الشعبية الديمقراطية الجمهورية الجزائرية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL
Faculté des sciences et de la technologie
Département de Génie Mécanique

N° ...../2025

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE: génie mécanique

SPECIALITE : Energétique

Thème

Amélioration du rendement énergétique d'une centrale à cheminée solaire par la récupération de chaleur du condenseur du cycle de Rankine

Présenté Par : YADROUDJI Mohamed

BENNIOU Youssouf

Encadré Par : DJIMLI Samir

Date de soutenance : 02/07/2025

Jury de Soutenance

ADERGHAL Nadia	**Grade MCB**	**Univ MSB jijel**
SAADI Saida	**Grade MAA**	**Univ MSB jijel**
DJIMLI Samir	**Grade MCA**	**Univ MSB jijel**

Promotion : 2024 /2025

Remerciement

Tout simplement et basant sur la traduction d'une parole du Prophète Mohammed (que la prière d'Allah et son salut soient sur lui) et qui a dit : « Celui qui ne remercie pas pour la petite chose, ne remercie pas pour la grande chose et celui qui ne remercie pas les gens, ne remercie pas Allah ». Alors et avec un immense plaisir, je trouve l'occasion sur cette page afin de rendre hommage et exprimer toute ma reconnaissance à chaque personne ayant participé à la réussite de ma très belle aventure.

Nous tenons à remercier très vivement mon professeur de mémoire Djimli samir, de l'université Mohamed Seddik Ben Yahia à Jijel. Ce fut une grande chance et un honneur d'avoir eu le privilège de travailler sous sa direction. Mes premiers, mes plus vifs et profonds remerciements lui sont adressés pour son encadrement exceptionnel et sa pédagogie tout au long de cette thèse. J'ai particulièrement apprécié ses compétences variées, son expérience dans des domaines diversifiés, sa méthode de travail rigoureuse, son enthousiasme contagieux et son souci du détail dans la correction des documents scientifiques. Travailler à ses côtés, participer à ses réunions et échanger avec lui m'a permis d'apprendre énormément sur le monde de la recherche et les subtilités de ce métier exigeant.

Je tiens également à souligner ses qualités humaines : sa modestie, sa patience, sa bonne humeur, son ouverture d'esprit, ses encouragements constants et son soutien indéfectible. Il a toujours été à l'écoute, prêt à prodiguer des conseils, surtout durant les derniers mois cruciaux de la thèse. Enfin, comment pourrais-je assez le remercier pour avoir relu et corrigé mon manuscrit avec tant de dévouement, et même accepté de le réexaminer une seconde fois ? Qu'il trouve ici, aujourd'hui et pour toujours, l'expression de mon respect le plus profond et de ma gratitude infinie.

Une dernière pensée émue va à ma famille, en particulier à mes parents, pour leur confiance et leur amour inconditionnels, et pour leur soutien constant dans tous mes projets. Je vous remercie du fond du cœur et vous serai éternellement reconnaissant.

Dédicaces

C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que je dédie ce modeste travail de fin d'étude

À mes très chers parents ; qui ont sacrifié leur vie pour ma réussite et ils ont éclairé le chemin par leurs conseils judicieux.

Je dédie aussi ce travail à ma chère sœur et mes chers frères.

Tous mes adorables amis.

Ainsi qu'à toute personne qui m'a soutenu.

<u>YADROUDJI MOHAMED</u>

Dédicaces

Avec un cœur rempli de gratitude et une profonde humilité, j'exprime mes plus sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail :

- À mes chers parents ; qui ont tout donné pour moi et n'ont ménagé aucun effort pour m'offrir les moyens de réussir, en étant mes plus grands soutiens.

- À mes frères et sœur ; compagnons de route qui ont été mes piliers à chaque étape.

- À mes amis précieux ; qui ont été une véritable aide dans mon parcours académique.

- Et à tous ceux qui m'ont tendu la main ; que ce soit par une parole gentille, un encouragement ou un conseil.

BENNIOU YOUSSOUF

Sommaire

Remerciements……

Dédicace……...

Sommaire……...……I

Liste des figures…….……IV

Liste des tableaux……...VI

Nomenclature……VII

Introduction Générale 1

CHAPITRE I : Presentation de la cheminee solaire et recherche bibliographique 3

1. Introduction 4

2. Les Composantes de la cheminée solaire 5

2.1. Le Collecteur 5

2.2. La cheminée (la tour) 6

2.3. La Turbine 6

3. Principe de fonctionnement 7

4. Système de stockage 8

4.1. Les méthodes de stockage 8

4.1.1. Par chauffage de sable 8

4.1.2. Par chauffage d'eau 9

4.1.3. Par chauffage de galets 9

5. Avantages et inconvénients de la cheminée solaire 10

5.1. Avantages 10

5.2. Inconvénients 10

6. Les projets réalisés et en cours de réalisation dans le monde 11

6.1. Le prototype de Manzanares 11

6.2. Projet Australien 12

6.3. Projet de Buronga 12

6.4. Le projet Namibien 13

7. Revue bibliographique 14

.8 Conclusion 17

CHAPITRE II : MODELISATION MATHEMATIQUE 18
1. Introduction 19
2. Définition du problème 19
2.1. Le cycle de Rankine 20
2.2. Configuration géométrique 3D 21
2.3. Configuration géométrique 2D 23
2.3.1. Sans échangeur à vapeur 23
2.3.2. L'échangeur à vapeur sous collecteur bas (H_v = 0m ;L_v=1m) 24
2.3.3. L'échangeur à vapeur sur le collecteur bas (H_v = 0.3m ;L_v=1m) 24
2.3.4. L'échangeur à vapeur sur le collecteur bas (H_v = 0.5m ;L_v=1m) 26
3. Hypothèses simplificatrices 26
4. Formulation mathématique 27
4.1. Equation de continuité (conservation de la masse) 27
4.2. Equation de la conservation de la quantité de mouvement 28
4.3. Equation de l'énergie 28
5. Modèle de la turbulence 29
6. Conditions aux limites 30
7. Méthode de calcul de la production d'énergie 30
8. Conclusion 32
CHAPITRE III : MODELISATION NUMERIQUE 33
1. Introduction 34
2. Présentation de Gambit et Fluent 34
2.1. Pré processeur Gambit 34
2.2. ANSYS Fluent 34
3. Procédures de modélisation 35
.4 Réalisation du maillage 38
.5 Géométrie du problème 40
6. Conclusion 42
CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION 43
1. Introduction 44
2. L'effet de l'échangeur à vapeur sur les champs dans les différents cas 44
2.1. L'échangeur à vapeur sous collecteur bas (H_v=0 ; L_v=1) 45
2.2. L'échangeur à vapeur sur le collecteur bas (H_V=0.3m ; L_V=1m) 51
2.3. L'échangeur à vapeur sur le collecteur bas (H_V=0.5m ; L_V=1m) 57
.3 L'effet des échangeurs a vapeurs sur le rendement du collecteur : 63
4. L'effet des échangeurs à vapeurs sur la puissance produite : 64

5. Conclusion 65
..... **Conclusion Générale** 67
..... ***REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES*** 68

الملخص

Résumé

Abstract

Liste des figures

Chapitre I

Fig .I 1: La Centrale à Cheminée Solaire (CCS) 4
Fig .I 2: Collecteur d'une cheminée solaire 5
Fig .I 3: Verrière du collecteur d'une cheminée solaire 5
Fig .I 4: Photo montrant une tour cheminée 6
Fig .I 5: Turbine pour Cheminée Solaire de large diamètre 6
Fig .I 6 : Turbines verticales 7
Fig .I 7: Petites turbines horizontales 7
Fig .I 8: Toit transparent de la serre 7
Fig .I 9: Schéma de fonctionnement d'une centrale solaire aérothermique 8
Fig .I 10: Principe du stockage d'énergie thermique avec des tubes remplis d'eau 9
Fig .I 11: Principe du stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des galets 10
Fig .I 12: Tour solaire implantée à Manzanares 11
Fig .I 13: La Cheminée Solaire Australienne 12
Fig .I 14: projet de buronga 13
Fig .I 15: La Cheminée Solaire Namibien 14
Fig .I 16: Schéma d'une centrale à cheminée solaire avec condensation de vapeur d'eau 15
Fig .I 17: Cheminée solaire pour la production d'électricité et dessalement de l'eau de mer 15
Fig .I 18 : Cheminée solaire - Turbine à Gaz 16

Chapitre II

Fig .II 1: cycle de vapeur de Rankine 20
Fig .II 2: Géométrie de la centrale à cheminée solaire et l'échangeur à vapeur 21
Fig .II 3: Géométrie de la centrale à cheminée solaire et l'échangeur à vapeur 22
Fig .II 4: Géométrie de la centrale à cheminée solaire et l'échangeur à vapeur 23
Fig .II 5: Géométrie de la centrale à cheminée solaire 2D pour le cas 1 23
Fig .II 6: Géométrie de la centrale à cheminée solaire 2D pour les cas (2), (3) et (4) 24
Fig .II 7: Géométrie de la centrale à cheminée solaire 2D pour les cas (5), (6) et (7) 25
Fig .II 8: Géométrie de la centrale à cheminée solaire 2D pour les cas (8), (9) et (10) 26

Chapitre III

Fig.III 1: Procédure de résolution du problème 37
Fig.III 2: Géométrie 2D sur Gambit 38
Fig.III 3: Maillage de la géométrie en 2D 39
Fig.III 4: Distribution des conditions aux limites en 2D pour cas sans échangeur et le cas avec un échangeur à vapeur 40
Fig.III 5: distribution des conditions aux limites en 2D pour le cas avec deus échangeurs et le cas avec trois échangeurs à vapeur 41

Chapitre IV

Fig .IV. 1: représente les sections utilisées pour illustrer les différents profils vitesse et température. 45
Fig .IV. 2: Les champs températures pour les cas (1) (2) (3) (4) pour (Hv=0m) 46
Fig .IV. 3: Les champs des vecteurs de vitesses pour les cas (1) (2) (3) (4) pour (Hv=0m) 47
Fig .IV. 4: Profil de température au milieu du collecteur (z)=0.9m pour (Hv=0m) 48
Fig .IV. 5: Profil de température à la sortie du collecteur pour (Hv=0m) 48
Fig .IV. 6: Profil de vitesse à la sortie du collecteur pour (Hv=0m) 49
Fig .IV. 7: Profil de vitesse à l'entrée de la cheminée pour (Hv=0m) 50
Fig .IV. 8: Les champs températures pour les cas (1) (5) (6) (7) pour (Hv=0.3m) 52
Fig .IV. 9: Les champs des vecteurs de vitesses pour les cas (1) (5) (6) (7) pour (Hv=0.3m) 53
Fig .IV. 10: Profil de température au milieu du collecteur (z)=0.9m pour (Hv=0.3m) 54
Fig .IV. 11: Profil de température à la sortie du collecteur pour (Hv=0.3m) 55
Fig .IV. 12: Profil de vitesse à la sortie du collecteur pour (Hv=0.3m) 55
Fig .IV. 13: Profil de vitesse à l'entrée de la cheminée pour (Hv=0.3m) 56
Fig .IV. 14: Les champs températures pour les cas (1) (8) (9) (10) pour (Hv=0.5m) 58
Fig .IV. 15: Les champs des vecteurs de vitesses pour les cas (1) (8) (9) (10) pour (Hv=0.5m) 59
Fig .IV. 16: Profil de température au milieu du collecteur pour (Hv=0.5m) 60
Fig .IV. 17: Profil de température à la sortie du collecteur pour (Hv=0.5m) 60
Fig .IV. 18: Profil de vitesse à la sortie du collecteur pour (Hv=0.5m) 61
Fig .IV. 19: Profil de vitesse à l'entrée de la cheminée pour (Hv=0.5m) 62
Fig .IV. 20: Rendement du collecteur pour les différents cas 63
Fig .IV. 21: Puissances produite pour les différents cas 64

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II. 1:Les informations et mesures liées à échangeurs à vapeur 19
Tableau II. 2: Les conditions aux limites utilisées dans le cas bidimensionnel 30

Chapitre III

Tableau III. 1.Conditions aux limites pour le cas 2D 42

Chapitre IV

Tableau. IV. 1: Représentation de Tmoy et Vmoy à la sortie du collecteur et à l'entrée de la cheminée et au milieu collecetur pour (Hv=0m)..... 51
Tableau. IV. 2: Représentation de Tmoy et Vmoy à la sortie du collecteur et à l'entrée de la cheminée et au milieu du collecteur pour (Hv=0.3m)..... 57
Tableau. IV. 3: Représentation de Tmoy et Vmoy à la sortie du collecteur et à l'entrée de la cheminée et à milieu collecteur pour (Hv=0.5m)..... 63

Nomenclature

Symbole	Description	Unite
C_p	Capacité spécifique d'air	J/ kg.k
A	Surface	m²
V_{coll}	la vitesse moyenne de l'air dans le collecteur	m/s
g	Accélération de la pesanteur	m/s^2
H_{chem}	Hauteur de cheminée	m
H_v	Hauteur de échangeur à vapeur	m
L_v	Largeur de échangeur à vapeur	m
$\dot{m}$	Débit massique	kg/s
P	Pression	Pa
ε	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente	m²/s³
G	Rayonnement solaire global	W/m²
$\dot{Q}$	la puissance thermique captée	w
ΔP	Différence de pression générée par la cheminée	Pa
Pe	Puissance	kW
R	Rayon de la cheminée	m
r	Coordonnée radiale	m
z	Coordonnée verticale	m
u	Composante de la vitesse dans la direction r	m/s
w	Composante de la vitesse dans la direction z	m/s
T	Température	K
T_0	Température ambiante	K
ΔT	Différence de température dans le collecteur	K

Lettres grecques

α	Diffusivité thermique	m^2/s
β	Coefficient de dilatation thermique	1/K
μ	Viscosité dynamique	kg/m.s
υ	Viscosité cinématique	m^2/s
K	Conductivité thermique	W/m.K
ρ	Masse volumique	kg/m^3
η	Rendement	%
Φ	Flux thermique	W/m²

Nombres adimensionnels

Pr	Nombre de Prandtl
Ra	Nombre de Rayleigh

Indices

Coll	Collecteur
sc	Cheminée
0	Ambiante
wt	Turbine
CCS	Centrale à cheminée solaire
SCPP	Solar chimney power plants
SCCP	Solar chimney central power

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

Dans un contexte mondial marqué par des défis environnementaux et économiques croissants, la recherche de sources d'énergie renouvelables et durables est devenue une nécessité vitale pour assurer un avenir sûr aux générations futures. Parmi ces sources, l'énergie solaire se distingue comme une solution prometteuse en raison de l'abondance du rayonnement solaire et de la diversité des technologies disponibles pour son exploitation. Dans ce cadre, la technologie des "centrales à tour solaire" ou "cheminées solaires" se positionne comme l'une des solutions les plus innovantes dans le domaine des énergies renouvelables.

Cette technologie repose sur trois composants principaux : le collecteur solaire qui fonctionne comme une immense serre, la cheminée ou tour centrale qui constitue le cœur du système, et les turbines qui transforment l'énergie cinétique en électricité. Le principe fondamental consiste à chauffer l'air sous le collecteur solaire grâce au rayonnement solaire, créant ainsi un courant ascendant dans la cheminée qui actionne les turbines connectées à des générateurs électriques. Cette technologie ne dépend pas des combustibles fossiles et ne produit aucune émission nocive, ce qui en fait une solution parfaitement écologique.

L’importance de cette étude réside dans sa démarche visant à accroître l’efficacité de cette technologie en exploitant la vapeur en sortie de turbine, fonctionnant selon un cycle de Rankine, par l’intégration d’échangeurs thermiques dans la conception du collecteur solaire. Elle a pour objectif d’analyser les effets thermiques et aérodynamiques induits par ces échangeurs sur la répartition de la température et la vitesse de l’air au sein du système. Cette démarche d’optimisation s’inscrit dans un contexte où l’amélioration du rendement des systèmes d’énergie renouvelable devient indispensable pour satisfaire la demande énergétique mondiale croissante.

Ce mémoire se structure en quatre chapitres interdépendants poursuivant de manière intégrée les objectifs de travail. Le premier chapitre présente une vue d'ensemble des centrales à tour solaire, abordant leur principe de fonctionnement, leurs composants essentiels et leur évolution historique. Il inclut également une revue approfondie des principales études antérieures et des projets mondiaux pionniers dans ce domaine, fournissant ainsi une base solide pour ce projet fin d’étude.

Le deuxième chapitre aborde l'aspect théorique de l'étude à travers la modélisation mathématique du système. Il présente les équations de conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie qui régissent le fonctionnement du système, ainsi que le modèle de

turbulence utilisé pour simuler les conditions réelles. Ce chapitre explique en détail la méthodologie de calcul de la production d'énergie et de l'efficacité du système, en mettant l'accent sur les facteurs influençant ses performances.

