air, le rendement total de la turbine est par conséquent théoriquement de 100%, et les pertes en bout sont plus faibles que dans le cas de l'éolienne.

Il faut néanmoins signaler que bien que la turbine de la centrale à cheminée solaire soit protégée des intempéries, elle doit résister à des températures élevées, générées par l'air chaud à l'intérieur du collecteur, contrairement aux éoliennes [11].

I.8. Le prototype de Manzanares

Une recherche théorique préliminaire et une large gamme d'expériences en soufflerie, ont conduit à la mise en place d'une installation expérimentale avec une puissance maximale de 50 kW, sur un site mis à disposition par la compagnie d'électricité espagnole (Union Electrica Fenosa), à Manzanares (environ 150 km au sud de Madrid) en 1981/82, avec des fonds fournis par le ministère allemand de la Recherche et de la Technologie (BMFT) (figure. I.6) [3].



Figure. I.6. Prototype de la cheminée solaire de Manzanares.

L'objectif de ce projet de recherche était de vérifier par des mesures sur le terrain, le rendement prévu, par les calculs basés sur la théorie et d'examiner l'influence de différents paramètres externes (conditions météorologiques) sur le fonctionnement du système.

Les principales dimensions et les caractéristiques techniques de l'installation sont consignées dans le tableau. I.1.

Tableau. I.1. Données techniques du prototype espagnol [3].

Hauteur de la cheminée	H_{ch}	194.60 m
Rayon de la cheminée	R_{ch}	5.08 m
Rayon du collecteur	R_{coll}	122 m
Hauteur du collecteur	H_{coll}	1.85 – 6 m
Nombre de pales de la turbine	N	4
Longueur de lame	L	5 m
Profil aérodynamique des pales de la turbine	Profil	FX W-151-A
Différence de température dans le collecteur	ΔT	20 K
Puissance produite	P	50 kW
Surface de la couverture du collecteur en plastique	S_p	40 000 m ²
Surface de la couverture du collecteur en verre	S_v	6000 m ²

La cheminée a été construite au niveau du sol, en utilisant une méthode de levage spéciale. La partie supérieure de la cheminée a été installée d'abord sur un anneau de levage sur le sol, qui a été porté sur la bague d'appui au moyen de presses hydrauliques (figure. I.7) [3,4].



Figure. I.7. Construction de la cheminée

La turbine est supportée indépendamment de la cheminée, sur un cadre en acier à 9 m au-dessus du niveau du sol. Elle est munie de quatre pales, qui sont réglables en fonction de la vitesse frontale de l'air, afin de minimiser les pertes de charge entre ces dernières. La vitesse verticale du vent est de 2.5 m/s au démarrage et peut atteindre un maximum de 15 m/s.

Le collecteur doit avoir une couverture translucide, durable et à prix raisonnable. Une variété de types de feuilles de plastique, ainsi que de verre a été sélectionnée afin de déterminer le meilleur matériau en termes de longévité et de coût [3 ,4].

Les différentes parties du prototype espagnol sont représentées sur la figure. I.8.



Figure. I.8. Les différentes parties du prototype espagnol.

La phase de construction achevée en 1982 a été suivie par une phase d'expérimentation, dont le but a été de démontrer le principe de fonctionnement d'une cheminée solaire.

Les objectifs de cette phase du projet sont :

- (1) d'obtenir des données sur l'efficacité de la technologie développée
- (2) de démontrer la bonne fiabilité du fonctionnement de la centrale électrique
- (3) d'enregistrer et d'analyser le comportement opérationnel et les relations physiques sur la base de mesures sur une longue période.

Afin de parvenir à une compréhension approfondie des relations physiques et pouvoir identifier et faire évoluer les points d'approche pour des améliorations possibles, un programme de simulation a été développé décrivant les différents composants, leurs performances et leurs interactions dynamiques. Ce programme a été validé par des mesures expérimentales. Aujourd'hui, c'est un outil de développement qui prend en compte tous les effets connus jusqu'ici et avec l'aide duquel, le comportement thermodynamique des installations, à grande échelle et dans des conditions météorologiques données, peut être calculé à l'avance.

Les heures de service, par jour, pendant une année d'exploitation complète, sont illustrées sur la figure. I.9. Pour permettre une comparaison, le nombre d'heures d'ensoleillement mesuré avec plus de 150 W/m^2 de rayonnement solaire et le nombre maximum théoriquement possible d'heures d'ensoleillement (du lever au coucher du soleil) sont également représentés. L'analyse de cette figure a permis de noter qu'en 1987, l'installation a totalisé 3197 heures de fonctionnement, soit en moyenne, 8.8 heures par jour. Dès que la vitesse de l'air dans la cheminée dépasse 2.5 m/s , l'installation démarre automatiquement et se connecte au réseau public [3]. Il apparaît également que la centrale à cheminée solaire a fonctionné en continu, même par temps nuageux, bien que la production soit réduite [5].

Temps de fonctionnement quotidien

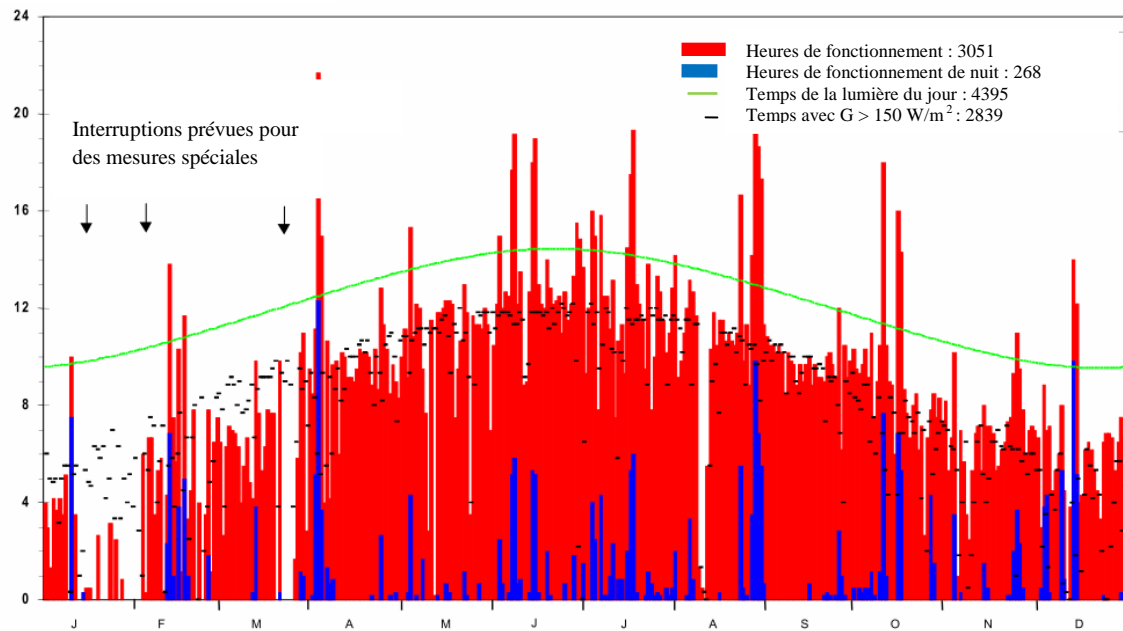


Figure. I.9. Heures de fonctionnement de la cheminée solaire de Manzanara (année 1987) [3].

Ces résultats montrent que les composants sont très fiables et que le système dans son ensemble est capable de bien fonctionner toute l'année, de jour comme de nuit. De plus les centrales à cheminée solaire présentent de nombreux avantages, parmi lesquels :

- Elles utilisent le rayonnement solaire global (direct et diffus), et peuvent donc fonctionner par temps nuageux.
- Le stockage thermique de l'énergie dans le sol assure la continuité de la production de l'électricité pendant la nuit.

Pendant la phase expérimentale, cette centrale a permis d'alimenter, de Juillet 1986 à Février 1989, le réseau espagnol en fonctionnement entièrement automatisé, totalisant 8611 heures.

Bien que le coût de production d'électricité dans la cheminée solaire soit élevé, par rapport aux centrales thermiques classiques (coût du kWh cinq fois plus élevé), les résultats de Manzanara montrent que la cheminée solaire est une alternative possible aux centrales électriques classiques, surtout si des améliorations du système permettaient de réduire le coût du kWh produit.

Aujourd'hui, il existe des plans pour la cheminée solaire à grande échelle en Australie, en Afrique du sud, au Brésil et en de nombreux autres sites, (dans les plus régions ensoleillées du monde).

I.9. Les projets

Sans être exhaustif, nous avons recensé dans la littérature:

I.9.1. Le projet australien

Un projet de tour solaire, appelé Projet de Buronga, initié en 2011, est développé en Australie par la société EnviroMission.

Spécifications du projet :

- Une cheminée de 990 m de haut.
- Un collecteur de 7 km de diamètre, soit 38.5 km² de verre et de plastique.
- Température de l'air chauffé dans la cheminée : 70 °C.
- Vitesse de l'air dans la cheminée : 15 m/s (54 km/h).
- 32 turbines.
- Puissance produite : 200 MW.

L'objectif à long terme de ce projet est de remplacer l'ensemble des sources d'énergie fossile (uranium inclus), pour la production d'électricité centralisée

Il s'agit d'un des projets les plus ambitieux de la planète, pour la production d'énergie renouvelable, sûre et propre (200 MW de puissance électrique, de quoi approvisionner en électricité environ 200 000 logements)[8]. En effet, les centrales solaires existantes ou en projet sont uniquement de l'ordre de 10 MW, soit 20 fois moins. Toutefois, l'énergie produite reste largement inférieure à celle d'un réacteur nucléaire moderne, (7 fois moins).

Le coût d'investissement serait d'environ 400 millions d'euros, soit 2 €/W. A titre comparatif, un système photovoltaïque (en 2016) coûte environ le double, tandis que la centrale solaire thermodynamique (11 MW) a coûté 3.2 €/W, (soit 1.6 fois plus) [10]. Le kWh fourni resterait néanmoins encore, six fois, plus cher que l'électricité produite à partir du charbon [9], (qui représente 95% de la production en Australie).

Ce qui frappe dans ce projet est évidemment ses dimensions. Il n'existe probablement, dans l'histoire industrielle de l'humanité, que très peu d'exemples de franchissement d'un pas aussi important entre expérimentation et mise en œuvre effective, pour un projet d'un tel coût. Une telle audace est donc justifiée et finalement raisonnable.

Une première raison est que, même si les calculs à la base de ce projet sont complexes (mécanique des fluides turbulents), le changement d'échelle n'en change pas qualitativement la nature. L'essentiel est donc que le prototype ait apparemment bien rempli son rôle de fournisseur d'information. Pour le reste, une modélisation construite avec précision et bon sens permet de prédire assez correctement le comportement des structures d'une telle envergure.

En 2011, EnviroMission a lancé le développement d'une première version plus petite et moins coûteuse (50 MW), avec une cheminée en béton précontraint, haute résistance [10]. D'après EnviroMission, le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord (MENA) dont l'insolation est la plus élevée au monde offrent une opportunité remarquable pour cette technologie. La société envisage ainsi de réaliser des projets de centrales à cheminée solaire dans cette région, d'ici 2030.

I.9.2. Le projet espagnol

Un autre projet de tour solaire, si le financement est trouvé, est actuellement développé en Espagne dans la localité de Fuenteel Fresno, un village de la province de Ciudad Real. Les travaux devraient être menés par les entreprises espagnoles Campo3 et Imasa, en collaboration avec la compagnie allemande Schlaich Bergermann.

Spécifications du projet :

- Une cheminée de 750 m de haut (qui serait la plus haute en Europe)
- Un collecteur de 3 km de diamètre, couvrant 350 hectares, dont 250 hectares pourraient être utilisés pour la culture de légumes sous serre.
- Vitesse de l'air dans la cheminée : 43 km/h.
- Puissance de l'installation : 40 MW, (soit la demande en électricité d'environ 120000 personnes).
- Coût du projet : 240 millions d'euros [10].

I.9.3. Le projet namibien

Une société sud-africaine de propriété intellectuelle *Hahn & Hahn*, a annoncé qu'elle prévoyait la construction, à un coût de 150 millions de dollars US, d'une tour solaire de 400 MW en Namibie, dans le cadre des efforts pour combler le déficit de l'approvisionnement en électricité dans ce pays. Cette tour solaire, baptisée *Green tower*, d'une hauteur de 1.5km et d'un diamètre de 280 m, dotée d'une serre d'une superficie de 38.5 km² (7 km de diamètre)

pourra générer un courant d'air ascendant aux turbines d'entraînement, et produire 400 MW d'électricité. Le directeur général de *Hahn & Hahn*, a annoncé que le projet avait été approuvé par le gouvernement namibien, en ajoutant que la société nationale de distribution de l'électricité financera en partie, l'étude de faisabilité [10].

I.9.4. Le projet chinois

Une cheminée solaire de 27.5 MW sera construite en Chine à Jinshawan, Wuhai, Mongolie et sera financée par une entreprise locale en Mongolie intérieure, avec 1.38 milliards de Yuans (160 millions d'euros). La capacité totale planifiée de ce projet est de 27.5 MW. La superficie totale des serres servant de collecteur serait de 2.780.000 m².

Les travaux ont été effectués en trois phases :

- **La première phase** du projet (Mai 2009 - Décembre 2010) a permis l'édification d'un prototype de cheminée solaire de 200 kW occupant 40000 m² de surface de désert et dotée d'une tour ou cheminée de 53 m de haut et de 18 m de diamètre, représentant une dépense de 1 million de Yuans. La centrale à cheminée solaire a été mise en fonctionnement le 27 décembre 2012.
- **La deuxième phase** du projet (Février 2011- Décembre 2011) s'est clôturée par la réalisation d'une centrale à cheminée solaire de 2.2 MW, occupant 220.000 m² et dont le coût d'investissement a été de 110 millions de Yuans ;
- **La troisième phase** du projet a été effectuée entre Janvier 2012 et Décembre 2013, pour permettre la construction d'une centrale à cheminée solaire de 25.1 MW, avec un collecteur qui occupe une région désertique de 2.510.000 m², l'investissement prévu est de 1260 000 000 Yuans (1.2 milliards de Yuans Chinois) [10].

Ce projet est toujours en cours de réalisation.

I.10. Synthèses de travaux sur les centrales solaires à cheminée

De nombreuses études expérimentales, théoriques, numériques et de simulation par le logiciel FLUENT et ANSYS FLUENT, sur les centrales solaires à cheminée ont été menées. La structure et le design de la cheminée, la performance du collecteur, le stockage de l'énergie, le développement de la turbine, ont retenu l'attention de multiples chercheurs.

I.10.1. Les études expérimentales

En 1982, le premier prototype de la centrale solaire à cheminée de 50 kW a été construit et exploité avec succès à Manzanares, en Espagne. Les principes de base et les résultats préliminaires des tests ont été rapportés par Haaf et al. Le bilan énergétique, les critères de conception et d'analyse des coûts ont été discutés. Les auteurs ont fait l'état des résultats d'essais préliminaires de la centrale à cheminée solaire. Suite à cette série de tests, de nombreuses études ont été menées et continuent de l'être, jusqu'à présent [4, 5].

D'autres études expérimentales ont été réalisées et de nombreuses centrales solaires à cheminée de différentes tailles ont été construites. En 1983, Krisst [12] a construit une cheminée solaire à petite échelle d'une puissance de sortie de 10 W, dotée d'un collecteur de diamètre de 6m et d'une cheminée de 10m de hauteur. Plus tard, une petite installation (une cheminée de 2 m de hauteur et un collecteur de 9 m²) a été construite par Kulunk [13] en 1985, en Turquie et a permis de produire 0.14Wd'électricité.

Pasumarthi et al [14] ont construit un modèle de démonstration de la cheminée solaire en Floride. Les auteurs ont mené des expériences sur les distributions de température et de vitesse du flux d'air à l'intérieur du collecteur.

Zhou et al [15] ont étudié expérimentalement une cheminée solaire de 8m de hauteur et de 10m de diamètre du collecteur, et déterminé la distribution de température dans l'installation. Ils ont construit plusieurs prototypes afin d'étudier la performance des systèmes SCPP de différentes dimensions. Les résultats montrent que la température dans la cheminée croît le matin en raison de l'augmentation du rayonnement solaire, ce qui conduit à chauffer l'air intérieur du collecteur à une température suffisamment élevée pour générer une forte poussée de celui-ci vers le haut. La différence de température entre la sortie du capteur et la température ambiante peut atteindre 24.1°C, ce qui génère la force motrice du flux d'air dans la cheminée solaire.

Kasaeian et al [16] ont mené à l'université de Zanjan, en 2011, une étude expérimentale, des effets climatiques sur l'efficacité d'une cheminée solaire, avec un collecteur de 10 m de diamètre et une cheminée de 12 m de hauteur. Les auteurs ont noté qu'une vitesse (maximale) de l'air de 2,9 m/s a été atteinte, alors que la vitesse de l'air à l'entrée du collecteur était autour de zéro. Par ailleurs, les auteurs ont noté que sous une température ambiante de 34°C, la température maximale de 60°C a été atteinte, entre 13h30 et

14h30. Ils ont en outre montré que la diminution de la surface de l'entrée du collecteur a un effet bénéfique sur la puissance de la cheminée solaire.

Zuo et al [17] ont proposé un dispositif expérimental à petite échelle pour la cheminée solaire en intégrant le dessalement de l'eau de mer et étudié la performance du système en fonction des conditions météorologiques. Les résultats expérimentaux montrent que le système intégré peut réaliser le double objectif ciblé de la production simultanée de l'électricité et de l'eau douce.

Kalash et al [18] ont construit, en 2013, sur le campus sud de l'université de Damas, en Syrie, un prototype avec un collecteur triangulaire. Le prototype a été utilisé pour étudier la performance du collecteur en hiver. Les résultats montrent que la température de l'air a atteint une valeur maximale de 19 °C, ce qui génère une vitesse de courant ascendant dans la cheminée, d'une valeur maximale de 2.9 m/s. Les auteurs ont également remarqué que la couche de stockage, absorbe le rayonnement solaire, du matin jusqu'à midi et libère la chaleur stockée, lorsque ce dernier commence à diminuer, en début d'après-midi, ce qui assure le fonctionnement continu de la cheminée solaire.

Ghalamchi et al [19] ont construit en 2015, une cheminée solaire avec un collecteur de 3m de diamètre et une cheminée de 2m de hauteur. Les distributions de la température et de la vitesse de l'air, sous différentes conditions météorologiques, ont été mesurées. Les auteurs ont montré que la différence de température entre l'entrée de la cheminée et la température ambiante, atteint 26.3 °C, tandis que, une vitesse maximale de l'air de 1.3 m/s a été enregistrée à l'intérieur de la cheminée. Ils ont également étudié l'effet de la hauteur d'entrée du collecteur sur la production d'électricité, les résultats montrent que la réduction de la taille de cette dernière, a un effet positif sur les performances de la cheminée.

Plus tard, Ghalamchi et al [20] ont construit en 2016, un nouveau prototype, avec une hauteur de la cheminée de 3 m et un diamètre du collecteur de 3 m, pour obtenir de nouvelles données expérimentales. Leur étude expérimentale, a révélé qu'une hauteur d'entrée du collecteur de 6 cm donne la meilleure performance pour une cheminée de 3m de hauteur et 10 cm de diamètre. Les auteurs ont montré également que l'absorbeur en aluminium a un taux de transfert de chaleur supérieur à celui en fer.

Lal et al [21] ont présenté en 2016 une étude en utilisant un modèle expérimental réduit et un code commercial CFD. La performance thermique de la cheminée solaire a été étudiée et la distribution de température à travers le collecteur est examinée. Les résultats montrent que la température et la vitesse maximales de l'air dans le collecteur sont respectivement de 42.4 °C et 12.2 m/s, à 14 :00 h, d'une journée type du mois de Mai 2013. L'efficacité énergétique a été estimée à 3.53%, à 12 :00 h de la journée. Les auteurs ont également montré que l'efficacité exégetique est également très faible, de l'ordre de 8% à 12 :00.

I.10.2. Les études théoriques

En parallèle, de nombreuses études théoriques sur la centrale solaire à cheminée, ont été menées.

Pasumarthi et al [22] ont élaboré un modèle mathématique. Les équations de continuité, de conservation de mouvement et d'énergie, régissant l'écoulement unidimensionnel de l'air chaud dans la cheminée solaire, ont été établies. Les auteurs ont étudié l'influence des conditions environnementales et de la géométrie sur l'écoulement de l'air, les caractéristiques de transfert de chaleur et la performance de la cheminée solaire.

En se basant sur le prototype de Manzanares, en Espagne, Haaf et al. [5] ont établi un bilan énergétique. Les critères de conception et l'analyse des coûts dans le système sont présentées dans leur étude.

Gannon et al ont mené une étude concernant l'optimisation de la forme de la cheminée. Un autre travail des mêmes auteurs [23], a porté sur la description thermo-hydrodynamique du système. Pour cela ils ont utilisé une méthode analytique pour décrire les transferts thermiques par convection dans la cheminée solaire. La même étude a été faite par Pretorius et al [24].

Ming et al [25] ont proposé un modèle mathématique pour évaluer la pression statique relative et la force motrice du système de production d'énergie, par la cheminée solaire. Plus tard, les auteurs ont développé un modèle global pour évaluer la performance d'une centrale solaire à cheminée, dans lequel les effets de différents paramètres sur les pressions statique et relative, la force motrice et l'efficacité ont été étudiés [26].

Chergui et al [27] ont présenté une analyse des performances d'une centrale solaire à cheminée, en Algérie. Les auteurs ont trouvé que la centrale solaire à cheminée pouvait

produire de 140 à 200 kW d'électricité, sur le site d'Adrar, au cours de l'année, selon une estimation faite sur la moyenne mensuelle d'ensoleillement.

Bilgen et al [28] ont mené des études sur les cheminées solaires en hautes latitudes. Les auteurs ont développé un modèle mathématique calculé sous MATLAB, basé sur les données mensuelles moyennes météorologiques et un cycle thermodynamique. La performance thermique de la production nominale d'une centrale de 5 MW dans trois emplacements au Canada, a été étudiée. Les résultats ont montré que la performance thermique globale des cheminées solaires, en hautes latitudes, est environ 0.48 %, et donc légèrement meilleure que celle avec des collecteurs horizontaux, dans les régions du sud.

Koonsrisuk et al [29] ont proposé une étude numérique pour étudier les changements dans les propriétés d'écoulement de l'air causés par les variations de la zone d'écoulement. Ils ont montré que la combinaison du collecteur incliné et de la cheminée à sommet divergeant, peut produire une puissance atteignant jusqu'à des centaines de fois celle de la centrale à cheminée solaire conventionnelle.

Ming et al [30] ont introduit un modèle numérique pour examiner l'influence de la géométrie de la cheminée solaire sur la performance du système. Les auteurs ont utilisé le prototype de Manzanares. Leur modèle a permis d'évaluer les performances d'une centrale solaire à cheminée et de mettre en évidence les effets de la hauteur et du diamètre de la cheminée solaire du diamètre du collecteur ainsi que celui de l'irradiation solaire, sur la puissance développée et sur l'efficacité du système.

Sangi [31] a proposé un modèle mathématique pour étudier la performance de la cheminée solaire dans certaines parties de l'Iran et estimer l'énergie électrique produite. L'effet de diverses conditions climatiques et dimensions structurelles sur l'énergie produite, a été examiné.

Ming et al [32] ont effectué une analyse de l'écoulement d'air dans la cheminée solaire et ont présenté le cycle thermodynamique du système afin d'analyser la performance thermique de la cheminée solaire.

I.10.3. Les études de simulation et numériques

La littérature disponible concernant les études de simulation et numériques d'une cheminée solaire est très vaste. De nombreux chercheurs ont mené plusieurs analyses sur la cheminée solaire à l'aide des logiciels commerciaux (CFD), FLUENT et ANSYS FLUENT.

Sangi et al [33] ont présenté une simulation numérique en 2D, d'une cheminée solaire et analysé les profils de température, de vitesse et de pression dans le collecteur pour différents rayonnements solaires.

Pastohr [34] a développé un modèle mathématique et présenté une analyse CFD pour la cheminée solaire. Les travaux de l'auteur ont conduit à une nouvelle connaissance des températures dans le collecteur et à l'amélioration des processus thermodynamique et dynamique des fluides dans la cheminée solaire.

Une simulation numérique englobant des modèles de rayonnement, de charge solaire et de turbines est proposée par Guo et al [35], pour simuler les performances de la cheminée solaire et étudier les effets du rayonnement solaire, de la perte de charge de la turbine et de la température ambiante sur les performances du système. Dans une autre étude, Guo et al, ont étudié le rapport optimal de perte de charge de la turbine pour une cheminée solaire, à l'aide d'une approche analytique et d'une simulation numérique en 3D. Les auteurs ont examiné l'influence du rayonnement solaire et de la température ambiante sur le rapport optimal de perte de charge de la turbine. Pour une centrale solaire à cheminée (SCPP), celui-ci est étudié à l'aide d'une approche analytique et des simulations numériques en 3D. Les résultats indiquent que le rayonnement solaire et la température ambiante ont une influence significative sur le rapport optimal de perte de charge de la turbine [36].

Hu et al [37] ont réalisé une simulation CFD de la cheminée solaire sur une grande surface, afin d'étudier l'effet géométrique du mur de guidage sur la puissance de sortie d'une cheminée solaire. Ils ont également présenté la variation du débit massique après l'ajout d'un mur de guidage dans le prototype expérimental à petite échelle.

Gholamalizadeh et al [38] ont mené une analyse en 3D, pour simuler l'effet de serre et les caractéristiques de transfert de chaleur, à travers le système en utilisant un modèle de rayonnement à deux bandes.

Pour étudier l'importance de l'effet de serre sur les caractéristiques du flux, du transfert de chaleur et la force de flottabilité ascendante dans les systèmes de centrales solaires à cheminée. Gholamalizadeh et al [39] ont développé un modèle CFD pour l'analyse de la cheminée solaire. Les répartitions de la température et de la vitesse pendant le fonctionnement de la turbine, pour diverses irradiances solaires, ont été examinées. Les auteurs ont réalisé un modèle CFD en 3D, pour une cheminée solaire couplée avec une turbine réelle. Ils ont analysé l'écoulement de l'air et le transfert de chaleur dans le système à cheminée solaire et comparé les résultats du modèle à ventilateur inversé avec ceux de la turbine réelle.

Ming et al [40] ont effectué une simulation numérique d'une cheminée solaire couplée à une turbine réelle. Les auteurs ont présenté les résultats de la simulation du prototype espagnol avec une turbine à trois pales ainsi que ceux d'une cheminée solaire de type MW à turbine à cinq pales.

Ming et al [41] ont traité différents modèles mathématiques pour le collecteur, la cheminée et le système de stockage de chaleur et analysé l'influence du rayonnement solaire sur les caractéristiques du stockage de chaleur. Des modèles mathématiques et numériques pour l'efficacité des cycles idéal et réel ont été établis. Plus tard, les mêmes auteurs [42] ont entrepris une simulation numérique détaillée pour étudier l'influence de la vitesse du vent sur les performances de la cheminée solaire. En 2017, Ming et al [43] ont mené une analyse numérique tridimensionnelle du dessalement de l'eau de mer à l'aide d'une centrale à cheminée solaire.

Backström et al [44] ont mené une étude relative à l'optimisation des paramètres des turbines. Trois types de turbine (turbine à axe simple vertical, à axe multiple vertical et à axe multiple horizontal), ont été comparés. Les résultats obtenus semblent en faveur de turbine à axe simple vertical en termes d'efficacité et de rendement d'énergie, du fait de moindres pertes mécaniques, cependant son moment de torsion est énorme. Dans le même contexte Denantes et al [45] ont présenté une étude sur les paramètres des turbines.

Pasthor et al [46] ont procédé à une simulation numérique pour améliorer la description du mode de fonctionnement et de l'efficacité de couplage de toutes les parties de la cheminée solaire, y compris la terre, le collecteur, la cheminée et la turbine.

Xu et al [47] ont réalisé une simulation numérique en 2D pour la cheminée solaire comprenant le collecteur, la cheminée, la turbine et le stockage d'énergie. Les distributions de pression, de vitesse et de température du système ont été analysées. Les effets du rayonnement solaire et de la chute de pression à travers la turbine, sur le flux et le transfert de chaleur, sur la puissance de sortie et la perte d'énergie du système ont été également évalués.

Alibakhsh et al [48] ont entrepris une simulation tridimensionnelle pour le prototype espagnol en considérant les aubes de la turbine. Les effets de la hauteur de la cheminée, du diamètre du collecteur, des aubes de la turbine et de la vitesse de rotation, sur le rendement du système ont été examinés

Guo et al [49] ont proposé une simulation numérique en 3D, afin d'estimer les performances d'une centrale à cheminée solaire. Les modèles de rayonnement, de charge solaire et de ventilateur sont intégrés dans cette approche. Les effets du rayonnement solaire, de la perte de charge de la turbine et de la température ambiante, sur la performance du système ont été étudiés. Dans une autre étude, Li et al [50] ont proposé un modèle théorique pour évaluer les performances d'une centrale à cheminée solaire. Ce modèle prend en compte les effets du flux et des pertes de chaleur, ainsi que les taux de variation de température à l'intérieur et à l'extérieur de la cheminée.

Zhou et al [51] ont étudié numériquement l'énergie électrique produite d'un prototype de centrale à cheminée solaire. La puissance de sortie pour différents rayonnements solaires, surfaces du collecteur et hauteurs de la cheminée, a été traitée.

Rabehi et al [52] ont mené une étude numérique sur la performance d'une cheminée solaire installée en Algérie, en utilisant le logiciel Fluent. Les auteurs ont analysé la puissance électrique générée, pour quatre régions de l'Algérie (Constantine, Ouargla, Adrar et Tamanrasset). Les résultats de la simulation montrent que la puissance électrique la plus élevée, évaluée à 73 kW, sur l'année est relative à la région de Tamanrasset. Il a été également noté pour cette région, que la puissance horaire maximale produite, est de l'ordre de 113 kW (en Juin), alors que pour les autres régions, la puissance est quasiment la même (environ 109 kW). Dans une autre étude, Rabehi et al [53] ont entrepris une simulation numérique en 3D d'une cheminée solaire en adoptant le modèle de ventilateur, dans lequel la configuration détaillée de la turbine n'est pas prise en compte, mais traitée comme un disque infiniment mince. L'effet du fonctionnement de la turbine, de la chute de pression à travers la turbine et

du rayonnement solaire a été étudié. Les résultats numériques montrent, que pendant le fonctionnement de la turbine, la température et la pression à l'intérieur du collecteur augmentent, tandis que la vitesse diminue, dû à la force de traînée produite par la turbine. Par ailleurs, les auteurs ont noté, d'une part l'effet significatif du rayonnement solaire sur la vitesse du courant ascendant de l'air et d'autre part, que si l'influence de la perte de charge de la turbine sur l'efficacité du collecteur est faible, elle est considérable sur la puissance.

Chapitre II : Modélisation mathématique

II.1. Introduction

La modélisation physique des phénomènes impliqués dans la cheminée solaire est complexe. En effet, les transferts de chaleur par conduction, par convection et par rayonnement, la turbulence de l'air dans le collecteur et les caractéristiques thermo-physiques du fluide dans la zone d'étude, doivent être pris en compte simultanément.

L'étude de la performance de la cheminée est basée sur le modèle mathématique développé par Schlaich en 1995 [3].

Dans ce chapitre, la formulation mathématique du problème physique, équations de Navier-Stokes, équation de l'énergie et modèle de turbulence, est présentée, pour deux cas de simulation, bidimensionnel et tridimensionnel, avec et sans turbine.

II.2. Modèle physique

Dans le cadre de notre travail, le prototype espagnol, constitué d'une cheminée de 195m de hauteur et d'un rayon de 5 m et d'un collecteur de 122 m de rayon et de 2 m de hauteur, est choisi comme modèle physique pour la simulation numérique. Le problème qui doit être traité est axisymétrique, pour les géométries, en 2D et en 3D, sans turbine et correspond à la moitié du champ d'écoulement. Le collecteur est construit en matériaux transparents ou semi-transparentes, soit du verre ou un film de plastique PVC tendu horizontalement et soulevé au-dessus du sol. Nous avons opté pour le verre dont les propriétés physiques sont meilleures que celles du plastique. Au centre du collecteur, se trouve une tour métallique de 0.00125 m d'épaisseur.

Trois géométries seront étudiées :

- La géométrie bidimensionnelle de la cheminée solaire (figure. II.1).
- La géométrie tridimensionnelle de la cheminée solaire, couplée à une turbine réelle (figure. II.2).
- La géométrie tridimensionnelle de la cheminée solaire, en adoptant le modèle de ventilateur (figure. II.3).

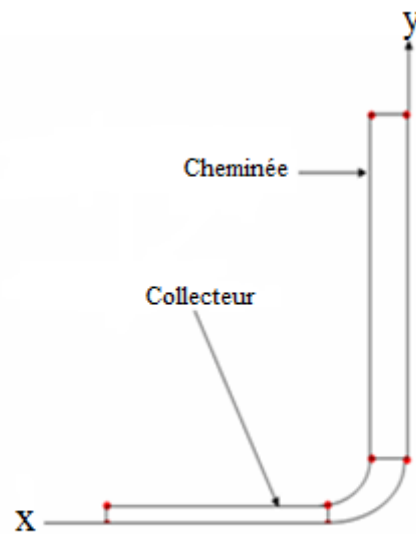


Figure. II.1. Géométrie bidimensionnelle de la cheminée solaire

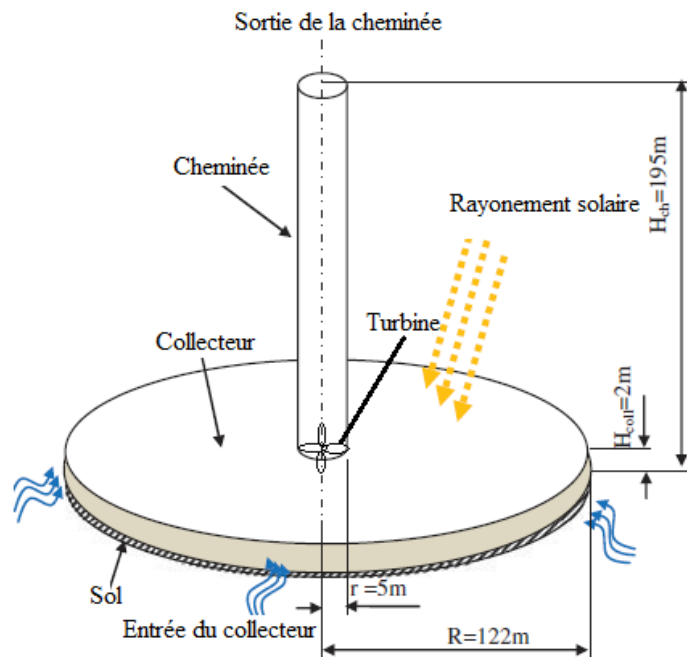


Figure. II.2. Géométrie tridimensionnelle de la cheminée solaire couplée à une turbine réelle

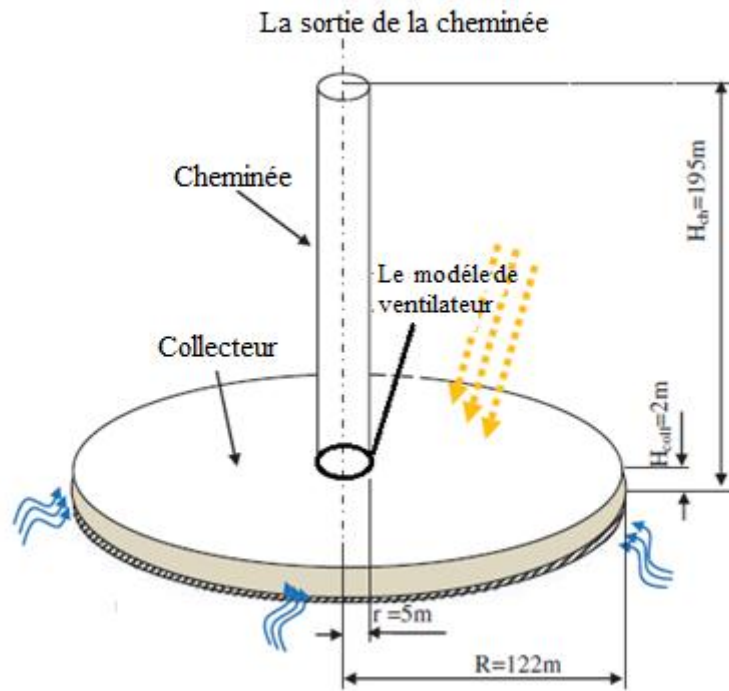


Figure. II.3. Géométrie tridimensionnelle de la cheminée solaire en adoptant le modèle de ventilateur

II. 3. Modélisation mathématique

II. 3. 1. Equations générales

Les équations exprimant les phénomènes d'écoulement, sont déduites des lois physiques de la conservation de la masse, de quantité de mouvement et de l'énergie.

a) Equation de continuité

L'équation de continuité est établie à partir du principe de conservation de la masse (fluide incompressible), et a pour expression [58]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \operatorname{div} \vec{V} = \rho q_v \quad (\text{II.1})$$

Où:

ρ : Masse volumique du fluide.

\vec{V} : Vecteur de vitesse.

q_v : Débit volumique, lié au puits ou à la source de matière.

b) Equations de quantité de mouvement

En utilisant la deuxième loi de la dynamique, et après avoir simplifié l'équation de base, nous obtenons le taux de variation de la quantité de mouvement dans un volume de contrôle, qui est égal à la somme de toutes les forces externes, qui lui sont appliquées et qui s'écrit comme suit [58]:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0} g - \frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \Delta V + \frac{1}{3} \nu \text{grad}(\text{div} V) \quad (\text{II.2})$$

c) Equation de l'énergie

L'équation d'énergie résulte du premier principe de la thermodynamique, qui exprime la relation entre les différentes formes d'énergie, soit [58]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + T \beta \frac{\partial P}{\partial t} + q + \bar{\phi} \quad (\text{II.3})$$

Avec:

λ : Conductivité thermique

β : Coefficient de dilatation à pression constante

C_p : Chaleur massique du fluide.

q : Source de chaleur interne.

$\bar{\phi}$: Fonction de dissipation

T : Température du fluide.

d) Hypothèses simplificatrices

Afin de simplifier le modèle mathématique, les hypothèses et approximations suivantes ont été adoptées:

- L'écoulement est incompressible. Pour des écoulements de fluide compressible à nombre de Mach relativement petit, on se ramène au cas d'écoulement de fluide incompressible.

- L'écoulement est stationnaire ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$).

- Le modèle de turbulence $k - \varepsilon$ standard est adopté.

- Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable au sein du fluide.

- Pas de source de chaleur ni de réaction chimique.

- L'approximation de Boussinesq est appliquée :

$$\rho_T = \rho_0(1 - \beta[T - T_a]) \quad (\text{II.4})$$

T étant la température du fluide au point donné, T_a , la température de référence, et β le coefficient de dilatation thermique défini par :

$$\beta = -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (\text{II.5})$$

II. 3. 2. Cas de la géométrie bidimensionnelle

L'écoulement tourbillon d'un fluide newtonien incompressible dans le cas bidimensionnel stationnaire est régi par des équations de base, l'équation de continuité et les équations de Navier Stokes.

a) Équation de continuité

L'équation de continuité à travers un volume de contrôle est exprimée dans les coordonnées cartésiennes par :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.6})$$

b) Équations de conservation de la quantité de mouvement

Les équations de Navier Stokes sont données dans les coordonnées cartésiennes par :

- Suivant la direction (x):

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.7})$$

- Suivant la direction(y):

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho \beta (T - T_0) \quad (\text{II.8})$$

c) Equation de l'énergie

$$\rho C_p u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho C_p v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (\text{II.9})$$

d) Modèle de turbulence $k - \varepsilon$

Le modèle de turbulence $k - \varepsilon$ standard est utilisé dans notre travail. Il suppose que le flux est entièrement turbulent, de sorte que les effets de la viscosité moléculaire peuvent être négligés.

L'énergie cinétique de turbulence, k et son taux de dissipation, ε , sont calculés à partir des équations de transport :

$$\frac{\partial(\rho k u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho k v)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + G_k + G_b + \rho \varepsilon \quad (\text{II.10})$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \varepsilon v)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{II.11})$$

Avec:

G_k : Génération d'énergie cinétique de turbulence, due aux gradients de vitesse moyenne

G_b : Génération d'énergie cinétique de turbulence, due à la flottabilité

μ_{eff} : Viscosité turbulente

$C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $\alpha_k = 1.0$ et $\alpha_\varepsilon = 1.3$ [40].

La troisième constante, $C_{3\varepsilon}$, n'est pas spécifiée, mais calculée en utilisant la relation suivante :

$$C_{3\varepsilon} = tg \left| \frac{v}{u} \right| \quad (\text{II.12})$$

II. 3.3. Cas de la géométrie tridimensionnelle

Pour la géométrie tridimensionnelle, les hypothèses sont identiques à celles du cas précédent, les expressions des équations seront en 3D.

a) Equation de continuité

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{II.13})$$

b) Équations de conservation de la quantité de mouvement

- Suivant la direction (x):

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II.14})$$

- Suivant la direction (y):

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g(T - T_0) \quad (\text{II.15})$$

- Suivant la direction (z):

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II.16})$$

c) Equation de l'énergie

$$\rho C_p u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho C_p v \frac{\partial T}{\partial y} + \rho C_p w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (\text{II.17})$$

d) Modèle de turbulence $k - \varepsilon$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho k v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho k w)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial z} \right) &+ G_k + G_b + \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (\text{II.18})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \varepsilon v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \varepsilon w)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \\ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} & \end{aligned} \quad (\text{II.19})$$

II. 3. 4. Modélisation de la performance de la cheminée solaire

La performance du système est exprimée par la relation suivante :

$$\eta_{sys} = \eta_{col} \cdot \eta_t \cdot \eta_{ch} \quad (\text{II.20})$$

a) Le collecteur

Le collecteur constitué uniquement d'un verre ou d'un film plastique et générant l'effet de serre, convertit le rayonnement solaire disponible G sur la surface du collecteur A_{col} , en chaleur.

L'efficacité du collecteur, d'une surface $A_{col} = \pi r^2$ et pour une irradiation G , est donnée par:

$$\eta_{col} = \frac{Q}{\pi r^2 G} \quad (II.21)$$

Avec:

r : Rayon du collecteur

Q : Chaleur générée par effet de serre dans le collecteur. Elle est donnée par :

$$Q = C_p m \Delta T \quad (II.22)$$

ΔT , est la différence de température entre l'entrée et la sortie du collecteur

Avec : $m = \rho V_{ch} A_{ch}$ (II.23)

Où m , A_{ch} et V_{ch} sont respectivement, le débit massique, la surface et la vitesse à l'entrée de la cheminée.

En remplaçant Q et m par leurs expressions respectives dans l'équation (II.21), on obtient la relation suivante :

$$\eta_{col} = \frac{C_p \rho V_{ch} A_{ch} \Delta T}{\pi r^2 G} \quad (II.24)$$

b) La cheminée

La cheminée est située dans le centre du collecteur. Le potentiel de pression entre le haut et le bas de cette dernière, entraîne le fluide dans un mouvement ascendant. Elle agit comme un moteur thermique dans le système, qui convertit l'air chaud en force motrice. Selon Schlaich, le rendement de la cheminée est donné par [3]:

$$\eta_{ch} = \frac{g H_{ch}}{C_p T_a} \quad (II.25)$$

Avec:

H_{ch} : Hauteur de la cheminée

T_a : Température ambiante

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

La puissance d'écoulement dans la cheminée a pour expression:

$$P_{tot} = \frac{gH_{ch}}{T_a} \rho_{col} V_{ch} \Delta T_{A_{ch}} \quad (\text{II.26})$$

La différence de pression entre l'entrée et la sortie de la cheminée est donnée par :

$$\Delta P_{tot} = \rho_{col} g H_{ch} \frac{\Delta T}{T_a} \quad (\text{II.27})$$

c) La turbine

La turbine est située dans la trajectoire de l'écoulement du fluide. Elle transforme l'énergie cinétique du fluide en énergie mécanique, qui à son tour est convertie en énergie électrique grâce à un générateur. Une turbine dans une cheminée solaire joue un rôle important dans la production d'énergie dans le système.

Selon Sengi [31], la puissance mécanique absorbée par la turbine est donnée par:

$$P_m = \frac{2}{3} \eta_{col} \eta_{ch} \pi r^2 G \quad (\text{II.28})$$

L'efficacité de la turbine varie généralement de 0.8 à plus de 0.9, pour différentes configurations de turbines [54]. Dans notre travail, l'efficacité de la turbine a été fixée à 0.8 et 0.85, du fait que de nombreux chercheurs [47], [49], [52], [55], ont adopté ces valeurs pour la prédiction de la performance d'une cheminée solaire.

L'énergie électrique produite pour la cheminée solaire est donnée par:

$$P_e = P_m \eta_t \quad (\text{II.29})$$

$$P_e = \frac{2}{3} \eta_{col} \eta_{ch} \eta_t \pi r^2 G \quad (\text{II.30})$$

$$P_e = \frac{2}{3} \eta_{col} \frac{gH_{ch}}{C_p T_a} \eta_t \pi r^2 G \quad (\text{II.31})$$

Pour la simulation de la cheminée, deux cas seront traités. Soit en considérant la turbine comme une turbine réelle, soit en adoptant le modèle de ventilateur, dans lequel la

chute de pression à travers la turbine est prise en compte, mais la turbine est considérée comme un disque infiniment mince.

La chute de pression à travers la turbine peut être déterminée soit, en choisissant des valeurs constantes, ou en l'exprimant en fonction de la vitesse de l'air, Cette dernière approche a été appliquée par Guo et al [49]. Dans notre travail, la première approche a été adoptée.

L'énergie maximale disponible générée par la turbine peut être donnée par :

$$P_a = \Delta p_t Q_v \quad (\text{II.32})$$

Où Δp_t est la chute de pression de la turbine et Q_v , le débit volumique.

La puissance produite par la turbine peut être exprimée en fonction de la chute de pression à travers la turbine comme suit:

$$W_t = \eta_t \Delta p_t Q_v \quad (\text{II.33})$$

Nous pouvons également calculer la puissance produite par l'expression suivante :

$$W_t = \Delta p_t \pi r_{ch}^2 V_0 \quad (\text{II.34})$$

r_{ch} , étant le rayon de la cheminée et V_0 , la vitesse de l'écoulement de l'air à la sortie du collecteur.

Dans le cas de la cheminée solaire couplée à une turbine réelle, la puissance produite par la turbine peut être obtenue par:

$$W_t = \frac{2\pi n M}{60} \quad (\text{II.35})$$

Avec:

n : Vitesse de rotation de la turbine

M : Moment total des pales de la turbine (ou le couple).

A partir des équations (II.32) et (II.35), le rendement de la turbine peut être calculé par:

$$\eta_t = \frac{W_t}{P_a} = \frac{2\pi m M}{60\Delta p_t Q_v} \quad (\text{II.36})$$

II. 3. 5. Conditions aux limites

Pour résoudre le système d'équations, des conditions aux limites sont indispensables. Nous présenterons dans ce qui suit, les conditions aux limites considérées dans notre travail.

II.3.5.1. Cas bidimensionnel

a) Pour l'entrée du collecteur

La condition aux limites, pression d'entrée (**Pressure inlet**) est appliquée à l'entrée du collecteur (la pression statique est nulle : $P = 0$ Pa).

$$\Delta P = 0, T = T_a$$

b) Pour le toit du collecteur

Au niveau du toit du collecteur la condition aux limites imposée est une convection naturelle qui est produite entre le toit du collecteur et l'air ambiant. Le coefficient de transfert de chaleur est fixé à $10 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, la température de l'air ambiant étant de 293K .

$$T_a = 293 \text{ K}, h = 10 \text{ W}/\text{m}^2.\text{K}, u = u_0, v = 0$$

c) Pour le sol

Le sol sous le collecteur absorbe un flux solaire G . Nous pouvons considérer un flux de chaleur imposé au niveau du sol ($G = q$).

d) Pour la sortie de la cheminée

A la sortie de cheminée, la condition aux limites, pression de sortie (**Pressure outlet**) est appliquée.

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \Delta P = 0$$

e) Conditions aux limites pour la paroi extérieur de la cheminée

La paroi de la cheminée peut être définie comme une paroi adiabatique.

$$u = 0, v = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

f) Conditions aux limites pour l'axe de symétrie

Axe de symétrie ($y = 0$). Le modèle dans ce cas est symétrique dans la direction y .

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

Dans ce cas, la moitié du domaine de l'écoulement a été traitée comme montré sur la figure.

II.4.

Les conditions aux limites appliquées à notre modèle sont représentées sur la figure. II.4.

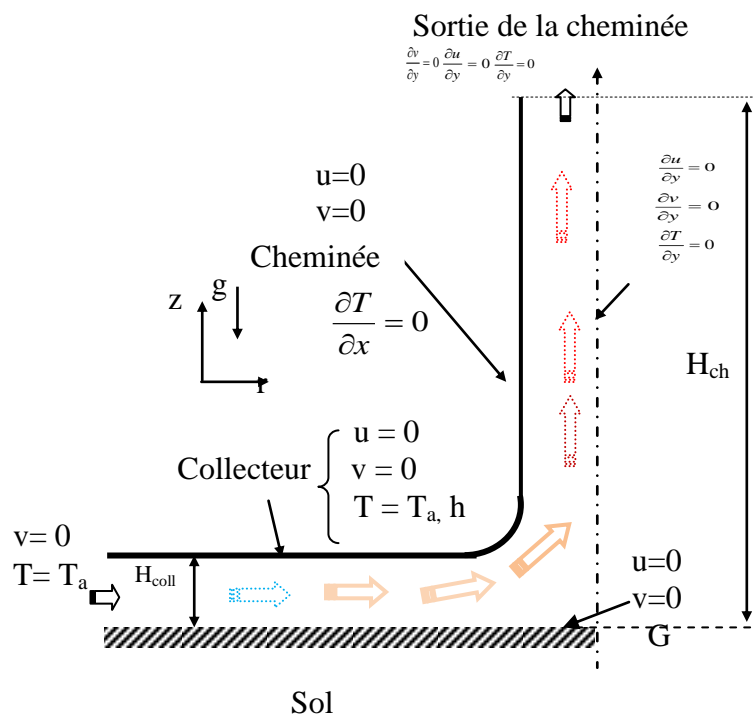


Figure. II.4. Conditions aux limites pour la géométrie bidimensionnelle

II. 3. 5. 2. Cas tridimensionnel

Dans ce cas, nous avons choisi les mêmes conditions aux limites que celles du cas bidirectionnel, en ajoutant seulement les conditions aux limites pour la turbine. Pour le modèle de ventilateur, différentes valeurs de chute de pression à travers la turbine, de 40 à 220 Pa, avec un intervalle de 20 Pa, sont utilisées pour modéliser la manière dont la turbine

affecte le débit. Les conditions aux limites pour le cas tridimensionnel du modèle de ventilateur, sont présentées dans le tableau. II.1.

Tableau. II. 1. Conditions aux limites pour le cas tridimensionnel du modèle de ventilateur

Endroit	Type	Valeur
Entrée du collecteur	Pression d'entrée (Pressure inlet)	$\Delta P = 0 \text{ Pa}$, $T_a = 293 \text{ K}$
Toit du collecteur	Paroi (Wall)	$h = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $T_a = 293 \text{ K}$,
Surface du sol	Paroi (Wall)	$G = 200 - 1200 \text{ W}/\text{m}^2$, interval de $200 \text{ W}/\text{m}^2$
Surface de la cheminée	Paroi (Wall)	Adiabatique
La chute de pression à travers la turbine	Modele de ventilateur (Revers fan)	$\Delta P_t = 40 - 220 \text{ Pa}$, interval de 20 Pa
Sortie de la cheminée	Pression de sortie (Pressure outlet)	$\Delta P = 0 \text{ Pa}$

Dans le cas d'une cheminée solaire couplée avec une turbine réelle, nous avons simulé une turbine de 4 pales. La condition aux limites paroi (**Wall**) est appliquée pour les pales de la turbine qui sont en rotation, avec une vitesse de rotation variant de 30 à 300 rpm, avec un intervalle de 30 rpm.

Chapitre III : Simulation numérique

III.1. Introduction

Les méthodes des volumes finis, des différences finies et des éléments finis, sont couramment utilisées dans les codes bidimensionnel et tridimensionnel. La première qui se base sur la subdivision du domaine d'étude en un nombre finis de volumes de contrôle (maillage), est la plus usuelle.

Les logiciels de simulation numérique qui de nos jours, sont considérés comme de véritables “expériences numériques” présentent de nombreux avantages, parmi lesquels :

- Les quantités physiques liées à l'écoulement (champ de vitesse, températures, contraintes, ...etc.), sont immédiatement disponibles.
- L'obtention des quantités en tout point du champ ou du contour est possible.
- Elles sont économes par rapport à l'expérimentation et à la rapidité d'exécution.
- L'analyse du problème dans des conditions réelles et même dans des conditions d'essais extrêmes, voire marginales, est possible.
- L'étude d'un système est plus flexible. On peut facilement faire des changements sur les quantités physique et les dimensions, ou même de varier l'échelle de temps pour une étude.

Les logiciels de simulation comportent essentiellement, un préprocesseur, un processeur de calcul (solver) et un postprocesseur. Le diagramme. III.1, illustre la procédure simplifiée pour la modélisation et la simulation d'un problème donné.

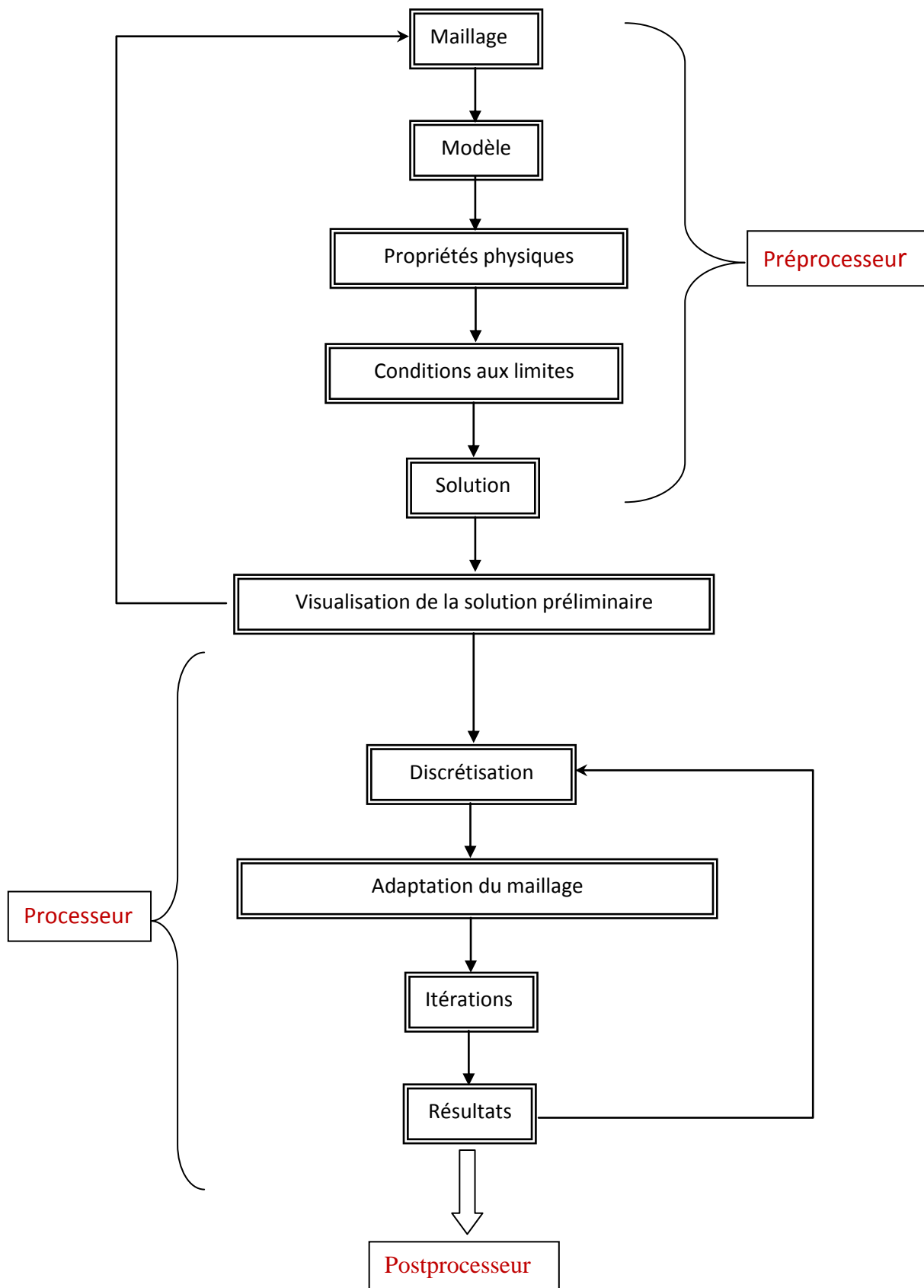


Figure. III. 1. Procédure de modélisation et simulation

- **Le préprocesseur** permet de générer un maillage et de définir les fluides entrant en jeu, ainsi que les conditions initiales et aux limites. Il permet également de discrétiser le domaine de calcul, en calculant les grandeurs recherchées, en des points discrets du domaine.
- **Le processeur** donne la possibilité d'itérer les calculs et de résoudre ainsi les équations qui décrivent le phénomène (équations, de Navier Stokes, de l'énergie,...).
- **Le post processeur** permet de regrouper les résultats obtenus pour les visualiser. Il s'agit d'une interface graphique qui présente les résultats à l'utilisateur sous une forme adaptée à sa perception de la physique du problème, qui doit être portée sur les résultats obtenus à l'issue de la simulation.

Notre travail consistera à obtenir une solution numérique, bidimensionnelle ou tridimensionnelle, de l'écoulement d'air dans une cheminée solaire, avec et sans turbine, par la méthode des volumes finis, en utilisant des logiciels commerciaux très employés dans l'industrie, GAMBIT et FLUENT. Ce dernier est un logiciel, processeur, qui résout par la méthode des volumes finis, des problèmes de mécanique des fluides et de transferts thermiques.

III.2. Présentation des outils de simulation

III. 2.1. Présentation du préprocesseur Gambit

Le mailleur GAMBIT est un logiciel qui permet de créer des maillages pouvant être utilisés en particulier sous FLUENT et ANSYS FLUENT. Ce programme est un prétraitement au logiciel de simulation, qui permet de générer un maillage structuré ou non structuré, en coordonnées cartésiennes, polaires ou cylindriques. Il peut réaliser des maillages complexes en deux ou trois dimensions, avec des mailles de type rectangle ou triangle.

Pour la construction d'un maillage sur GAMBIT, il est recommandé de suivre la démarche suivante [57]:

- a) Définir la géométrie.
- b) Réaliser le maillage.
- c) Définir des régions correspondant aux conditions aux limites.

III.2.1.1. Définition de la géométrie

Il est impératif de bien distinguer la géométrie et le maillage physique, qui lui-même est différent du domaine de calcul. En fait, la géométrie comprend les positions physiques des points caractéristiques définissant la zone, que nous avons à mailler, du point de départ et du point d'arrivée, d'une ligne, du centre et de l'ouverture angulaire d'un arc de cercle ou d'ellipse. Il faut pouvoir représenter la zone à étudier par un ensemble de figures géométriques simples, raccordées les unes aux autres.

Il peut être avantageux de définir des points intermédiaires, qui ne sont pas indispensables à la définition de la géométrie, mais qui permettent de délimiter les zones dans lesquelles les mailles seront adaptées, pour raffiner le maillage, (près des parois ou bien pour épouser au mieux, la forme des obstacles, parois ou autres).

Pour définir la géométrie sur GAMBIT, il faut suivre les étapes suivantes :

- a) Création des points : créer les points qui caractérisent la géométrie.
- b) Création des lignes : créer les lignes qui relient les points déjà créés.
- c) Création des surface : créer les surfaces limitées par les lignes déjà créées.
- d) Création des volumes : créer les volumes limitées par les surfaces déjà créées pour la géométrie tridimensionnelle.

Dans le cadre de notre travail, deux géométries seront traitées.

a) Cas bidimensionnel de la cheminée solaire

Tel qu'il a été mentionné précédemment, le prototype espagnol est choisi comme modèle physique pour la simulation numérique. La figure. III.2 représente la géométrie bidimensionnelle de la cheminée solaire et les coordonnées des points créés.

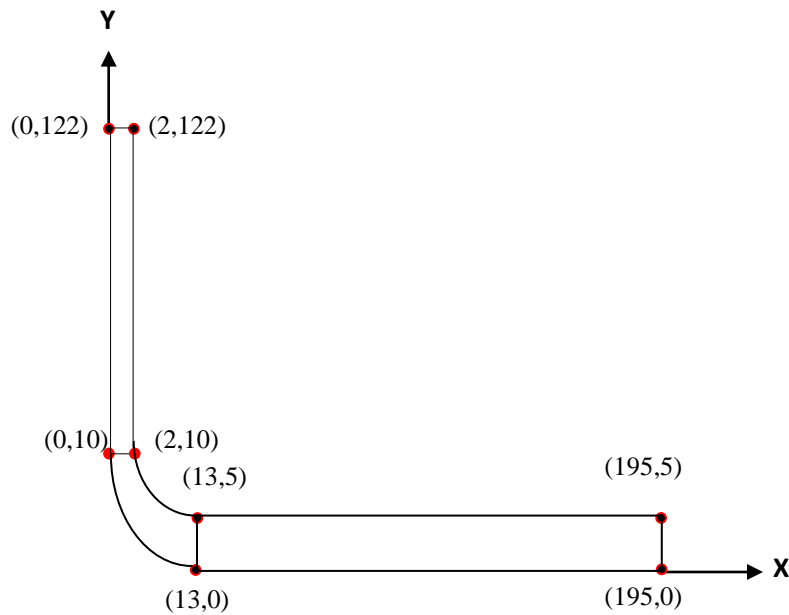


Figure.III.2. Géométrie de la cheminée en 2D

Le problème est axisymétrique, la géométrie bidimensionnelle correspond à la moitié du domaine d'écoulement, qui sera prise en considération.

Le logiciel FLUENT prend par défaut l'axe x, comme axe de symétrie, ceci nous conduit à adapter le domaine de calcul en appliquant une rotation des axes pour le domaine choisi.

b) Cas tridimensionnel de la cheminée solaire

Pour la géométrie tridimensionnelle, les dimensions sont les mêmes que pour le cas précédent. La zone de la turbine est définie, soit, comme un disque infiniment mince de 5 m de rayon et de 12m de hauteur, dans le cas de l'adoption du modèle de ventilateur, soit en créant une turbine de quatre pales de 5 m de rayon. La géométrie tridimensionnelle de la cheminée solaire est illustrée par la figure. III.3.

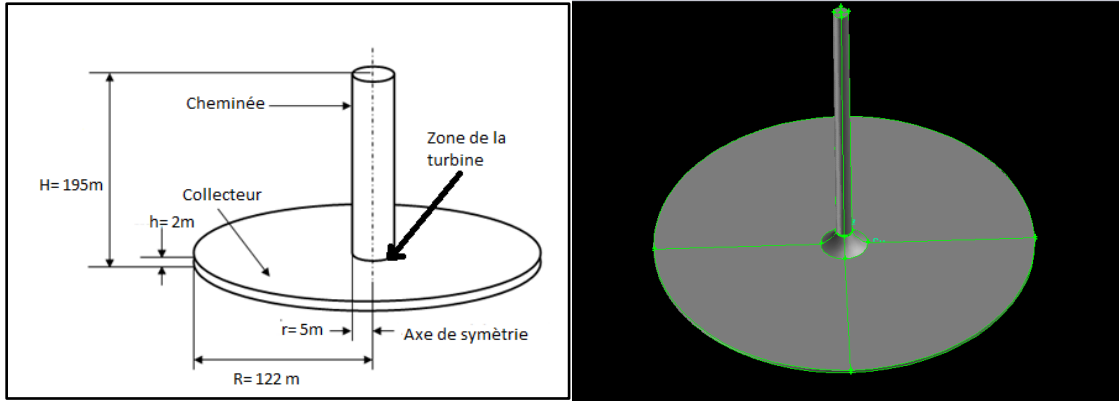


Figure.III.3. Géométrie de la cheminée solaire en 3D

Dans ce qui suit, la géométrie et les paramètres de la turbine ainsi que ceux du profil aérodynamique et la section des pales, seront exposés en détail.

La turbine est généralement installée à la base de la cheminée solaire. Dans notre étude elle est à la base de la cheminée, à 12 m du sol, avec 4 pales de profil aérodynamique Fx-77-W-153 A. Les paramètres du profil aérodynamique et la section des pales, sont consignés respectivement dans les tableaux. III.1 et III.2. La forme du profil FX-77- W- 153A est représentée sur la figure. III.4.

Tableau. III.1. Paramètres du profil aérodynamique FX-77- W- 153A

X(%)	0.00	2.65	10.3	22.2	37	53.2	69.1	83.0	93.3	99	100
Y _{supérieur} (%)	0.00	4.03	8.83	11.7	11.28	8.36	5.35	3.00	2.00	0.14	0.00
Y _{inférieur} (%)	0.00	2.01	2.84	3.13	3.08	2.75	2.27	1.66	0.96	0.21	0.00

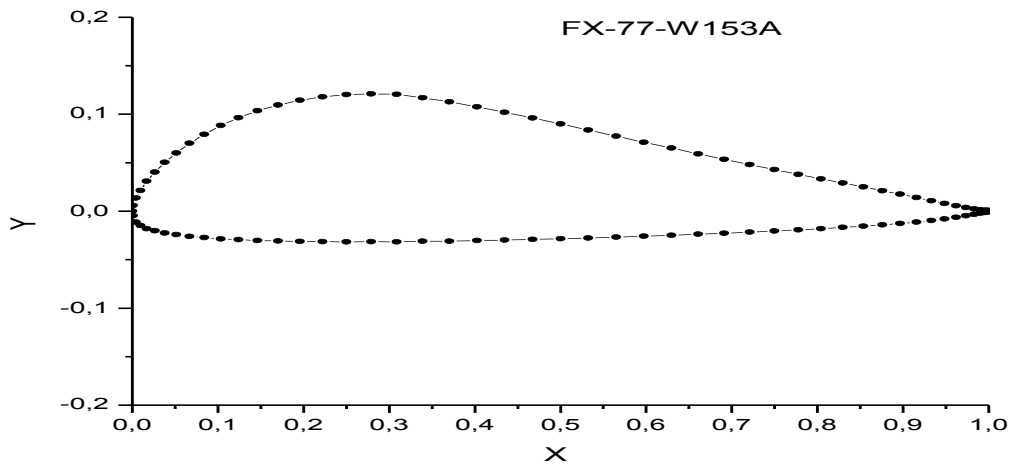


Figure. III.4. Le profil aérodynamique FX-77- W-153 A

Tableau. III.2. Section des pales

r/R	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Corde (m)	0.9762	0.8572	0.7382	0.6192	0.5000
Angle de calage (deg)	9.524	7.144	4.764	2.384	0.000

R, étant le rayon de la turbine (longueur de la pale) et r, la distance entre les profils et le centre de la turbine.

La figure. III.5 donne un aperçu de la géométrie des profils aérodynamiques, de la pale et de la turbine, réalisés par Gambit.

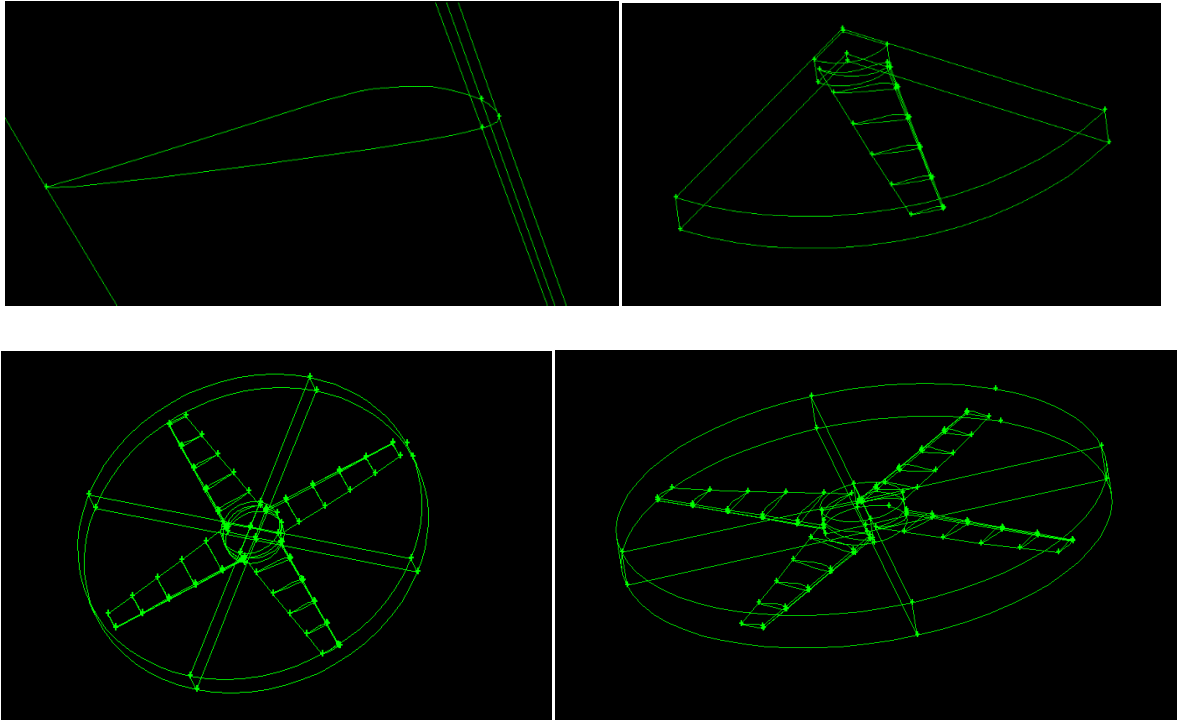


Figure. III.5. Géométrie des profils aérodynamiques, de la pale et de la turbine réalisée par Gambit

III.2.1.2. Réalisation du maillage

Le maillage physique est l'ensemble des mailles générées pour remplir la zone définie par la géométrie, par de petits éléments. Ces derniers peuvent tous avoir la même forme, carrée ou rectangulaire pour des maillages cartésiens réguliers, mais être également déformés par rapport à une forme de départ, dans le cas d'un raffinement en maillage cartésien ou pour un maillage curviligne épousant la forme de la paroi.