Le troisième chapitre est consacré à l'aspect appliqué à travers la modélisation numérique. Il présente les outils et logiciels informatiques utilisés pour la simulation comme Gambit et Fluent, tout en clarifiant les étapes de création du modèle, la définition des conditions aux limites appropriées et la réalisation de la simulation numérique. Ce chapitre représente le pont entre les aspects théoriques et appliqués de l'étude.

le quatrième chapitre analyse et discute les résultats de manière détaillée. Il évalue l'impact des échangeurs de vapeur sur les performances du système à travers une comparaison complète entre les différents cas étudiés. L'analyse porte sur les variations dans la distribution des températures, les modèles d'écoulement d'air et l'efficacité de conversion d'énergie, accompagnées d'explications physiques de ces résultats. Des recommandations pratiques pour l'amélioration de la conception du système sont également formulées.

CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA CHEMINEE SOLAIRE ET RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Introduction

Dans ce chapitre on va présenter l'historique, le principe de fonctionnement et les avantages et les inconvénients d'une centrale solaire à effet de cheminée.

« Une centrale solaire » souvent appelée « cheminée solaire » et une centrale thermique qui se réalise dans les régions ensoleillées de la terre. C'est une usine constituée par trois éléments principaux : un collecteur, une cheminée et une turbine. En effet les tours solaires produisent l'électricité à partir du rayonnement solaire qui réchauffe l'air sous un toit transparent et en raison de la différence de densité entre l'air chaud sous le collecteur à l'intérieur et l'air ambiant plus froid, l'air chaud monte dans la cheminée creuse. En utilisant des turbines, l'énergie contenue dans le courant aérien ascendant est convertie en énergie électrique.

Plusieurs projets ou idées sur les CCS ont été communiqués à travers le monde. Le premier était incontestablement celui d'un militaire espagnol, le colonel Isidoro Cabanyes qui, en 1903, proposa un modèle de tour solaire. Ensuite elle a été rendue publique par Günter. Depuis 1975, plusieurs brevets ont été accordés par Lucier en Australie, au Canada, et aux Etats-Unis. En 1978, le Professeur Jorg Schlaich de l'université de Stuttgart, a confirmé l'idée que l'électricité pourrait être produite par un système hybride solaire – éolien. [1]



Fig. I 1: La Centrale à Cheminée Solaire (CCS) [1]

2. Les Composantes de la cheminée solaire

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

2.1. Le Collecteur

Le composant principal d'une centrale solaire à cheminée est le capteur solaire. Les capteurs d'énergie solaire sont des types particuliers d'échangeurs de chaleur qui transforment l'énergie du rayonnement solaire en énergie interne du milieu de transport.

Le collecteur est la partie de la cheminée qui produit de l'air chaud par effet de serre. Il possède un toit constitué d'un film plastique ou d'un film en verre. Le matériau du toit est tendu horizontalement à deux ou six mètres au-dessus du sol. La hauteur du toit augmente à proximité de la base de la cheminée, de sorte que l'air est détourné vers la base de la cheminée avec une perte de friction minimale. Ce revêtement admet la composante du rayonnement solaire à ondes courtes et retient le rayonnement à ondes longues du sol chauffé. Ainsi, le sol sous le toit se réchauffe et transfère sa chaleur à l'air qui circule radialement au-dessus de lui de l'extérieur vers la cheminée. [2].



Fig. I 3: Collecteur d'une cheminée solaire [2]



Fig. I 2: Verrière du collecteur d'une cheminée solaire [2]

2.2. La cheminée (la tour)

Est la partie principale d'une centrale thermique. Une tour est située au centre du collecteur et est considérée comme le moteur thermique de la centrale. La tour crée une différence de température entre le haut et le bas qui crée l'effet de cheminée, qui déplace l'air du bas de la cheminée vers le haut. Il est également avantageux de placer la turbine dans la cheminée aussi basse que possible afin de faciliter sa construction.

Il existe de nombreuses méthodes de construction différentes pour une telle tour :

- Tubes en béton armé autoporteurs.
- Tubes en acier soutenus par des fils ou des câbles.
- De telles tours peuvent également être construites à l'aide de technologies supplémentaires telles que l'acier haubané entouré de filets de câbles en acier, de membranes ou de films métalliques trapézoïdaux [3].

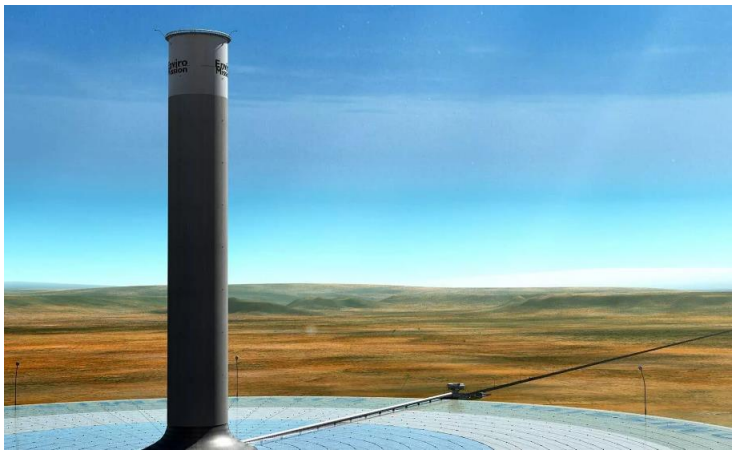


Fig. I 4: Photo montrant une tour cheminée [3]

2.3. La Turbine

Des turbines, comme sur la Figure (I-5), servent à convertir le courant d’air ascendant en énergie mécanique, puis électrique.

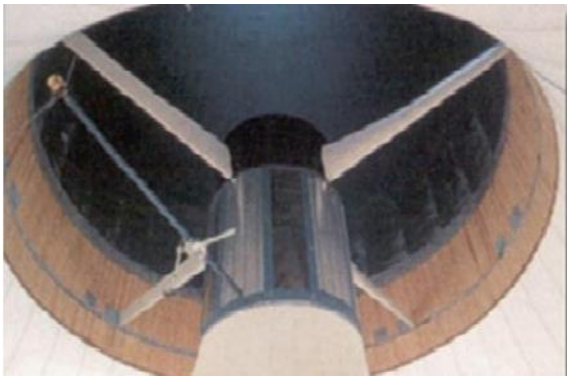


Fig. 5: Turbine pour Cheminée Solaire de large diamètre [4]

Les turbines sont placées soit verticalement dans le collecteur Figure (I.5), soit horizontalement dans la cheminée Figure (I.6). Afin d'obtenir le maximum d'énergie à partir de l'air chauffé, les lames des turbines doivent couvrir toute la section de la cheminée. Pour cela, une grande turbine ou plusieurs petites turbines devraient être utilisées au pied de la cheminée, comme montré sur les Figures (I.6) -(I.7) [4]

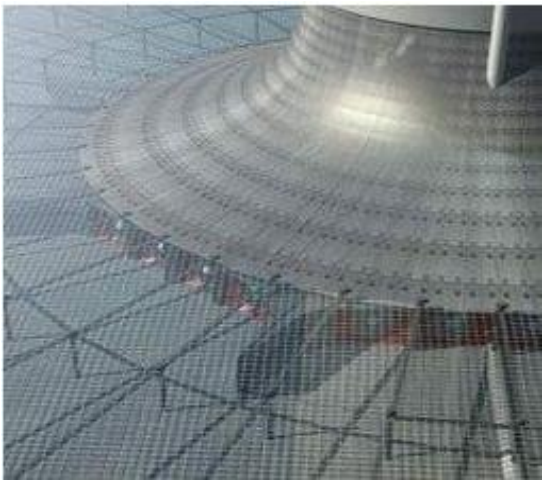


Fig. I 6 : Turbines verticales [4]

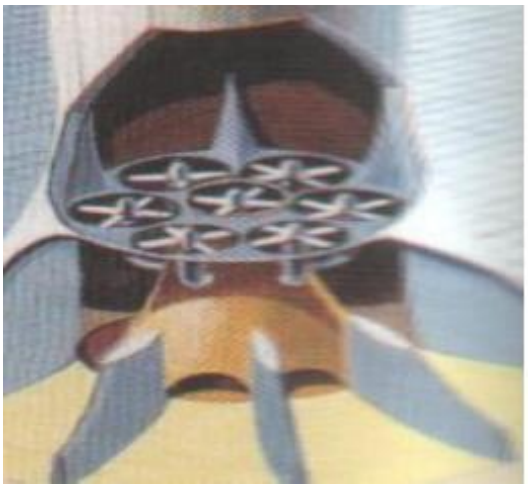


Fig. I 7: Petites turbines horizontales [4]

3. Principe de fonctionnement

Le toit transparent de la serre, qu'on voit sur la Figure (I 8), laisse passer les faibles longueurs d'onde de la radiation solaire et retient le rayonnement de grandes longueurs d'onde. Donc une partie du rayonnement solaire chauffe directement l'air sous la serre et l'autre partie est absorbée par le sol qui la restitue ensuite sous forme de chaleur.



Fig. I 8: Toit transparent de la serre [4]

Comme l'air est "chauffé" il se dilate et commence à monter et à se déplacer sous la serre vers la cheminée comme illustré sur la Figure (I 9). Il acquiert aussi progressivement de la vitesse. Lair chauffé sous la serre pénètre dans la cheminée placée en son centre et crée un courant d'air ascendant. Au pied de la cheminée des turbines équipées de générateurs produisent de l'électricité [4].

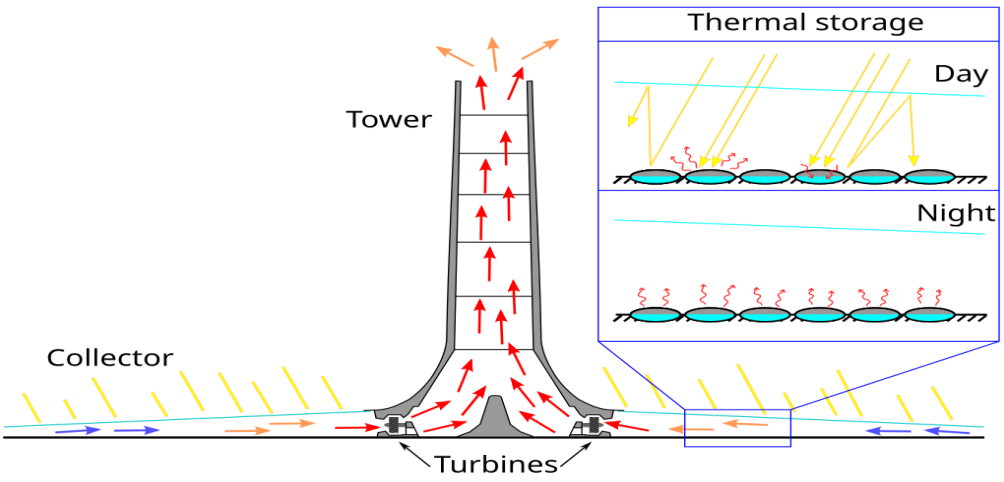


Fig. I 9: Schéma de fonctionnement d'une centrale solaire aérothermique [4]

4. Système de stockage

La cheminée solaire fonctionne grâce au rayonnement solaire, ce qui signifie qu'elle est active uniquement pendant la journée. En l'absence de rayonnement, notamment la nuit, son fonctionnement s'interrompt. C'est pourquoi l'énergie solaire captée durant la journée peut être stockée à l'aide de systèmes de stockage thermique, permettant ainsi d'assurer le fonctionnement de la cheminée même en l'absence de soleil [5].

4.1. Les méthodes de stockage

4.1.1. Par chauffage de sable

Le sable exposé au rayonnement solaire accumule de l'énergie thermique pendant la journée. Cette chaleur sert à chauffer l'air, qui est ensuite dirigé vers la cheminée, où il actionne une turbine génératrice d'électricité. La chaleur stockée dans le sable est libérée progressivement la nuit, assurant un fonctionnement continu du système même en l'absence de soleil. Ainsi, la centrale peut produire de l'électricité 24 heures sur 24, tout au long de l'année, y compris pendant l'hiver lorsque l'ensoleillement est faible

4.1.2. Par chauffage d'eau

Les collecteurs génèrent de l'air chaud grâce à l'effet de serre. Pour permettre la production d'électricité la nuit, des réservoirs tubulaires de couleur noire, remplis d'eau, sont installés sous la serre, comme illustré dans la Figure. I.10

Les réservoirs d'eau stockent la chaleur pendant la journée et la restituent à l'air ambiant durant la nuit. Ces tubes, une fois remplis, sont hermétiquement scellés et ne nécessitent aucun remplissage ultérieur. Leur volume est dimensionné pour fournir une hauteur d'eau comprise entre 5 et 20 cm, en fonction de la puissance de production nocturne souhaitée. Toutefois, plus l'énergie stockée pour la nuit est importante, plus elle réduit la production en journée. Il est possible d'optimiser la production pendant les heures de pointe, où l'électricité est vendue entre 3 et 10 fois plus cher qu'en heures creuses, ce qui améliore significativement la rentabilité du système.

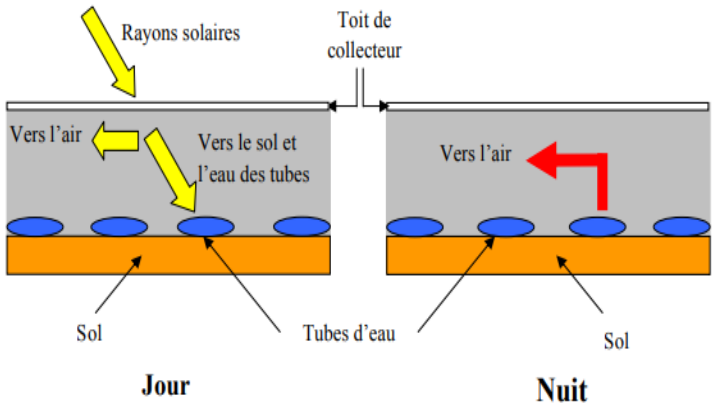


Fig. I 10: Principe du stockage d'énergie thermique avec des tubes remplis d'eau [5]

4.1.3. Par chauffage de galets

Afin d'optimiser cette production nocturne, nous pouvons placer sous la serre des galets qui ont un pouvoir de stockage de chaleur très important Figure. I.11.

En effet, durant la journée, ces galets sont exposés constamment aux rayons du soleil et donc emmagasinent cette chaleur afin de la restituer durant la nuit [6]

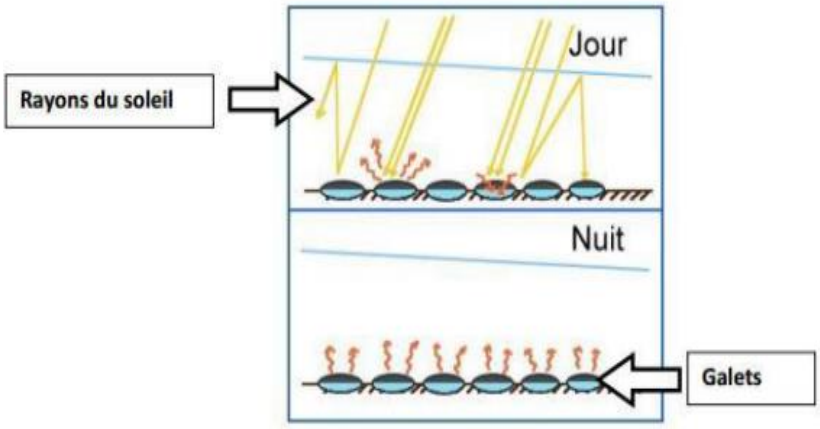


Fig. I 11: Principe du stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des galets [5]

5. Avantages et inconvénients de la cheminée solaire

5.1. Avantages

- La cheminée solaire est particulièrement adaptée à la production d'électricité dans les déserts et les terres arides.
- En raison du système de stockage de chaleur, la cheminée solaire actionnera 24 h sur l'énergie solaire uniquement.
- Aucun carburant n'est nécessaire.
- Elle ne nécessite pas d'eau de refroidissement et elle est adaptée à des régions où règne une sécheresse extrême.
- La cheminée solaire est particulièrement fiable et nécessite peu de maintenances Comparativement aux autres usines de production d'électricité.
- Les matériaux nécessaires à la construction d'une cheminée solaire sont le béton, le verre et l'acier, sont disponibles en quantités suffisantes partout dans le monde.

5.2. Inconvénients

- L'investissement de départ est plus élevé.
- La production n'est pas constante pendant le jour ou l'année.
- Le collecteur occupe une immense surface.
- Impact visuel négatif (certains y voient une dégradation du paysage).
- Quelques estimations disent que les coûts d'investissement pour la production d'électricité à partir d'une cheminée solaire est 5 fois plus important que celui à partir d'une turbine à gaz [5].

6. Les projets réalisés et en cours de réalisation dans le monde

6.1. Le prototype de Manzanares

Un prototype de centrale solaire a été conçu, construit et exploité par Schlaich Bargeman en 1981 à Manzanares, au sud de Madrid, avec une puissance maximale de 50 kW, financé par le ministère allemand de la Recherche et de la Technologie. Après des améliorations, la production continue a eu lieu entre 1983 et 1989. La centrale a atteint un rendement électrique de 0,53 %, avec un potentiel estimé à 1,3 %. Le facteur de capacité était de 10 %, mais pourrait atteindre 29 % pour une unité de 200 MW. La production dépendait de l'irradiation solaire et des conditions climatiques. Bien que le projet ait pris fin après huit ans en raison de la corrosion des câbles et de l'effondrement de la cheminée, il a démontré la validité scientifique du concept, soulignant l'importance de construire des cheminées plus hautes pour améliorer la production électrique [3].

Spécifications de projet

- Hauteur de la tour 194,6 m
- Diamètre de la tour 10,16 m
- Diamètre du collecteur 244 m
- Hauteur moyenne du toit 1,85 m
- Différence de température dans le collecteur ΔT 20 °C
- Puissance électrique nominale 50KW
- Surface du collecteur en Membrane plastique 40 000 m²
- Surface du collecteur en verre 6 000 m²
- Nombre de turbine 1
- Vitesse de l'air dans la cheminée 12m/s

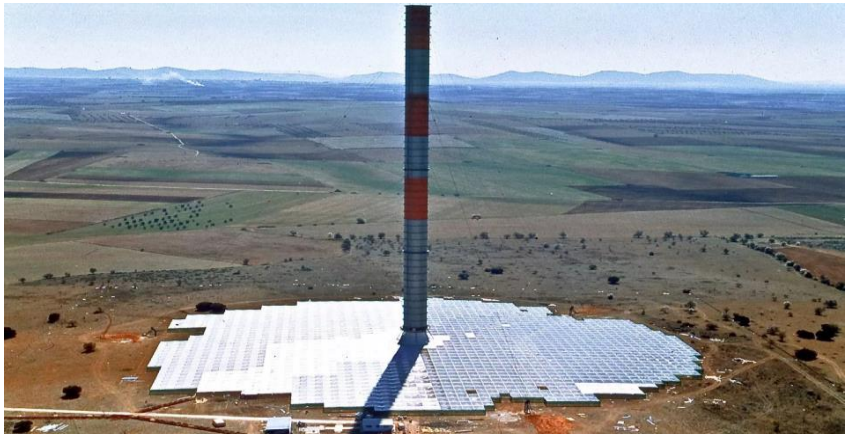


Fig. I 12: Tour solaire implantée à Manzanares [3]

6.2. Projet Australien

En 2001, un projet de centrale électrique à cheminée solaire a été annoncé dans le sud-ouest de l'Australie, visant à produire 200 mégawatts d'électricité, soit 4000 fois plus que la centrale expérimentale de Manzanares. Ce projet ambitieux nécessiterait la construction d'une cheminée gigantesque de 1000 mètres de hauteur et 130 mètres de diamètre. Pour générer suffisamment d'air chaud, une zone de captage solaire en verre ou en plastique de 35 kilomètres carrés serait aménagée. Le coût total est estimé à un milliard de dollars. La tour serait construite en béton armé, renforcée par des supports métalliques horizontaux. Sous le collecteur solaire, l'air atteindrait environ 30 °C, puis monterait à 60–70 °C en entrant dans la cheminée, circulant à une vitesse de 32 km/h. Ce flux d'air activerait 32 turbines installées horizontalement à la base de la cheminée, fabriquées en alliage léger et équipées de 10 pales chacune [3].

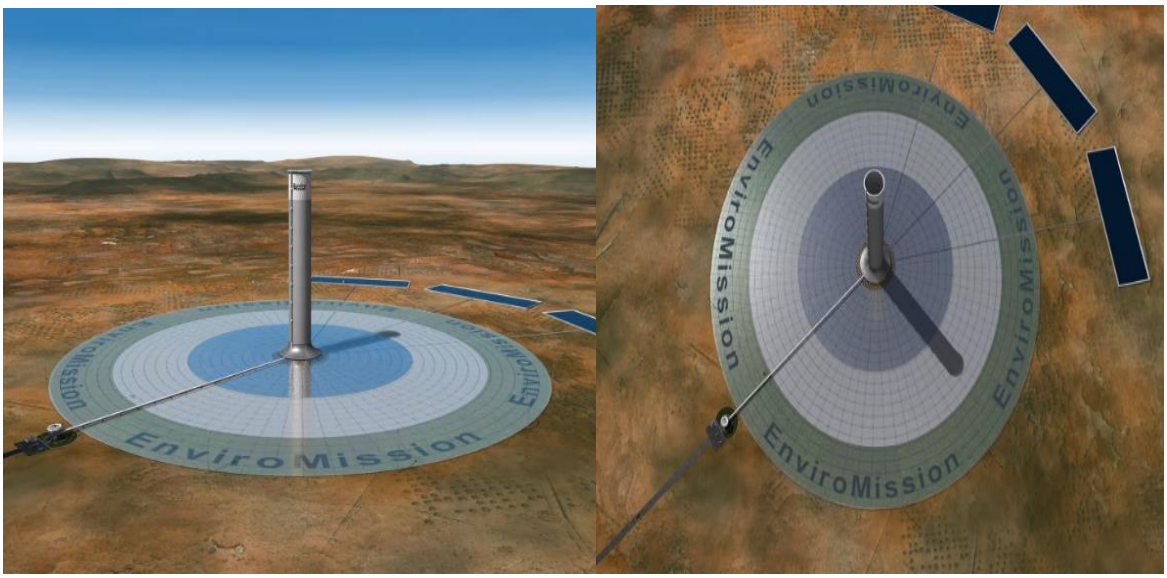


Fig. I 13: La Cheminée Solaire Australienne [3]

6.3. Projet de Buronga

Le projet de tour solaire Buronga, développé par la société Enviromission en Australie, était prévu pour 2010. Cette tour, mesurant 990 mètres de hauteur et 70 mètres de diamètre, devait produire 200 mégawatts d'électricité, représentant une alternative énergétique ambitieuse et plus propre qu'un réacteur nucléaire. Le coût d'investissement était estimé à environ 400 millions d'euros. Pour éviter l'ovalisation de la tour, des structures de maintien, semblables à des rayons de bicyclette, étaient envisagées pour minimiser l'impact sur la vitesse de l'air. Spécifications du projet [6]

- Une cheminée de 990 m de haut (3281 pieds) en matériaux composites
- 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 prévue : 200 mégawatts (électricité pour environ 200 000 logements.)



Fig. I 14: projet de buronga [7]

6.4. Le projet Namibien

Des ingénieurs allemands, à la demande de Nam Power, travaillent sur la construction d'une centrale à cheminée solaire à Arandis, en Namibie. La tour, qui atteindra 1 000 mètres de hauteur, sera entourée d'un toit en verre de 20 km². Le principe repose sur le chauffage de l'air sous le toit, qui remonte dans la cheminée, créant un courant d'air qui sera utilisé pour actionner des ventilateurs et des alternateurs. Le générateur produira 50 MW, ce qui représente environ un huitième de la consommation électrique totale du pays [8].

Spécifications du projet

- Une cheminée de 1,5 km de haut et 280m de diamètre
- La superficie de la serre sera de 20 km^2
- Puissance produite 50 MW
- Fournir toute la capitale Windhoek (300 000 habitants)
- Le coût total prévu est de 1 milliard de dollars



Fig. I 15: La Cheminée Solaire Namibien [8]

7. Revue bibliographique

Une revue bibliographique approfondie a permis d'identifier de nombreuses études consacrées aux centrales solaires à cheminée. Les chercheurs y explorent diverses stratégies pour optimiser leurs performances, notamment par des modifications de la forme du collecteur, de la cheminée ou de la turbine. Parallèlement, l'écoulement de l'air et le transfert de chaleur ont fait l'objet d'analyses détaillées afin de mieux comprendre les phénomènes hydrodynamiques et thermiques en jeu. Nous présentons ci-après une synthèse de ces travaux.

Ming, Tingzhen, et al [9] ont proposé une conception innovante de centrale solaire à cheminée, combinant production d'électricité et génération d'eau douce à partir de l'humidité ambiante. Dans ce système, des tubes noirs remplis d'eau chaude remplacent la serre vitrée traditionnelle pour chauffer l'air et favoriser la condensation de la vapeur d'eau à l'intérieur de la cheminée. Des simulations menées dans neuf villes chinoises révèlent une forte dépendance de la production d'eau aux précipitations locales, avec des performances particulièrement intéressantes en zones arides. À titre d'exemple, la ville de Guangzhou pourrait produire jusqu'à 37,9 millions de tonnes d'eau par an. Cette approche prometteuse offre une solution pour atténuer la pénurie d'eau, tout en réduisant les coûts d'infrastructure et en soutenant le cycle hydrologique régional.

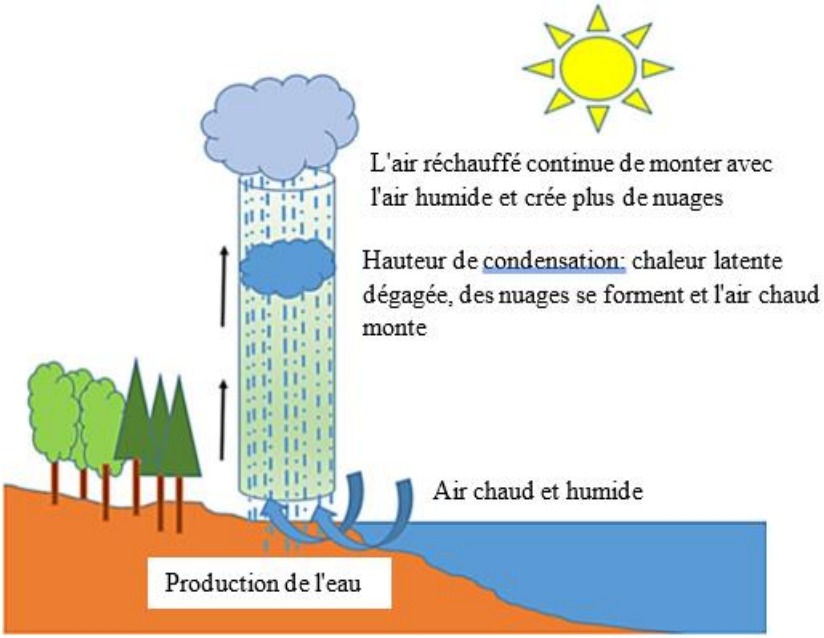


Fig. I 16: Schéma d'une centrale à cheminée solaire avec condensation de vapeur d'eau [9]

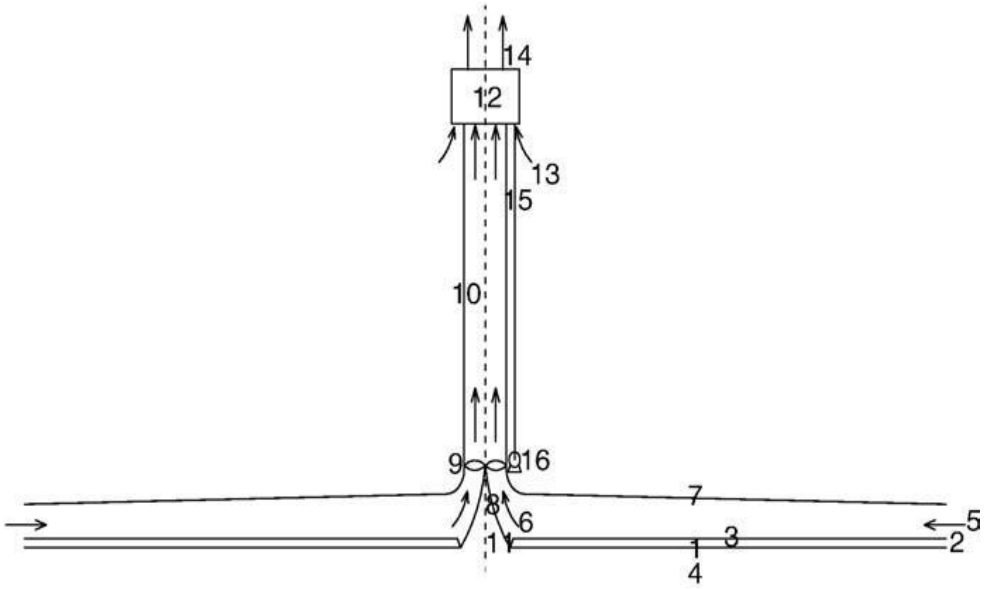


Fig. I 17: Cheminée solaire pour la production d'électricité et dessalement de l'eau de mer [9]

1) Absorbeur noir 2) Couche d'eau de mer 3) Surface de l'eau de mer 4) Lit de résistance thermique 5) Air ambiant frais et sec 6) Air chaud et saturé 7) Couverture transparente 8) Mur de guidage 9) Turbines 10) Cheminée 11) Auge des chutes d'eau 12) Condenseur à haute efficacité 13) Air ambiant frais et sec à la sortie de la cheminée 14) Air chaud ; 15) Eau de condensation 16) Production d'eau

Djimli, Samir, et al [10] ont développé une conception améliorée de centrale solaire à cheminée en l'associant à une turbine à gaz, dans le but d'augmenter le rendement et de diminuer le coût spécifique de production d'électricité. Dans ce système hybride, les gaz d'échappement de la turbine sont introduits dans le collecteur solaire — à l'entrée ou en son centre — ce qui élève rapidement la température et la vitesse de l'air, amplifiant ainsi la production d'énergie. Des simulations numériques, basées sur le prototype de Manzanares et réalisées avec le logiciel Fluent, montrent que la puissance générée peut atteindre 500 kW, soit dix fois plus que le modèle de référence, tout en réduisant notablement le coût par kWh.

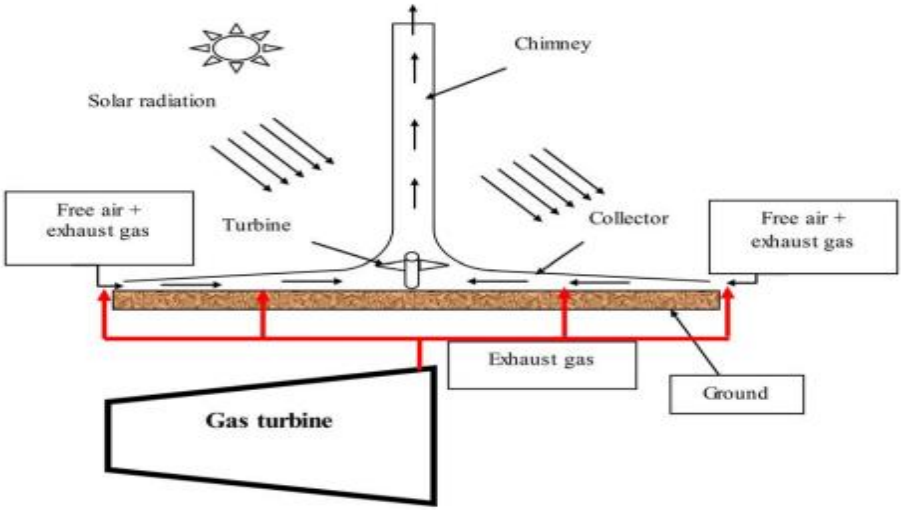


Fig. I 18 : Cheminée solaire - Turbine à Gaz [10]

Cao, Fei, et al. [11] ont proposé une centrale solaire à cheminée améliorée en y intégrant une source géothermique à basse température. Ce couplage permet de pallier l'intermittence de la production d'électricité due aux variations de l'ensoleillement. Un modèle dynamique validé par simulation montre que le mode combiné (géothermie + solaire) assure une production continue, augmente la puissance générée, surtout en hiver et la nuit, et exploite mieux les deux ressources. Ce concept offre une solution prometteuse pour une production d'énergie renouvelable stable et adaptable à la demande.

Les autres Zhou, Xinping, et al. [12] ont comparé une centrale solaire à cheminée classique (CCSS) qui produit à la fois de l'électricité et de l'eau douce par dessalement de l'eau de mer. Dans le système combiné, l'air chauffé et humidifié traverse la cheminée, où une partie de la vapeur est condensée pour fournir de l'eau douce et faire tourner une turbine hydraulique. Résultat : la production d'électricité par l'air est réduite, mais la centrale fournit en plus de

l’eau potable. Une analyse montre que ce système est plus rentable que le modèle classique pour des cheminées de moins de 445 m, notamment dans les zones côtières manquant d’eau.

Ghorbani et al. [13] proposent un nouveau concept qui combine une tour de refroidissement à sec et une cheminée solaire pour récupérer la chaleur perdue d’une centrale thermique. Grâce à des optimisations géométriques et à l’injection de gaz chauds, le système hybride produit jusqu’à 4,5 MW de puissance supplémentaire, augmentant l’efficacité de la centrale de 0,54 %. Cette solution améliore la valorisation de la chaleur résiduelle tout en réduisant la consommation d’eau et les pertes énergétiques.

8. Conclusion

Ce chapitre a présenté une étude complète de la technologie de tour solaire, expliquant ses composants principaux (collecteur solaire, tour, turbines) et son principe de fonctionnement basé sur le chauffage de l'air pour créer un courant générateur d'électricité. Il a également retracé l'évolution historique de cette technologie depuis ses débuts jusqu'aux applications modernes. L'analyse a porté sur les avantages du système (indépendance des combustibles fossiles) et ses inconvénients (coût élevé et grande superficie requise), tout en présentant des modèles appliqués réussis comme le projet Manzanares. Ce chapitre constitue une base théorique essentielle pour comprendre la technologie en préparation des études de développement ultérieures.