Pour des maillages structurés, on peut faire la liaison entre la géométrie et le maillage. Aussi, et avant de réaliser le maillage, il faut spécifier par écrit, d'une part, la géométrie adoptée pour définir la zone à mailler, et d'autre part, les numéros des mailles correspondants aux points caractéristiques de la géométrie. Un nœud pourra alors être repéré par ses coordonnées physiques x et y ou ses indices I et J .

Pour réaliser le maillage sur Gambit, la démarche suivante est nécessaire :

- a) Maillage des lignes.
- b) Maillage des surfaces.
- c) Maillage des volumes.

III.2.1.2.1. Réalisation du maillage pour la géométrie bidimensionnelle de la cheminée solaire

La géométrie bidimensionnelle de la cheminée solaire est constituée de trois surfaces, la cheminée, le collecteur et la jonction. Chaque partie sera maillée à part, en commençant par le maillage de chaque ligne qui sera suivi par celui de chaque surface. Un maillage raffiné au niveau des parois et du sol est nécessaire en utilisant des ratios pour obtenir des résultats plus précis. Le maillage de la géométrie bidimensionnelle est représenté sur la figure. III.6

Le ratio, rapport entre deux mailles successives est donné par la relation :

$$ratio = \frac{L_{i+1}}{L_i}$$

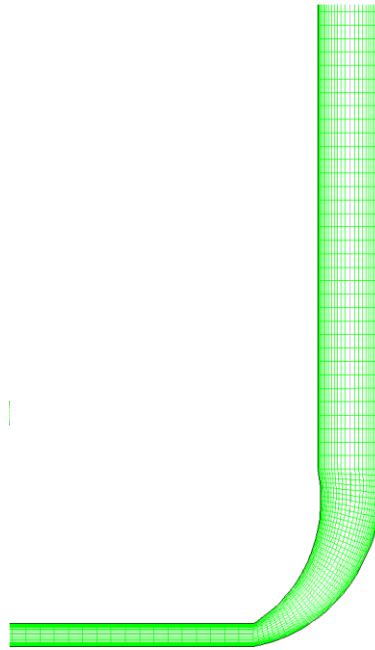


Figure. III.6. Maillage de la géométrie bidimensionnelle de la cheminée solaire

a) Test de maillage

Afin de choisir un maillage optimal et ce dans l'objectif obtenir des résultats numériques acceptables, nous avons fait varier le nombre d'éléments et suivi l'évolution du débit massique à la sortie de la cheminée, pour des conditions de fonctionnement données, une température ambiante de 293 K et rayonnement solaire de 600 W / m².

Les résultats de différents maillages sont consignés dans le tableau. III.3

Tableau. III. 3. Variation de la valeur maximale du débit massique en fonction du nombre d'éléments (cas bidimensionnel)

Nombre d'éléments	Débit massique (kg/s)	La différence entre le débit à l'entrée et à la sortie	Erreur relative (%)
4120	1295.041	0.00425	3.281×10^{-4}
7832	1302.040	0.00382	2.933×10^{-4}
10386	1308.86	0.00361	2.758×10^{-4}
14944	1313.579	0.00345	2.626×10^{-4}
19364	1313.426	0.00340	2.588×10^{-4}

Nous remarquons que pour les deux derniers résultats (tableau. III.3), la valeur du débit massique ne change que très légèrement, ce qui nous permet de choisir le maillage de 14944 éléments.

b) Définition des conditions aux limites

Après la réalisation de la géométrie et du maillage dans Gambit, les conditions aux limites de chaque partie doivent être déterminées.

Dans le cas bidimensionnel, les conditions aux limites sont présentées par la figure. III.7.

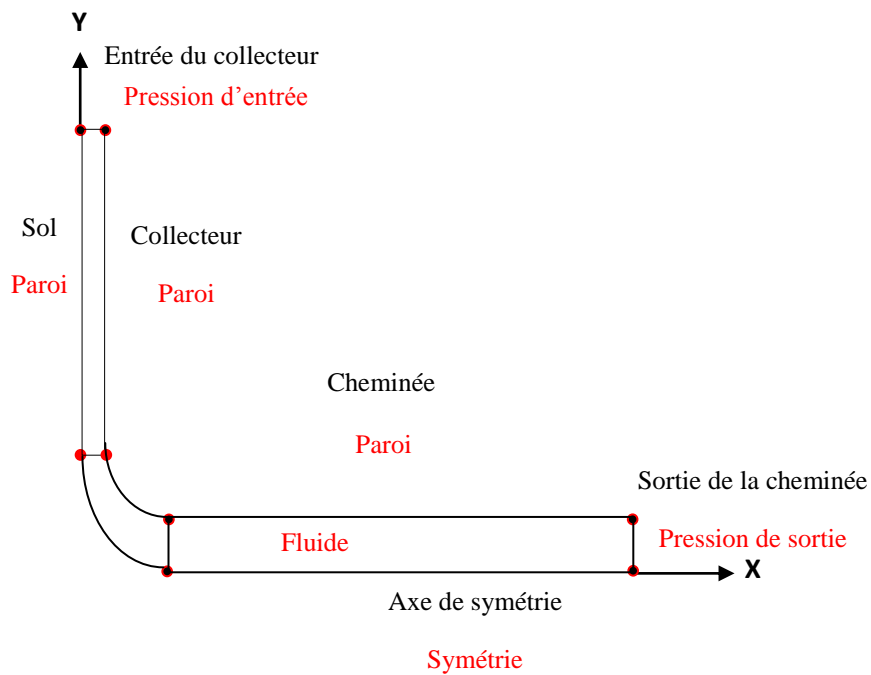


Figure. III.7. Conditions aux limites de la géométrie bidimensionnelle

III.2.1.2.2. Réalisation du maillage pour la géométrie tridimensionnelle de la cheminée solaire

Le maillage de la géométrie tridimensionnelle est compliqué, surtout s'il existe plusieurs formes et plusieurs volumes dans la même géométrie. En plus du maillage des lignes et des surfaces, il faut aussi mailler les volumes.

Pour le modèle de ventilateur, une géométrie de la cheminée solaire en 3D axisymétrique correspondant à la moitié du domaine a été considérée.

La figure. III.8 illustre le maillage de la géométrie tridimensionnelle dans le cas du modèle de ventilateur.

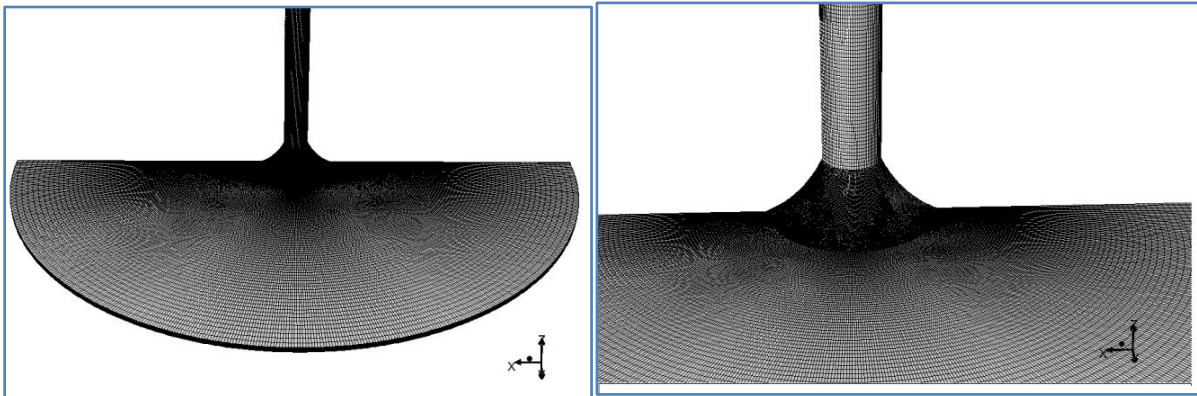


Figure. III.8. Maillage de la géométrie tridimensionnelle (cas du modèle de ventilateur)

Dans le cas de la turbine réelle, le maillage est plus compliqué à cause de la turbine tridimensionnelle. En effet, il faut d'abord mailler les profils aérodynamiques (maillage des lignes), puis les pales (maillage des surfaces) et enfin le volume de la turbine, en plus du système complet en 3D.

La figure. III.9, donne un aperçu du maillage de la cheminée solaire avec la turbine.

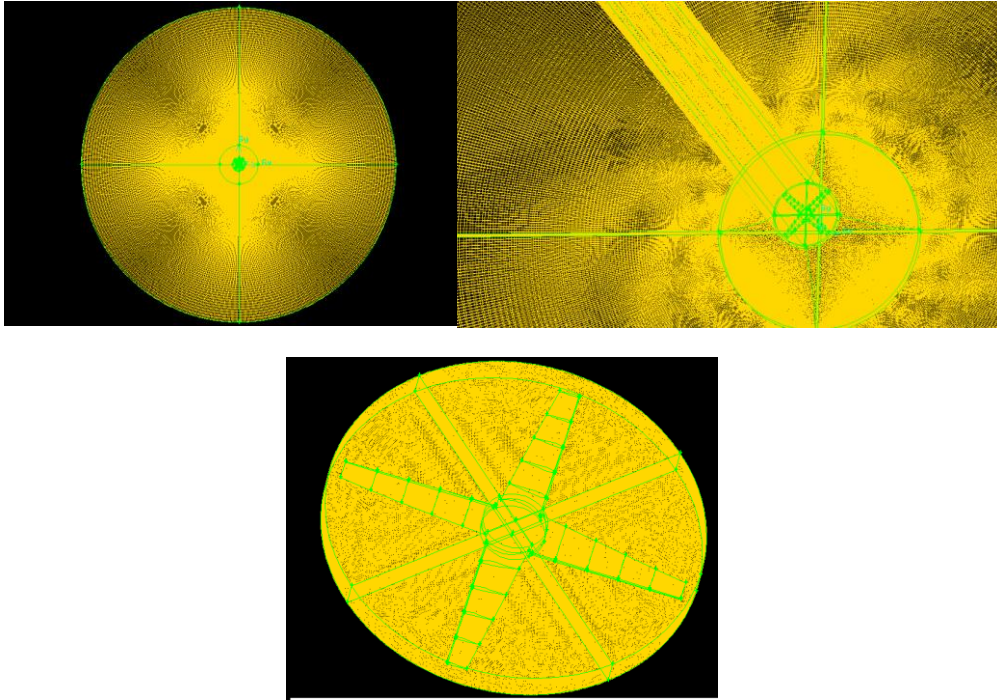


Figure. III.9 Maillage da la cheminée solaire et de la turbine, en 3D

a) Test de maillage

Dans le cas de la cheminée solaire sans turbine, un test d'indépendance du maillage a été effectué afin de déterminer le nombre de cellules approprié, pour obtenir des résultats indépendants du réseau. Généralement, pour la simulation du prototype espagnol sans turbine, la grille avec un nombre d'éléments de 1.000.000 est suffisante pour obtenir des résultats indépendants du réseau. Dans notre simulation, le nombre d'éléments est approximativement de 1 700 000 (plusieurs maillages ont été créés). Le nombre 1700000 éléments est le plus proche de celui du prototype espagnol.

Dans le cas de la cheminée solaire avec turbine, trois maillages ont été créés, un maillage grossier à 3 067 741 cellules, un maillage moyen à 2 000 000 cellules et un maillage fin à 1 200 450 cellules. Les vitesses à la sortie de la cheminée pour les trois maillages, dans les conditions de fonctionnement d'une température ambiante de 293 K et d'un rayonnement solaire de 800 W/m^2 , avec une vitesse de rotation de 90 rpm ont été comparées. Les valeurs de la vitesse à la sortie du collecteur pour les maillages grossier, moyen et fin sont respectivement de 14.8976 m/s, 13.1591 m/s et 13.1498 m/s. Il s'ensuit que le maillage moyen avec 2 000 000 de cellules, est retenu pour la simulation numérique.

b) Définition des conditions aux limites

Les conditions aux limites pour la géométrie tridimensionnelle de la cheminée solaire avec turbine, sont représentées sur la figure. III.10.

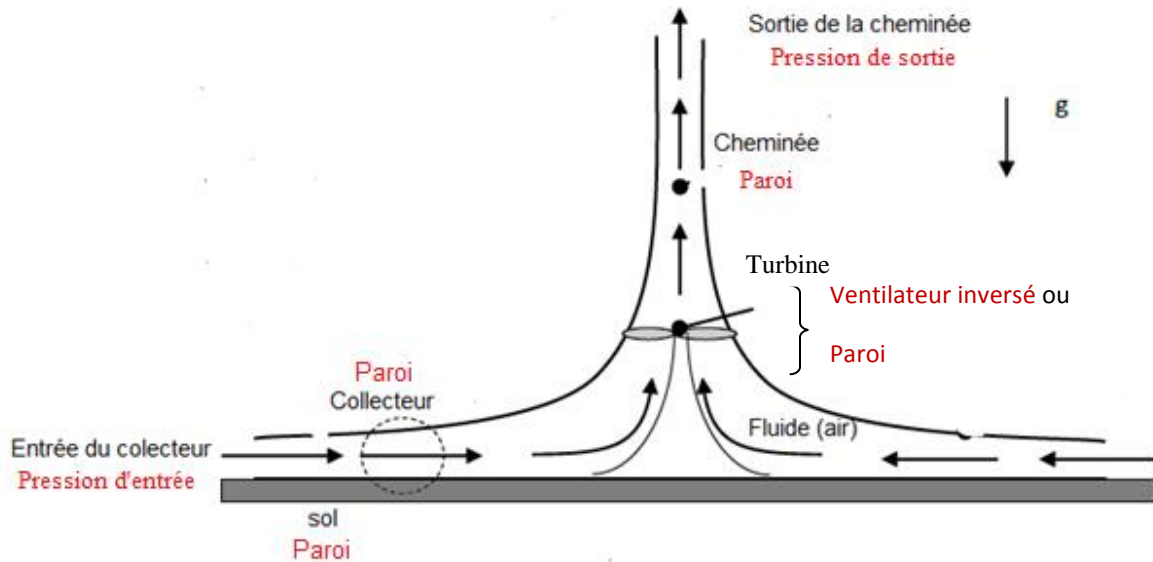


Figure III.10. Condition aux limites de la géométrie tridimensionnelle

III.2.2. Présentation du processeur (solver) Fluent

Le logiciel FLUENT est un code industriel largement utilisé dans le domaine de la mécanique des fluides. Il permet de modéliser tous les écoulements fluides, compressibles ou incompressibles, impliquant des phénomènes physiques complexes tels que, la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques, les écoulements multiphasiques et ce, sur les géométries complexes industrielles. La solution Fluent, inclut également un environnement CAO et un mailleur paramétrique, permettant de mettre en place les modèles numériques ou de s'intégrer aux outils de conception déjà existants. De plus, il permet de définir numériquement les conditions opératoires (gravité, pression...) dans lesquelles, est effectuée la simulation, ainsi que la spécification des conditions aux limites. Ce logiciel permet également de choisir le processus itératif, en proposant plusieurs schémas numériques pour les discrétisations spatiale et temporelle, et pour le couplage de vitesse et de pression. Ajouté à tout cela, il rend possible le traitement de problèmes tels que, les écoulements dans des zones

déformables et/ou en mouvement, les écoulements réactifs, les écoulements multiphasiques, de prédire le bruit produit ‘‘aérodynamiquement’’, de modéliser la solidification, etc.

Les domaines d’application sont nombreux et variés, parmi lesquels, la mécanique des fluides, la chimie des procédés, la production d’énergie, l’électronique, l’environnement informatique, les turbomachines, etc.

III.2.2.1. Définition du problème sur Fluent

a) Cas bidimensionnel

La simulation est réalisée par le logiciel Fluent (version 6.3.26), en utilisant la méthode numérique des volumes finis, pour la discrétisation des équations de Navier-Stokes, de conservation de la masse et de l’énergie (à partir d’éléments quadrilatéraux structurés). L’algorithme SIMPLE est utilisé pour décrire le couplage pression-vitesse et le schéma Second Ordre Upwind sont employés pour discrétiser les termes convectifs. Tous les calculs numériques sont faits en double précision. L’erreur d’itération est de 10^{-5} , pour tous les calculs et de 10^{-8} pour l’équation d’énergie.

Le nombre de Rayleigh inférieur à 10^8 indique que le flux est laminaire, avec une transition vers la turbulence qui se produit dans l’intervalle [$10^8 - 10^{10}$]. Le nombre de Rayleigh dans le prototype espagnol est supérieur à 10^{10} et le flux d’air à l’intérieur de la cheminée solaire est en régime turbulent, ce qui nous conduit à choisir, le modèle de turbulence k- ϵ standard, pour simuler le flux d’air dans le système.

Le modèle de Boussinesq a été adopté dans cette simulation, du fait que le changement de température n’est pas trop important.

b) Cas tridimensionnel

Dans le cas tridimensionnel, nous avons réalisé la simulation sur le logiciel Ansys Fluent 16.0, où l’arithmétique SIMPLE est utilisée pour décrire le couplage pression-vitesse. Le modèle standard de turbulence k- ϵ , a été choisi pour décrire le flux, l’algorithme PRESTO a été adopté comme méthode de discrétisation pour le terme de pression. Le schéma de discrétisation appliqué pour les autres équations est de Second Ordre Upwind. Tous les calculs numériques sont faits en double précision. L’erreur d’itération est de 10^{-5} pour tous les calculs et de 10^{-8} pour l’équation d’énergie.

III.3.3. Etapes de résolution du problème

La démarche suivie comporte les étapes suivantes :

1. Construction de la géométrie sous GAMBIT,
2. Lancer le solveur approprié pour la modélisation en 3D (FLUENT),
3. Importer et dimensionner le maillage,
4. Sélectionner les modèles physiques,
5. Définir les propriétés des matériaux,
6. Définir les conditions de calcul,
7. Définir les conditions aux limites,
8. Fournir une solution initiale,
9. Régler les paramètres du solveur,
10. Régler les moniteurs de convergence,
11. Calculer et surveiller la solution,
12. Exploitation des résultats.

Chapitre IV : Résultats et discussion
(cas de la géométrie
bidimensionnelle de la cheminée)

IV. 1. Introduction

Les résultats obtenus par le logiciel FLUENT, pour le cas bidimensionnel de la cheminée solaire sans turbine, feront l'objet de ce chapitre. L'effet hydrodynamique et thermique dans la cheminée solaire est simulé et l'influence de la vitesse de l'entrée de l'air et de la température ambiante sur les caractéristiques de l'écoulement de l'air sous le collecteur, est examinée. Pour aider à mieux cerner le principe de fonctionnement de la cheminée solaire et les caractéristiques de l'écoulement d'air dans ce dernier, les profils de vitesse, de température et de pression de l'air, seront analysés et discutés.

Une simulation numérique des paramètres les plus influents (rayonnement solaire, température ambiante) sur la performance de la cheminée et une estimation de l'énergie électrique produite mensuellement et annuellement, pour quatre régions de l'Algérie seront présentés.

IV. 2. Résultats et discussion

IV. 2. 1. Caractéristiques de l'écoulement dans le collecteur

Le fonctionnement d'une cheminée solaire est étroitement lié aux caractéristiques de l'écoulement du fluide dans le collecteur. Pour cela la simulation de la vitesse, de la température et de la pression de l'écoulement de l'air dans le collecteur a été entreprise. Une irradiation de 800 W/m^2 et une température ambiante de 293 K , ont été choisies.

L'observation du profil de vitesse de l'écoulement de l'air en fonction du rayon du collecteur, (figure. IV.1), permet de remarquer une croissance exponentielle de la vitesse de l'air, à travers le collecteur qui atteint une valeur maximale de 10.18 m/s à la sortie de ce dernier.

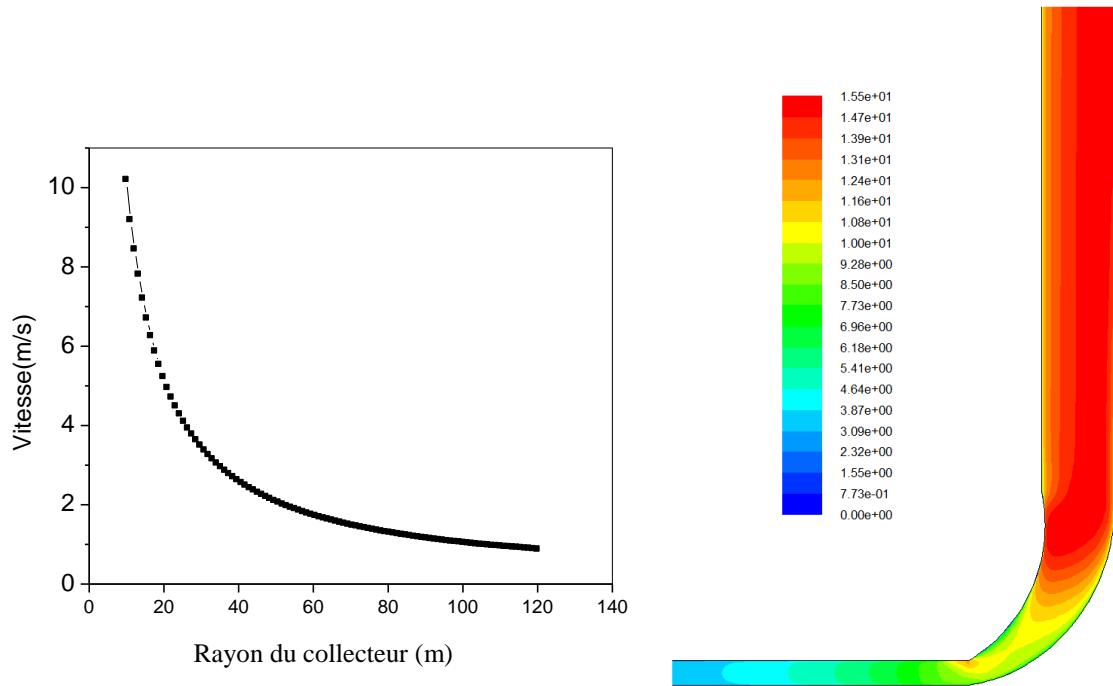


Figure. IV.1. Profil de vitesse de l'écoulement de l'air dans le collecteur

Concernant la température de l'écoulement d'air, il apparaît clairement sur la figure. IV. 2, que celle-ci augmente le long du collecteur et atteint une valeur de 317.504 K à la base de la cheminée.

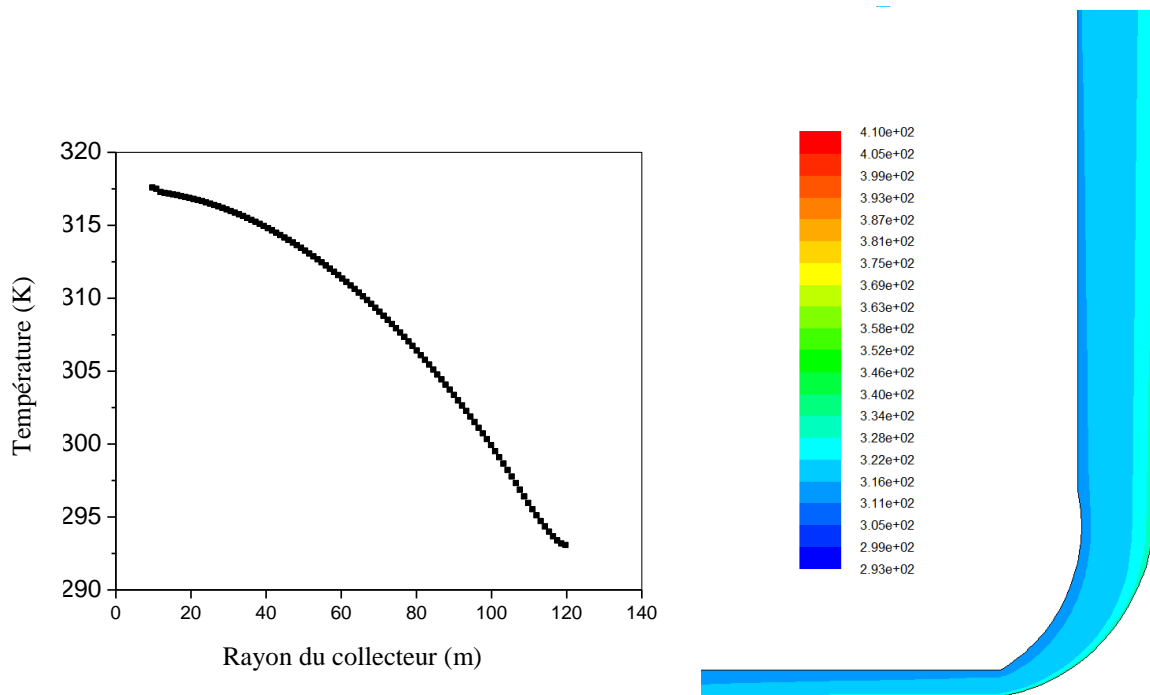


Figure. IV. 2. Profil de température de l'écoulement de l'air dans le collecteur

Les résultats de simulation obtenus révèlent que la pression statique de l'air dans la cheminée solaire est une valeur négative et qu'elle décroît avec l'augmentation du rayon du collecteur (figure IV.3). Cette diminution est d'autant plus significative à l'approche de la base de la cheminée, ce qui nous permet de conclure qu'à cet endroit précis, nous pouvons avoir la plus grande énergie que peut délivrer la cheminée solaire et de ce fait, c'est la meilleure position pour placer les turbines.

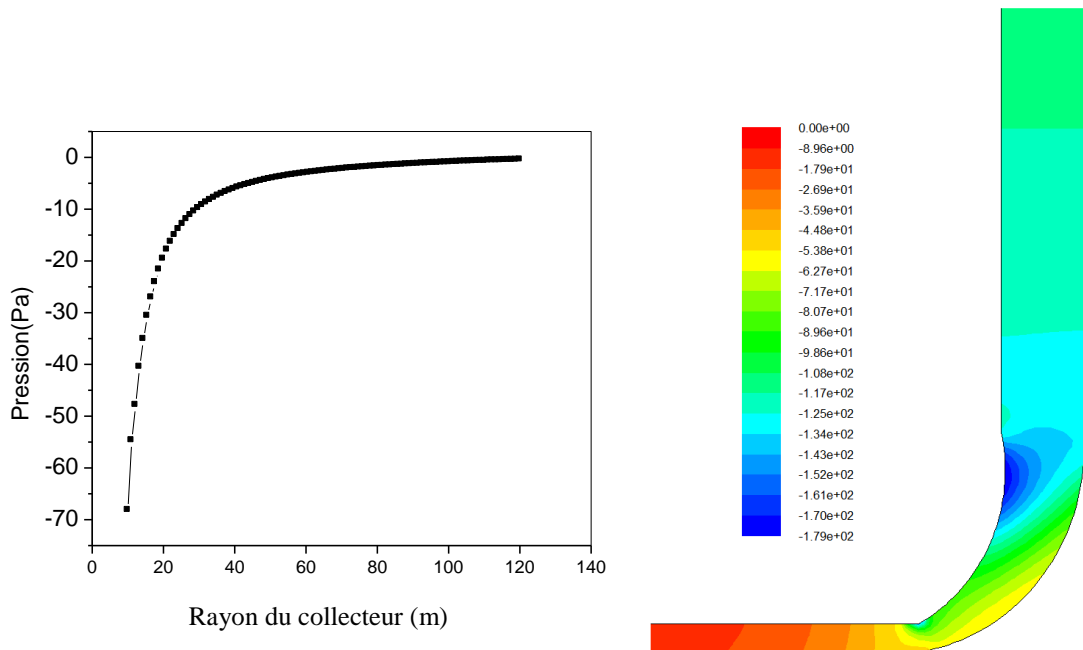


Figure. IV. 3. Profil de pression de l'air dans le collecteur

Les résultats de simulation de la distribution de la vitesse, de la température et de la pression de l'air dans la cheminée solaire, pour un rayonnement solaire de 1000 W/m^2 et une température ambiante de 293 K , sont présentés respectivement, sur les figures. IV.4, IV.5 et IV.6. Il est aisé de noter que la vitesse de l'écoulement de l'air est maximale (16.3 m/s), à la base de la cheminée.

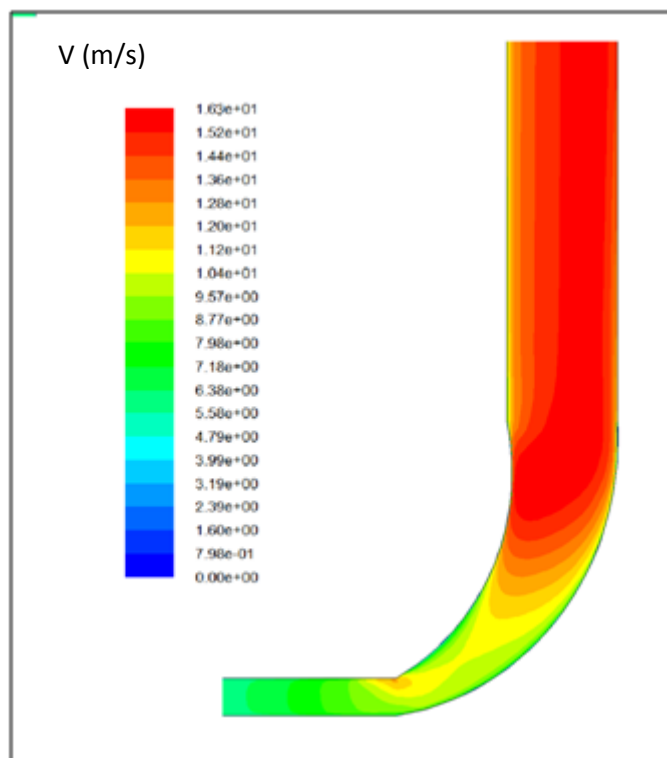


Figure. IV. 4. Distribution de la vitesse de l'écoulement de l'air dans la cheminée solaire

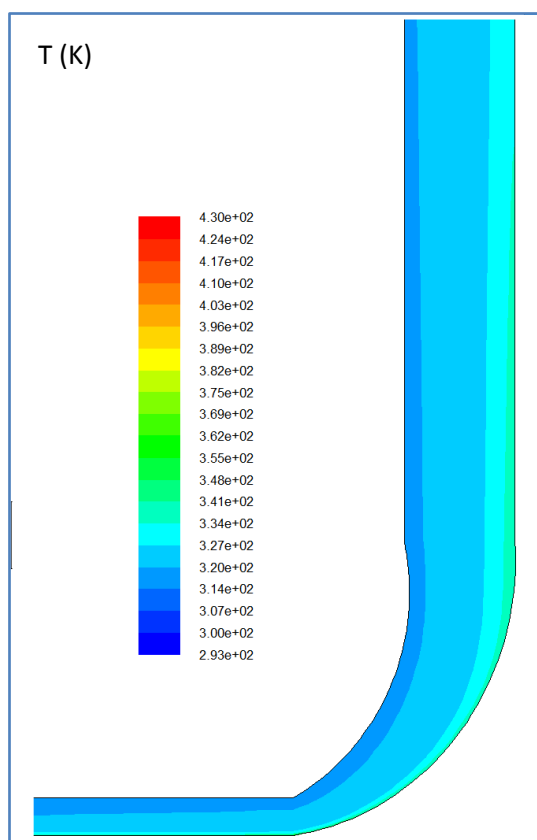


Figure. IV.5. Distribution de la température de l'écoulement de l'air dans la cheminée solaire

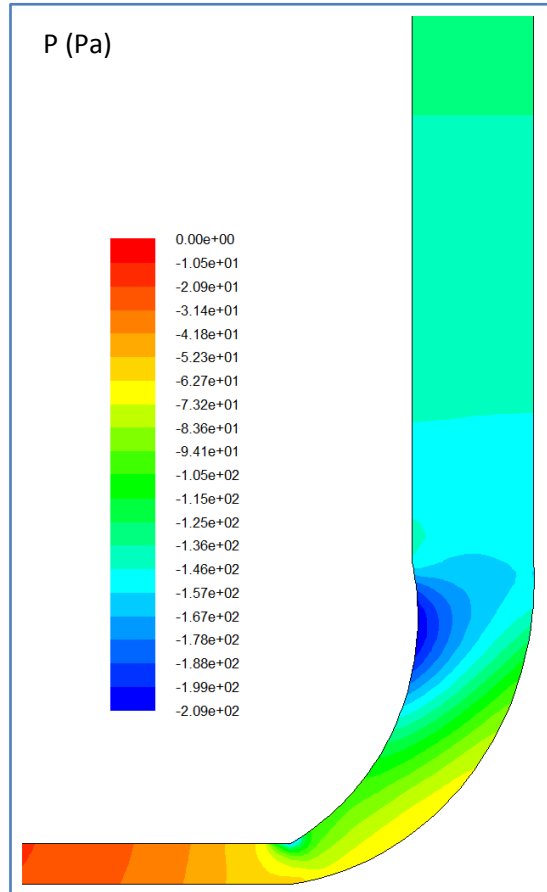


Figure. IV. 6. Distribution de la pression statique de l'écoulement de l'air dans la cheminée solaire

Pour valider nos résultats numériques, la vitesse de l'air à la base de la cheminée et la différence de température de l'air entre l'intérieur et l'extérieur du collecteur, sont comparées aux données expérimentales du prototype espagnol, puis à celles des travaux de Ming.