CHAPITRE II : MODELISATION MATHEMATIQUE

1. Introduction

Ce chapitre examine les effets de l'intégration des échangeurs à vapeur sur les caractéristiques thermiques et dynamiques de l'air dans un système de centrale à cheminée solaire, en mettant l'accent sur la vitesse de l'air en tant que principal indicateur des performances. En utilisant une modélisation mathématique bidimensionnelle et des outils de simulation de pointe, nous considérons comment les modifications du nombre, de la hauteur et de la position des échangeurs de vapeur affectent la distribution des températures et l'écoulement de l'air. Les effets sont réalisés en résolvant les équations de conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie, ce dernier étant réglé via le modèle de turbulence K-epsilon pour simuler de vrais environnements. L'analyse proposée catégorisera davantage la relation entre la conception principale des effets corrupteurs sur le système.

2. Définition du problème

L'air à l'intérieur du collecteur, chauffé par l'effet de serre, monte le long de la tour de la cheminée solaire. Une cheminée solaire se compose donc essentiellement d'un collecteur solaire, d'une tour ou cheminée et d'un aérogénérateur (turbine).

Notre travail porte sur l' intégration d'échangeurs à vapeur sur le collecteur bas.

Pendant l'expérience, nous varions leur position, et leur nombre afin d'augmenter la température de l'air.

Nombre des échangeurs à vapeur	Un, deux, trois
Hauteur des échangeurs à vapeur	H_v= (0 ; 0.3 ; 0.5) m
La distance entre les échangeurs à vapeur	35 m
La distance entre l'entrée du collecteur et le 1èr échangeur à vapeur	2 m
La distance entre la sortie du collecteur et le Dernière échangeur à vapeur	45 m

Tableau II. 1:Les informations et mesures liées à échangeurs à vapeur

2.1. Le cycle de Rankine

Le cycle de Rankine ou cycle de vapeur de Rankine est le processus largement utilisé par les centrales électriques. Dans ce mécanisme, un combustible est utilisé pour produire de la chaleur à l'intérieur d'une chaudière, transformant l'eau en vapeur qui se détend ensuite à travers une turbine produisant un travail utile. Ce procédé a été mis au point en 1859 par l'ingénieur écossais William J.M. Rankine. Il s'agit d'un cycle thermodynamique qui convertit la chaleur en énergie mécanique qui est généralement transformée en électricité par production d'électricité [14]

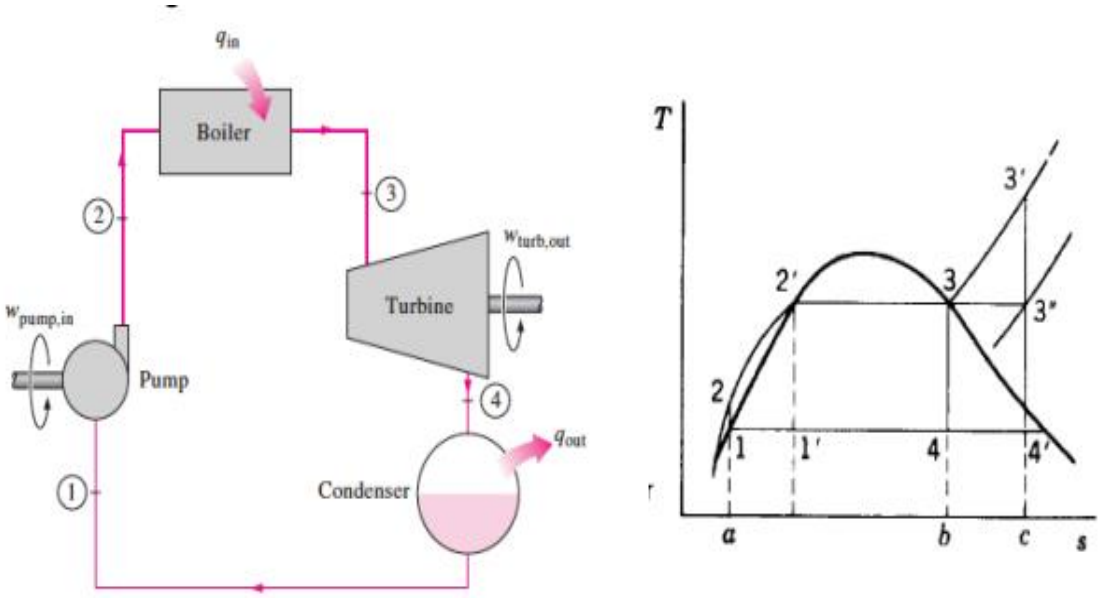


Fig. II 1: cycle de vapeur de Rankine [14]

Cycle idéal des centrales thermiques à vapeur d'eau

4 transformations de systèmes ouverts en régime permanent

- 1–2 : pompage adiabatique et réversible dans la pompe, à partir d'un état de liquide saturé
- 2–3 : échange de chaleur isobare dans la chaudière jusqu'à l'état de vapeur saturée
- 3–4 : détente adiabatique et réversible dans la turbine
- 4–1 : échange de chaleur isobare dans le condenseur

2.2. Configuration géométrique 3D

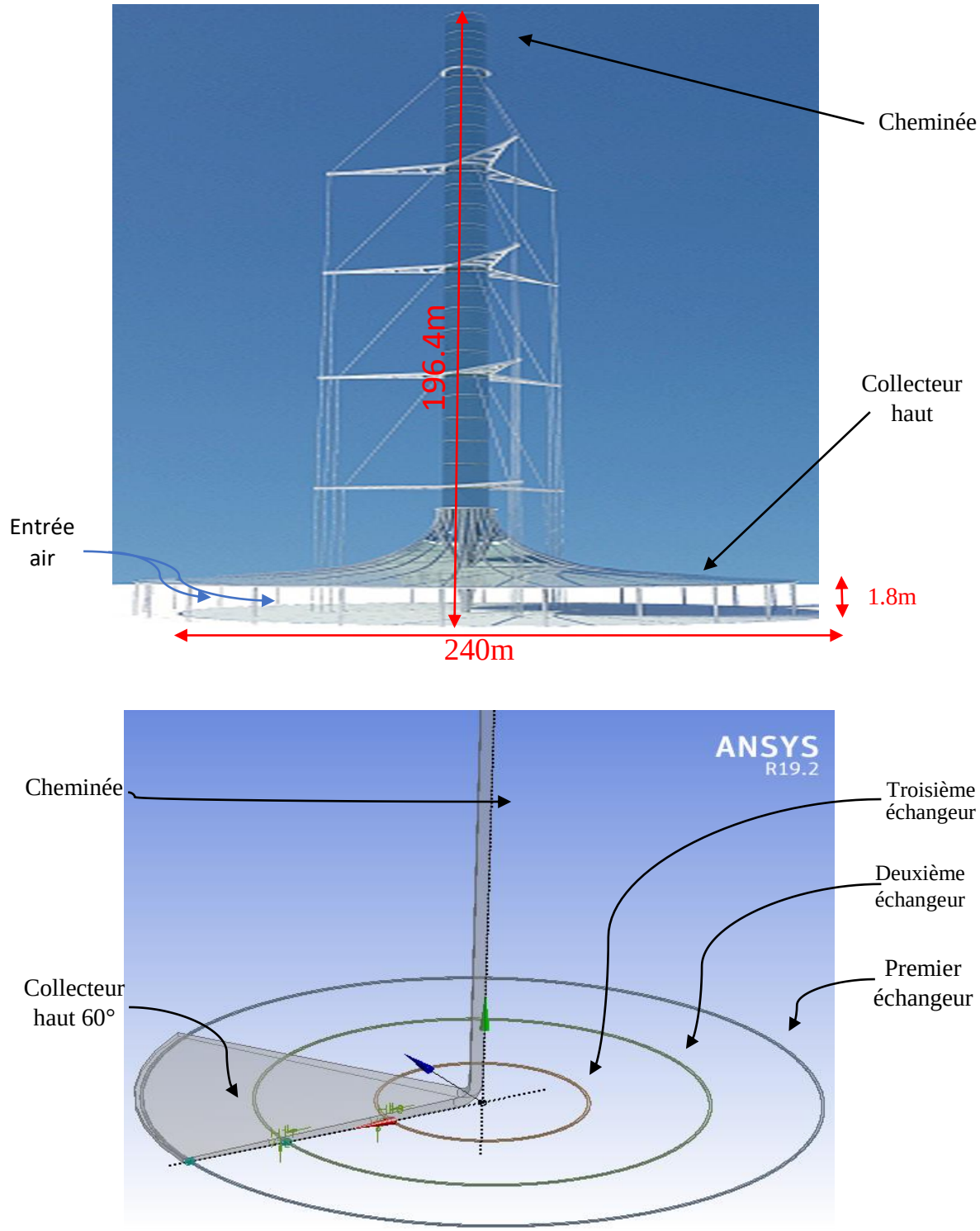


Fig. II 2: Géométrie de la centrale à cheminée solaire et l'échangeur à vapeur

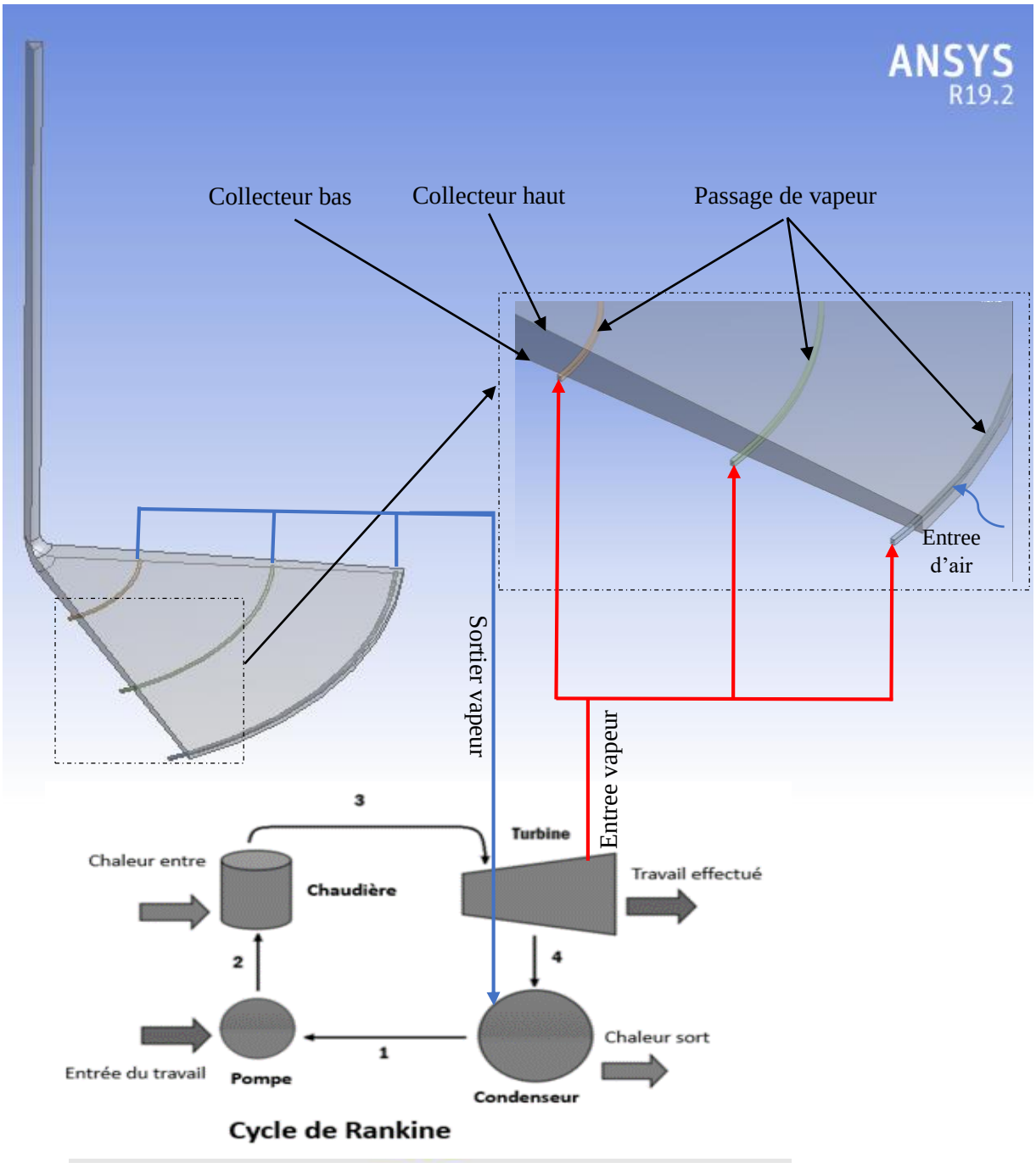


Fig. II 3: Géométrie de la centrale à cheminée solaire et l'échangeur à vapeur

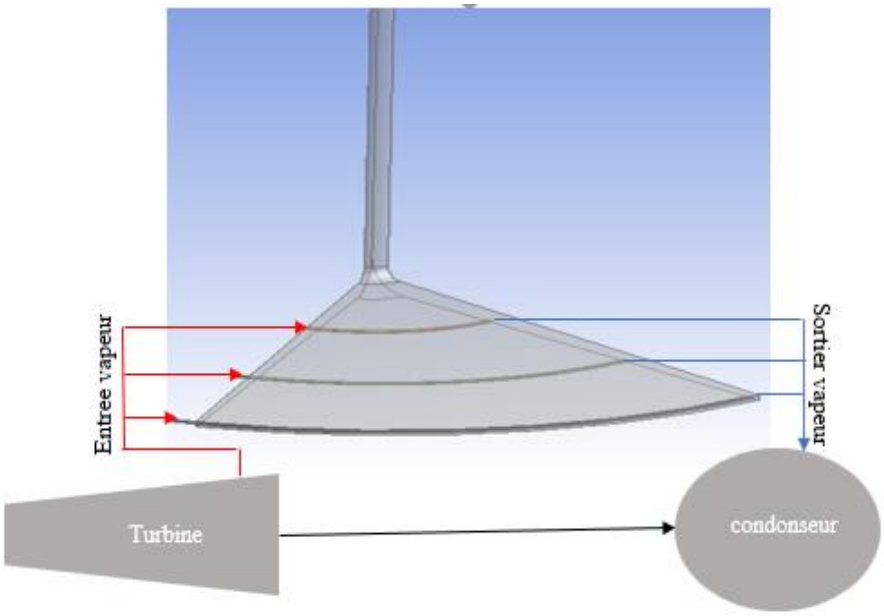


Fig. II 4: Géométrie de la centrale à cheminée solaire et l'échangeur à vapeur

2.3. Configuration géométrique 2D

2.3.1. Sans échangeur à vapeur

- Cas 1 : simple sans échangeur

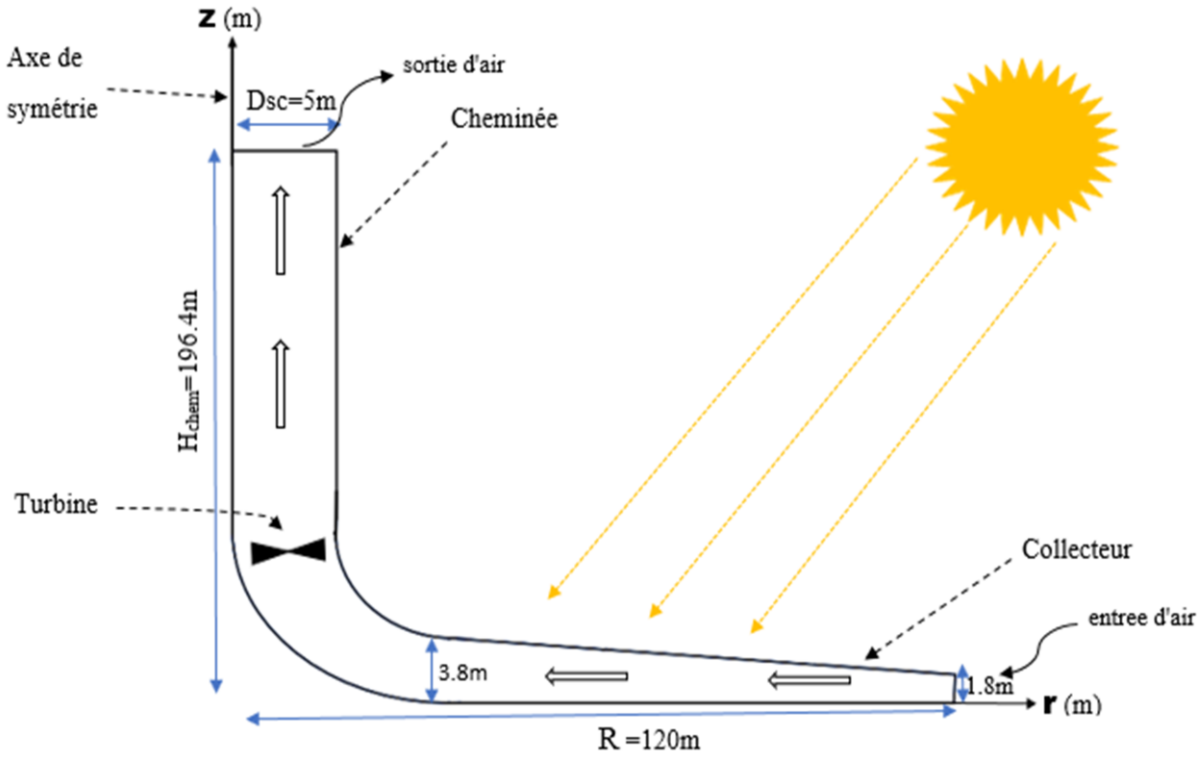


Fig. II 5: Géométrie de la centrale à cheminée solaire 2D pour le cas 1

2.3.2. L'échangeur à vapeur sous collecteur bas (H_v = 0m ; L_v=1m)

- Cas 2 : avec un échangeur
- Cas 3 : avec deux échangeurs
- Cas 4 : avec trois échangeurs

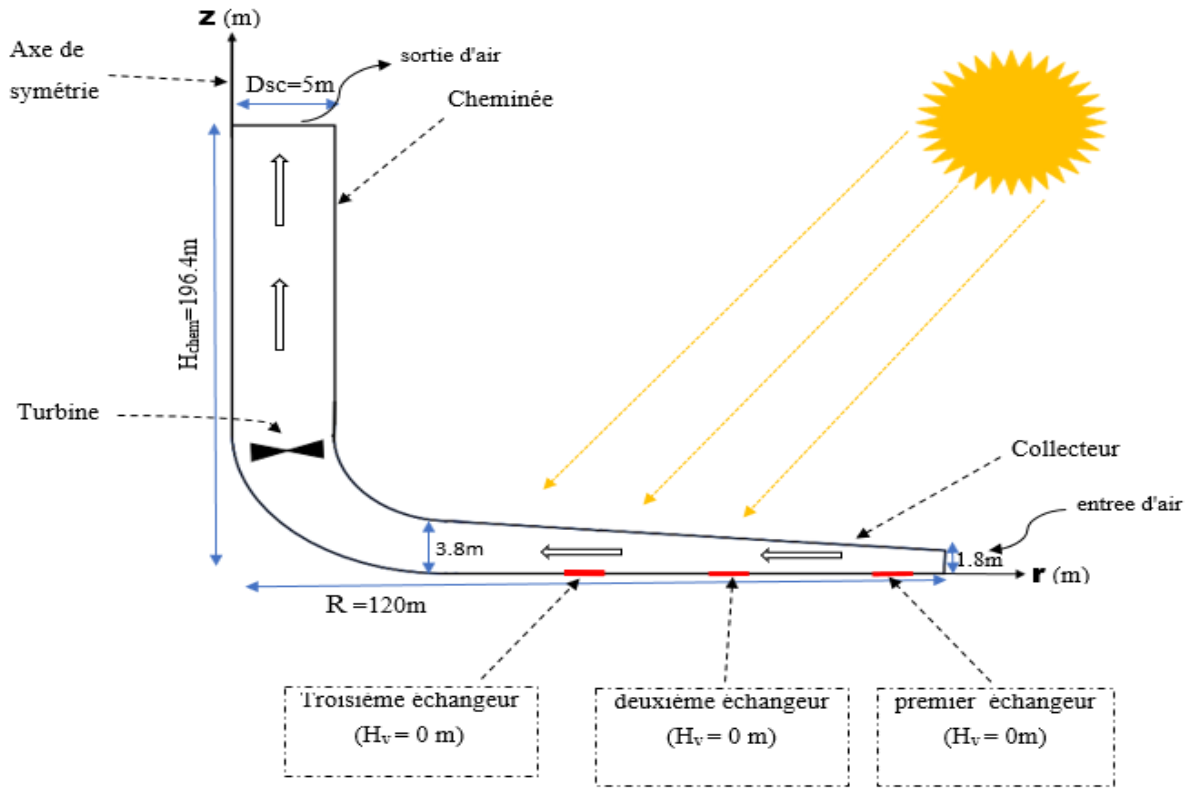


Fig. II 6: Géométrie de la centrale à cheminée solaire 2D pour les cas (2), (3) et (4)

2.3.3. L'échangeur à vapeur sur le collecteur bas (H_v = 0.3m ; L_v=1m)

- Cas 5 : avec un échangeur
- Cas 6 : avec deux échangeurs
- Cas 7 : avec trois échangeurs

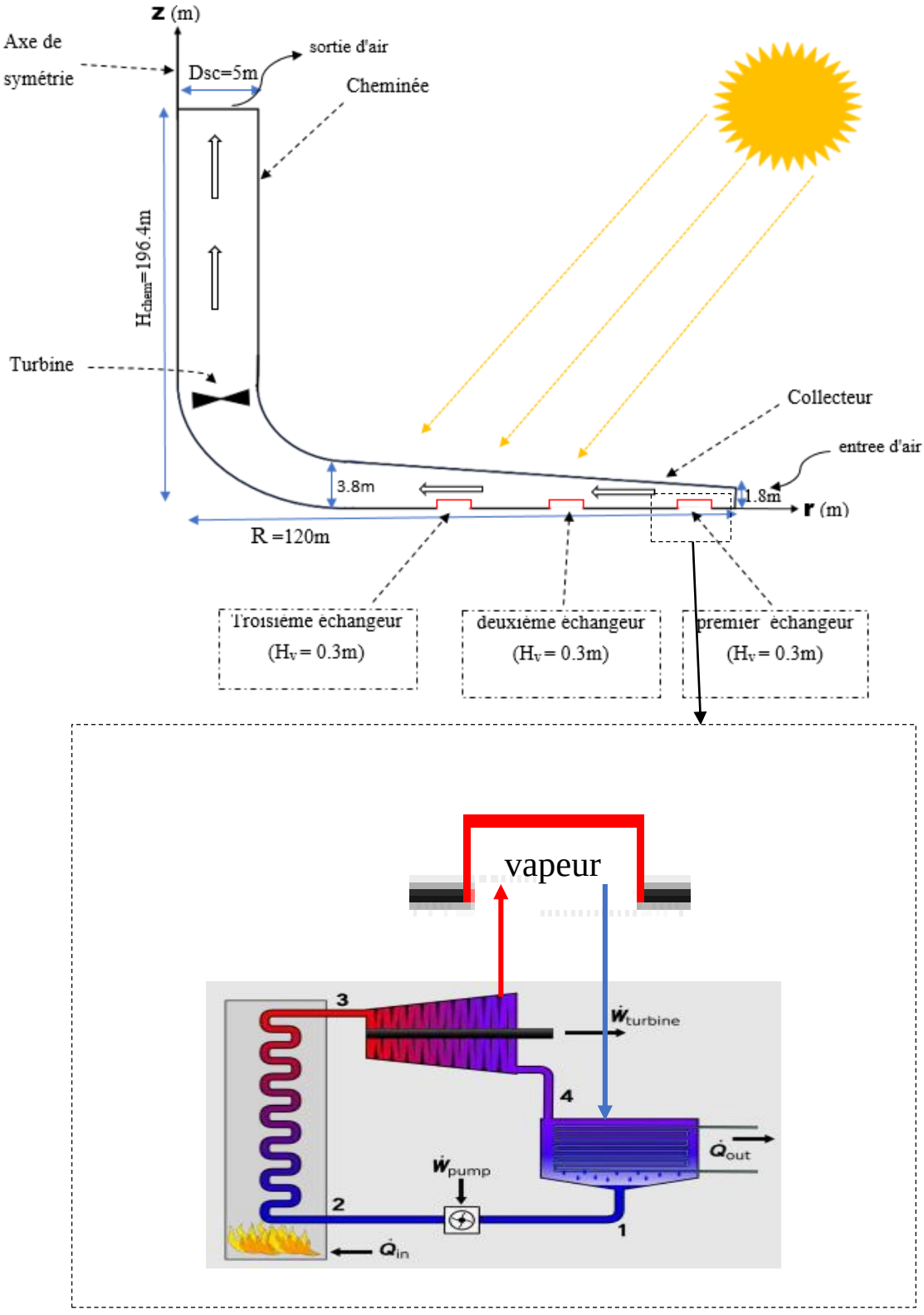


Fig. II 7: Géométrie de la centrale à cheminée solaire 2D pour les cas (5), (6) et (7)

2.3.4. L'échangeur à vapeur sur le collecteur bas (H_v = 0.5m ; L_v=1m)

- Cas 8 : avec un échangeur
- Cas 9 : avec deux échangeurs
- Cas 10 : avec trois échangeurs

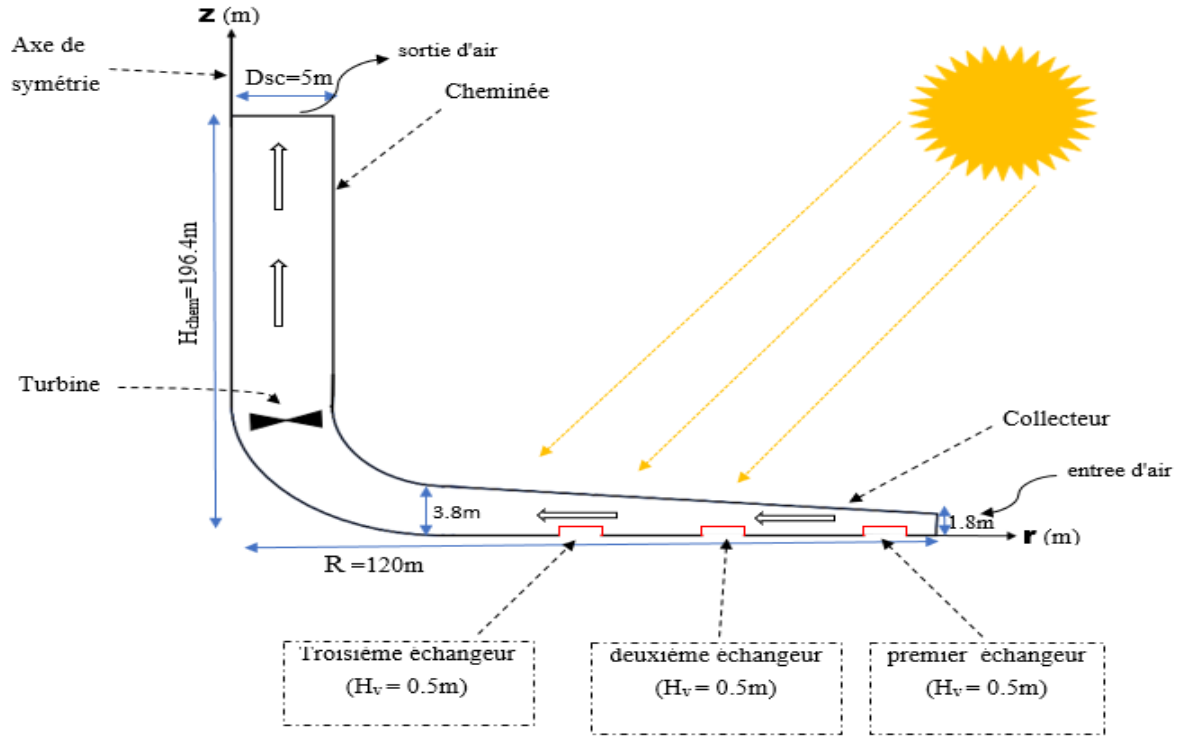


Fig. II 8: Géométrie de la centrale à cheminée solaire 2D pour les cas (8), (9) et (10)

3. Hypothèses simplificatrices

Le modèle mathématique développé repose sur les hypothèses suivantes :

- Le flux est bidimensionnel et le système possède un axe de symétrie.
- On suppose que le fluide, qui est l'air, est visqueux et newtonien, et suit l'approximation de Boussinesq. Cette approximation repose sur l'hypothèse : l'effet de la compressibilité est négligé, sauf dans l'équation de la quantité de mouvement, où la densité du fluide varie en fonction de la température, et la différence de température au cours du flux est relativement faible. Ainsi, l'approximation de Boussinesq dans ce cas suppose que la densité varie avec la température selon le coefficient de dilatation thermique, qui est une propriété du fluide. [15]

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

D'où :

$$\rho = \rho_0[1 - \beta(T - T_0)] \qquad (II.1.b)$$

ρ_0 : La masse volumique à la température de référence T_0

β: Le coefficient de dilatation volumique à pression constante

- Les propriétés du fluide sont supposées constantes
- Pas de source de chaleur

4. Formulation mathématique

L'écoulement bidimensionnel d'un fluide visqueux incompressible est régi par des équations de base qui sont respectivement :

- Conservation de la masse.
- Conservation de la quantité de mouvement.
- Conservation de l'énergie.

Ces équations sont à partir de l'équation de transport généralisé et d'après les hypothèses précédentes.

Cette étude utilise un système axisymétrique où :

- **r** : direction radiale (distance depuis l'axe central).
- **z** : direction verticale (hauteur).

4.1. Equation de continuité (conservation de la masse)

C'est l'équation qui exprime la loi de la conservation de la masse pour un volume de contrôle. L'équation de conservation de la masse pour un fluide incompressible est obtenue par l'équation suivante : [16]

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \qquad (\text{II}.2)$$

Cette équation peut s'écrire en coordonnées cylindriques comme suit :

$$\frac{1}{r}\frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \qquad (II.3)$$

Où :

- u = vitesse radiale (r).
- w = vitesse axiale (z).

4.2. Equation de la conservation de la quantité de mouvement

Le principe de conservation de la quantité de mouvement nous permet de déterminer les relations entre les propriétés du fluide, son mouvement et les causes qui y mènent. Nous pouvons démontrer que le taux de variation de la quantité de mouvement dans un volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces extérieures qui agissent sur lui. Voici l'équation de la quantité de mouvement :

$$\nabla\left(\vec{V}.\vec{V}\right) = \frac{1}{\rho}\nabla P + v\nabla^2 V \qquad \text{(II.4)}$$

Les équations de Navier Stokes avec l'approximation de Boussinesq sont données en coordonnées cylindriques par : [17]

- Selon la direction r :

$$u\frac{\partial u}{\partial r} + w\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial r} + \nu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \qquad \text{(II. 5)}$$

- Selon la direction z :

$$u\frac{\partial w}{\partial r} + w\frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial z} + \nu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) + g\beta(T - T_0) \qquad \text{(II. 6)}$$

4.3. Equation de l'énergie

En coordonnées cylindriques elle prend la forme suivante : [16]

$$u\frac{\partial T}{\partial x} + w\frac{\partial T}{\partial z} = \alpha\nabla^2 T \qquad \text{(II. 7)}$$

- $\alpha = \frac{k}{\rho_0 C_p}$ = diffusivité thermique.

5. Modèle de la turbulence

Quatre modèles de turbulence sont recensés dans le code Fluent :

- Spalart-Allmaras (1 équation)
- K-epsilon (2équations)
- K-Omega (2équations)
- Reynolds Stress (5équations)

Pour notre simulation en régime turbulent, nous avons utilisé le modèle K-epsilon standard, qui repose sur deux équations de transport. Ce modèle offre généralement de bons résultats dans des configurations simples.

Les équations standards concernant l'énergie cinétique turbulente (K) et la dissipation (ε) sont les suivantes : [18]

- **Énergie cinétique turbulente (k)** :

$$u\frac{\partial k}{\partial r}+w\frac{\partial k}{\partial z}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial r}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial z}\right]+P_k-\epsilon \qquad (\text{II.8})$$

- **Taux de dissipation (ϵ)** :

$$u\frac{\partial \epsilon}{\partial r}+w\frac{\partial \epsilon}{\partial z}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon}\right)\frac{\partial \epsilon}{\partial r}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon}\right)\frac{\partial \epsilon}{\partial z}\right]+C_{1\epsilon}\frac{\epsilon}{k}P_k-C_{2\epsilon}\frac{\epsilon^2}{k} \qquad (\text{II.9})$$

Où :

- $\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$.
- P_k = production de turbulence (dépend des gradients de vitesse).

Les valeurs des coefficients du modèle k-ε standard sont (Extrait d'ansys fluent) :

$C\mu$ = 0, 09 ; σk = 1 ; $\sigma\varepsilon$ = 1,22 ; $C\varepsilon$ = 1,44 ; $C\varepsilon$ = 1,9

6. Conditions aux limites

Les conditions aux limites utilisées dans le cas bidimensionnel sont consignées dans le tableau

Position	Conditions aux limites
Entrée du collecteur	Pression et température
Sortie de la cheminée	Pression
Collecteur bas	Flux thermique
Collecteur haut	Coefficient de transfert de chaleur et température
Paroi de la cheminée	Flux thermique
Les échangeurs à vapeur	Température

Tableau II. 2: Les conditions aux limites utilisées dans le cas bidimensionnel

7. Méthode de calcul de la production d'énergie

L'énergie produite par la cheminée solaire dépend de plusieurs facteurs, notamment le rayonnement solaire, l'efficacité de la turbine et des critères techniques tels que la hauteur de la cheminée et la surface du collecteur.