❖ Comparaison avec des données expérimentales du prototype espagnol

L'examen des valeurs de la vitesse verticale de l'air (à l'entrée de la cheminée) et de la différence de température de l'air, entre l'intérieur et l'extérieur du collecteur, obtenues par la simulation et celles issues de l'expérimentation du prototype espagnol de Manzanares, pour un rayonnement solaire de 1000 W/m^2 (tableau. IV.1), permet de noter qu'elles sont relativement proches.

Tableau. IV.1. Comparaison entre les résultats de simulation et ceux du prototype espagnol

	Vitesse verticale (m/s)	ΔT (K)
Résultats de simulation	16.37	23
Résultats expérimentaux (prototype espagnol)[5]	15	20
Erreur relative(%)	9.13	15

❖ Comparaison avec les résultats numériques de Ming et al

Une comparaison de nos résultats de simulation, de la vitesse de l'écoulement de l'air à la base de la cheminée avec les résultats numériques de Ming et al [25] a été également effectuée.

Dans le modèle Ming et al, la vitesse de l'écoulement à la base de la cheminée atteint environ 16 m /s et la différence de température du système dépasse 20 °C [25]. L'observation de la figure. IV.7, permet de remarquer que la vitesse de l'air à la base de la cheminée, atteint 16. 372 m /s et que la différence de la température de l'air entre l'intérieur et l'extérieur du collecteur est environ de 23°C. Nous pouvons également noter sur cette figure, que les courbes de variation de la vitesse de l'air à la base de la cheminée en fonction de l'irradiation solaire, présentent non seulement la même allure mais sont proches. Il existe néanmoins, une différence (en termes quantitatif) entre les deux résultats, qui pourrait probablement être due aux raisons suivantes:

- La condition aux limites, au niveau du sol dans le modèle de Ming et al [25] est considérée comme une fonction de température. Dans notre approche, le rayonnement solaire qui traverse le toit du collecteur et atteint le sol, a été considéré comme un flux de chaleur imposé au niveau du sol ($G = q$), de plus, la convection naturelle entre le toit du collecteur et l'ambiance a été prise en compte dans notre étude.
- Ming et al ont utilisé un modèle tridimensionnel.

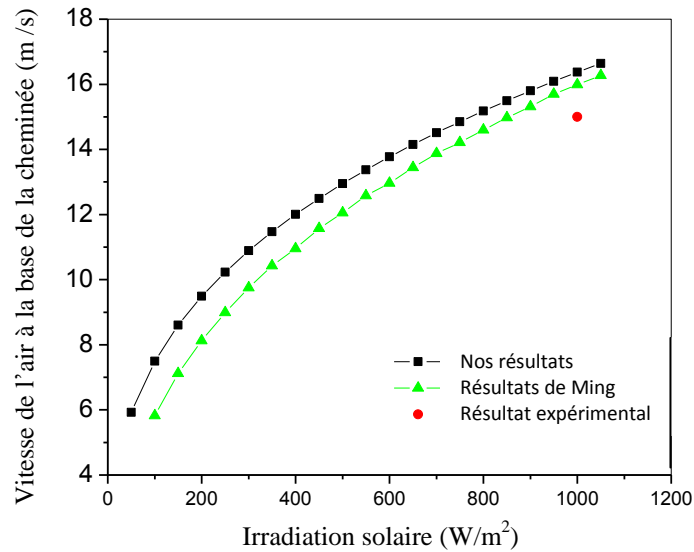


Figure. IV. 7. Validation des résultats de simulation

IV. 2. 2. Effet de la vitesse d'entrée de l'air et de la température ambiante

➤ Effet de la vitesse d'entrée de l'air

Dans ce qui suit, l'effet hydrodynamique et thermique dans la cheminée solaire est simulé et l'influence de la vitesse d'entrée de l'air et de la température ambiante sur les champs de pression de vitesse et de température de l'écoulement de l'air dans la cheminée solaire est étudiée.

Les distributions de vitesse de pression et de température de l'air, pour trois valeurs de vitesse d'entrée de l'air ($V_e = 1 \text{ m/s}$, 3 m/s et 5 m/s) et pour un rayonnement solaire de 800 W/m^2 et une température ambiante de 293 K , sont illustrées dans cette partie.

La figure. IV. 8 représente la distribution de la vitesse de l'air au milieu de la cheminée solaire, pour différentes valeurs de vitesse d'entrée de l'air (1 , 3 et 5 m/s). Nous pouvons noter que la vitesse de l'air croît avec l'augmentation de la vitesse d'entrée de l'air et atteint sa valeur maximale, à la base de la cheminée.

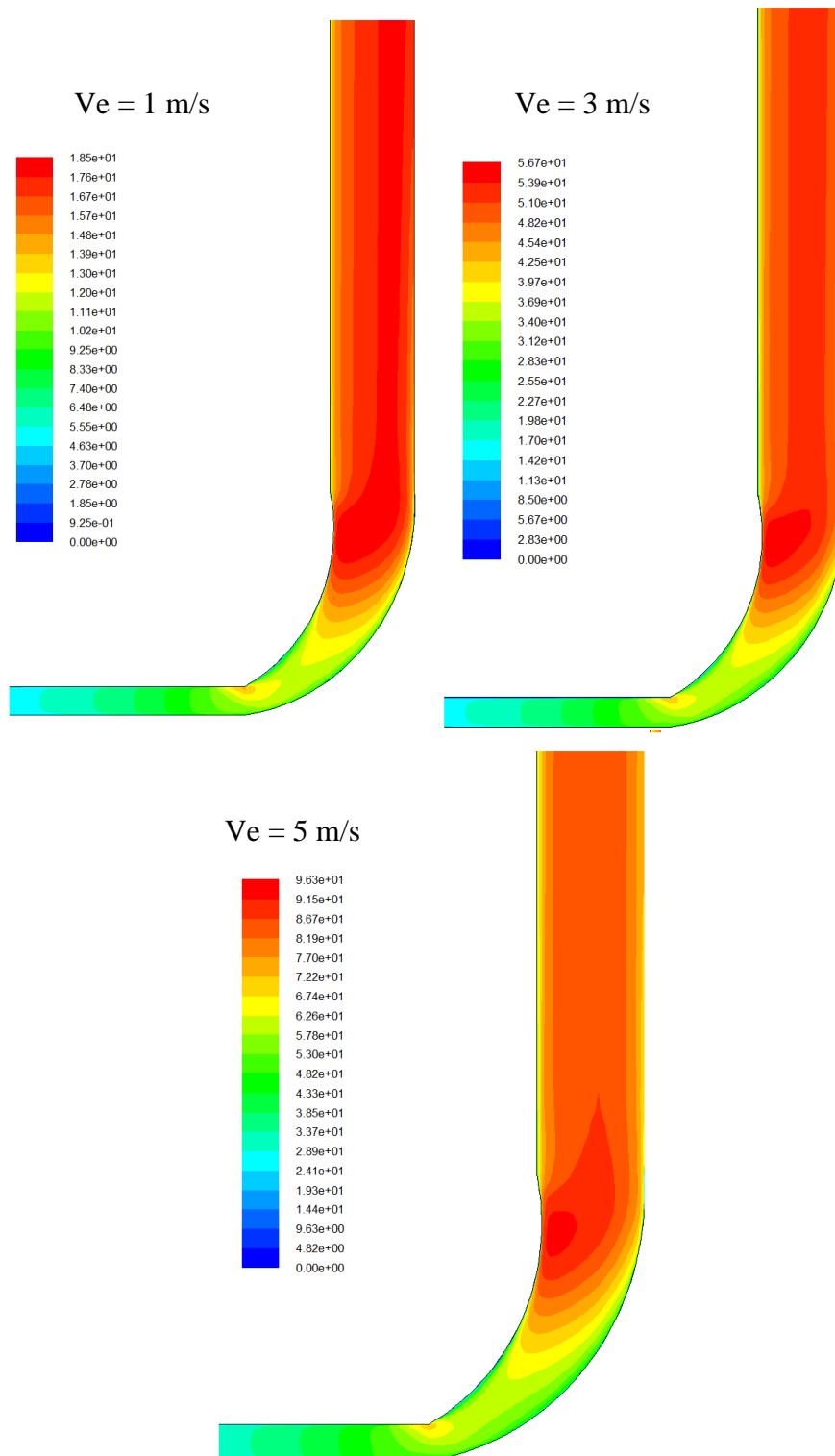


Figure. IV. 8. Distribution de la vitesse de l'écoulement d'air pour différentes valeurs de vitesse d'entrée de l'air

La figure. IV.9 montre le profil de vitesse de l'écoulement de l'air, à travers le collecteur. L'observation des courbes de cette figure, permet de noter que la vitesse de l'air dans le collecteur augmente avec la diminution du rayon. Cette augmentation est d'autant plus importante, que les vitesses d'entrée de l'air sont élevées, ce qui démontre que la variation de la vitesse d'entrée de l'air influe sensiblement, sur la vitesse de l'air dans le collecteur. Ainsi de l'air entrant à 5 m/s, peut atteindre une vitesse de 60.3 m/s au voisinage de la base de la cheminée.

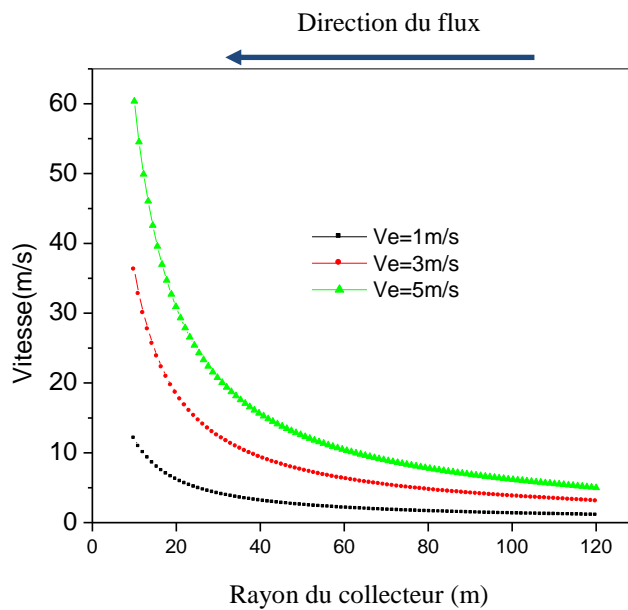


Figure. IV.9. Profil de vitesse de l'écoulement de l'air en fonction du rayon du collecteur, pour différentes valeurs de vitesse d'entrée de l'air (température ambiante de 293K)

La variation du champ de pression de l'air pour différentes valeurs de vitesse d'entrée de l'air est illustrée par la figure. IV.10. Il apparaît que la pression dans la cheminée solaire est une valeur négative, pour une vitesse d'entrée de l'air de 1m/s, mais prend des valeurs positives aux vitesses d'entrée de l'air de 3 et 5 m/s, en particulier dans la zone du collecteur.

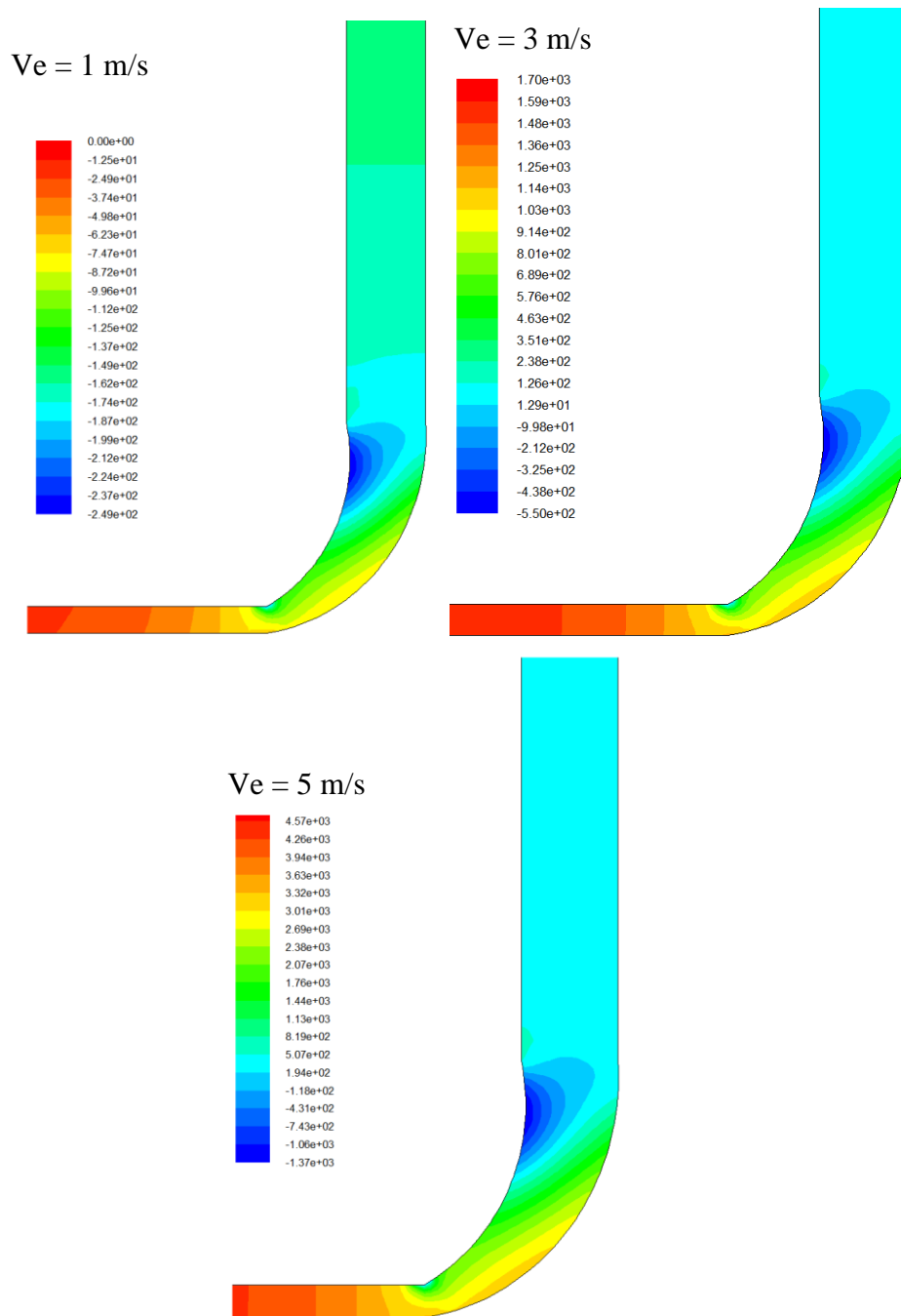


Figure. IV. 10. Distribution de la pression de l'écoulement d'air pour différentes valeurs de vitesse d'entrée de l'air

L'effet de la vitesse d'entrée de l'air sur la pression à travers le collecteur est montré dans la figure. IV.11. Il est aisé de remarquer que l'augmentation de celle-ci, conduit à un accroissement de la pression de l'air à travers le collecteur. La pression de l'écoulement de l'air suit ainsi la loi fondamentale de l'écoulement incompressible, elle varie inversement à la vitesse d'écoulement de

l'air dans la zone où $r \leq 35$ m puis demeure quasiment invariable sur le reste du collecteur. Ce phénomène résulte du fait que le fluide est plus stratifié dans la zone en question, que dans la région située à la base de la cheminée. Nous pouvons également constater que la pression de l'air prend une valeur positive lorsque la vitesse d'entrée de l'air dépasse 1 m/s, ce qui signifie que la pression de l'air à cet endroit est supérieure à celle de l'ambiance à la même hauteur.

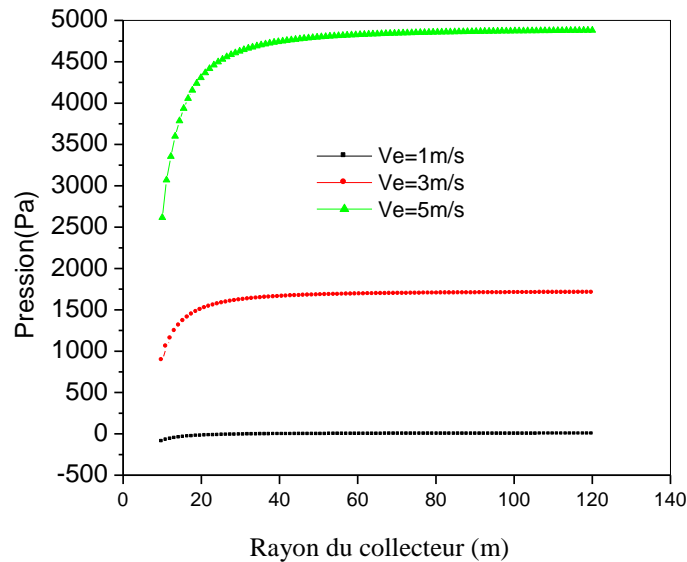


Figure. IV. 11. Profil de la pression de l'écoulement de l'air en fonction du rayon du collecteur pour différentes valeurs de vitesse d'entrée de l'air (température ambiante de 293 K)

La figure. IV.12 représente la distribution de la température de l'air dans la cheminée solaire pour différentes valeurs de vitesse d'entrée de l'air. Les résultats montrent que la température de l'air augmente le long du collecteur, jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale à la base de la cheminée, puis diminue faiblement le long de la cheminée jusqu'à la sortie. Il convient de noter que la température maximale de l'air dans la cheminée solaire, est située près du sol dans le collecteur. De plus, il est remarqué que la température de l'écoulement d'air dans la cheminée solaire, diminue lorsque la vitesse d'entrée de l'air augmente.

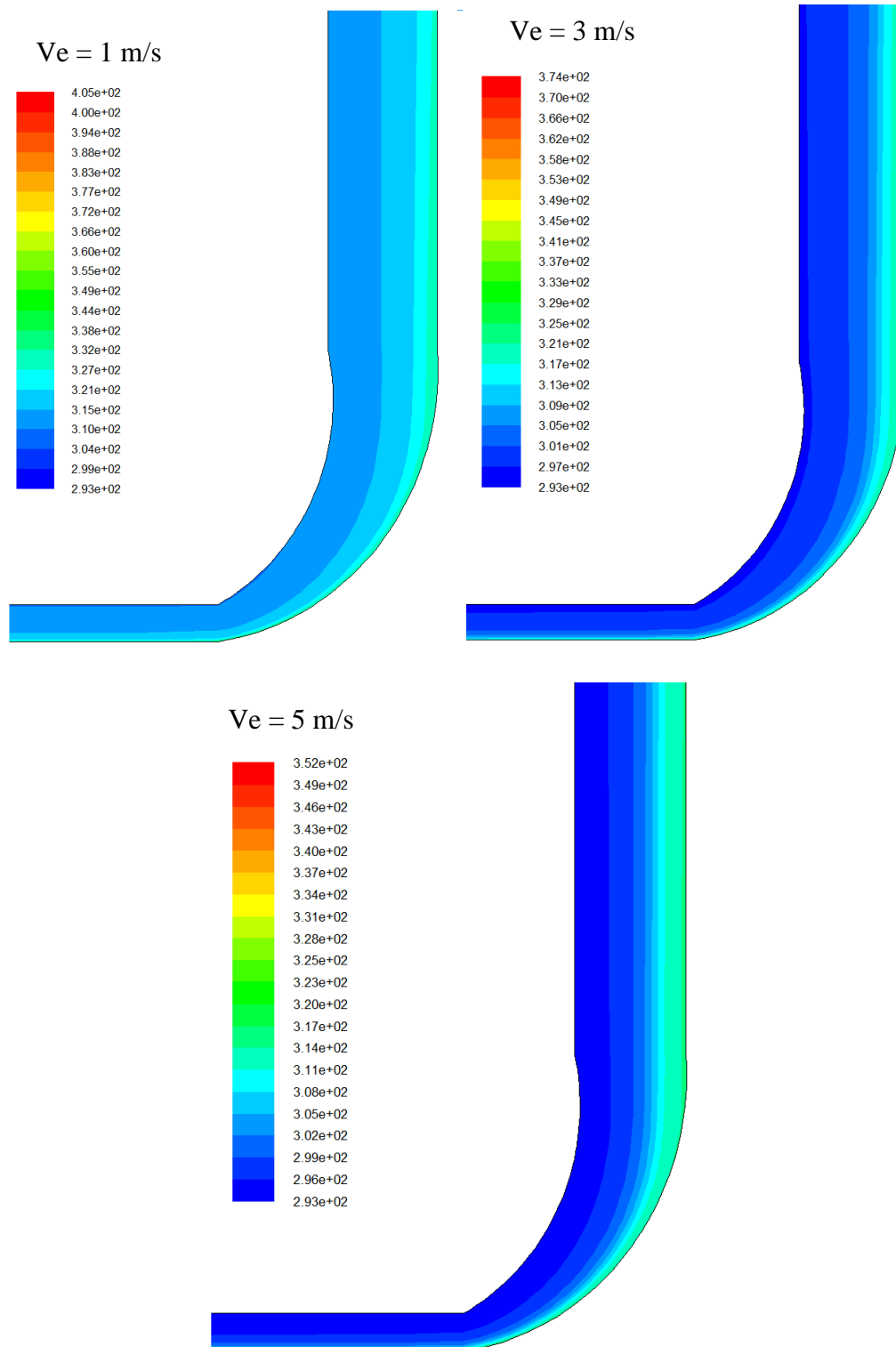


Figure. IV. 12. Distribution de la température de l'écoulement d'air pour différentes valeurs de vitesse d'entrée de l'air

L'influence de la vitesse d'entrée de l'air et du rayon du collecteur sur le profil de température de l'écoulement de l'air à travers le collecteur est montrée sur la figure. IV.13. Nous

pouvons observer que lorsque la vitesse d'entrée de l'air est constante, la température de l'air augmente le long du collecteur, alors qu'une augmentation de celle-ci conduit à une diminution de la température de l'écoulement de l'air, pour un même rayon de collecteur.

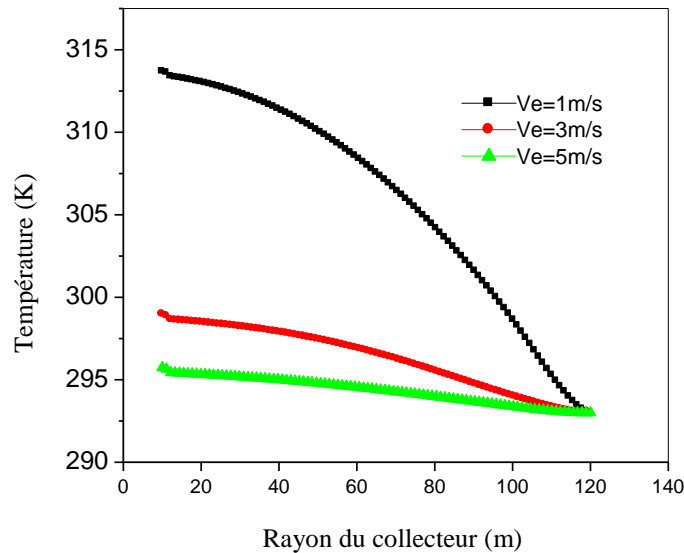


Figure. IV. 13. Profil de la température de l'écoulement de l'air en fonction du rayon du collecteur pour différentes valeurs de vitesse d'entrée de l'air (température ambiante de 293 K)

➤ **Effet de la température ambiante**

L'influence de la température ambiante sur les champs dynamiques et thermiques de la cheminée solaire et spécifiquement sous le collecteur pour deux cas (1) en appliquant la condition aux limites, de pression à l'entrée et (2) pour une vitesse d'entrée de l'air de 5 m/s), est examinée dans ce qui suit.

La distribution de la vitesse de l'air au milieu de la cheminée solaire, pour différentes valeurs de température ambiante (293 K, 310 K et 317 K) est représentée sur la figure. IV.14. Nous pouvons noter que la vitesse de l'air augmente, jusqu'à atteindre sa valeur la plus élevée à l'entrée de la cheminée. De plus, la vitesse de l'air est d'autant plus significative que la température ambiante est élevée (pour un même rayon de collecteur).

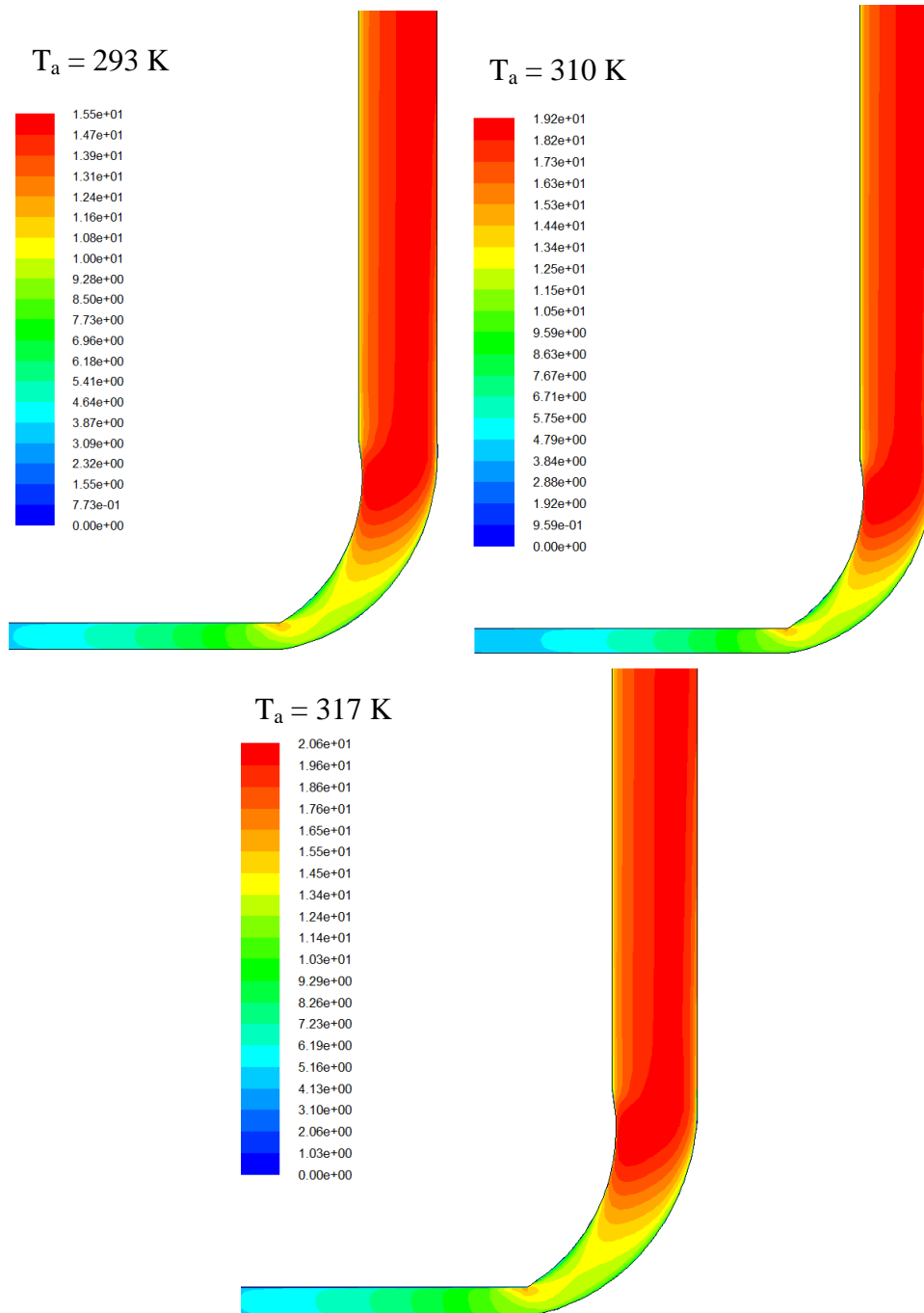


Figure. IV.14. Distribution de la vitesse de l'écoulement d'air pour différentes valeurs de température ambiante

L'examen du profil de vitesse de l'air à travers le collecteur, pour différentes valeurs de température ambiante et en appliquant la condition aux limites de pression à l'entrée (figure. IV.15), permet de remarquer que la vitesse de l'air augmente à travers le collecteur. Il apparaît également que la vitesse de l'air augmente lorsque la température ambiante croît, jusqu'à

atteindre des valeurs maximales de 16.70, 13.57 et 10.18 m/s, respectivement pour les températures ambiantes de 317, 310 et 293 K, à la sortie du collecteur.

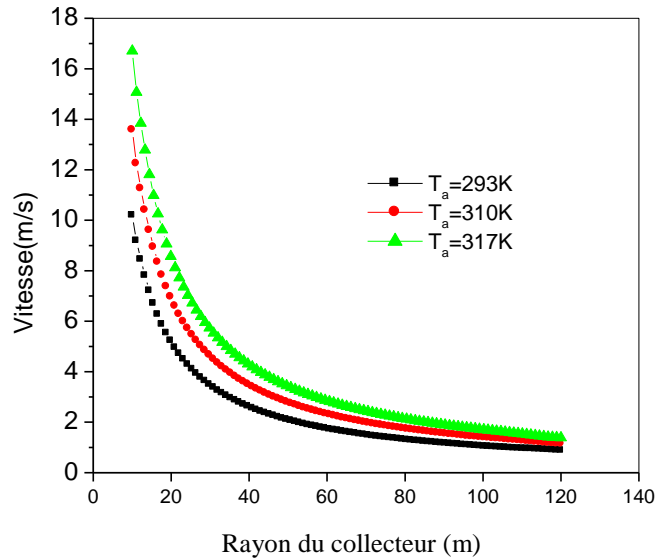


Figure. IV. 15 . Profil de la vitesse de l'air à travers le collecteur pour différentes valeurs de la température ambiante (en appliquant la condition aux limites de pression à l'entrée)

Concernant la distribution de la pression de l'air dans la cheminée solaire, pour différentes valeurs de température ambiante, la figure. IV.16 montre que la pression de l'air au milieu de la cheminée solaire a une valeur négative. C'est la raison pour laquelle l'air extérieur peut pénétrer dans la cheminée solaire et former un flux d'air.

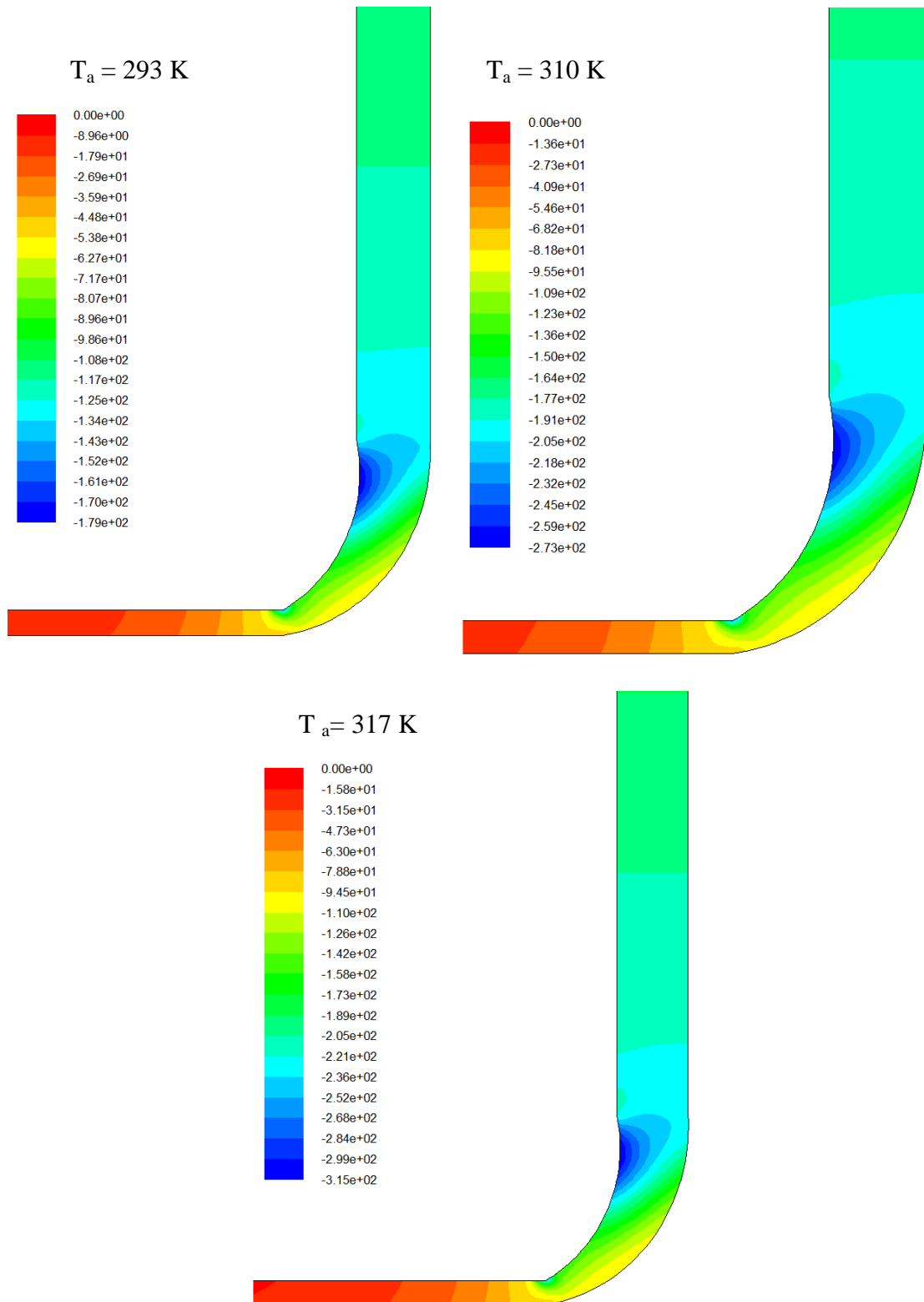


Figure. IV.16. Distribution de la pression statique de l'écoulement d'air pour différentes valeurs de température ambiante

L'effet de la température ambiante sur le profil de pression statique de l'air, à travers le collecteur est illustré sur la figure. IV.17. A l'inverse de la vitesse de l'air, la pression de l'air diminue à travers le collecteur jusqu'à atteindre une valeur minimale à la sortie du collecteur. Il apparait également que l'augmentation de température ambiante conduit à une diminution de la pression statique de l'air. De ce qui précède, nous pouvons conclure que la température ambiante a un effet bénéfique, sur le processus de transfert de chaleur à l'intérieur de la cheminée solaire.