Le rendement du collecteur est exprimé selon A. Asnaghi et al [19] par :

$$\eta_{\text{coll}} = \frac{\dot{Q}}{A_{\text{coll}} \cdot G} \qquad \text{(II.10)}$$

Où :

- $\dot{Q}$ Est la puissance thermique captée (W),
- A_{coll} Est la surface du collecteur (m²),
- G Est le rayonnement solaire global (W/m²).

La puissance chaleur capté $\dot{Q}$ et le débit massique $\dot{m}$ de l'air sont donnés respectivement par les relations :

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \qquad \text{(II.11)}$$

$$\dot{m} = \rho_{\text{coll}} \cdot V_{\text{coll}} \cdot A_{\text{sc}} \qquad \text{(II.12)}$$

- $\dot{m}$ Est le débit massique de l'air (kg/s),
- C_p Est la capacité thermique spécifique de l'air (J/kg·K),
- $\Delta T = T_{\text{moy}} - T_0$ Est la différence de température entre l'air chauffé et l'air ambiant.
- ρ_{coll} Est la masse volumique de l'air dans le collecteur (kg/m³),
- V_{coll} Est la vitesse moyenne de l'air dans le collecteur (m/s).

En remplaçant dans l'équation, $\dot{Q}$ et $\dot{m}$ par leurs expressions, nous obtenons la relation :

$$\eta_{coll} = \frac{\rho_{coll} \,.\, V_{coll} \,.\, A_{SC} \,.\, C_p \,.\, \Delta T}{A_{coll} \,.\, G} \qquad \text{(II. 13)}$$

G, étant le rayonnement solaire global sur un plan horizontal

Le rendement de la cheminée est exprimé selon Y.J. Daietal [20] par :

$$\eta_{\text{sc}} = \frac{P_{\text{TOT}}}{\dot{Q}} = g \cdot \frac{H_{\text{sc}}}{C_p \cdot T_0} \qquad \text{(II. 14)}$$

Où :

- g Est l'accélération de la pesanteur (9.81 m/s²),
- H_{sc} Est la hauteur de la cheminée (m),
- T_0 Est la température ambiante (K).

La différence de pression produite par la cheminée est calculée par la relation :

$$\Delta P_{SC} = \rho_{\text{coll}} \,.\, g \,.\, H_{SC} \qquad \text{(II.15)}$$

L'énergie électrique produite est donnée par :

$$P_e = \frac{2}{3} \cdot \eta_{\text{coll}} \cdot \eta_{\text{wt}} \cdot \frac{g}{C_p \cdot T_0} \cdot H_{\text{sc}} \cdot A_{\text{coll}} \cdot G \qquad \text{(II.16)}$$

Où :

- η_{wt} =0.75 est le rendement de la turbine,
- Le facteur $\frac{2}{3}$ représente la perte de pression dans la turbine.

8. Conclusion

Dans le cadre de ce chapitre, nous avons procédé à la présentation et à l'explication du problème central de notre recherche. Nous avons également abordé la prise en compte des différentes équations nécessaires et connues dans ce domaine. Ces équations comprennent la les formule mathématique (équation de continuité, équation de la conservation de la quantité de mouvement et équation d'énergie), la condition aux limites, qui a été évoquée, expliquée et précisée sous diverses formes, et enfin la méthode de calcul de la production d'énergie. Dans le chapitre suivant, une étude approfondie sera consacrée à la modélisation numérique. Cette analyse portera sur l'utilisation conjointe de deux logiciels spécifiques : Gambit et Fluent.

CHAPITRE III : MODELISATION NUMERIQUE

1. Introduction

Dans le cadre de cette étude, nous penchons sur la modélisation numérique d'un système thermique, en nous appuyant sur les logiciels Gambit et Fluent. Une fois ces outils présentés de manière concise, nous procéderons à un examen détaillé des étapes requises pour la création de la géométrie, le maillage du domaine, la définition des conditions aux limites, ainsi que la configuration de la simulation. Cette démarche s'inscrit dans le cadre d'un projet visant à reproduire le comportement d'un système de cheminée solaire en conditions diurnes et nocturnes.

2. Présentation de Gambit et Fluent

2.1. Pré processeur Gambit

Ce système permet de représenter la géométrie du modèle et divise le domaine créé à l'aide d'un ensemble d'algorithmes de maillage en deux ou trois dimensions. Il est également utilisé pour définir les conditions aux limites et le type de matériaux (liquides ou solides) à l'intérieur du domaine. Il est recommandé d'utiliser un maillage structuré pour diviser le domaine, car cela réduit considérablement le temps de calcul et garantit également une bonne convergence. Après avoir défini la géométrie à l'aide du logiciel Gambit, elle peut être exportée vers Fluent au format "msh". La géométrie et le maillage peuvent être visualisés, redimensionnés et vérifiés via le menu GRID qui apparaît dans l'interface de FLUENT [16]

2.2. ANSYS Fluent

ANSYS Fluent est un code de calcul dans la CFD (Computationnel Fluide Dynamics) qui modélise par la méthode des volumes finis des écoulements très variés dans des configurations plus ou moins complexes. [21]

C’est est un logiciel très puissant de modélisation des flux de fluides et de transfert de chaleur dans des géométries complexes

Il fournit autant d’avantages à savoir :

- Une grande flexibilité de maillage, résolvant les problèmes de flux grâce à des maillages qui peuvent être générés sur des géométries complexes avec une relative facilité. Il supporte les maillages 2D (Triangles ou Quadrilatères), en 3D (Tétraèdres, Hexaèdres, pyramides) et des maillages mélangeant les précédents.

- Permet aussi d'améliorer (ou de grossir) le maillage, ce qui est particulièrement utile pour les zones où la prédiction des flux nécessite une grande précision
- Permet ainsi de réduire le temps nécessaire à la réalisation d'un « bon » maillage.

Le logiciel ANSYS comporte les éléments suivants :

- **WORBENCH** est une plateforme qui vous permet de réaliser toutes les étapes de la simulation dans une interface unique et de connecter les différents modules et physiques associés (fluides, thermique, structure...). La simplicité de son interface graphique vous permettra de gagner du temps et d'accroitre votre productivité.
- **ANSYS Design Modeler** est le module de géométrie intégré à ANSYS Workbench qui permet de créer ou d'importer des assemblages pour modéliser la veine fluide et les solides adjacents en cas de calcul thermique, Le logiciel ANYS Design Modeler permet de réaliser des tracés 2D (Sketch), de créer à partir des sketchs des objets 3D (par extrusion etc.…) et de manipuler les objets3D.
- **Meshing** est utilisé pour la création de maillage.
- **Fluent** est utilisé pour la simulation.

3. Procédures de modélisation

Les étapes fondamentales à suivre lors de l'utilisation du logiciel de simulation numérique des flux Fluent nécessitent la connaissance de certains concepts théoriques de base. Ces concepts incluent en particulier les définitions des équations principales qui régissent l'écoulement des fluides. En général, le processus de résolution numérique avec Fluent suit les étapes suivantes :

1) Création de la géométrie sous le logiciel Gambit.

   a) Création des points qui caractérisent la géométrie.
   b) Création des lignes qui relient les points déjà créés.
   c) Création des surfaces limitées par les lignes déjà créées.
   d) Création des volumes de volumes limités par les surfaces déjà créées.

2) Choix de la stratégie de maillage et création de plusieurs grilles.
3) Définition des conditions aux limites dans Gambit.

4) Définition du problème sous le logiciel Fluent, étude des différentes grilles de maillage et sélection du maillage retenue.
5) Visualisation des résultats qui permet d'afficher les champs de température et de vitesse dans notre domaine d'étude.

Le fichier case (regroupe toutes les informations liées à la géométrie).

Le fichier Dat (contient tous les paramètres et données des calculs).

Les étapes à suivre pour la modélisation numérique d'un problème sur le logiciel Fluent, sont illustrées par le diagramme) III.1)

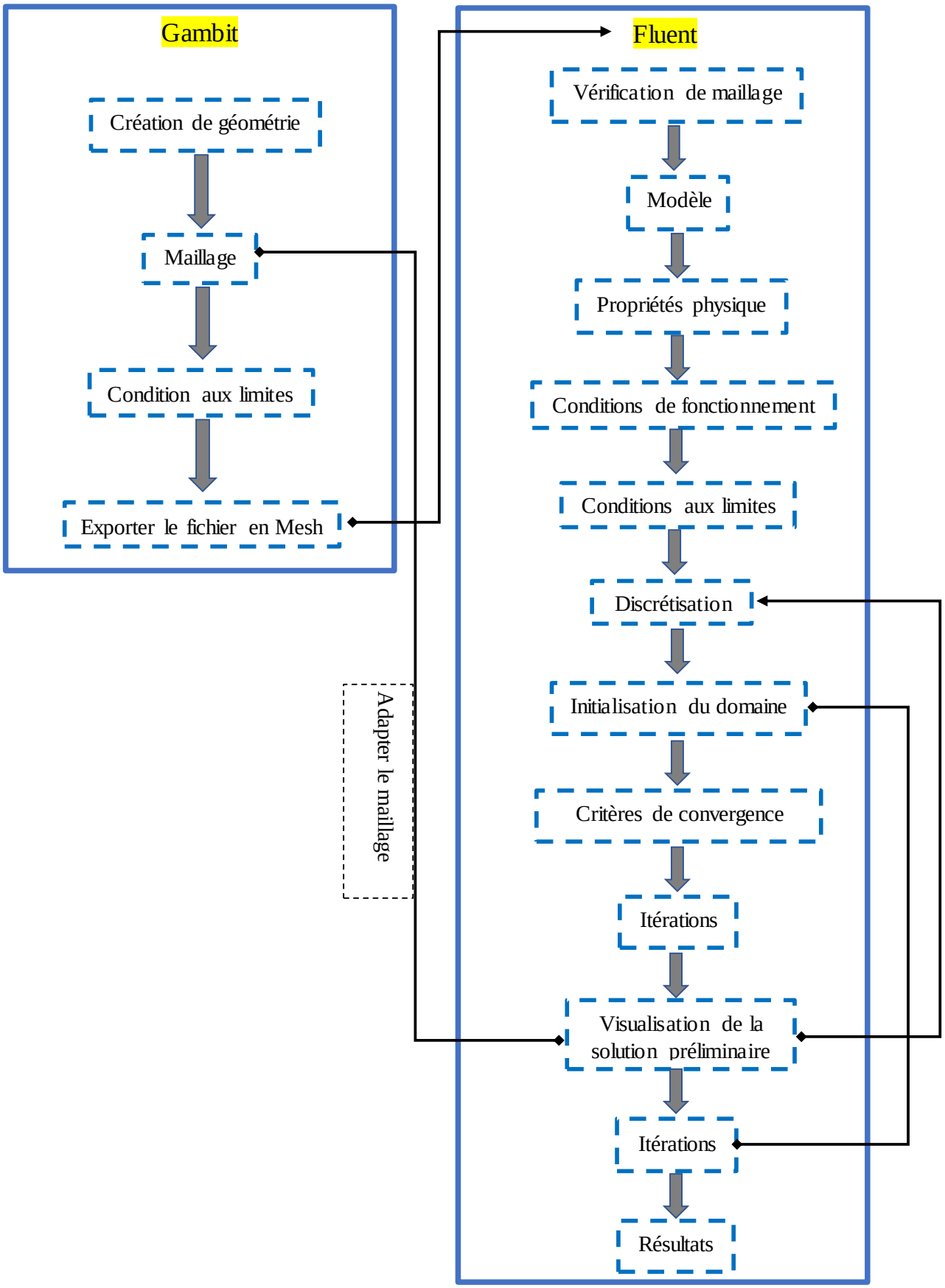


Fig. III 1: Procédure de résolution du problème

Le logiciel Fluent prend par défaut l'axe x comme axe de symétrie. Il faut par conséquent réaliser la géométrie 2D telle représentée sur la figure (III.2).

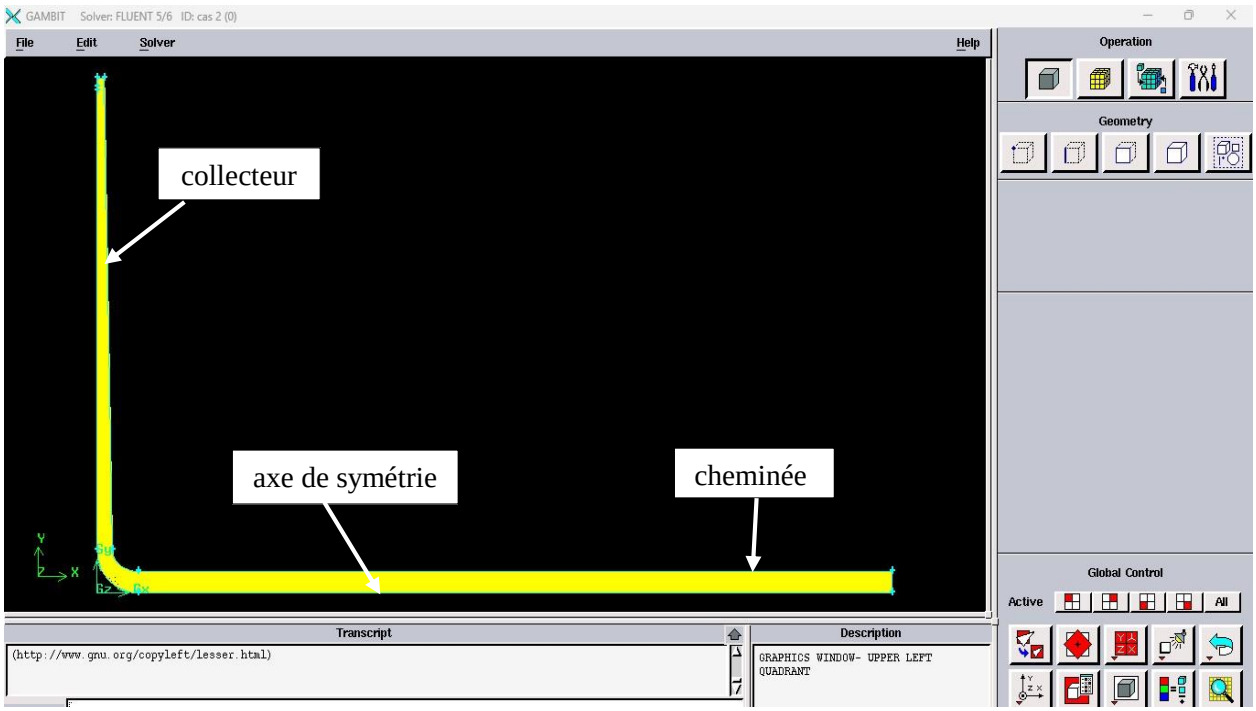


Fig. III 2: Géométrie 2D sur Gambit

4. Réalisation du maillage

Le logiciel Gambit vous permet de créer des maillages structurés ou non, en coordonnées cartésiennes, polaires, cylindriques ou axisymétriques. Que ce soit en 2D ou 3D, réalisez des maillages complexes avec des formes rectangulaires ou triangulaires.

Pour réaliser le maillage sur Gambit il faut suivre la démarche suivante :

- Maillage des lignes
- Maillage des surfaces
- Maillage des volumes

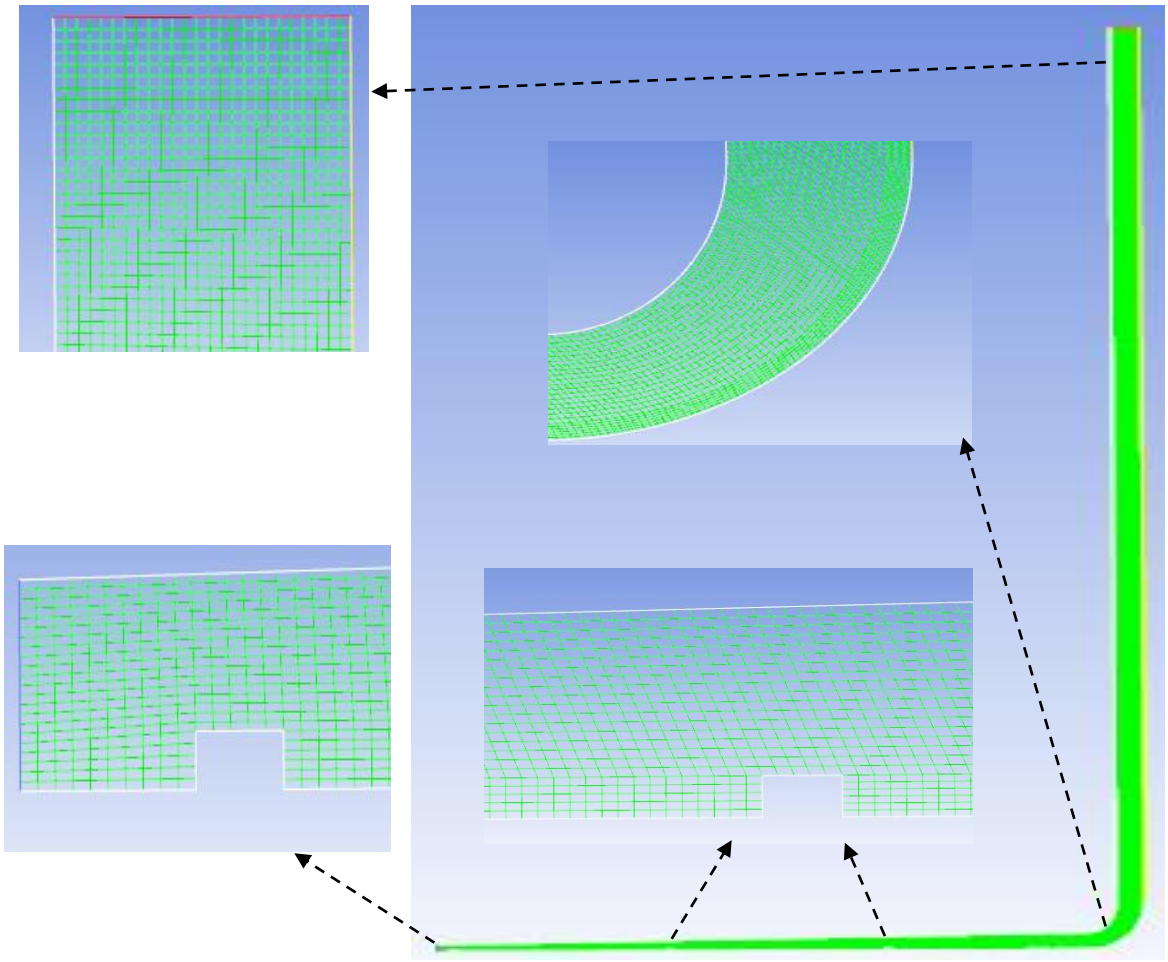


Fig. III 3: Maillage de la géométrie en 2D

5. Géométrie du problème

Les conditions aux limites pour la géométrie en 2D, son respectivement présentées sur la figure (III.3)

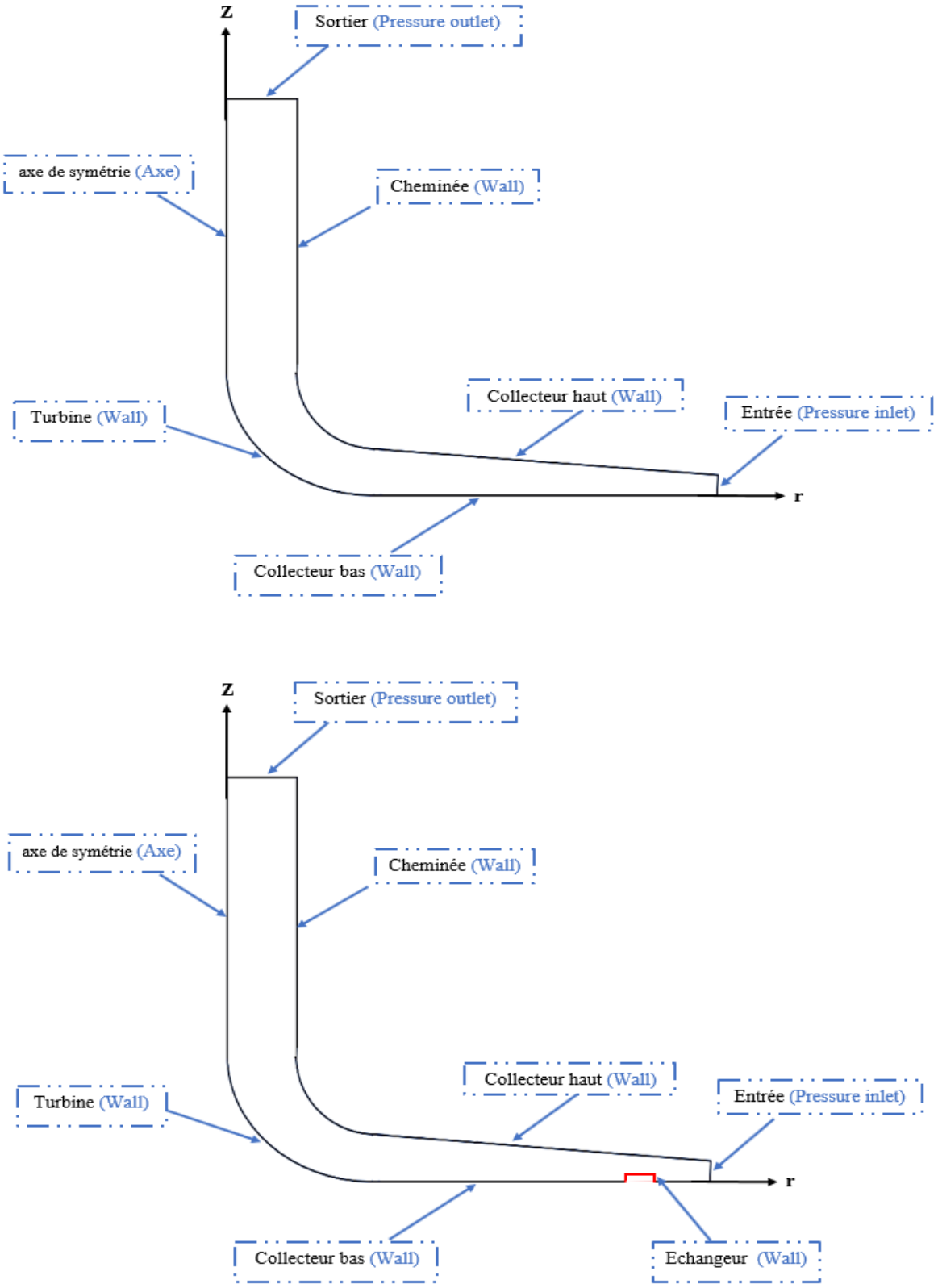


Fig. III 4: Distribution des conditions aux limites en 2D pour cas sans échangeur et le cas avec un échangeur à vapeur

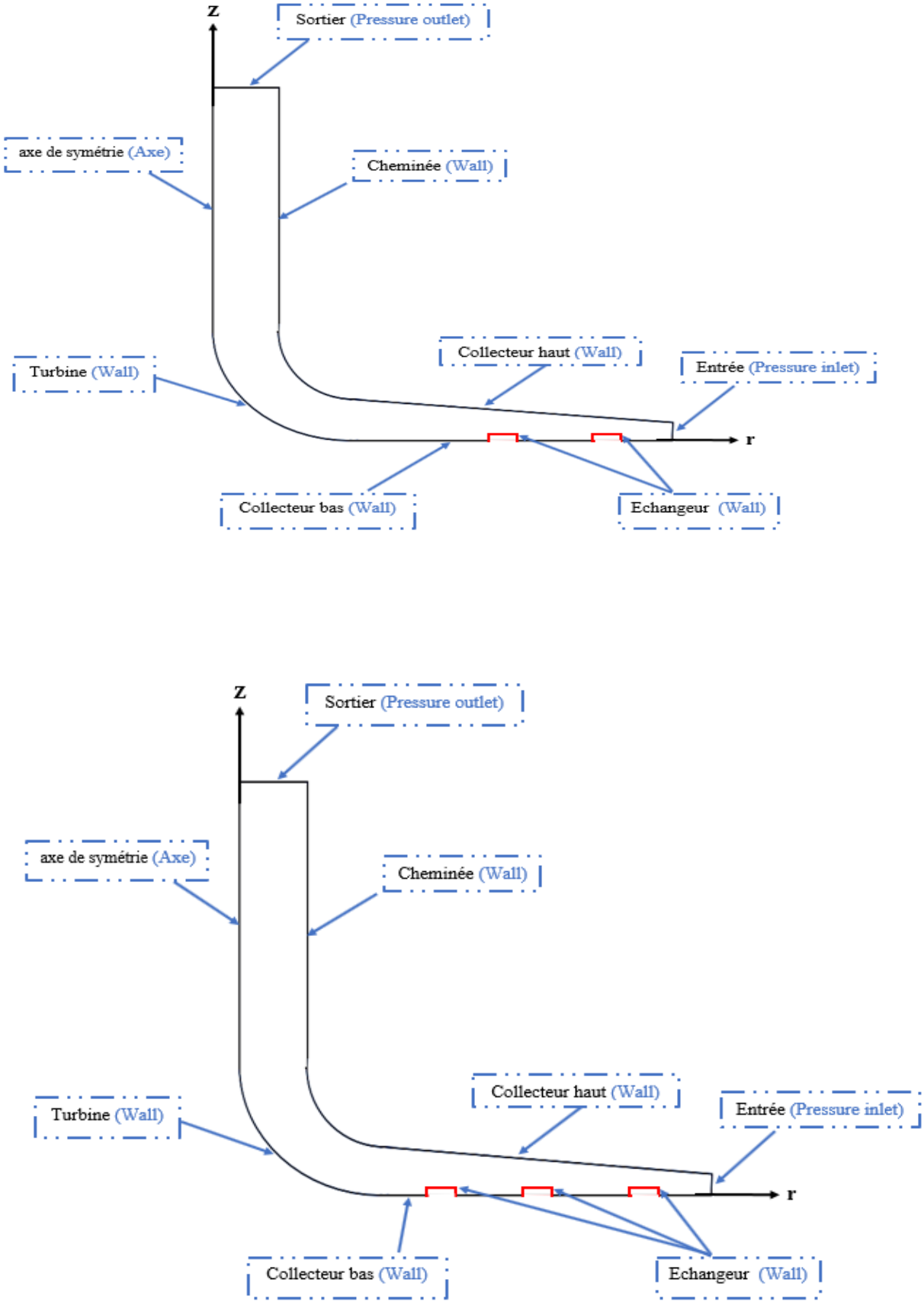


Fig. III 5: distribution des conditions aux limites en 2D pour le cas avec deux échangeurs et le cas avec trois échangeurs à vapeur

Les conditions aux limites ainsi que leurs valeurs assignées pour la géométrie bidimensionnelle (2D) sont répertoriées dans le tableau III.1. Le fonctionnement de la centrale solaire à cheminée est supposé se dérouler de manière ininterrompue sur un cycle de 24 heures, grâce à l'intégration d'un système de stockage thermique. Durant les heures diurnes, le flux thermique se déplace de la surface supérieure vers la surface inférieure sous l'effet du rayonnement solaire, tandis que, pendant les périodes nocturnes, ce flux s'inverse en raison du rôle du système de stockage. Par conséquent, il est possible d'ajuster les conditions aux limites applicables entre les surfaces supérieure et inférieure du collecteur en fonction du mode de fonctionnement, qu'il s'agisse du jour ou de la nuit. Concernant la pression, le logiciel Fluent traite celle-ci comme une pression effective, où la pression absolue est définie par la somme de la pression atmosphérique et des variations considérées.

Position	Type sur Fluent	Valeur
Collecteur bas	Wall	Ø=800 W/m²
Collecteur haut	Wall	T_0=288K, h=10W/m²K
Echangeur	Wall	T_{Ech}=318.15K
Surface de la cheminée	Wall	Øsc=0
Entrée collecteur	Pressure inlet	P=0Pa (pression effective) T=T0=288K
Sortie cheminée	Pressure outlet	P=0Pa (pression effective)

Tableau III. 1.Conditions aux limites pour le cas 2D

6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les différentes étapes impliquées, en commençant par une introduction à la géométrie en deux dimensions, suivie d'une présentation des logiciels Fluent et Gambit. Cette présentation inclut notamment la création de maillages ainsi que leur optimisation. Par la suite, nous avons défini et expliqué les conditions aux limites appliquées dans notre étude à l'aide de Fluent.

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

1. Introduction

L'intégration d'échangeurs à vapeur dans le collecteur d'une centrale à cheminée solaire apparaît comme une solution prometteuse pour intensifier le transfert de chaleur, mieux contrôler les gradients thermiques et améliorer l'efficacité globale du système. Néanmoins, cette intégration modifie sensiblement les conditions d'écoulement de l'air et les distributions de température à l'intérieur du collecteur et de la cheminée, ce qui peut influencer positivement ou négativement le rendement et la puissance produite selon le nombre, la position et la configuration des échangeurs.

Ce chapitre présente une analyse détaillée de l'effet des échangeurs à vapeur sur les performances d'une centrale à cheminée solaire. Différentes configurations sont étudiées, variant le nombre d'échangeurs et leur hauteur d'installation sous ou sur le collecteur. Les impacts sur les champs de température et de vitesse, le rendement du collecteur ainsi que la puissance générée sont examinés à travers des résultats numériques et des observations comparatives. Cette étude a pour objectif de fournir des éléments de compréhension approfondis afin de guider la conception optimale des systèmes intégrant des échangeurs à vapeur pour maximiser l'efficacité énergétique et la production électrique.

2. L'effet de l'échangeur à vapeur sur les champs dans les différents cas

- Cas 1 : centrale à cheminée solaire simple sans échangeur
- Cas 2 : centrale à cheminée solaire avec un échangeur sous le collecteur bas ($H_v = 0$)
- Cas 3 : centrale à cheminée solaire avec deux échangeurs sous le collecteur bas ($H_v = 0$)
- Cas 4 : centrale à cheminée solaire avec trois échangeurs sous le collecteur bas ($H_v = 0$)
- Cas 5 : centrale à cheminée solaire avec un échangeur sur le collecteur bas ($H_v = 0.3$)
- Cas 6 : centrale à cheminée solaire avec deux échangeurs sur le collecteur bas ($H_v = 0.3$)
- Cas 7 : centrale à cheminée solaire avec trois échangeurs sur le collecteur bas ($H_v = 0.3$)
- Cas 8 : centrale à cheminée solaire avec un échangeur sur le collecteur bas ($H_v = 0.5$)
- Cas 9 : centrale à cheminée solaire avec deux échangeurs sur le collecteur bas ($H_v = 0.5$)
- Cas 10 : centrale à cheminée solaire avec trois échangeurs sur le collecteur bas ($H_v = 0.5$)

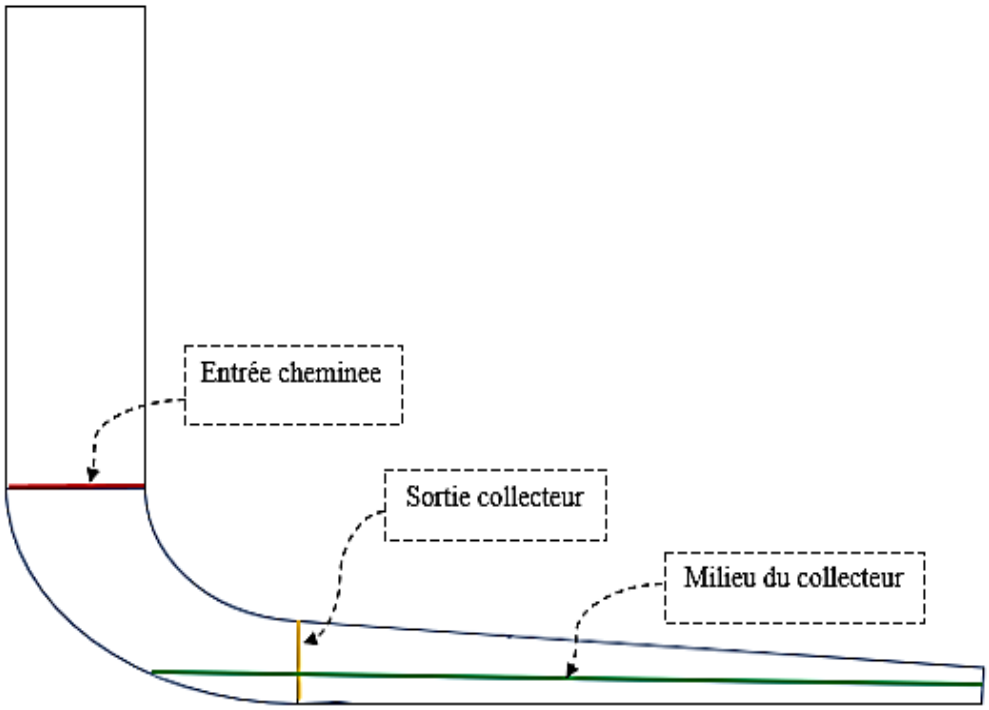


Fig. IV. 1: représente les sections utilisées pour illustrer les différents profils vitesse et température.

2.1. L'échangeur à vapeur sous collecteur bas (H_v=0 ; L_v=1)

La figure IV.2 illustre les champs de température pour les quatre configurations étudiées (cas 1, cas 2, cas 3 et cas 4) avec une hauteur Hv=0. La température à l'entrée du collecteur est de 288 K et augmente progressivement le long du collecteur jusqu'à la sortie de la cheminée. La température maximale est observée dans la partie inférieure du collecteur, à proximité des échangeurs à vapeur et le long de l'axe de symétrie. La valeur la plus élevée, environ 320 K, est relevée pour le cas 1, tandis que la plus faible, environ 303 K, est enregistrée pour le cas 4.