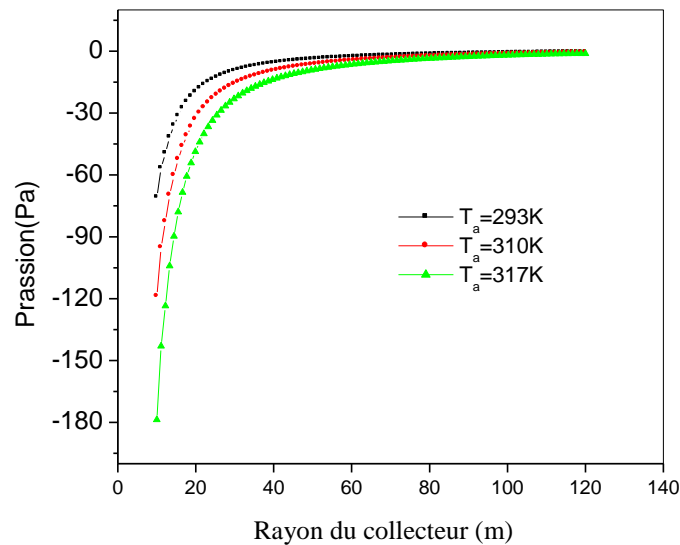


Figure. IV.17. Profil de la pression statique de l'air en fonction du rayon du collecteur à différentes valeurs de température ambiante (en appliquant la condition aux limites de pression à l'entrée)

La distribution de température de l'air dans la cheminée solaire, pour différentes valeurs de température ambiante, est illustrée par figure. IV.18. Nous pouvons observer que la température de l'air augmente progressivement le long de la direction de l'écoulement de l'air, jusqu'à atteindre une valeur maximale à la base de la cheminée. En outre elle croit d'autant plus que la température ambiante est élevée.

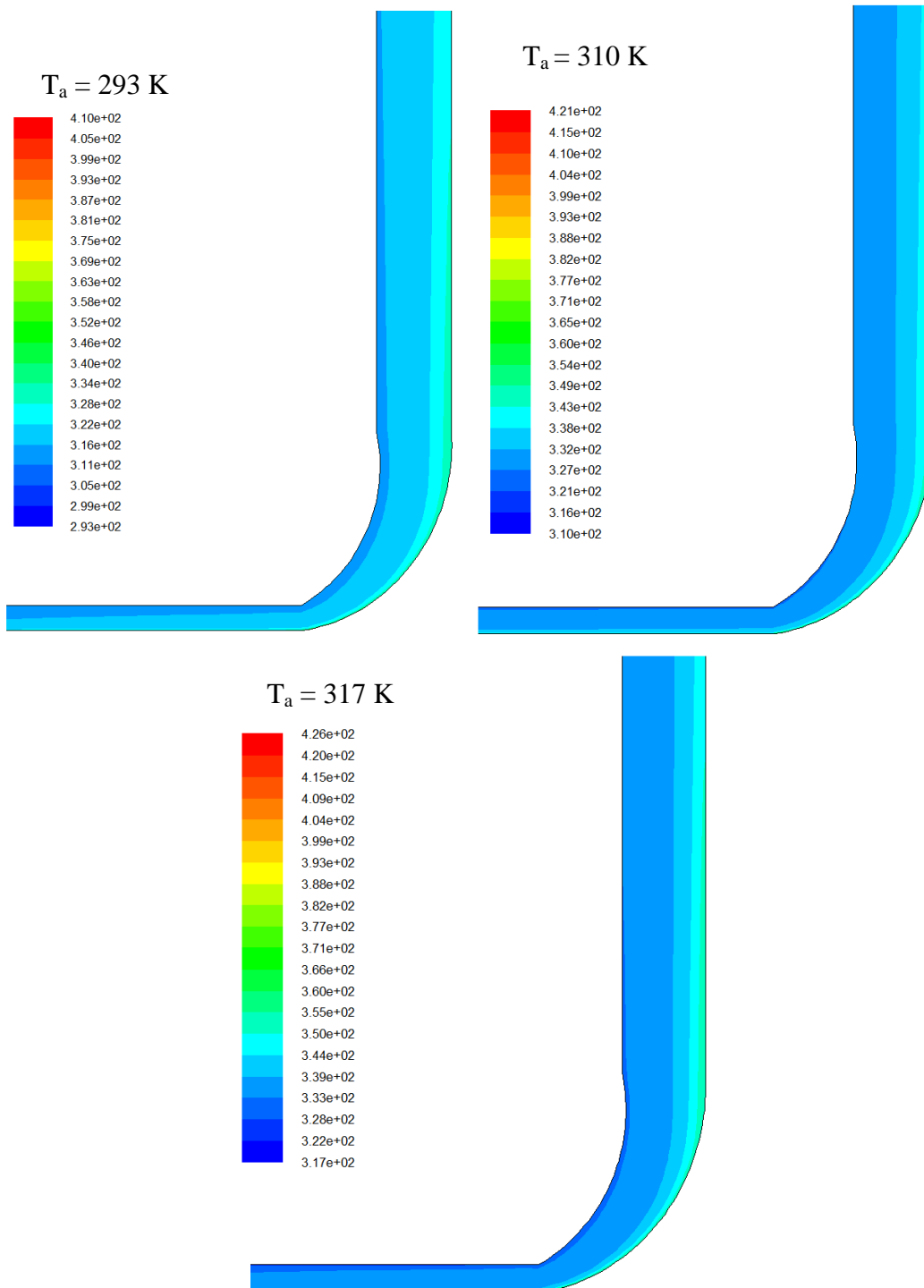


Figure. IV. 18. Distribution de la température de l'écoulement d'air pour différentes valeurs de température ambiante.

L'observation des courbes de la variation de la température de l'air dans le collecteur, pour différentes valeurs de température ambiante, (figure. IV. 19), permet de noter que pour une température ambiante donnée, constante, la température du fluide augmente lorsque le rayon du

collecteur diminue. En outre, (pour un même rayon de collecteur), la température de l'air dans ce dernier est d'autant plus élevée, que la température ambiante est grande.

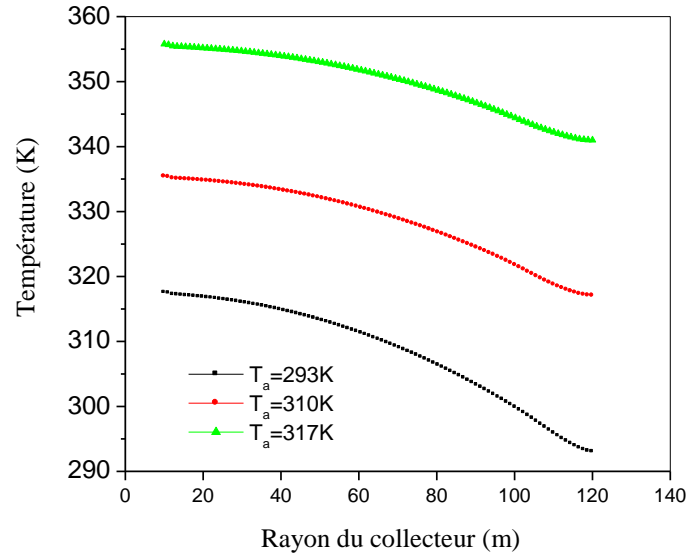


Figure. IV.19. Profil de température de l'air en fonction du rayon du collecteur à différentes valeurs de température ambiante (en appliquant la condition aux limites de pression à l'entrée).

Dans ce qui suit, l'influence de la température ambiante sur les champs thermiques et dynamiques de l'écoulement d'air, dans la cheminée solaire avec une vitesse d'entrée de l'air de 5m/s (vitesse du vent), est examinée.

La distribution de la vitesse de l'air dans la cheminée solaire pour différentes valeurs de température ambiante (293, 310 et 317 K) et pour une vitesse d'entrée de l'air de 5 m/s (vitesse du vent) (figure. IV. 20), est similaire à celle pour le cas de la condition initiale de pression à l'entrée du collecteur. Néanmoins la vitesse de l'air dans la cheminée solaire, en présence du vent, est plus importante que celle du cas traité précédemment.

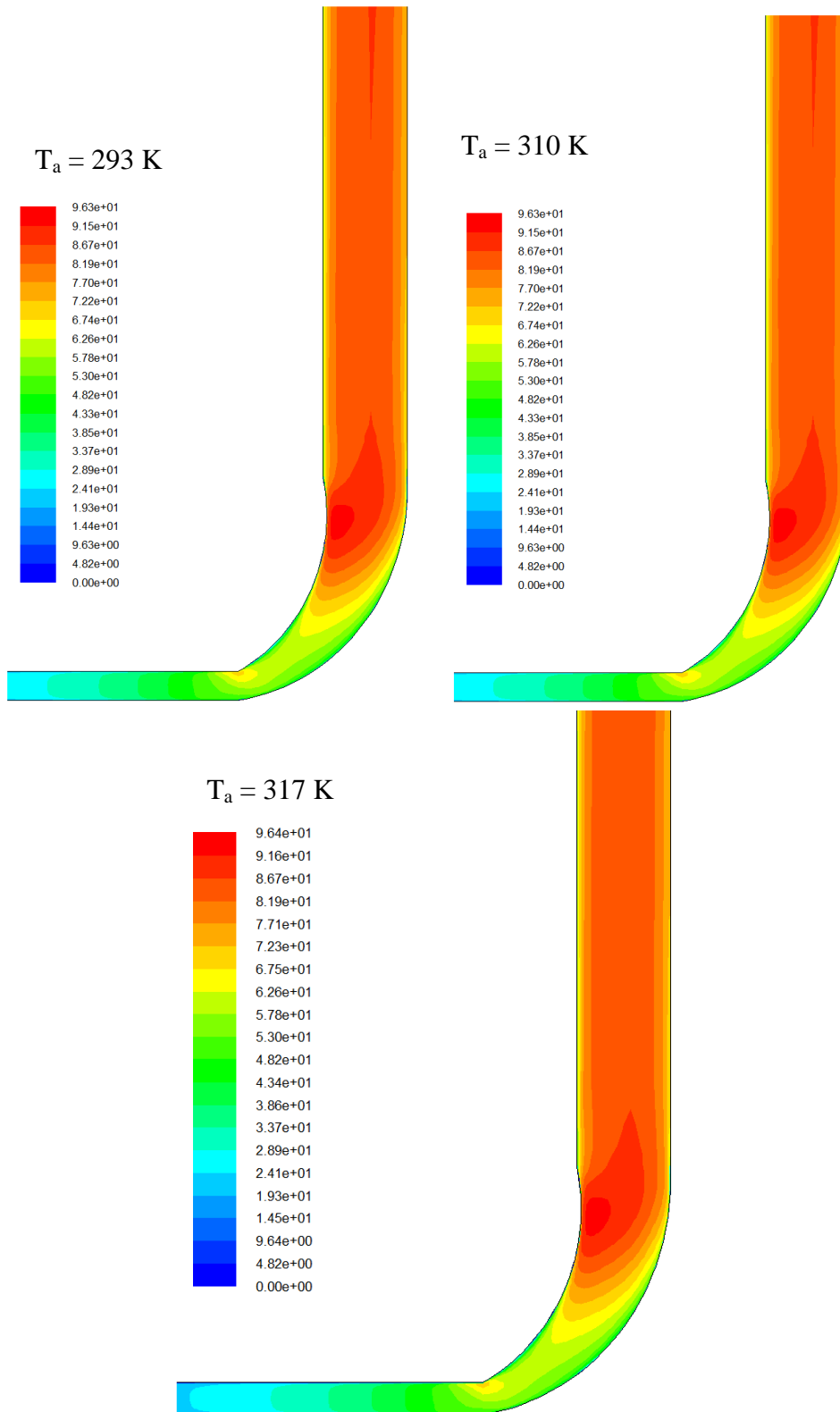


Figure. IV. 20. Distribution de la vitesse de l'écoulement d'air pour différentes températures ambiantes et pour une vitesse d'entrée de l'air de 5 m/s

Le profil de vitesse de l'air le long du collecteur, pour différentes valeurs de température ambiante et pour une vitesse d'entrée de l'air de 5 m/s (figure. IV. 21), montre que la vitesse de l'air le long du collecteur, augmente de manière identique pour les trois valeurs de température ambiante (293, 310 et 317 K) et atteint une valeur maximale de 60.63 m/s à la sortie du collecteur. Nous pouvons ainsi déduire qu'en présence du vent (vitesse de 5 m/s), l'effet de la température ambiante sur le fonctionnement de la cheminée solaire, est le même pour toute valeur de celle -ci. Ce qui démontre l'effet dominant de la vitesse d'entrée de l'air, sur le fonctionnement de la cheminée solaire, par rapport à celui de la température ambiante.

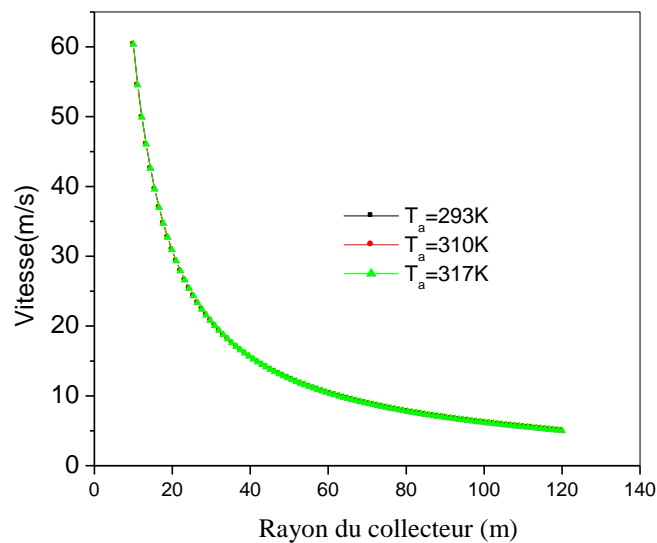


Figure. IV. 21 . Profil de vitesse de l'air à travers le collecteur pour différentes valeurs de température ambiante (vitesse d'entrée de l'air de 5 m/s)

Concernant la distribution de la pression statique de l'air dans la cheminée solaire, pour les trois valeurs de température ambiante et pour une vitesse d'entrée de l'air de 5 m/s (figure. IV. 22), il est à noter que la pression statique de l'air, en présence du vent est positive dans la cheminée solaire, (sauf à côté de la paroi intérieure, à l'entrée de la cheminée), ce qui est probablement dû au frottement avec la paroi, qui a réduit la différence de pression, lorsque le courant ascendant s'écoule à l'intérieur. La figure. IV. 22, montre également que les valeurs de la pression statique de l'air sont proches, pour les trois valeurs de la température ambiante.

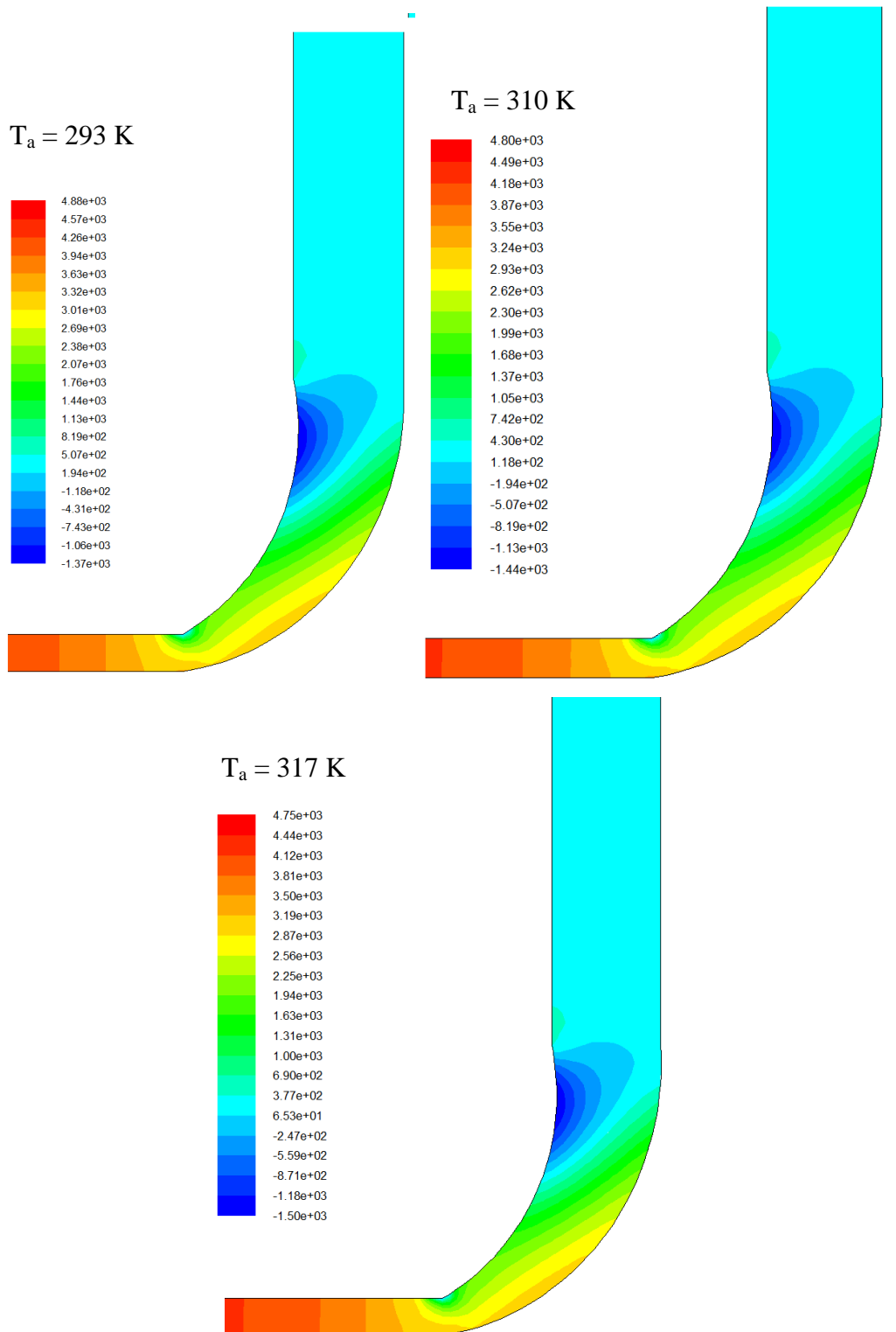


Figure. IV. 22. Distribution de la pression statique de l'écoulement d'air pour différentes températures ambiantes et pour une vitesse d'entrée de l'air de 5 m/s

La figure. IV. 23 illustre le profil de pression statique de l'air à travers le collecteur, pour les trois valeurs de température ambiante et sous une vitesse d'entrée de l'air de 5 m/s. Nous pouvons remarquer que l'effet de la température ambiante sur le profil de pression statique de l'air est négligeable en présence du vent d'une vitesse de 5 m/s, à l'entrée du collecteur. En effet, pour les trois valeurs de la température ambiante, la pression statique de l'air diminue exactement de la même manière, le long du collecteur et prend des valeurs positives. Comme le système est en contact avec l'environnement, par l'entrée du collecteur et la sortie de la cheminée, la différence de pression statique devient la force motrice, pour pousser l'air à l'intérieur du système. Ainsi, les valeurs positives de la pression statique conduisent à une diminution de la force motrice du système et donc à une baisse de l'efficacité de ce dernier.

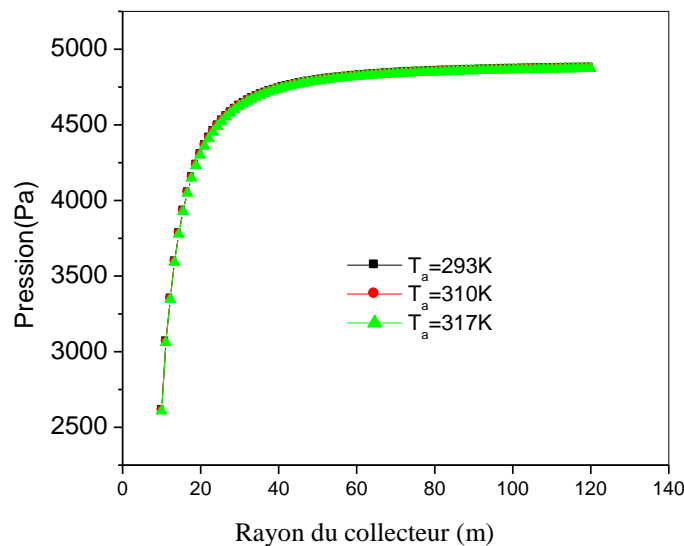


Figure. IV.23. Profil de la pression statique en fonction du rayon du collecteur pour différentes valeurs de température ambiante (vitesse d'entrée de l'air de 5 m/s)

La distribution de température du fluide, au milieu de la cheminée solaire, pour les trois valeurs de température ambiante et pour une vitesse d'entrée de l'air de 5 m/s, est illustrée par la figure. IV.24. A l'inverse des champs de vitesse et de la pression de l'air, la température de l'air dans la cheminée solaire croît, lorsque la température ambiante augmente. Pour se rendre compte de l'effet de la vitesse d'entrée de l'air sur la distribution température de l'air dans la cheminée solaire, il suffit de comparer les résultats des figures. IV. 24 et IV. 18. Il est aisé d'observer que la température de l'air à l'intérieur de la cheminée solaire a diminué de manière significative dans le cas de la vitesse d'entrée de l'air de 5 m/s. Ainsi, pour une température ambiante de 310 K, la

température de l'air atteint une valeur maximale de 421 K, dans le cas où la condition aux limites de pression d'entrée est appliquée, alors que dans le second cas (pour une vitesse d'entrée de l'air de 5 m/s), elle n'est que de 369 K.

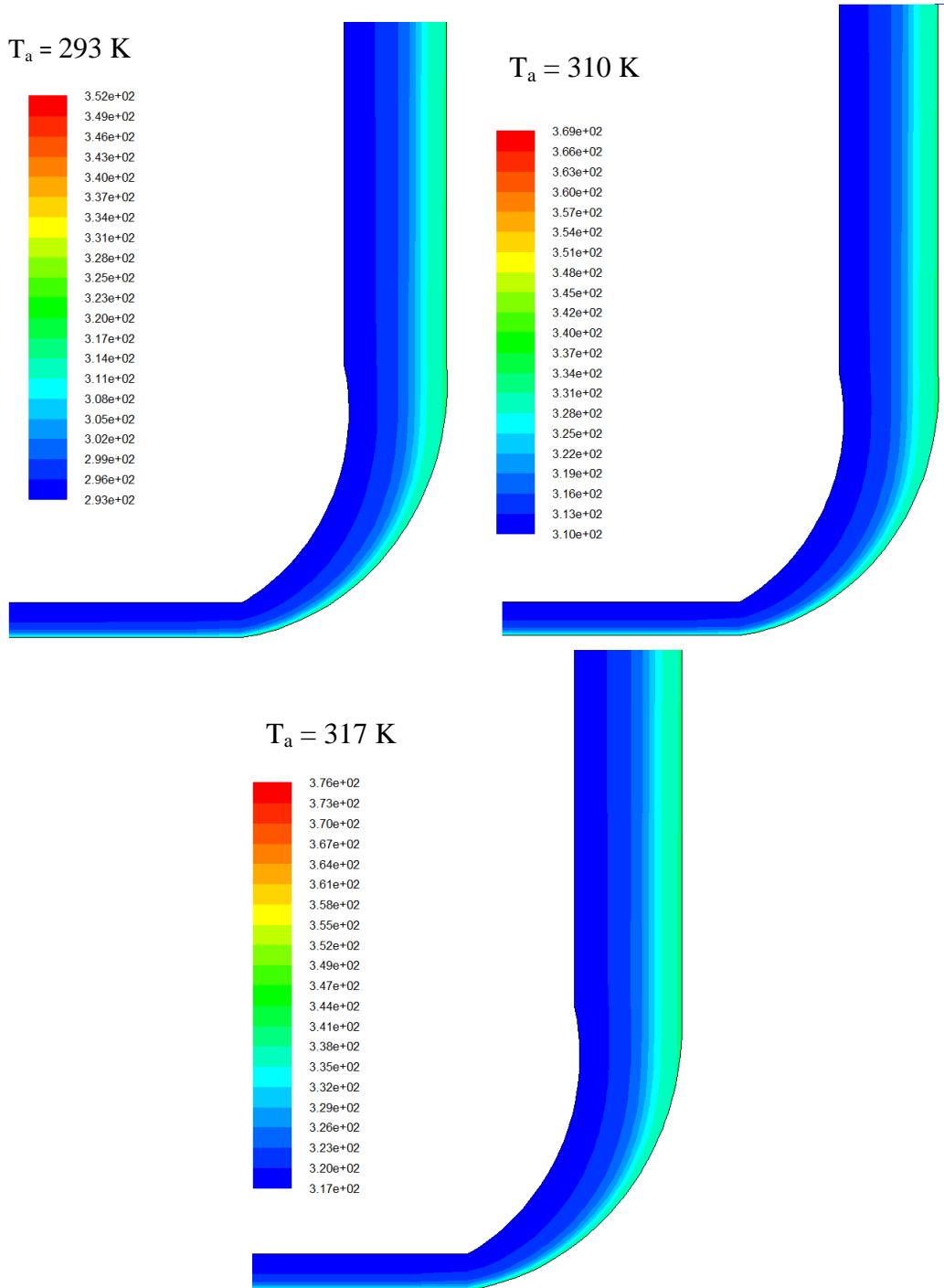


Figure. IV. 24. Distribution de la température de l'écoulement d'air pour différentes températures ambiantes et pour une vitesse d'entrée de l'air de 5 m/s

Le profil de température de l'air, en fonction du rayon du collecteur pour les trois valeurs de température ambiante et pour une vitesse d'entrée de l'air de 5 m/s, est représenté sur la figure. IV. 25. Nous pouvons noter que la température de l'air n'augmente que légèrement à travers le collecteur. En effet, la différence de température de l'air entre l'entrée et la sortie du collecteur n'est que de 2.75, 2.74 et 2.74 K, respectivement pour les valeurs de température ambiante de 293, 310 et 317 K. Ainsi une vitesse de vent même modérée (5 m/s), peut influencer négativement sur le fonctionnement de la cheminée solaire.

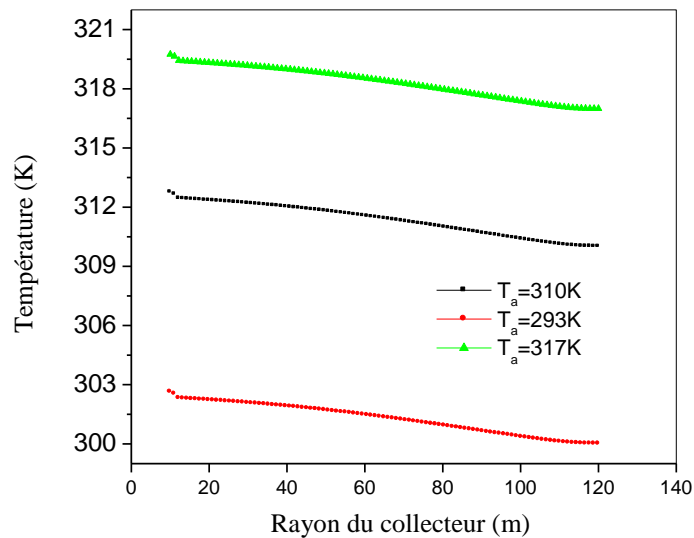


Figure. IV.25. Profil de température en fonction du rayon du collecteur à différentes valeurs de température ambiante (vitesse d'entrée de l'air de 5 m/s)

Ainsi, les résultats précédents, mettent en évidence l'effet défavorable du vent (lorsque la vitesse de l'air à l'entrée du collecteur est de 5 m/s), sur le fonctionnement d'une installation à cheminée solaire.

IV. 2. 3. Etude de la performance de la cheminée solaire : étude de cas en Algérie

La possibilité d'installer une cheminée solaire en Algérie sera examinée dans ce qui suit. Quatre régions potentielles de différents climats et différentes latitudes (Constantine, Ouargla, Adrar et Tamanrasset), ont retenu notre attention. La performance de toute installation solaire et à fortiori une cheminée solaire, étant étroitement liée à l'irradiation solaire et à la température

ambiante du site, nous avons dans un premier temps accordé un intérêt aux paramètres susmentionnés. L'énergie électrique produite annuellement et mensuellement par la cheminée solaire pour les quatre régions, sera estimée.

Les variations mensuelles du rayonnement solaire pour les quatre régions choisies sont représentées sur la figure .V. 26. L'observation des différentes courbes, permet de constater que la région de Tamanrasset est la plus ensoleillée (avec une valeur maximale de 800 W/m^2 au mois de Juin), suivie de près par celle d'Adrar. Constantine étant le site dont l'irradiation solaire est la moins élevée.

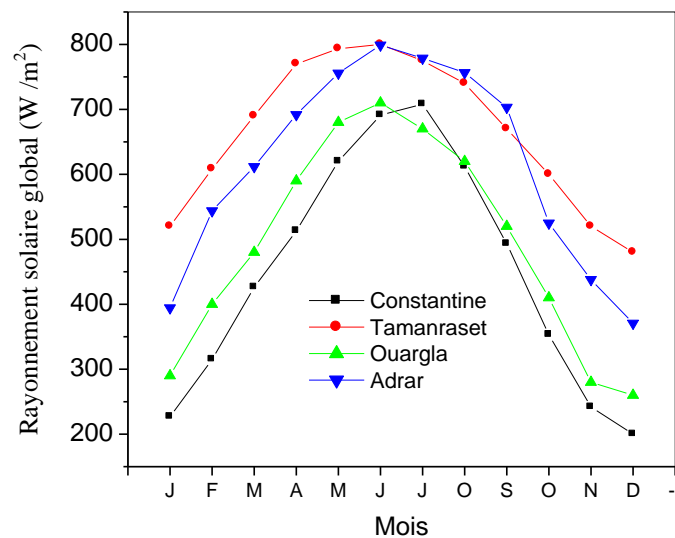


Figure. IV.26. Variation mensuelle du rayonnement solaire global pour les quatre régions choisies

La figure. IV. 27 montre l'évolution de la température ambiante moyenne de chaque région au cours de l'année. Il apparaît que la région d'Adrar soit la plus chaude, suivie de près de celle de Ouargla. Les températures ambiantes moyennes mensuelles de Constantine sont les moins élevées.

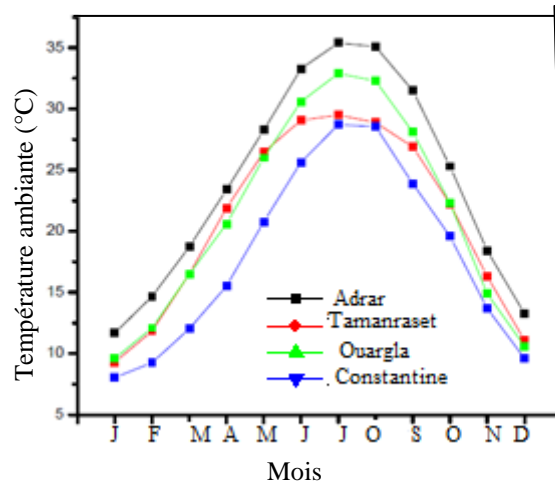


Figure. IV.27. Variation mensuelle de la température ambiante pour les quatre régions

Les variations de l'irradiation solaire et de la température ambiante, au cours de trois journées types des mois de Mars (21 Mars) de Juin (21 Juin) et de Novembre (21 Novembre), sont représentées sur les figures IV.28, IV.29, IV.30, IV.31, IV.32 et IV.33, pour les quatre régions.

L'examen des courbes de l'ensemble des figures, montre que les valeurs les plus élevées du rayonnement solaire et de la température ambiante pour les quatre régions, sont au mois de Juin. Toutes les courbes du rayonnement global, ont une allure similaire, en forme de cloche, dont le maximum est approximativement à 12 heures (midi solaire).

L'analyse des différentes courbes de la température ambiante, conduit à constater que les valeurs de cette dernière, sont différentes d'une région à l'autre résultant de leurs positions géographiques et leurs albédos. En juin, la température à Adrar peut atteindre 49°C, alors que celle des autres régions, est comprise entre 32 et 37°C.

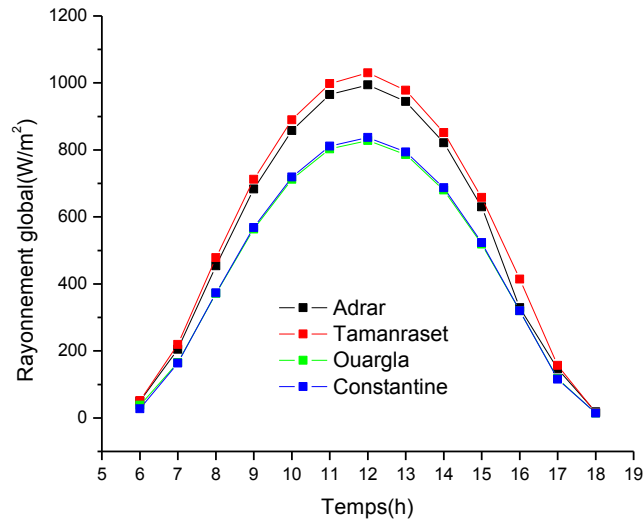


Figure. IV.28. Variation horaire du rayonnement solaire global dans les quatre régions (Journée du 21/ 03/ 2013)

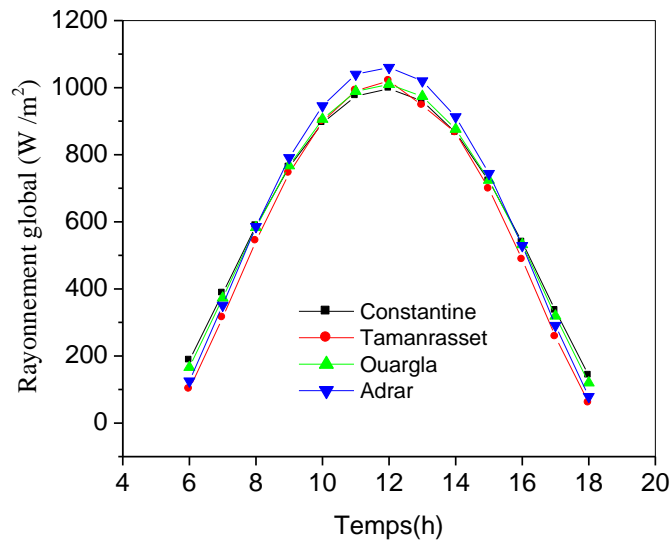


Figure. IV.29. Variation horaire du rayonnement solaire global dans les quatre régions (Journée du 21/ 06/ 2013)

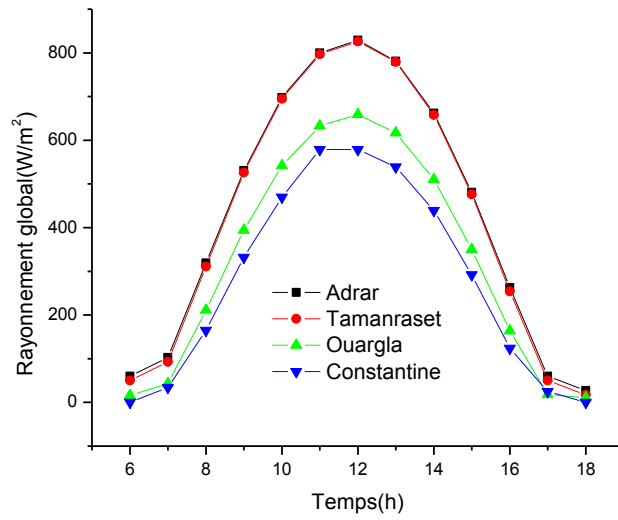


Figure. IV.30. Variation horaire du rayonnement solaire global dans les quatre régions (Journée du 21/ 11/ 2013)

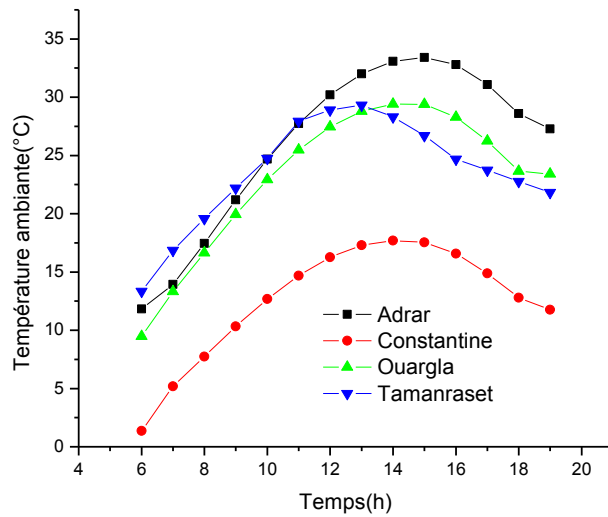


Figure. IV. 31. Température ambiante horaire dans les quatre régions (Journée du 21/ 03/ 2013)

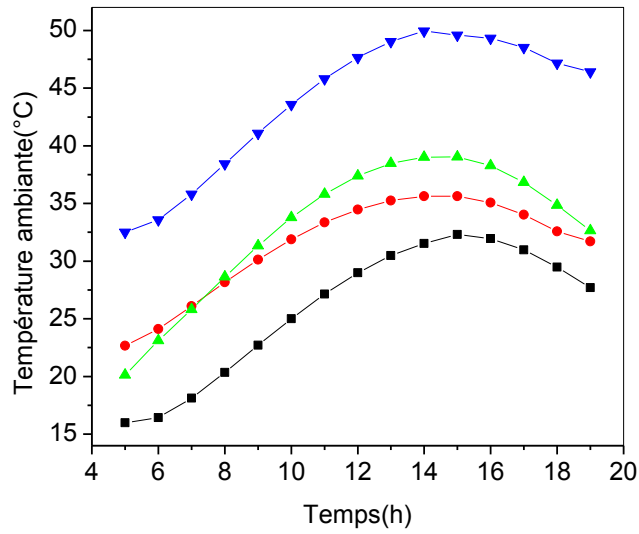


Figure. IV. 32. Température ambiante horaire dans les quatre régions
(Journée du 21/ 06/ 2013)

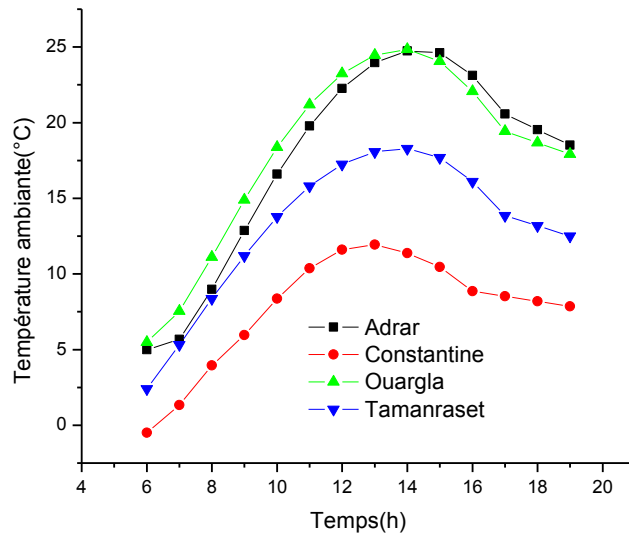


Figure. IV. 33. Température ambiante horaire dans les quatre régions
(Journée du 21/ 11/ 2013)

L'énergie électrique mensuelle produite par une cheminée solaire, installée dans les quatre régions, (Constantine, Ouargla, Adrar et Tamanrasset), est présentée sur la figure. IV.34.

Nous pouvons noter que la région de Tamanrasset a la meilleure production d'électricité (73 kW), comparativement aux trois autres régions.

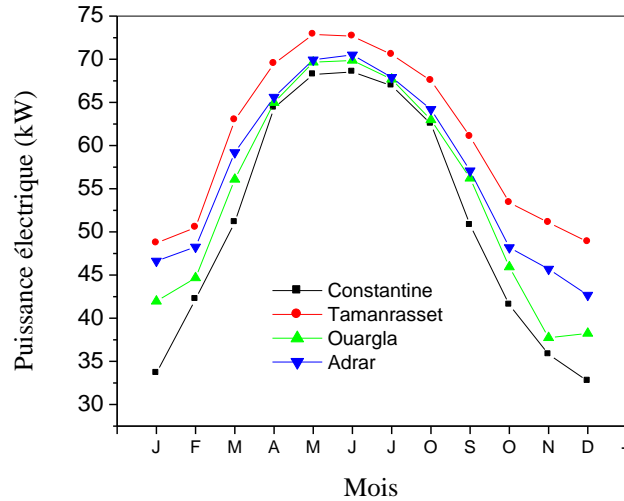


Figure. IV.34. Puissance électrique mensuelle pour les quatre régions

Les variations de la température de l'air, entre l'intérieur et l'extérieur du collecteur (ΔT), au cours de trois journées types des mois de Mars (21 Mars), de Juin (21 Juin) et de Novembre (21 Novembre), pour les quatre régions, sont respectivement représentées sur les figures IV.35, IV.36 et IV.37.

L'analyse des différentes courbes de ΔT , conduit à constater que, dans toutes les régions, la différence de température de l'air entre l'intérieur et l'extérieur du collecteur, augmente tout d'abord avec le temps, jusqu'à atteindre une valeur maximale à 12 heures (midi solaire), puis diminue par la suite. Notons que la valeur de ΔT la plus élevée, a été obtenue dans la région de Constantine, (pour une température ambiante de 30°C à 12 h, la température de l'air à la sortie du collecteur est de 54°C , soit une différence de température de l'air de 24°C). Pour Adrar, la différence de température de l'air entre l'entrée et la sortie du collecteur n'est que de 21°C (pour une température ambiante de 50°C , la température de l'air à la sortie du collecteur est de 71°C).

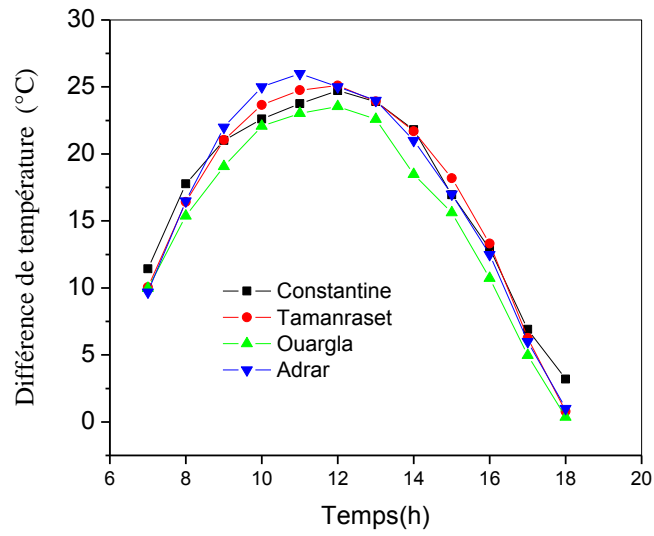


Figure. IV.35. Variation temporelle de la différence de température de l'air entre l'intérieur et l'extérieur du collecteur (Journée du 21/03/2013)

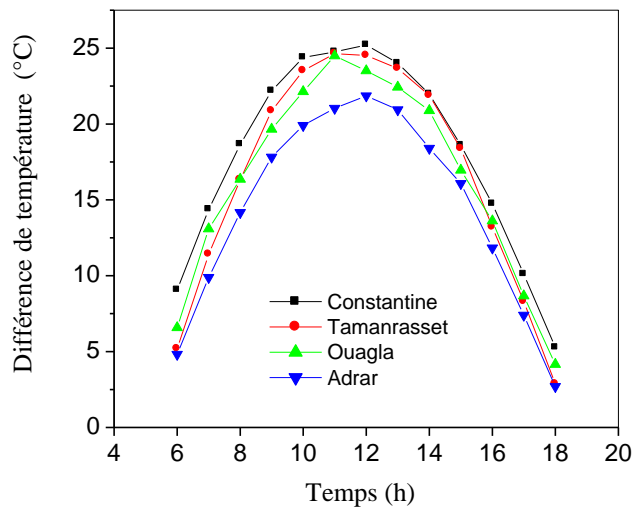


Figure. IV.36. Variation temporelle de la différence de température de l'air entre l'intérieur et l'extérieur du collecteur (Journée du 21/06/2013)

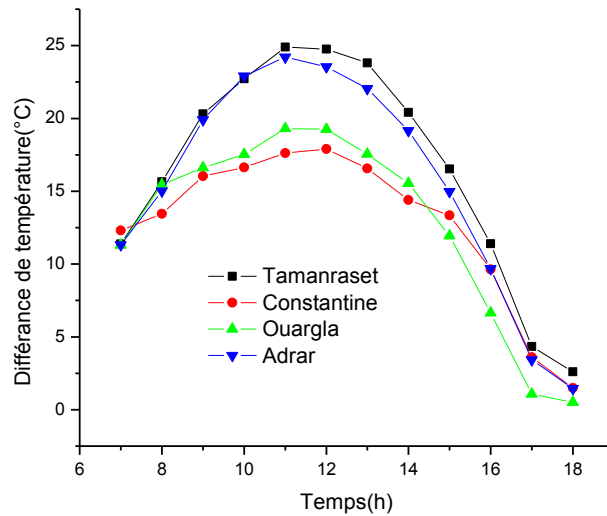


Figure. IV.37. Variation temporelle de la différence de température de l'air entre l'intérieur et l'extérieur du collecteur (Journée de 21/11/2013)

Les variations de la puissance électrique horaire produite durant des journées type des mois de Mars, Juin et Novembre, sont représentées respectivement sur les figures IV.38, IV.39 et IV.40, pour les quatre régions choisies.

Nous pouvons observer que toutes les courbes ont la même forme en cloche, qui de plus est similaire à celle du rayonnement solaire, atteignant des valeurs maximales à midi. La puissance est ainsi d'autant plus grande que le rayonnement solaire est plus élevé.

Au mois de Mars, les puissances électriques produites les plus élevées, (à 12h midi solaire), de 108.94kW et de 111.8 kW, sont respectivement à Tamanrasset (pour un rayonnement solaire de 1030 W/m²) et à Adrar (pour un rayonnement solaire de 994 W/m²). Dans les sites Constantine (rayonnement solaire 837 W/m²) et Ouargla (rayonnement solaire de 828 W/m²), les puissances produites ne sont respectivement que de 95.57 kW et de 100 kW.

Au mois de juin, lorsque le rayonnement solaire atteint ses plus hauts niveaux (1060 W/m² à Adrar, 1020 W/m² à Tamanrasset, 1010 W/m² à Ouargla et 997 W/m² à Constantine), la puissance électrique produite augmente dans toutes les régions. Elle atteint, à 12h, les valeurs de 113 kW à Tamanrasset, et de 109 kW (quasiment la même valeur), dans les trois autres régions. Au mois de Novembre, il peut être noté que la puissance électrique produite est moindre qu'au mois de Mars. Elle est au maximum de 93.37 kW à Tamanrasset et de 93.08 kW à Adrar. Les

puissances électriques produites à Constantine et à Ouargla sont encore plus faibles, avec respectivement des valeurs, à 12h, de 67.26 kW et de 72.87 kW.

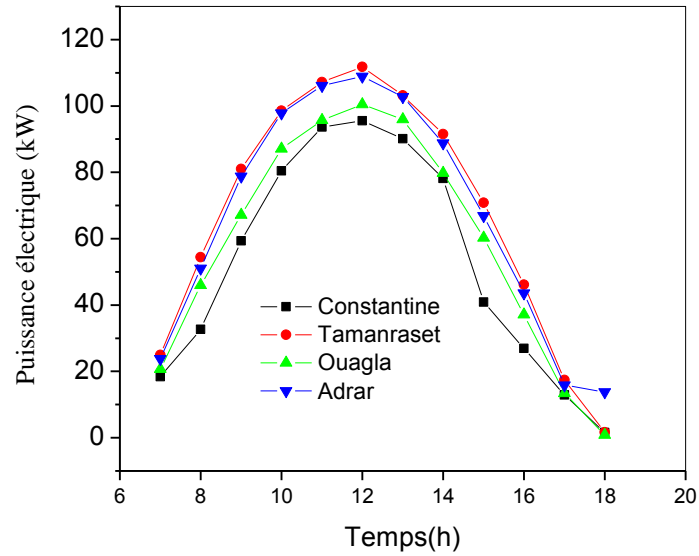


Figure. IV.38. Puissance électrique horaire pour les quatre régions (Journée du 21/03/2013)

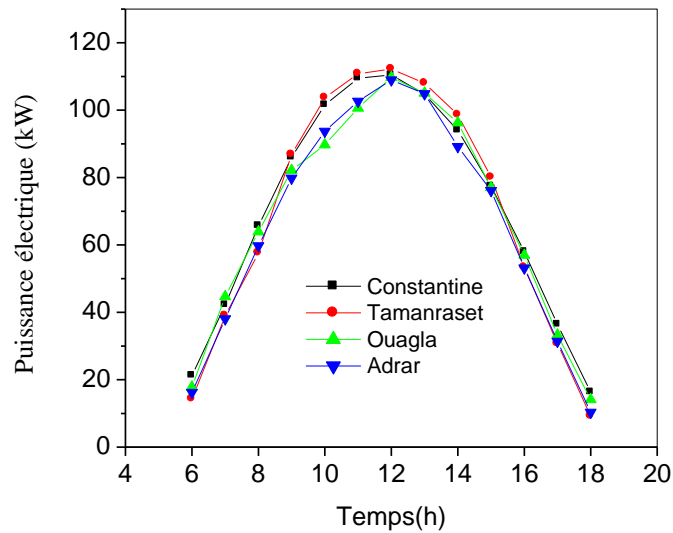


Figure. IV.39. Puissance électrique horaire pour les quatre régions (Journée du 21/06/2013)

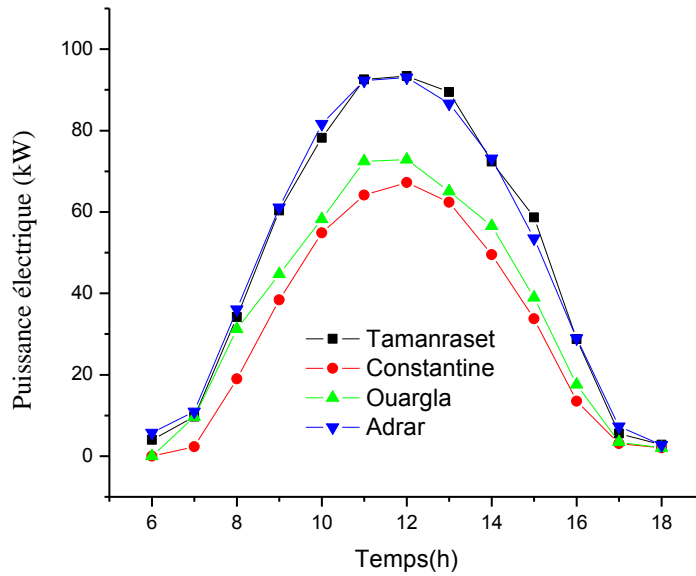


Figure. IV.40. Puissance électrique horaire pour les quatre régions
(Journée du 21/11/2013)

Dans ce chapitre, la possibilité d'installer une cheminée solaire en Algérie, a été examinée. Quatre sites potentiels ont été sélectionnés et la puissance électrique de chaque région a été estimée. Les résultats obtenus, nous conduisent à la conclusion, que la latitude de la région, le rayonnement solaire et la température ambiante, sont les principaux facteurs que l'on doit prendre en compte pour le choix du site. En outre, il apparaît qu'une installation à cheminée solaire, peut effectivement être envisagée dans des sites caractérisés par un climat continental et aride.

Chapitre V : Résultats et discussion (cas de la cheminée solaire avec turbine, 3D)

V.1. Introduction

Ce dernier chapitre est dédié à l'étude numérique en 3D, de la cheminée solaire avec une turbine. La simulation sera entreprise, soit en adoptant le modèle de ventilateur dans lequel la turbine est considérée comme un disque infiniment mince (la configuration détaillée de celle-ci n'est pas prise en compte), soit en envisageant le couplage de la cheminée solaire avec une turbine réelle de quatre pales de profil aérodynamique FX-77-W- 153 A. L'effet des paramètres qui influent sur le fonctionnement de la turbine sera analysé. La puissance électrique, les rendements du collecteur et de la turbine, seront estimés.

V.2. Validation des résultats

Nos résultats numériques, (différence de la température dans le collecteur, vitesse de l'écoulement à l'entrée de cheminée et puissance électrique produite) seront comparés aux données expérimentales du prototype espagnol, de Manzanares.

- Pour la différence de la température dans le collecteur, et la vitesse de l'écoulement à l'entrée de cheminée, regroupées dans le tableau V.1, nous pouvons remarquer que nos résultats sont relativement proches de ceux issus de l'expérimentation du prototype espagnol [5], pour un rayonnement solaire de 1000W/m^2 .

Tableau. V.1. Comparaison entre les résultats de simulation en 3D et ceux de Manzanares

Les paramètres	Résultats expérimentaux du prototype espagnol	Résultats de simulation en 3D	Erreur relative (%)
V (m/s)	15	15.95	6.33
ΔT (K)	20	24.4	22

- Pour la puissance électrique produite par la cheminée solaire, (figure. V.1), un écart de l'ordre de 30.02% est constaté entre notre simulation (45.51 kW), et les résultats

expérimentaux du prototype de Manzanares (35 kW), rapportés par Haaf et al [5], pour une chute de pression à travers la turbine de 100 Pa et un rayonnement solaire de 800 W/m^2 .

La raison principale de cette différence “relativement importante” est que les paramètres structurels détaillés et la conception de la turbine, n’ont pas été pris en compte.

Nos résultats peuvent néanmoins être considérés en assez bon accord, avec les résultats expérimentaux du prototype espagnol.

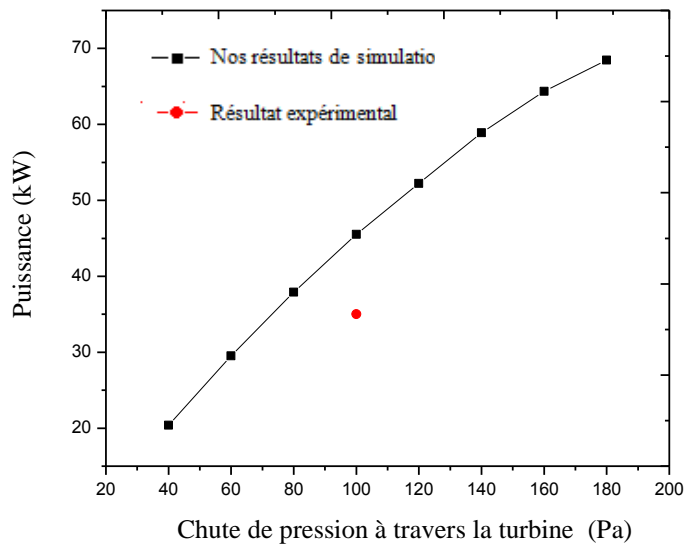


Figure. V.1. Comparaison des résultats de simulation en 3D, avec ceux de Manzanares

V.3. Résultats et discussion

V.3.1. Cas du modèle de ventilateur

Dans le cas de la simulation de la cheminée solaire, en adoptant le modèle de ventilateur, l’effet du rayonnement solaire et de la chute de pression à travers la turbine, sur la différence de température dans le collecteur, l’efficacité du collecteur et la puissance du système est examiné. Dans un premier temps, notre attention a porté sur les distributions de la pression, de la vitesse et de la température dans le collecteur, dans les cas de fonctionnement de la cheminée avec (à charge) et sans turbine (à vide ou hors charge), pour un rayonnement solaire de 1000 W / m^2 .

L’effet de la présence de la turbine sur la distribution de la pression statique de l’air dans le collecteur, est mis en évidence sur la figure. V.2. Il apparaît qu’une chute de pression

à travers la turbine de 100 Pa, conduit à une baisse de la pression statique à l'intérieur du collecteur (le long du collecteur), dont les valeurs négatives peuvent atteindre -24.45 Pa à la sortie du collecteur. Dans le cas de la cheminée fonctionnant en mode hors charge (donc sans la turbine), la pression statique à la sortie du collecteur, n'est que de -33.37 Pa.

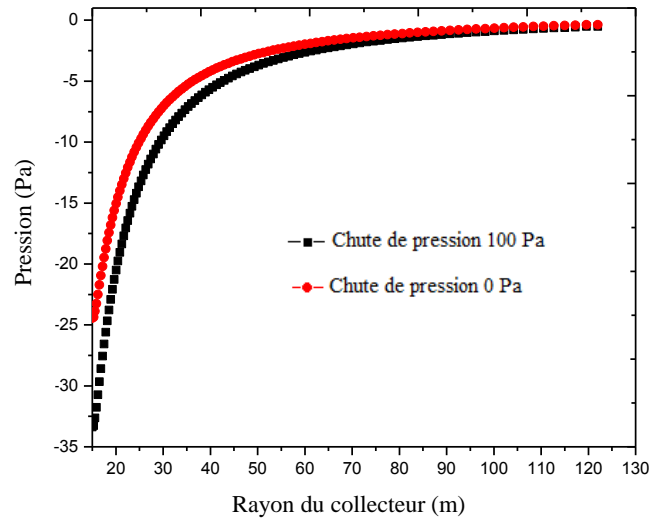


Figure. V.2. Distribution de la pression de l'air à travers le collecteur dans le cas du hors charge et durant le fonctionnement de la turbine

Concernant la distribution de la température à travers le collecteur (figure. V.3), nous pouvons observer que la présence de la turbine conduit à une plus grande augmentation de la température de l'air, le long du collecteur, que dans le cas où la cheminée fonctionne en mode hors charge. En effet, lorsque la chute de pression à travers la turbine est de 100 Pa, la température à l'intérieur du collecteur atteint 322.8 K (à la sortie du collecteur), alors que dans le second cas (cheminée solaire à vide), elle n'est que de 317.4 K. Notons que les différences de température de l'air (entrée-sortie) dans le collecteur atteignent 29.80 et 24.4 K, respectivement pour les modes de fonctionnement de la cheminée solaire avec et sans turbine.

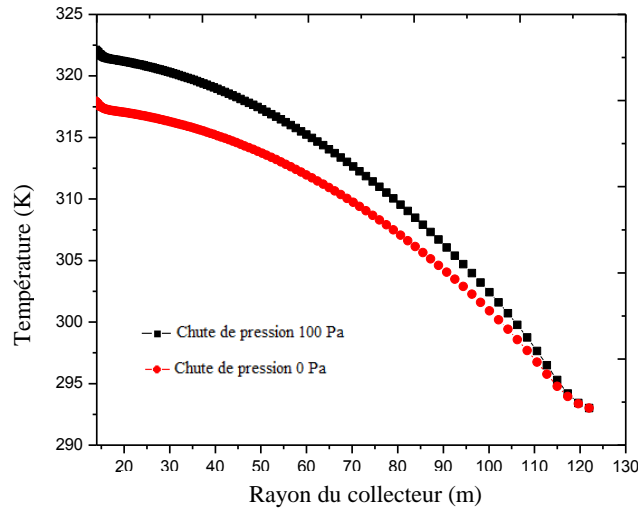


Figure. V.3. Distribution de la température de l'air dans le collecteur

Concernant la vitesse de l'air, elle augmente le long du collecteur pour les deux cas (figure. V.4), mais contrairement à la température, l'accroissement de celle-ci est plus important dans le cas de la cheminée, en mode de fonctionnement à vide (sans la turbine), pour lequel elle atteint une valeur maximale de 7.26 m/s, à la sortie du collecteur. Dans le cas de la présence de la turbine, la vitesse de l'air n'atteint que 6.19 m/s, probablement due à la résistance de l'air induite par la présence de la turbine, qui entraîne une diminution de la vitesse de l'écoulement de l'air. De ce fait, ce dernier est exposé plus longuement au rayonnement solaire à l'intérieur du collecteur, et par conséquent une température plus élevée.

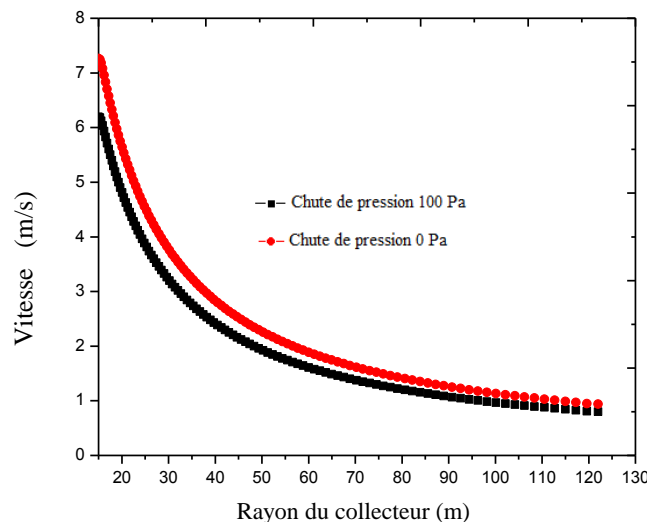


Figure. V.4. Distribution de la vitesse de l'air à travers le collecteur

V.3.1.1. Influence du rayonnement solaire sur les paramètres de la cheminée solaire

Le rayonnement solaire est la seule source d'énergie d'un système à cheminée solaire, et la variation de ce dernier à des effets significatifs sur les conditions de fonctionnement du système. Des simulations numériques ont été effectuées pour le prototype espagnol, pour un rayonnement solaire variant de 200 W/m^2 à 1200 W/m^2 , à des intervalles de 200 W/m^2 .

L'effet du rayonnement solaire, sur la vitesse de l'air à la sortie du collecteur et sur la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du collecteur, pour les deux cas (hors charge et pendant le fonctionnement de la turbine), est illustré sur la figure. V.5. Dans les deux cas, la vitesse du courant d'air à la sortie du collecteur, ainsi que la différence de température de l'air entre l'intérieur et l'extérieur du collecteur augmentent quand le rayonnement solaire croît. Néanmoins la vitesse du courant d'air, dans le cas d'une cheminée avec turbine est inférieure à celle où la cheminée solaire fonctionne en mode hors charge, alors que pour la différence de température de l'air, il se produit l'inverse. Ceci est probablement dû à la force de résistance provoquée par la présence de la turbine.

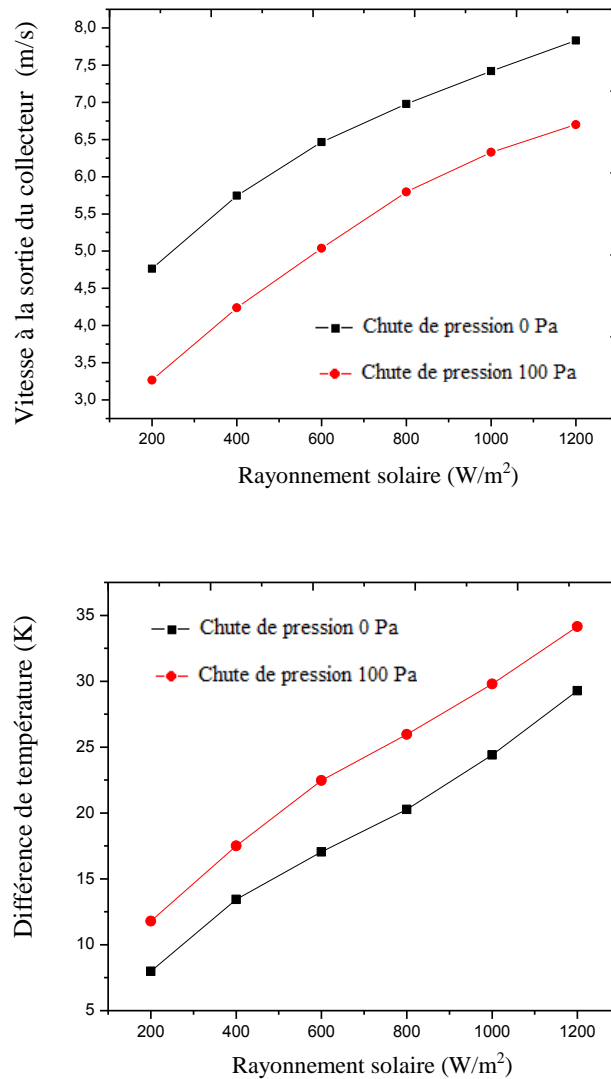


Figure. V.5. Effet du rayonnement solaire sur la vitesse moyenne de l'air à la sortie du collecteur et sur la différence de température de l'air entre l'intérieur et l'extérieur du collecteur.

La figure. V.6 montre l'influence du rayonnement solaire sur la vitesse moyenne de l'air et sur la température moyenne de l'air, à la sortie de la cheminée pour deux valeurs de chute de pression à travers la turbine, (0 Pa et 100 Pa). Nous pouvons remarquer que dans les deux cas, la vitesse moyenne de l'air et la température moyenne de l'air augmentent significativement quand le rayonnement solaire croît. Néanmoins, la présence de la turbine (lorsque la chute pression est de 100 Pa), qui engendre une force de résistance plus importante conduit à des vitesses moyennes de l'air à la sortie de la cheminée, plus faibles, mais à des

valeurs de températures moyennes plus élevées, que dans le cas de la cheminée fonctionnant en mode hors charge, (une chute de pression de 0 Pa).

Notons, par exemple que pour un rayonnement solaire de 800 W/m^2 , la vitesse moyenne dans la cheminée, pour les chutes de pression de 0 Pa et de 100 Pa, est respectivement de 16.8m/s et de 13.93 m/s, soit une diminution de 17 %, pendant le fonctionnement de la turbine. Par contre, une augmentation de la température moyenne de l'air de 4.25 K est observée dans le cas d'une chute de pression de 100 Pa, par rapport au cas où la chute de pression est de 0 Pa.

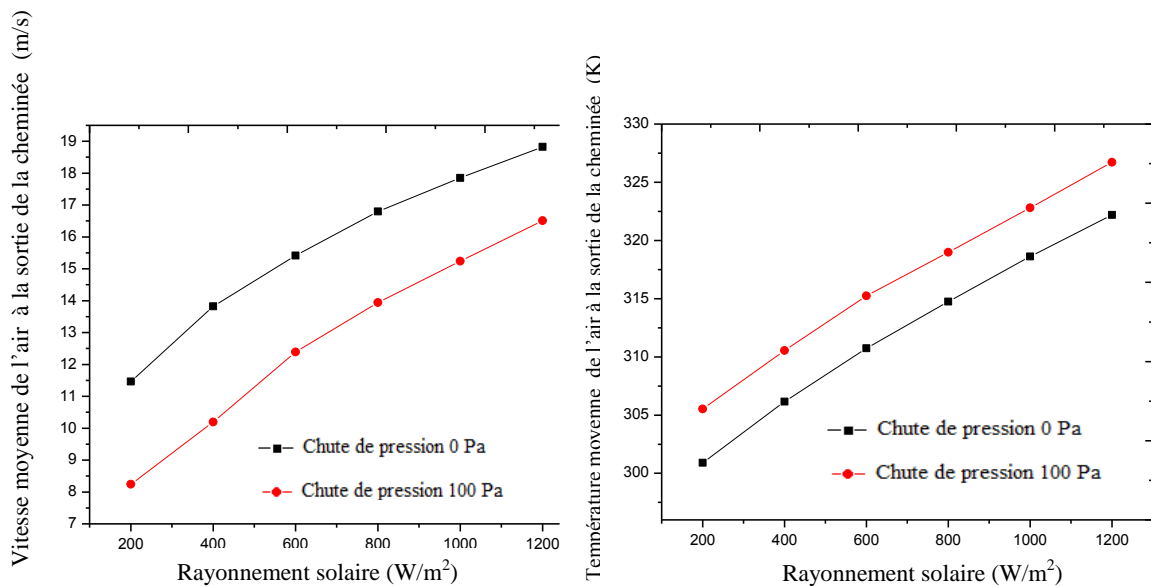


Figure. V. 6. Effet du rayonnement solaire sur la vitesse et sur la température moyenne de l'air à la sortie de la cheminée

V.3.1.2. Influence de la chute de pression à travers la turbine sur les performances de la cheminée solaire

L'effet de la chute de pression à travers la turbine sur les performances de la cheminée solaire, a été étudié en variant ce paramètre de 40 Pa à 220 Pa (avec un intervalle de 20 Pa), et pour des valeurs du rayonnement solaire de 400, 600, 800 et 1000 W/m^2 .

La figure. V.7 montre l'influence de la chute de pression sur le rendement du collecteur pour différentes valeurs du rayonnement solaire. Il apparaît clairement que, le rendement du collecteur est d'autant meilleur que le rayonnement solaire est plus élevé. Par ailleurs, pour un rayonnement solaire donné, une très légère diminution du rendement du collecteur est observée, lorsque la chute de pression croît ce qui peut être expliqué grâce aux courbes de la figure. V.8. En effet, ces dernières montrent que si la différence de température

de l'air entre l'intérieur et l'extérieur du collecteur augmente quand la chute de pression à travers la turbine croit, l'inverse se produit pour le débit volumique.

Rappelons, que pour un rayonnement solaire donné, le rendement du collecteur varie avec le débit volumique (ou le débit massique) et avec la différence de température de l'air entre l'intérieur et l'extérieur du collecteur (équations (II.21) et (II.22)). Néanmoins, l'effet de la différence de température de l'air sur le rendement du collecteur est moindre que celui du débit volumique, par conséquent, l'évolution du rendement du collecteur suivra celle du débit massique. Ainsi, une diminution de ce dernier conduira à une baisse du rendement du collecteur.

Nos résultats (un rendement de 58.57%, pour une chute de pression est 100 Pa et un rayonnement solaire de 1000 W/m^2), sont en bon accord avec ceux de Guo et al [49] qui ont trouvé un rendement de 60%, (soit une erreur relative entre les deux résultats de l'ordre de 2.38 %).

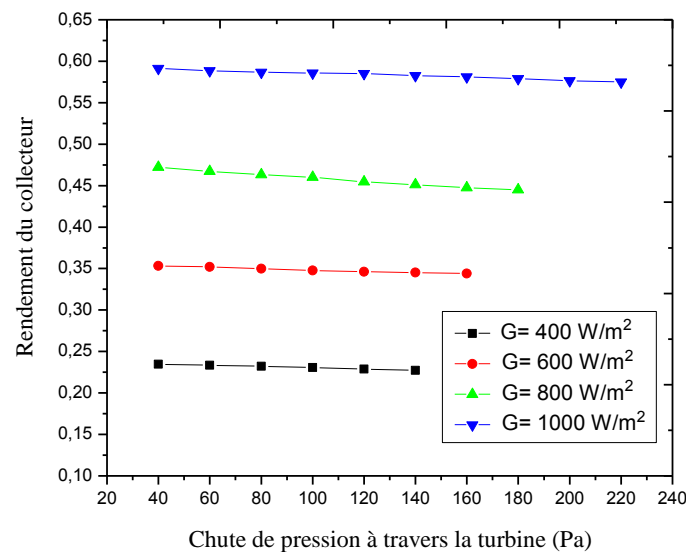


Figure. V.7. Effet de la chute de pression de l'air à travers la turbine sur le rendement du collecteur pour différentes valeurs du rayonnement solaire

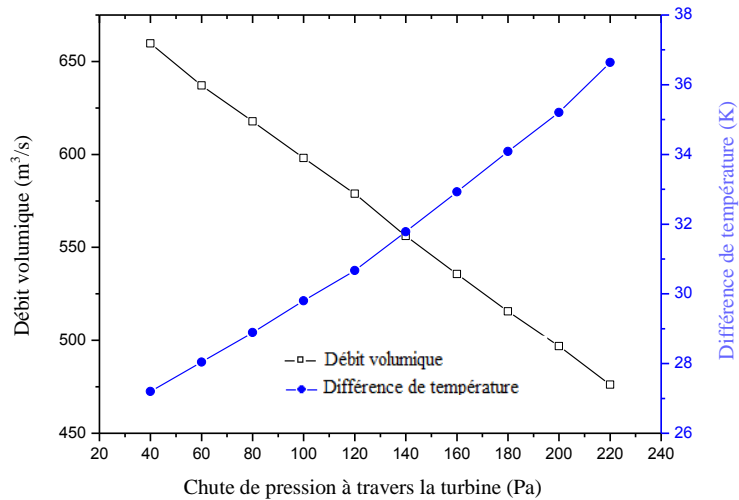


Figure. V.8. Effet de la chute de pression de l'air sur le débit volumique et sur la différence de température de l'air

L'effet de la chute de pression de l'air à travers la turbine, sur la puissance électrique produite, pour différentes valeurs de rayonnement solaire, est mis en évidence par les courbes de la figure. V.9. Il apparaît que la puissance électrique produite augmente avec la chute de pression, ce qui peut également être expliqué grâce aux courbes de la figure. V.8.

En effet, pour un rayonnement solaire donné (dans notre cas de 1000 W/m^2), bien que le débit volumique diminue légèrement lorsque la chute de pression de l'air à travers la turbine augmente (figure. V.8), le produit de celui-ci par la chute de pression de l'air à travers la turbine, est toujours croissant (équation (II.33)), par conséquent la puissance électrique produite augmente.

Par ailleurs, la puissance électrique produite par la cheminée solaire augmente significativement, pour les faibles chutes de pression de l'air à travers la turbine, à l'opposé du cas de chutes de pressions importantes, pour lesquelles l'augmentation est bien moindre. A titre d'exemple, nous pouvons noter que pour un rayonnement solaire de 1000 W/m^2 et de faibles valeurs de chute de pression de l'air à travers la turbine, de 40 Pa et de 60 Pa, les puissances électriques produites sont respectivement de 21.96 kW et 31.77 kW, soit une augmentation de près de 10 kW. Alors que pour des valeurs de chute de pression beaucoup plus importantes, de 200 et de 220 Pa, l'augmentation de la puissance électrique produite observée, est seulement de 4.4 kW, entre les deux valeurs.

D'autre part, la puissance électrique produite est d'autant plus importante que l'irradiation solaire est plus élevée. Ainsi nous pouvons remarquer que pour des rayonnements solaires de 400 W/m^2 et de 1000 W/m^2 et une chute de 120 Pa, les puissances électriques

produites sont respectivement de 37 kW et de 57 kW. Ce qui démontre que la turbine peut extraire d'autant plus d'énergie, que l'irradiation solaire est plus élevée.

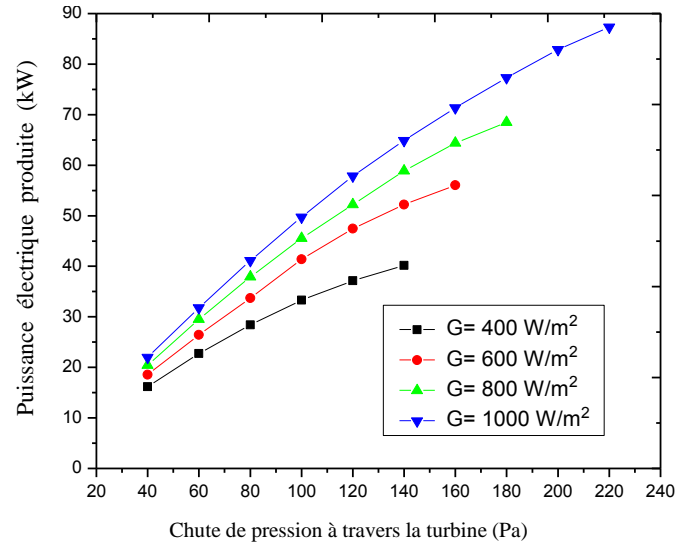


Figure. V.9. Effet de la chute de pression de l'air à travers la turbine sur la puissance électrique produite par la cheminée solaire

Les figures.V.10, V.11 et V.12 représentent les distributions de la pression, de la vitesse et de la température de l'air, dans la cheminée solaire pour un rayonnement solaire de 800 W/m^2 et une chute de pression de l'air à travers la turbine, de 80 Pa.

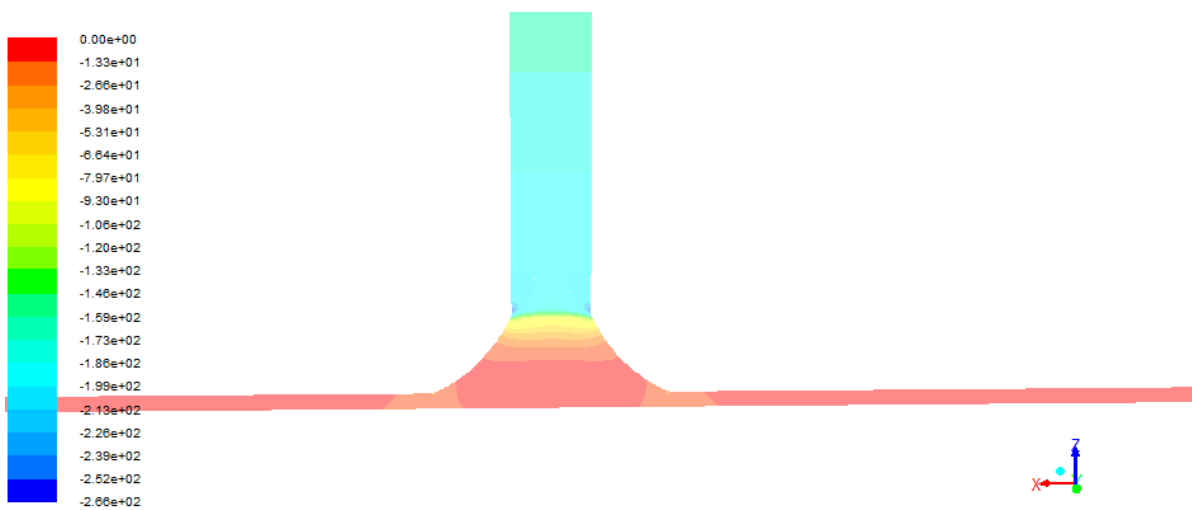


Figure. V.10. Distribution de la pression de l'air dans la cheminée solaire, pour un rayonnement solaire de 800 W/m^2 et une chute de pression à travers la turbine de 80 Pa.

L'examen de la figure. V.11 permet de relever que la vitesse de l'air atteint sa valeur la plus élevée, (16.8 m/s), au niveau de la base de la cheminée.

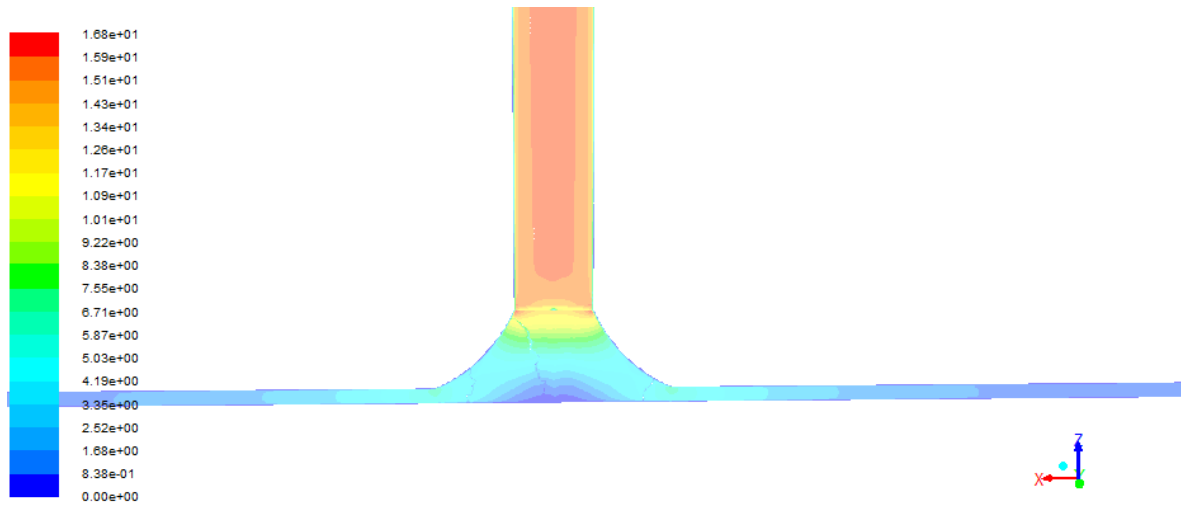


Figure. V.11. Distribution de la vitesse de l'air dans la cheminée solaire, pour un rayonnement solaire de 800 W/m^2 et une chute de pression à travers la turbine de 80 Pa.

Concernant la température de l'air, nous pourrions noter sur la figure V.12, que sa valeur maximale, (de 497 K) est près du sol (dans le collecteur).

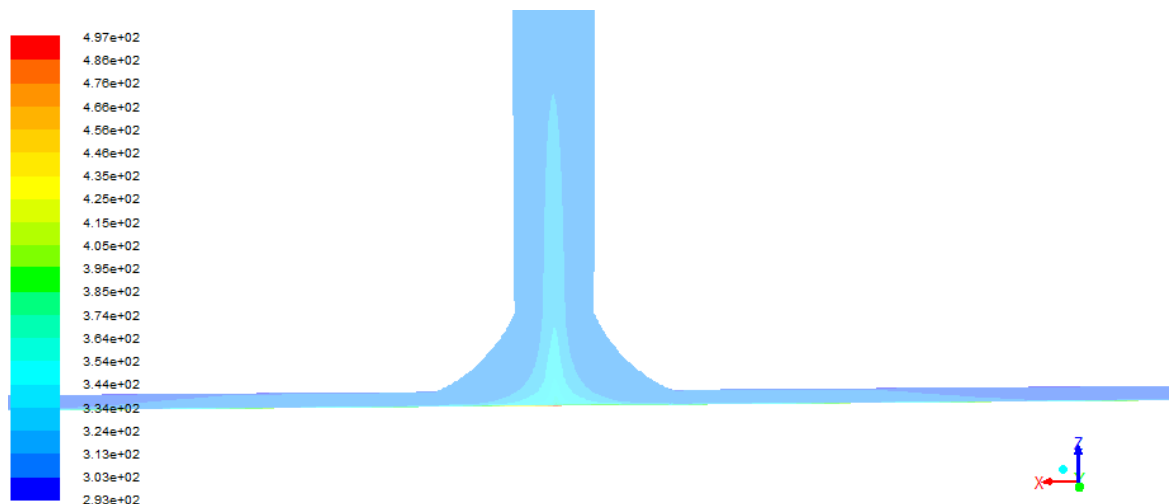


Figure. V.12. Distribution de la température de l'air dans la cheminée solaire pour un rayonnement solaire de 800 W/m^2 et une chute de pression à travers la turbine de 80 Pa.

V. 3.2. Cas de la cheminée solaire couplée avec une turbine réelle

Les résultats de la simulation numérique d'une cheminée solaire, couplée avec une turbine réelle de 4 pales, de profil aérodynamique FX- 77- W- 153 A, feront l'objet de la dernière partie de ce chapitre. La simulation numérique a été entreprise pour la géométrie du prototype espagnol, pour un rayonnement solaire de 800 W/m^2 et pour des vitesses de rotation de la turbine de 30 à 300 rpm, avec un intervalle de 30 rpm.

La figure. V.13 présente le profil de température de l'air à travers le collecteur pour différentes valeurs de vitesse de rotation de la turbine. L'examen de l'ensemble des courbes permet d'observer que pour une vitesse de rotation de la turbine donnée, la température de l'air croît le long du collecteur, cette augmentation est d'autant plus importante (pour un même rayon du collecteur) que la vitesse de rotation de la turbine est grande.

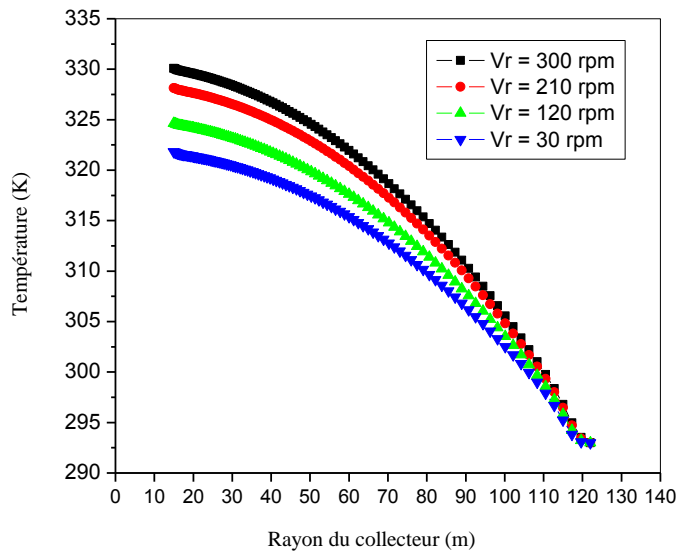


Figure. V. 13. Profil de température de l'air à travers le collecteur pour différentes valeurs de vitesse de rotation de la turbine.

Concernant l'effet de la vitesse de rotation de la turbine, sur la vitesse de l'air à travers le collecteur, il apparaît sur la figure. V.14. que cette dernière augmente quand le rayon diminue, mais contrairement à température de l'air, la vitesse de l'écoulement de l'air, pour un même rayon du collecteur, est d'autant plus faible que la vitesse de rotation de la turbine est grande.

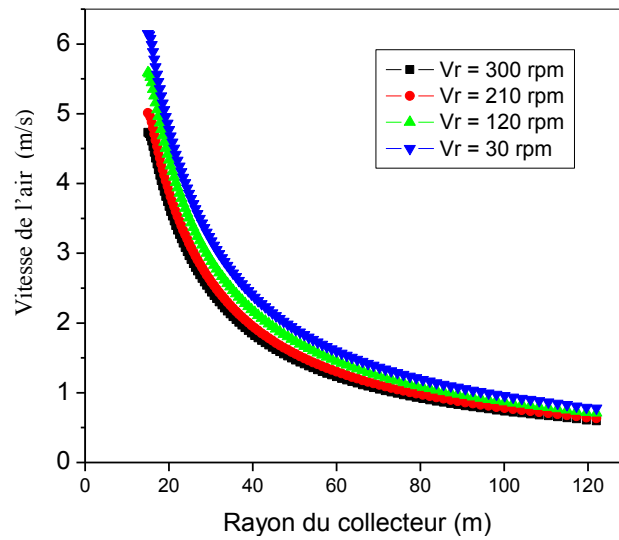


Figure. V. 14. Effet de la vitesse de rotation de la turbine sur la vitesse de l'écoulement d'air à travers le collecteur

L'effet de la vitesse de rotation de la turbine sur la pression statique de l'air à travers le collecteur est représenté sur la figure. V.15. Il apparaît que la pression statique de l'air à l'intérieur du collecteur diminue le long de ce dernier collecteur. Contrairement à la vitesse de l'écoulement de l'air, la pression statique de l'air pour un même rayon du collecteur est d'autant plus faible que la vitesse de rotation de la turbine est plus élevée.

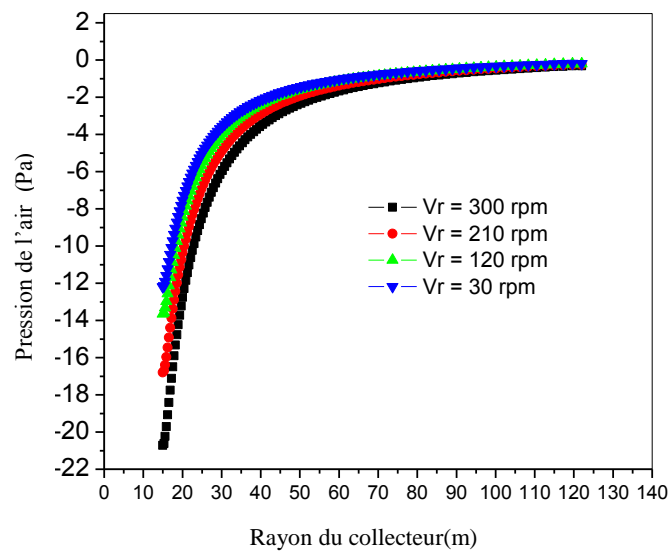


Figure. V. 15. Effet de la vitesse de rotation de la turbine sur la pression statique de l'air à travers le collecteur

V. 3. 2.1. Effet de la vitesse de rotation de la turbine sur la température et sur la vitesse de l'air à la sortie de la cheminée

Les figures. V.16 et V.17, montrent l'effet de la vitesse de rotation de la turbine sur la vitesse et sur la température de l'écoulement d'air à la sortie de la cheminée pour différentes valeurs du rayonnement solaire. Nous pouvons remarquer que la vitesse de l'air à la sortie de la cheminée diminue significativement quand la vitesse de rotation de la turbine augmente, alors que pour la température de l'air à la sortie de la cheminée, il se produit l'inverse. Ceci est probablement dû à la force de résistance provoquée par la présence de la turbine qui conduit à une diminution du débit massique du système et par conséquent à des vitesses de l'air à la sortie de cheminée plus faibles. Ainsi l'air est exposé plus longtemps au rayonnement solaire à l'intérieur du collecteur, atteint par conséquent des températures à la sortie de la cheminée, plus élevées. Par ailleurs, la vitesse et la température de l'écoulement d'air à la sortie de la cheminée sont d'autant plus significatives que le rayonnement solaire est élevé.

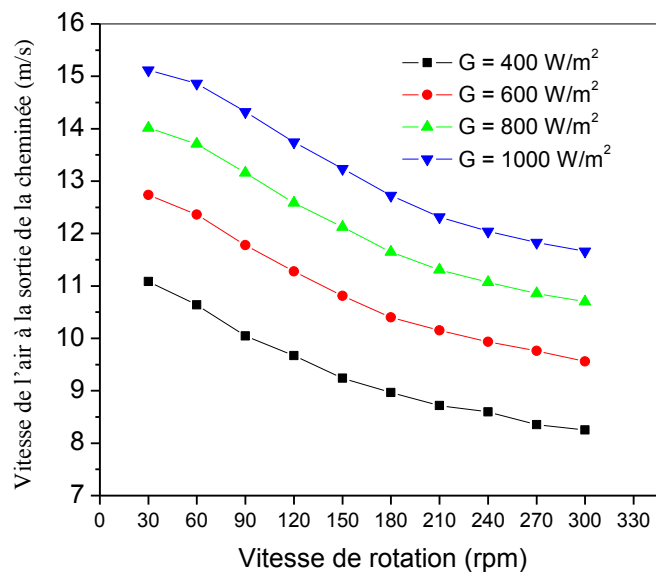


Figure. V.16. Profil de la vitesse de l'air à la sortie de la cheminée en fonction de la vitesse de rotation de la turbine

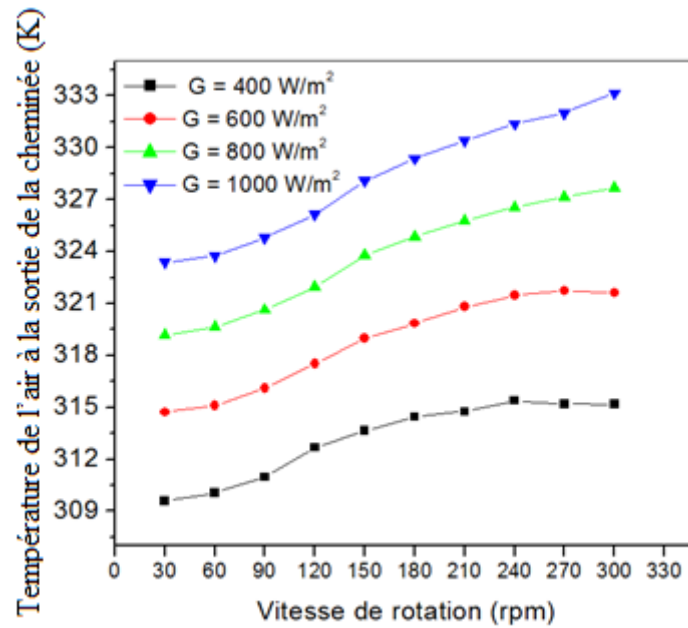


Figure. V.17. Profil de température de l'air à la sortie de la cheminée en fonction de la vitesse de rotation de la turbine

Les figures.V.18 et V.19 représentent les distributions de la température de l'air et de la vitesse de l'air, dans la cheminée solaire, pour un rayonnement solaire de 800 W/m² et une vitesse de rotation de la turbine, de 80 rpm.

Concernant la température de l'air, nous pouvons noter sur la figure. V.18, que sa valeur maximale, (de 468 K) est près du sol (dans le collecteur), alors que la vitesse de l'air atteint quant' à elle, sa valeur la plus élevée, (39.4 m/s), à l'extrémité de la pale de la turbine.

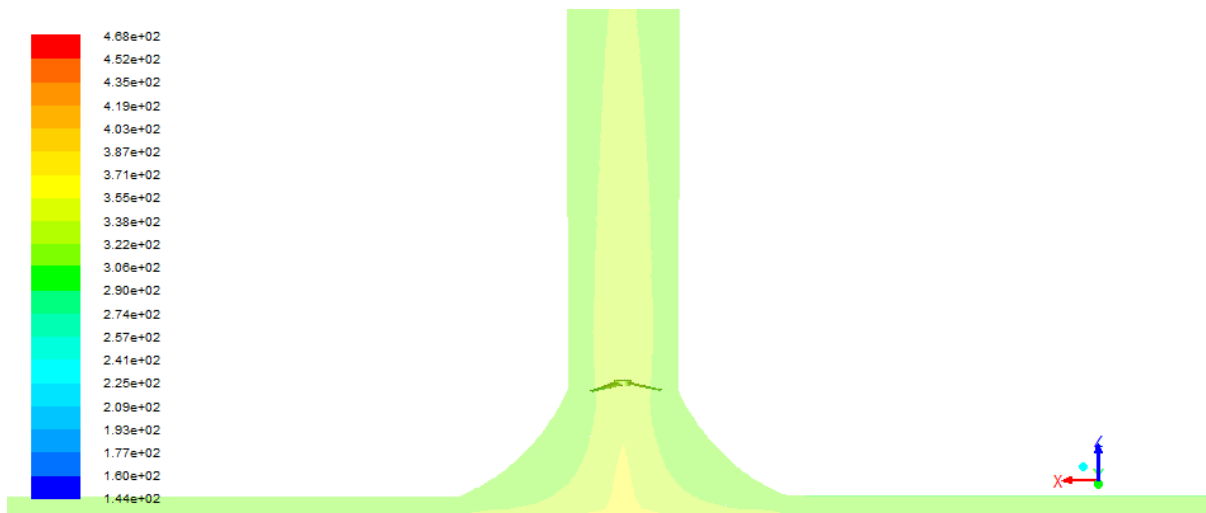


Figure. V. 18. Distribution de la température de l'air dans la cheminée solaire couplée avec une turbine réelle
(Rayonnement solaire de 800 W/m^2 / vitesse de rotation de la turbine de 80 rpm).

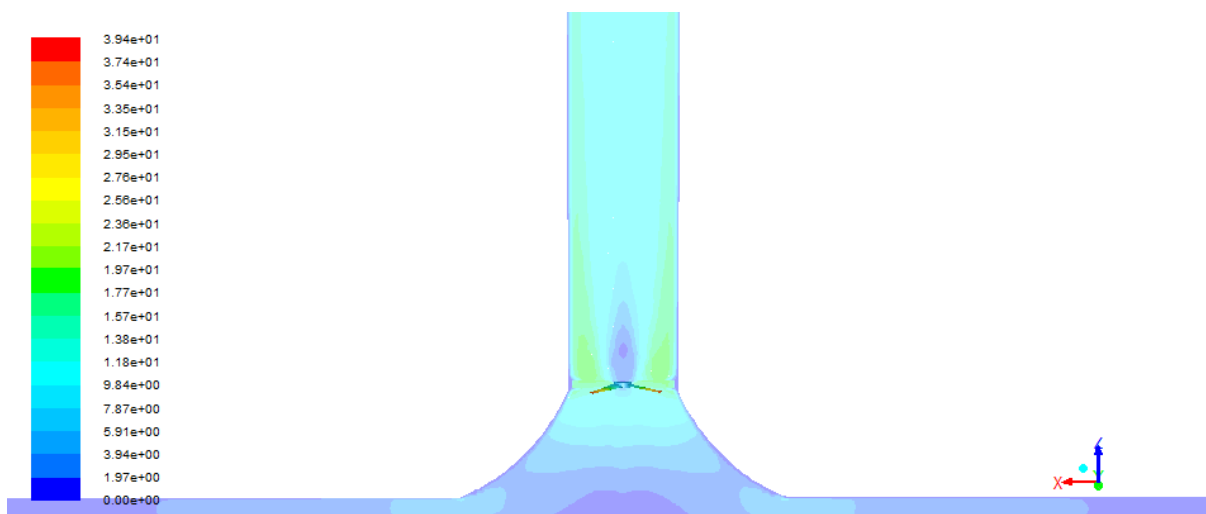


Figure. V. 19. Distribution de la vitesse de l'air dans la cheminée solaire couplée avec une turbine réelle
(Rayonnement solaire de 800 W/m^2 / vitesse de rotation de la turbine de 80 rpm).

V. 3. 2.2. Influence de la vitesse de rotation de la turbine sur la puissance et sur le rendement de la turbine

L'effet de la vitesse de rotation de la turbine, sur la puissance électrique produite par la cheminée solaire et sur le rendement de la turbine, pour un rayonnement solaire de 800 W/m^2 et une température ambiante de 293 K est montré dans la figure. V.20. Il apparaît clairement que la puissance électrique produite et le rendement de la turbine, augmentent quand la vitesse de rotation de la turbine croît. Par ailleurs il est aisé de constater que pour une vitesse de rotation de 210 rpm , la puissance électrique produite et le rendement de la turbine atteignent leurs valeurs maximales, respectivement de 61.5 kW et de 51.5% . Une plus grande vitesse de rotation conduira à une diminution de la puissance électrique produite par la cheminée solaire et du rendement de la turbine. Toutefois il serait possible d'atteindre une plus grande puissance électrique et un meilleur rendement de la cheminée, grâce à une optimisation des performances de la turbine.

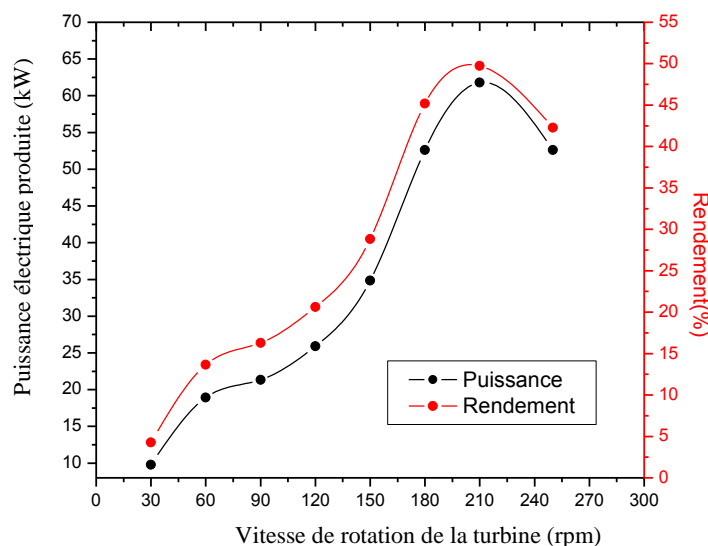


Figure. V. 20. Influence de la vitesse de rotation de la turbine sur la puissance électrique produite par la cheminée solaire et sur le rendement de la turbine

Conclusion

Conclusion

L'objectif du présent travail a été la simulation des effets thermiques et hydrodynamiques dans une cheminée, plus précisément dans la turbine. Cette étude a été réalisée à l'aide des logiciels Fluent et Ansys Fluent, en utilisant la méthode des volumes finis pour la discrétisation des équations de Navier-Stokes, de la conservation de la masse et de l'énergie. Ces logiciels permettent de réaliser une simulation numérique bidimensionnelle et/ou tridimensionnelle, de géométries complexes avec une grande précision. Les maillages bidimensionnels et tridimensionnels sont été réalisés par le mailleur Gambit. Afin de valider le modèle, les résultats obtenus ont été comparés avec les données expérimentales et numériques disponibles dans la littérature.

La première partie de notre travail a été consacrée à la simulation en 2D d'une cheminée solaire. Pour étudier les caractéristiques de l'écoulement dans le collecteur, nous avons choisi comme conditions climatiques, un rayonnement solaire de 800W/m^2 et une température ambiante de 293 K. Les résultats de la simulation numérique ont permis d'observer que la vitesse maximale est obtenue à la base de la cheminée, avec une valeur de 10.18 m/s, et que la température atteint environ 317.50 K. Dans la seconde partie, l'effet hydrodynamique et thermique dans la cheminée solaire a été simulé. L'influence de la vitesse d'entrée de l'air et de la température ambiante pour deux cas, soit en appliquant la condition aux limites de pression à l'entrée, soit pour une vitesse d'entrée de l'air de 5 m/s, sur les champs de pression, de vitesse et de température, de l'écoulement de l'air dans la cheminée solaire a été analysée. Les résultats obtenus révèlent l'effet significatif de la vitesse d'entrée de l'air sur la vitesse et sur la pression de l'écoulement, sous le collecteur. En ce qui concerne, l'effet de la température ambiante, sur les caractéristiques de la cheminée solaire, il a été noté que celle-ci a un effet bénéfique sur le processus de transfert de chaleur à l'intérieur de la cheminée solaire, dans le cas où la condition aux limites, de pression à l'entrée, est appliquée. Par ailleurs, les résultats, mettent en évidence l'effet défavorable du vent lorsque la vitesse de l'air à l'entrée du collecteur est de 5m/s, sur le fonctionnement d'une installation à cheminée solaire.

La performance d'une cheminée solaire qui pourrait être installée en Algérie a également été étudiée. Une comparaison entre quatre sites éventuels d'implantation

(Constantine, Ouargla, Adrar et Tamanrasset), a révélé d'une part, qu'une centrale à cheminée solaire pourrait produire une puissance moyenne mensuelle comprise entre 68 et 73 kW, sur l'année et d'autre part que la région de Tamanrasset est celle qui présente la meilleure production d'électricité. Afin d'estimer la puissance électrique horaire produite par cette technologie, dans les quatre régions étudiées, trois journées types des mois de Mars (21 Mars) de Juin (21 Juin) et de Novembre (21 Novembre) ont été choisies. Les résultats ont montré que la puissance maximale dans la région de Tamanrasset est de 113 kW, à 12 h, alors que dans les autres régions, elle est quasiment la même, avec une valeur de 109 kW, au mois de juin. Au mois de Mars, les puissances électriques produites les plus élevées, (à 12h), de 108.94 kW et de 111.8 kW, sont respectivement à Tamanrasset et à Adrar, alors qu'elles sont de 95.57 kW et de 100 kW dans les sites de Constantine et Ouargla. Il a été noté également qu'au mois de Novembre, la puissance électrique produite est moindre qu'au mois de Mars. Elle est au maximum de 93.37 kW à Tamanrasset et de 93.08 kW à Adrar.

La simulation numérique de la cheminée solaire en 3D a été menée, soit en adoptant le modèle de ventilateur, soit en envisageant le couplage de la cheminée solaire avec une turbine réelle de quatre pales de profil aérodynamique FX-77-W- 153 A. Les distributions de la pression, de la vitesse et de la température, dans le collecteur, dans les cas de fonctionnement de la cheminée avec (à charge) et sans turbine (à vide ou hors charge) ont été analysées. Il apparaît que la pression statique diminue le long du collecteur et atteint - 24,45 Pa, à la sortie du collecteur, pendant le fonctionnement de la turbine, alors que dans le cas du mode hors charge elle est de -33.37 Pa. Les distributions de la vitesse et de la température de l'écoulement, varient en sens inverse pendant le fonctionnement de la turbine. En effet, la température augmente et atteint 322.8 K, alors que la vitesse diminue jusqu'à 6.19 m/s. Concernant l'effet de la turbine sur les comportements dynamique et thermique de l'écoulement de l'air, à travers la cheminée solaire, nous pouvons observer que si la présence de la turbine provoque une augmentation de la température et de la pression le long du collecteur, elle conduit par contre, à une baisse de la vitesse à l'intérieur du collecteur. Ceci est probablement dû à la résistance de l'air induite par la présence de la turbine, qui entraîne une diminution de la vitesse de l'écoulement de l'air. De ce fait, ce dernier est exposé plus longtemps au rayonnement solaire à l'intérieur du collecteur et a, par conséquent une température plus élevée.

L'influence du rayonnement solaire sur la vitesse ascendante ainsi que sur la différence de température à la sortie du collecteur a été également examinée pour les deux cas

(hors charge et pendant le fonctionnement de la turbine). Les résultats de la simulation ont montré que la vitesse ascendante et la différence de température de l'air à la sortie du collecteur pour les deux cas, croît avec l'augmentation du rayonnement solaire. Pendant le fonctionnement de la turbine, la vitesse du courant ascendant diminue et la différence de température augmente, probablement dû à la force de résistance provoquée par la présence de la turbine. Il a été également observé que le rendement du collecteur est d'autant meilleur que le rayonnement solaire est plus élevé et que la puissance électrique produite augmente significativement, pour les faibles chutes de pression de l'air à travers la turbine, à l'opposé du cas de chutes de pressions importantes.

Pour la simulation d'une cheminée solaire couplée avec une turbine réelle de quatre pales, il a été noté que si la vitesse de l'air diminue significativement, quand la vitesse de rotation de la turbine augmente, l'inverse se produit pour la température de l'air. Concernant l'effet de la vitesse de rotation de la turbine, sur la température et sur la vitesse de l'écoulement de l'air à la sortie de la cheminée, il a été observé que si la présence de la turbine provoque une augmentation de la température de l'air à la sortie de la cheminée, elle conduit par contre, à une baisse de la vitesse de l'air à la sortie de la cheminée.

Comme perspectives il pourrait être envisagé de nombreux autres travaux sur la turbine installée, dans une cheminée solaire tels que :

- La variation de l'angle de torsion des pales pour améliorer le rendement
- L'utilisation de matériaux de construction plus légers de la turbine (les fibres de carbone)
- L'étude de la résistance des matériaux
- La détermination de la fatigue de flexion due au changement de la vitesse de l'écoulement pour estimer la durée de vie d'une turbine installée dans une cheminée solaire.

Annexe

Annexe

Le FX 77-W-153-A est un profil aérodynamique spécifique qui appartient aux profils Wortmann de la série FX. Les deux premiers chiffres indiquent l'année du développement (1977), et les trois derniers indiquent l'épaisseur maximale en corde (épaisseur maximale de 15.2% à 27.9% de corde, Cambre maximal de 4.5% à 27.9% de corde).

Coordonnées du profil aérodynamique utilisé dans notre étude

#FX77W-153-A

#group	#point	#x_cord	#y_cord	#z_cord
1	1	0.00000	0.00000	0.00000
1	2	0.0010700	0.0059100	0.00000
1	3	0.0042800	0.0136500	0.00000
1	4	0.0096100	0.0214300	0.00000
1	5	0.0170400	0.0308900	0.00000
1	6	0.0265300	0.0403200	0.00000
1	7	0.0380600	0.0504800	0.00000
1	8	0.0515600	0.0601400	0.00000
1	9	0.0669900	0.0701300	0.00000
1	10	0.0842700	0.0792800	0.00000
1	11	0.1033200	0.0883600	0.00000
1	12	0.1240800	0.0963900	0.00000
1	13	0.1464500	0.1037200	0.00000
1	14	0.1703300	0.1095400	0.00000
1	15	0.1956200	0.1144900	0.00000
1	16	0.2222100	0.1179100	0.00000
1	17	0.2500000	0.1203700	0.00000
1	18	0.2788600	0.1210500	0.00000
1	19	0.3086600	0.1204000	0.00000
1	20	0.3392800	0.1169600	0.00000
1	21	0.3705900	0.1128000	0.00000
1	22	0.4024500	0.1075800	0.00000

1	23	0.4347400	0.1020900	0.00000
1	24	0.4673000	0.0960600	0.00000
1	25	0.5000000	0.0899700	0.00000
1	26	0.5327000	0.0836300	0.00000
1	27	0.5652600	0.0774000	0.00000
1	28	0.5975500	0.0711300	0.00000
1	29	0.6294100	0.0651200	0.00000
1	30	0.6607200	0.0591300	0.00000
1	31	0.6913400	0.0535500	0.00000
1	32	0.7211400	0.0480200	0.00000
1	33	0.7500000	0.0429100	0.00000
1	34	0.7777900	0.0379400	0.00000
1	35	0.8043800	0.0333900	0.00000
1	36	0.8296700	0.0290200	0.00000
1	37	0.8535500	0.0250300	0.00000
1	38	0.8759200	0.0211800	0.00000
1	39	0.8966800	0.0175800	0.00000
1	40	0.9157300	0.0140800	0.00000
1	41	0.330100	0.0109000	0.00000
1	42	0.9484400	0.0080100	0.00000
1	43	0.619400	0.0056100	0.00000
1	44	0.9734700	0.0036700	0.00000
1	45	0.9829600	0.0023100	0.00000
1	46	0.9903900	0.0014300	0.00000
1	47	0.9957200	0.0009900	0.00000
1	48	0.9989300	0.0008400	0.00000
1	49	0.0000000	0.0000000	0.00000
1	50	0.0010700	-0.0046400	0.00000
1	51	0.0042800	-0.0111500	0.00000
1	52	0.0096100	-0.0148200	0.00000
1	53	0.0170400	-0.0181700	0.00000
1	54	0.0265300	-0.0201600	0.00000

1	55	0.0380600	-0.0225500	0.00000
1	56	0.0515600	-0.0241400	0.00000
1	57	0.0669900	-0.0259800	0.00000
1	58	0.0842700	-0.0271300	0.00000
1	60	0.1033200	-0.0284900	0.00000
1	61	0.1240800	-0.0292900	0.00000
1	62	0.1464500	-0.0302100	0.00000
1	63	0.1703300	-0.0306400	0.00000
1	64	0.1956200	-0.0312300	0.00000
1	65	0.2222100	-0.0313400	0.00000
1	66	0.2500000	-0.0316600	0.00000
1	67	0.2788600	-0.0314300	0.00000
1	68	0.3086600	-0.0315400	0.00000
1	69	0.3392800	-0.0310500	0.00000
1	70	0.3705900	-0.0308800	0.00000
1	71	0.4024500	-0.0302500	0.00000
1	72	0.4347400	-0.0298400	0.00000
1	73	0.4673000	-0.0290800	0.00000
1	74	0.5000000	-0.0284600	0.00000
1	75	0.5327000	-0.0275700	0.00000
1	76	0.5652600	-0.0268100	0.00000
1	77	0.5975500	-0.0257800	0.00000
1	78	0.6294100	-0.0249000	0.00000
1	79	0.6607200	-0.0237600	0.00000
1	80	0.6913400	-0.0227600	0.00000
1	81	0.7211400	-0.0215200	0.00000
1	82	0.7500000	-0.0204400	0.00000
1	83	0.7777900	-0.0191400	0.00000
1	84	0.8043800	-0.0179700	0.00000
1	85	0.8296700	-0.0166200	0.00000
1	86	0.8535500	-0.0153600	0.00000
1	87	0.8759200	-0.0139700	0.00000

1	88	0.8966800	-0.0126300	0.00000
1	89	0.9157300	-0.0111500	0.00000
1	90	0.9330100	-0.0096200	0.00000
1	91	0.9484400	-0.0079300	0.00000
1	92	0.9619400	-0.0062700	0.00000
1	93	0.9734700	-0.0046400	0.00000
1	94	0.9829600	-0.0032500	0.00000
1	95	0.9903900	-0.0021600	0.00000
1	96	0.9957200	-0.0014100	0.00000
1	97	0.9989300	-0.0009700	0.00000

Exemple de rapport de Fluent pour la géométrie bidimensionnelle

Dans ce qui suit, le lecteur trouvera un exemple de rapport du logiciel Fluent détaillé, avec toutes les conditions aux limites et les valeurs utilisées, dans notre étude.

```

FLUENT
Version: axi, dp, pbns, ske (axi, double precision, pressure-based, standard k-epsilon)

Release: 6.3.26

Title:

Models
-----
Model          Settings
-----
Space Axisymmetric
Time           Steady
Viscous        Standard k-epsilon turbulence model
Wall Treatment Standard Wall Functions
Heat Transfer  Enabled
Solidification and Melting Disabled
Radiation      None
Species Transport Disabled
Coupled Dispersed Phase Disabled
Pollutants     Disabled

```

Pollutants Disabled

Soot Disabled

Boundary Conditions

Zones

name	id	type
------	----	------

fluid	2	fluid
-------	---	-------

center_col	3	interior
------------	---	----------

center_ch	4	interior
-----------	---	----------

ct2	5	wall
-----	---	------

ct1	6	wall
-----	---	------

collector	7	wall
-----------	---	------

ground	8	wall
--------	---	------

chimney	9	wall
---------	---	------

axis	10	axis
------	----	------

exit	11	pressure-outlet
------	----	-----------------

entry	12	pressure-inlet
-------	----	----------------

default-interior	14	interior
------------------	----	----------

Boundary Conditions

fluid

Condition	Value
-----------	-------

Material Name	air
---------------	-----

Specify source terms?no

Source Terms	()
--------------	----

Specify fixed values?no

Fixed Values	()
--------------	----

Motion Type	0
-------------	---

X-Velocity Of Zone (m/s)	0
--------------------------	---

Y-Velocity Of Zone (m/s)	0
--------------------------	---

Rotation speed (rad/s)	0
------------------------	---

Deactivated Thread	no
--------------------	----

Laminar zone?	no
Set Turbulent Viscosity to zero within laminar zone?	no
Porous zone?	no
X-Component of Direction-1 Vector	1
Y-Component of Direction-1 Vector	0
Relative Velocity Resistance Formulation?	yes
Direction-1 Viscous Resistance (1/m ²)	0
Direction-2 Viscous Resistance (1/m ²)	0
Choose alternative formulation for inertial resistance?	no
Direction-1 Inertial Resistance (1/m)	0
Direction-2 Inertial Resistance (1/m)	0
C0 Coefficient for Power-Law	0
C1 Coefficient for Power-Law	0
Porosity	1
Solid Material Name	aluminum
center_col	
Condition	Value

center_ch	
Condition	Value

ct2	
Condition	Value

Wall Thickness (m)	0
Heat Generation Rate (W/m ³)	0
Material Name	aluminum
Thermal BC Type	1
Temperature (K)	300
Heat Flux (W/m ²)	0
Convective Heat Transfer Coefficient (W/m ² .K)	0
Free Stream Temperature (K)	300
Wall Motion	0

Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?yes	
Apply a rotational velocity to this wall?no	
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?no	
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
External Emissivity	1
External Radiation Temperature (K)	300
Wall Roughness Height (m)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rad/s)	0
X-component of shear stress (Pa)	0
Y-component of shear stress (Pa)	0
Surface tension gradient (N/m-K)	0
Specularity Coefficient	0
ct1	
Condition	Value

Wall Thickness (m)	0
Heat Generation Rate (W/m3)	0
Material Name	aluminum
Thermal BC Type	1
Temperature (K)	300
Heat Flux (W/m2)	0
Convective Heat Transfer Coefficient (W/m2-K)	0
Free Stream Temperature (K)	300
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?yes	
Apply a rotational velocity to this wall?no	

Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?no	
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
External Emissivity	1
External Radiation Temperature (K)	300
Wall Roughness Height (m)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rad/s)	0
X-component of shear stress (Pa)	0
Y-component of shear stress (Pa)	0
Surface tension gradient (N/m-K)	0
Specularity Coefficient	0

collector

Condition	Value

Wall Thickness (m)	0
Heat Generation Rate (w/m3)	0
Material Name	aluminum
Thermal BC Type	2
Temperature (K)	300
Heat Flux (W/m2)	0
Convective Heat Transfer Coefficient (W/m2-K)	10
Free Stream Temperature (K)	293
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?yes	
Apply a rotational velocity to this wall?no	
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1

Y-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?no	
X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
External Emissivity	1
External Radiation Temperature (K)	300
Wall Roughness Height (m)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rad/s)	0
X-component of shear stress (Pa)	0
Y-component of shear stress (Pa)	0
Surface tension gradient (N/m-K)	0
Specularity Coefficient	0
gound	
Condition	Value

Wall Thickness (m)	0
Heat Generation Rate (W/m3)	0
Material Name	aluminum
Thermal BC Type	1
Temperature (K)	300
Heat Flux (W/m2)	800
Convective Heat Transfer Coefficient (W/m2-K)	0
Free Stream Temperature (K)	300
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?yes	
Apply a rotational velocity to this wall?no	
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?no	

X-Component of Wall Translation (m/s)	0
Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
External Emissivity	1
External Radiation Temperature (K)	300
Wall Roughness Height (m)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rad/s)	0
X-component of shear stress (Pa)	0
Y-component of shear stress (Pa)	0
Surface tension gradient (N/m-K)	0
Specularity Coefficient	0

chimney

Condition	Value

Wall Thickness (m)	0
Heat Generation Rate (w/m3)	0
Material Name	aluminum
Thermal BC Type	1
Temperature (K)	300
Heat Flux (W/m2)	0
Convective Heat Transfer Coefficient (Wm2-K)	0
Free Stream Temperature (K)	300
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?yes	
Apply a rotational velocity to this wall?no	
Velocity Magnitude (m/s)	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?no	
X-Component of Wall Translation (m/s)	0

Y-Component of Wall Translation (m/s)	0
External Emissivity	1
External Radiation Temperature (K)	300
Wall Roughness Height (m)	0
Wall Roughness Constant	0.5
Rotation Speed (rad/s)	0
X-component of shear stress (Pa)	0
Y-component of shear stress (Pa)	0
Surface tension gradient (N/m-K)	0
Specularity Coefficient	0
axis	
Condition	Value

exit	
Condition	Value

Gauge Pressure (Pa)	0
Backflow Total Temperature (K)	293
Backflow Direction Specification Method	1
Axial-Component of Flow Direction	1
Radial-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin (m)	0
Y-Coordinate of Axis Origin (m)	0
Z-Coordinate of Axis Origin (m)	0
Turbulent Specification Method	0
Backflow Turbulent Kinetic Energy (m ² /s ²)	1
Backflow Turbulent Dissipation Rate (m ² /s ³)	1
Backflow Turbulent Intensity (%)	0.1
Backflow Turbulent Length Scale (m)	1

Backflow Hydraulic Diameter (m)	1
Backflow Turbulent Viscosity Ratio	10
is zone used in mixing-plane model?	no
Specify targeted mass flow rate	no
Targeted mass flow (kg/s)	1
entry	
Condition	Value

Gauge Total Pressure (Pa)	0
Supersonic/Initial Gauge Pressure (Pa)	0
Total Temperature (K)	293
Direction Specification Method	1
Axial-Component of Flow Direction	1
Radial-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin (m)	0
Y-Coordinate of Axis Origin (m)	0
Z-Coordinate of Axis Origin (m)	0
Turbulent Specification Method	0
Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)	1
Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)	1
Turbulent Intensity (%)	0.1
Turbulent Length Scale (m)	1
Hydraulic Diameter (m)	
Turbulent Viscosity Ratio	10
is zone used in mixing-plane model?	no

default-interior

Condition Value

Solver Controls

```

Equations
Equation  Solved
-----
Flow      yes
Turbulence  yes
Energy    yes

Numerics

Numeric      Enabled
-----

Absolute Velocity Formulation  yes

Relaxation

Variable      Relaxation Factor
-----
Pressure      0.30000001
Density       1
Body Forces   1
Momentum      0.69999999
Turbulent Kinetic Energy  0.80000001
Turbulent Dissipation Rate 0.80000001
Turbulent Viscosity  1
Energy        1

Linear Solver

Solver  Termination  Residual Reduction
Variable      Type  Criterion  Tolerance
-----
Pressure      V-Cycle  0.1
X-Momentum    Flexible  0.1  0.7
Y-Momentum    Flexible  0.1  0.7
Turbulent KineticEnergy  Flexible  0.1  0.7
Turbulent Dissipation Rate  Flexible  0.1  0.7
Energy        Flexible  0.1  0.7

Pressure-Velocity Coupling

Parameter  Value

```

```

-----
Type      SIMPLE
Discretization Scheme
Variable      Scheme
-----
Pressure      Standard
Momentum      Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy  Second Order Upwind
Turbulent Dissipation Rate  Second Order Upwind
Energy      Second Order Upwind
Solution Limits
Quantity Limit
-----
Minimum Absolute Pressure  1
Maximum Absolute Pressure  5e+10
Minimum Temperature  1
Maximum Temperature  5000
Minimum Turb. Kinetic Energy  1e-14
Minimum Turb. Dissipation Rate  1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio  100000
Material Properties
-----
Material: air (fluid)
Property      Units  Method  Value(s)
-----
Density      kg/m3  boussinesq  1.225
Cp (Specific Heat)  J/kg-K  constant  1006.43
Thermal Conductivity  W/m-K  constant  0.0242
Viscosity      kg/m-s  constant  1.7894001e-05
Molecular Weight  kg/kg.mol  constant  28.966
L-J Characteristic Length  angstrom  constant  3.711
L-J Energy Parameter  K  constant  78.6
Thermal Expansion Coefficient  1/ K  constant  0.0033332999

```

Degrees of Freedom constant 0

Speed of Sound m/s none #f

Material: aluminum (solid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

Density kg/m3 constant 2719

Cp (Specific Heat) J/kg-K constant 871

Thermal Conductivity W/m-K constant 202.4

Références bibliographique

Références bibliographiques

- [1] Ministère algérien de l'énergie et des mines. <http://mem-algeria.org/english/index.php> (accessed 2015).
- [2] S. Bonnet, M. Alaphilippe, and P. Stouffs, "Thermodynamic solar energy conversion: Reflections on the optimal solar concentration ratio". *International Journal of Energy, Environment and Economics*, 2006. 12:141–52.
- [3] J. Schlaich, "The solar chimney: electricity from the sun". Edition Axel Menges, 1995.
- [4] W. Haaf, K. Mayr, J. Schlaich, "Solar Chimneys Part I: Principle and Construction of the Pilot Plant in Manzanares". *International Journal of Solar Energy*, 1983. 2(1): 3-20.
- [5] W. Haaf, "Solar Chimneys part II: preliminary test results from the Manzanarespilot plant". *International Journal of Solar Energy*, 1984. 2 (2): 141-161.
- [6] A. Dhari, A. Omri, "Review of solar chimney power generation technology". *International journal of engineering and advanced technology*. 2013. 2(3): 1-17.
- [7] I. Cabanyes, "Proyecto de MotorSolar", *la energia eléctrica revista general de electricidad y sus aplicaciones*, 1903. 8:61-65.
- [8] La société EnviroMission: <http://www.enviromission.com.au/> (accessed 2020).
- [9] T. Fluri, J. Pretorius, C. V. Dyk, T. Von Backström, D. Kröger, and G. Van Zijl, "Costanalysis of solar chimney power plants". *Solar Energy*, 2009. 83 : 246-256.
- [10] T. Tayebi, "Contribution à l'étude numérique de la convection naturelle laminaire d'un système radial de chauffage solaire". Thèse de doctorat. 2014. Université Frères Mentouri, Constantine 1.
- [11] T. Fluri, "Turbine layout for and optimization of solar chimney power conversion units". Thèse de doctorat. 2008. University of Stellenbosch, South Africa.

- [12] R. Krisst, "ENERGY- TRANSFER SYSTEMS," ED: MARIER COMMUNICATIONS 620 CENTRAL AVE NORTH, MILICA, MN 56363-1788, 1983. 8-8.
- [13] H. Kulunk. "Prototype solar convection chimney operated under Izmit conditions". Proceedings of the 7th Miami International Conference on Alternative Energy Sources 1985, Veiroglu, TN. 162.
- [14] S. Sherif, N. Pasumarthi, R. Harker, and G. Brinen."Performance of a demonstration solar chimney model for power generation". Final Technical Report No. UFME/SEECL-9507, Solar Energy and Energy conversation Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of Floarida, Gainesville, Florida 1998.
- [15] X. Zhou, J. Yang, B. Xiao, and G. Hou, "Experimental study of temperature field in a solar chimney power setup". Applied Thermal Engineering, 2007. 27(11): 2044-2050.
- [16] A. B. Kasaeian, E. Heidari, and S. N. Vatan. "Experimental investigation of climatic effects on the efficiency of a solar chimney pilot power plant". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. 15 (9):5202–5206.
- [17] L. Zuo, Y. Yuan, Z. Li, and Y. Zheng. "Experimental research on solar chimneys integrated with seawater desalination under practical weather condition". Desalination,2012. 298: 22–33.
- [18] S. Kalash, W. Naimeh, and S. Ajib. "Experimental investigation of the solar collector temperature field of a sloped solar updraft power plant prototype". Solar Energy, 2013. 98:70–77.
- [19] M. Ghalamchi, A. Kasaeian. "Experimental study of geometrical and climate effects on the performance of a small solar chimney". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. 43:425–431.
- [20] M. Ghalamchi, A. Kasaeian, and A. H. Mirzahosseini. "An experimental study on the thermal performance of a solar chimney with different dimensional parameters". Renewable Energy, 2016. 91:477–483.

- [21] S. Lal, S. C. Kaushik, and R. Hans. “Experimental investigation and CFD simulation studies of a laboratory scale solar chimney for power generation”. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2016. 13:13–22.
- [22] N. Pasumarthi, S. A. Sherif, “Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney model – part I: mathematical model development”. *International Journal of Energy Research*, 1998. 22: 277-288.
- [23] A. J. Gannon, and T. W. Von Backstrom. “Solar chimney cycle analysis with system loss and solar collector performance”. *Journal of Solar Energy Engineering – Transactions of the ASME*, 2000. 122:133–37.
- [24] J. P. Pretorius and D. G. Kroger, “Solar Chimney Power Plant Performance”. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2006. 128: 302-311.
- [25] T. Ming, L. Wei, and X. Guoliang, “Analytical and numerical investigation of the solar chimney power plant systems”. *International Journal of Energy Research*, 2006. 30 (11):861–873.
- [26] T. Ming, L. Wei, P. Yuan, X. Guoliang, “Numerical analysis of flow and heat transfer characteristics in solar chimney power plants with energy storage layer”. *Energy Conversion and Management*, 2008. 49(10): 2872-2879.
- [27] T. Chergui, S. Larbi, A. Bouhdjar, and M. Gahgah. “Performances analysis of a solar chimney power plant in South of Algeria”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010.14: 470–477.
- [28] E. Bilgen and J. Rheault, "Solar chimney power plants for high latitudes". *Solar Energy*, 2005. 79: 449-458.
- [29] A. Koonsrisuk, and T. Chitsomboon. “Effects of flow area changes on the potential of solar chimney power plants”. *Energy*, 2013. 51:400–06.
- [30] T. Ming, L. Wei, and X. Guoliang, "Analytical and numerical investigation of the solar chimney power plant systems," *International Journal of Energy Research*, 2006.30: 861- 873.

- [31] R. Sangi. “Performance evaluation of solar chimney power plants in Iran”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012.16 (1):704–10.
- [32] T. Ming, Y. Zheng, C. Liu, W. Liu and Y. Pan, “Simple analysis on thermal performance of SCPP generation systems”. *Journal of the Energy Institute*, 2010. 83(1): 6-11.
- [33] R. Sangi, M. Amidpour, and B. Hosseinizadeh. “Modeling and numerical simulation of solar chimney power plants”. *Solar Energy*, 2011.85 (5):829–838.
- [34] H. Pastohr, “Thermodynamical modelling of an upwind power plant”. PhD, Bauhaus- Universität Weimar, Weimar, 2004.
- [35] G. Penghua, L. Jingyin, W. Yunfeng, and W. Yuan, “Numerical study on the performance of solar chimney power plant”. *Energy Conversion and Management*, 2015. 105: 197-205.
- [36] G. Penghua, L. Jingyin, W. Yunfeng, and W. Yuan, “Evaluation of the optimal turbine pressure drop ratio for a solar chimney power plant”. *Energy Conversion and Management*, 2016. 108: 14–22.
- [37] S. Hu, D. Y. Leung, M. Z. Chen, and J. C. Chan. “Effect of guide wall on the potential of a solar chimney power plant”. *Renewable Energy*, 2016. 96:209–219.
- [38] E. Gholamalizadeh and H. K. Man, “Three-dimensional CFD analysis for simulating the greenhouse effect in solar chimney power plants using a two-band radiation model”. *Renewable Energy*, 2014. 63: 498-506.
- [39] E. Gholamalizadeh and J. D. Chung, “Analysis of fluid flow and heat transfer on a solar updraft tower power plant coupled with a wind turbine using computational fluid dynamics”. *Applied Thermal Engineering*, 2017. 126: 548-558.
- [40] T. Ming, W. Liu, G. Xu, Y. Xiong, X. Guan, and Y. Pan, “Numerical simulation of the solar chimney power plant systems coupled with turbine”. *Renewable Energy*, 2008. 33(5): 897-905.

- [41] T. Ming, W. Liu, and Y. Pan, and G. Xu “Numerical analysis of flow and heat transfer characteristics in solar chimney power plants with energy storage layer”. *Energy conversion and management*, 2008. 49(10): 2872-2879.
- [42] T. Ming, X. Wang, R. K. de Richter, W. Liu, T. Wu, and Y. Pan, “Numerical analysis on the influence of ambient crosswind on the performance of solar updraft power plant system”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012. 16(8): 5567-5583.
- [43] T. Ming, G. Tingrui, R. K. de Richter, C. Cunjin and S.A. Sherif, “Numerical analysis of seawater desalination based on a solar chimney power plant”. *Applied Energy*, 2017. 208:1258-1273.
- [44] A. G. Gannon, and T. W. Von Backström. “Solar chimney turbine: Part 1 of 2Design”. *ASME Solar: International Solar Energy Conference*, Reno, Nevada.2002. 335–341.
- [45] F. Denantes and E. Bilgen, "Counter-rotating turbines for solar chimney power plants". *Renewable energy*, 2006. 31:1873-1891.
- [46] H. Pastohr, O. Kornadt, and K. Gürlebeck, "Numerical and analytical calculations of the temperature and flow field in the upwind power plant". *International Journal of Energy Research*, 2004.28 : 495-510.
- [47] G. Xu, T. Ming, Y. Pan, F. Meng, C. Zhou, “Numerical analysis on the performance of solar chimney power plant system”. *Energy Conversion and Management*, 2011. 52: 876–883.
- [48] K. Alibakhsh, A. R. Mahmoudi, F. R. Astaraei and A. Hejab, “3D simulation of solar chimney power plant considering turbine blades”. *Energy Conversion and Management*, 2017. 147: 55-65.
- [49] P.H. Guo, J. Y. Li, and Y. Wang, “Numerical simulations of solar chimney power plant with radiation model”. *Renewable Energy*, 2014. 62: 24-30.
- [50] J. Y. Li, P. H. Guo, and Y. Wang, “Effects of collector radius and chimney height on power output of a solar chimney power plant with turbines”. *Renewable Energy*, 2012. 47(21):21-28.

- [51] X. Zhou, J. Yang, B. Xiao, and G. Hou, "Simulation of a pilot solar chimney thermal power generating equipment". *Renewable Energy*, 2007. 32:1637-1644.
- [52] R. Rabehi, A. Chaker, Z. Aouachria and T. Ming, "CFD analysis on the performance of a solar chimney power plant system Case study in Algeria". *International Journal of Green Energy*, 2017. 14(12): 971–982.
- [53] R. Rabehi, A. Chaker, T. Ming, and T. Gong. " Numerical simulation of solar chimney power plant adopting the fan model". *Renewable Energy*, 2018. 126: 1093-1101.
- [54] A. J. Gannon and T. W. Von Backström. "Solar chimney turbine performance". *Journal of Solar Energy Engineering*, 2003. 125(1):101-106.
- [55] S. Djimli, A. Chaker. « Numerical study of the solar chimney power plant performance in the region of M'Sila-Algeria ». *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, 2014. Cordoba (Spain).
- [56] GAMBIT 2.0 documentation : User's Guide. Modelling Guide. Tutorial Guide. Fluent, inc (2001).
- [57] FLUENT 6.0 documentation: User's Guide. Tutorial Guide. Fluent, inc (2001).
- [58] J. F. SACADURA. *Initiation aux transferts thermiques*. Paris : Tec & Doc, 1993.

Simulation of the thermal and hydromechanical effects of a turbine installed in a solar chimney

Abstract

The objective of this work is to simulate numerically the main thermal and hydrodynamic phenomena in a solar chimney with particular attention to the turbine.

This study was conducted using ANSYS FLUENT and FLUENT software to simulate the two-dimensional and three-dimensional models of a solar chimney power plant system, with and without a turbine. The simulation was performed for the geometry of prototype of Manzanares, Spain. Our numerical results are compared and validated with experimental and numerical work published.

First, a numerical study of a solar chimney is conducted in order to highlight the characteristics of the system and to define the region where the speed of the flow can turn a turbine. We examined the effect air velocity at the collector inlet, and ambient temperature on the system. The temperature, velocity and pressure distributions in the system are analyzed. In order to find the best site to install a solar chimney in Algeria, four areas are chosen (Adrar, Tamanrasset, Ouargla and Constantine). The electrical power produced annually and monthly by the solar chimney for the four regions is estimated.

In a second step, a numerical simulation in 3D of a solar chimney coupled with turbine was undertaken. The turbine has been treated in two ways, either by adopting the fan model, or by coupling the solar chimney with a real turbine of four blades. In the first case, the detailed configuration of the turbine is not taken into account, it has been treated as an infinitely thin disk. The effect of solar radiation and the pressure drop across the turbine on elements such as the temperature difference in the collector, the efficiency of the collector and the power of the system, is studied.

In the second case, the influence of the rotation speed of the turbine on the velocity and the temperature of the flow at the exit of the chimney is examined. The electric power output and the efficiency of the turbine were also estimated.

Keywords: solar chimney, 2D and 3D numerical simulation, real turbine, fan model, Fluent, thermal and hydromechanical effects.

محاكاة التأثيرات الحرارية والهيدروميكانكية لتوربين مثبت في مدخنة شمسية

ملخص

الهدف من هذا العمل هو محاكاة الظواهر الحرارية والهيدروديناميكية الرئيسية في المدخنة الشمسية مع إيلاء اهتمام خاص للتوربين.

تم إجراء الدراسة الحالية باستخدام برنامجي، FLUENT و ANSYS FLUENT لم يجعل من الممكن محاكاة نماذج ثنائية الأبعاد وثلاثية الأبعاد لمحطة مدخنة شمسية ، بتوربين و بدون توربين. تم إجراء المحاكاة لهندسة النموذج الأولي لمانزاناريس ، إسبانيا. كما قمنا بمقارنة نتائجنا الرقمية والتحقق من صحتها مع الدراسات التجريبية والرقمية المنشورة.

في الخطوة الأولى، أجرينا دراسة رقمية ثنائية الأبعاد للمدخنة شمسية من أجل إبراز خصائص النظام المدروس وتحديد المنطقة التي يمكن أن تتحول فيها سرعة التدفق إلى التوربين. كما قمنا بدراسة تأثير سرعة الهواء في مدخل المجمع ، ودرجة الحرارة المحيطة على النظام. تم تحليل توزيع درجة الحرارة والسرعة والضغط في النظام. من أجل العثور على أفضل موقع لتثبيت مدخنة شمسية في الجزائر ، تم اختيار أربع مناطق (أدرار ، تمنراست ، ورقلة و قسنطينة) تم تقدير الطاقة الكهربائية التي يتم إنتاجها سنويًا وشهريًا بواسطة المدخنة الشمسية للمناطق الأربعة. في خطوة ثانية، تم إجراء محاكاة رقمية ثلاثية الأبعاد لمداخل شمسية مقترنة بتوربين، وتمت معالجة هذه الأخيرة بطريقتين، إما عن طريق اعتماد نموذج المروحة، أو عن طريق اقتراح المدخنة بتوربين حقيقي من أربعة شفرات. في الحالة الأولى، لا يؤخذ التكوين التفصيلي للتوربين في الاعتبار، فقد تم التعامل معه كقرص رفيع للغاية. يتم دراسة تأثير الإشعاع والشمسي وانخفاض الضغط عبر التوربين على عناصر مثل الفرق في درجة الحرارة في المجمع ، و مردود المجمع و الطاقة الكهربائية المنتجة من طرف النظام ، وفي الحالة الثانية ، تم فحص تأثير سرعة دوران التوربين على سرعة ودرجة حرارة التدفق عند مخرج المدخنة. كما تم تقدير الطاقة الكهربائية المنتجة ومردودية التوربين.

الكلمات المفتاحية: مدخنة شمسية ، محاكاة ثنائية الأبعاد وثلاثية الأبعاد ، توربين حقيقي ، نموذج المروحة ، التأثيرات الحرارية والهيدروميكانكية.

Résumé

L'objectif de ce travail est de simuler numériquement les principaux phénomènes thermiques et hydrodynamiques dans une cheminée solaire avec une attention particulière à la turbine.

La présente étude a été réalisée en utilisant les logiciels FLUENT et ANSYS FLUENT qui permettent de simuler des modèles bidimensionnel et tridimensionnel d'une centrale à cheminée solaire, sans et avec une turbine. La simulation a été effectuée pour la géométrie du prototype de Manzanares, en Espagne. Nos résultats numériques sont comparés et validés, avec des travaux expérimentaux et numériques publiés.

En premier lieu, une étude numérique en 2D, d'une cheminée solaire est menée afin de mettre en évidence les caractéristiques du système étudié et de définir la région où la vitesse de l'écoulement, peut faire tourner une turbine. Nous avons examiné l'effet de la vitesse de l'air à l'entrée du collecteur et de la température ambiante sur le système. Les distributions de température, de vitesse et de pression dans le système, sont analysées. Afin de trouver le meilleur site pour implanter une cheminée solaire en Algérie, quatre régions sont choisies (Adrar, Tamanrasset, Ouargla et Constantine). La puissance électrique produite annuellement et mensuellement par la cheminée solaire, pour les quatre régions est estimée.

Dans un second temps, une simulation numérique en 3D d'une cheminée solaire couplée à une turbine a été entreprise. Cette dernière a été traitée de deux façons, soit en adoptant le modèle de ventilateur, soit en couplant la cheminée solaire avec une turbine réelle de quatre pales. Dans le premier cas, la configuration détaillée de la turbine n'est pas prise en compte, elle a été considérée comme un disque infiniment mince. L'effet du rayonnement solaire et de la chute de pression à travers la turbine sur la différence de température dans le collecteur, l'efficacité du collecteur et la puissance du système, est étudié. Dans le second cas, l'influence de la vitesse de rotation de la turbine sur la vitesse et la température de l'écoulement à la sortie de la cheminée est examinée. La puissance électrique et le rendement de la turbine ont été également estimés.

Mots-clés : Cheminée solaire, Simulation numérique en 2D et en 3D, Turbine réelle, Modèle de ventilateur, Fluent, Effets thermiques et hydromécaniques.