La figure IV.3 présente les champs de vitesse pour les mêmes configurations (cas 1, cas 2, cas 3 et cas 4) pour une hauteur H_v=0. On observe que la vitesse est faible à l'entrée du collecteur, puis augmente progressivement le long de celui-ci pour atteindre un maximum à l'entrée de la cheminée. Les cas 2, 3 et 4 montrent une augmentation significative de la vitesse par rapport au cas 1 (cas de base). La vitesse la plus élevée, environ 170 m/s, est atteinte pour le cas 4, tandis que la plus faible, environ 17 m/s, est observée pour le cas 1.

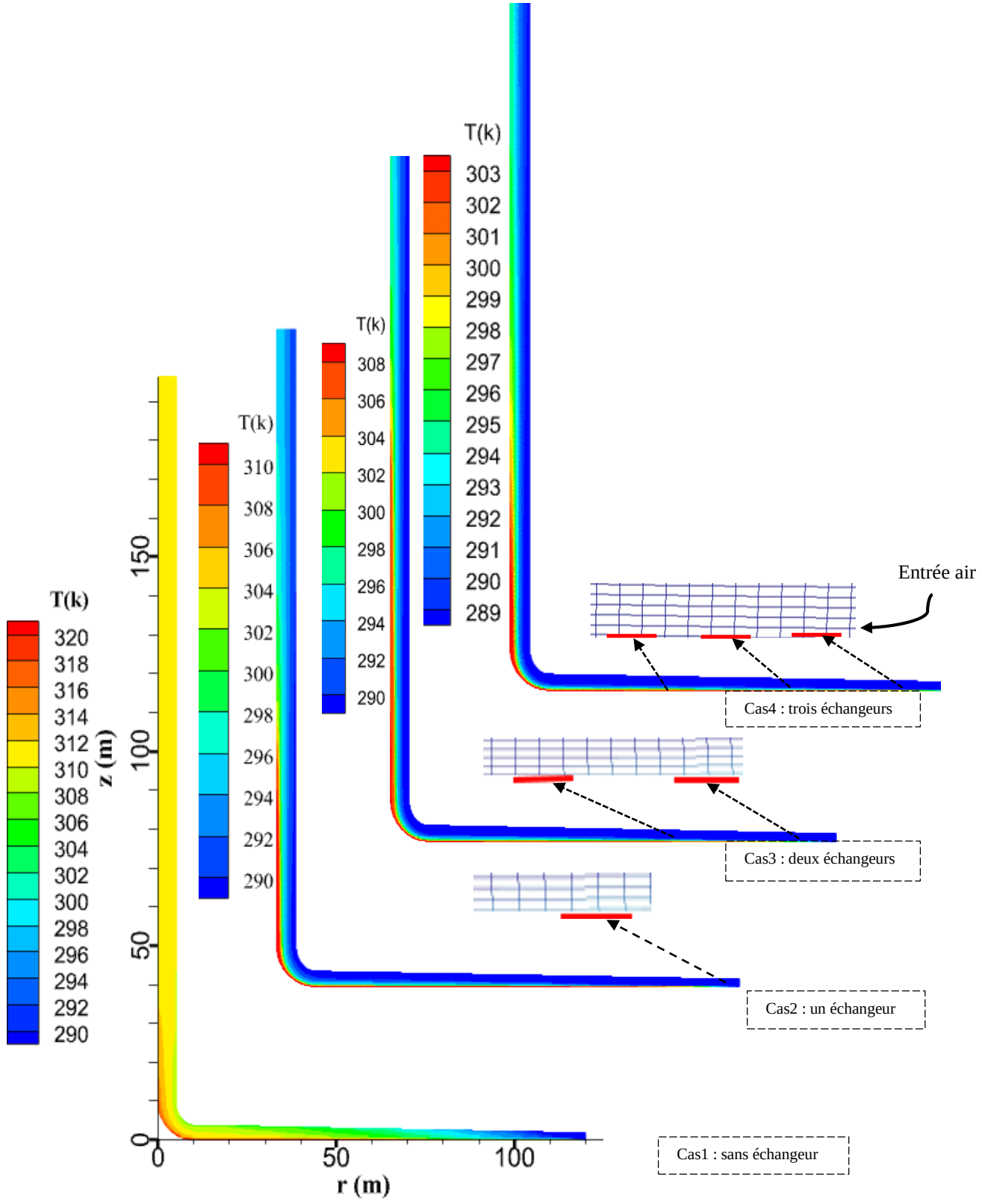


Fig. IV. 2: Les champs températures pour les cas (1) (2) (3) (4) pour (Hv=0m)

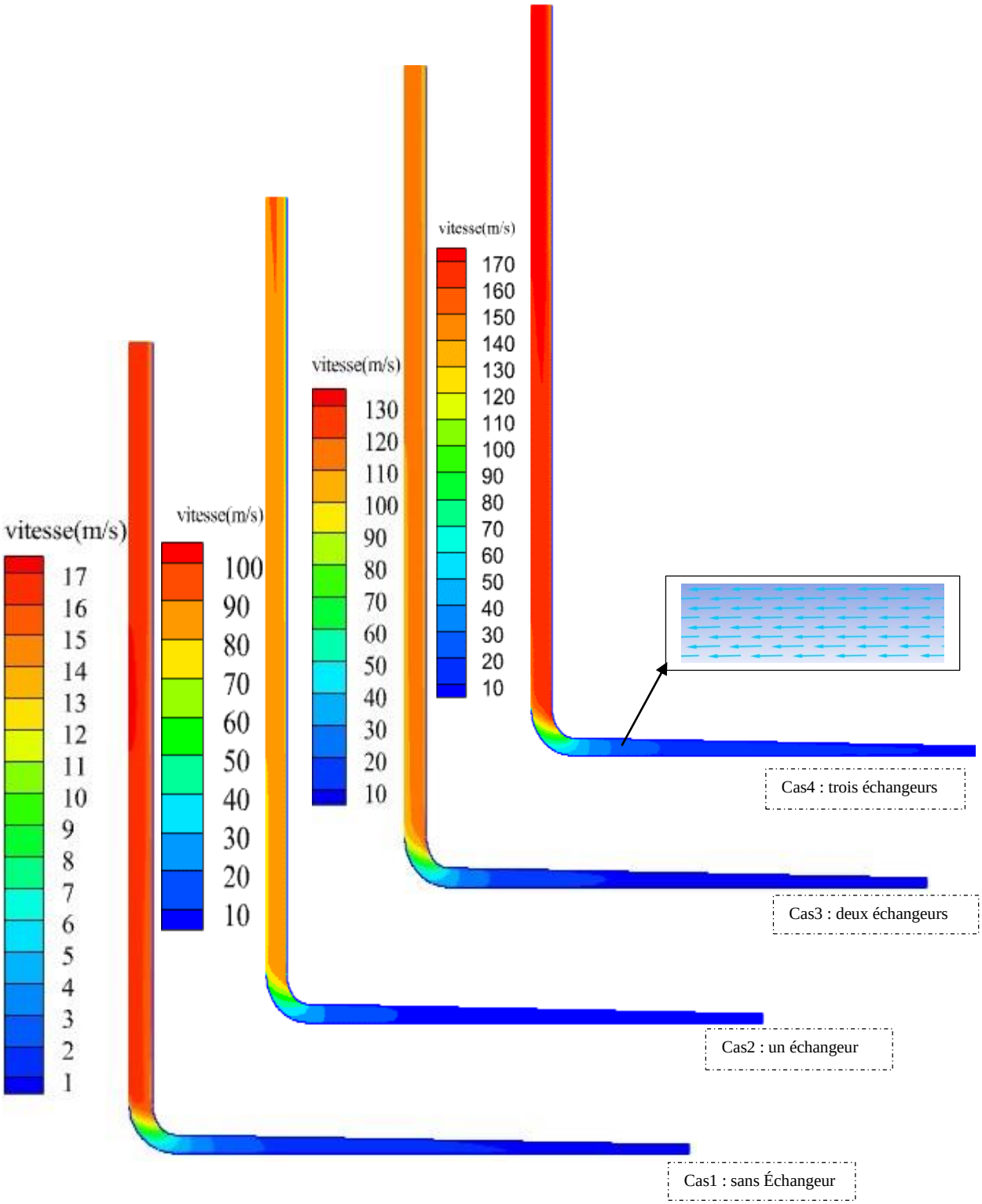


Fig. IV. 3: Les champs des vecteurs de vitesses pour les cas (1) (2) (3) (4) pour (Hv=0m)

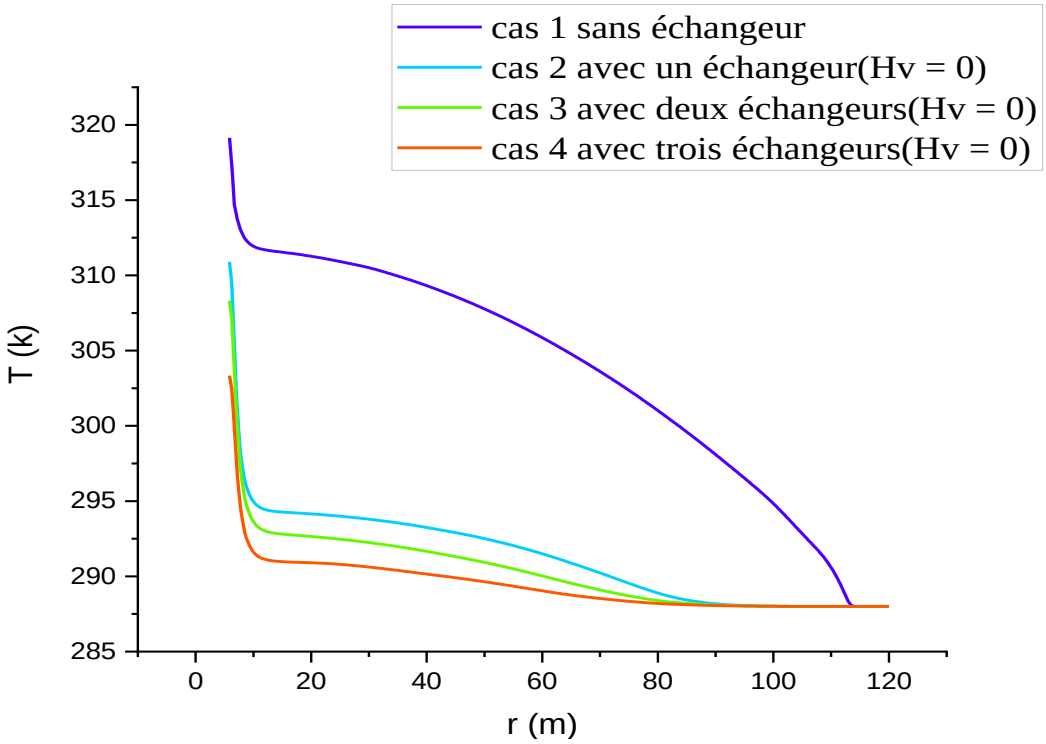


Fig. IV. 4: Profil de température au milieu du collecteur (z)=0.9m pour (Hv=0m)

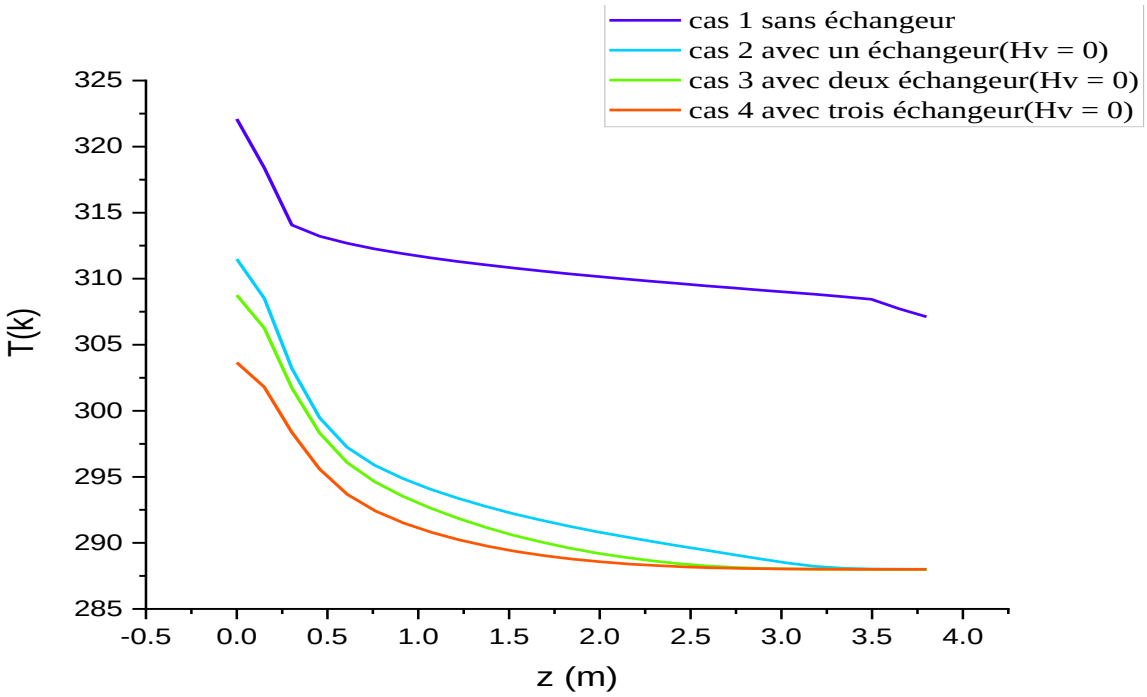


Fig. IV. 5: Profil de température à la sortie du collecteur pour (Hv=0m)

La figure IV.4 compare les profils de température au milieu du collecteur pour quatre configurations. Dans tous les cas, la température augmente le long du collecteur. Le cas

"simple" atteint les températures les plus élevées, indiquant une meilleure efficacité de transfert thermique. Cette configuration est donc la plus performante, tandis que le cas 4 est la moins performante.

La figure IV.5 illustre les profils de température à la sortie du collecteur pour quatre configurations différentes. Dans l'ensemble des cas, on observe une décroissance progressive de la température en fonction de la distance z. Le Cas 1 affiche la température la plus élevée au centre du collecteur, ce qui traduit une efficacité thermique optimale du système. À l'inverse, le Cas 4 présente les températures les plus basses, suggérant une performance thermique moins favorable. Les Cas 2 et 3 présentent des profils intermédiaires, reflétant des conditions de fonctionnement d'efficacité modérée.

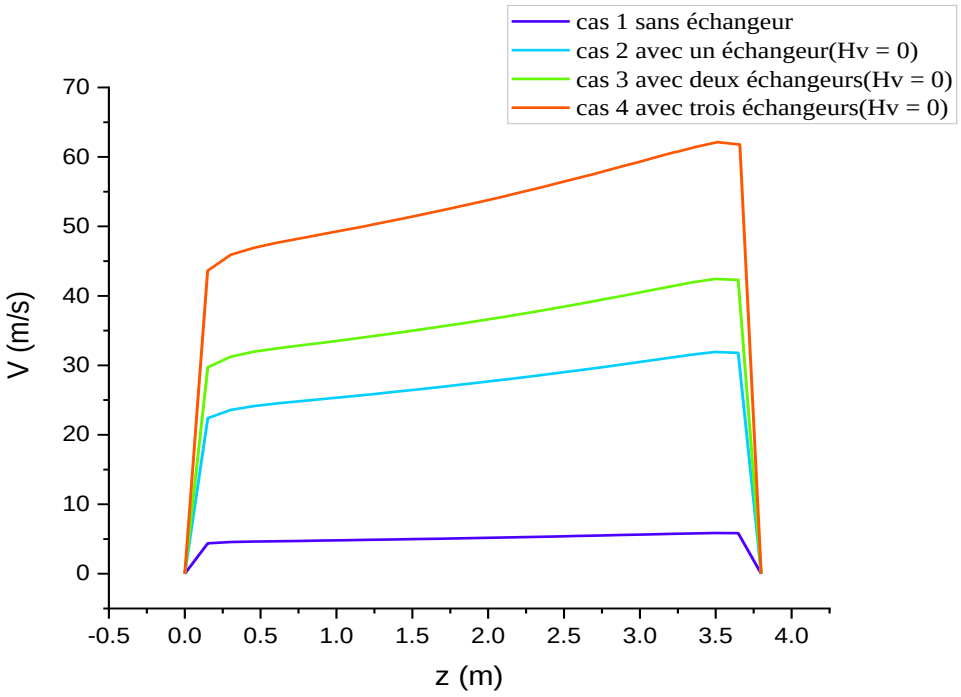


Fig. IV. 6: Profil de vitesse à la sortie du collecteur pour (Hv=0m)

La figure IV.6 illustre les profils de vitesse à la sortie du collecteur pour les quatre cas analysés. Dans le Cas 1, la vitesse est faible et reste pratiquement constante sur toute la longueur du collecteur. Le Cas 2 montre une augmentation notable de la vitesse par rapport au Cas 1, accompagnée d'un léger gradient. Le Cas 3 présente une accélération plus importante, bien qu'une légère baisse de la vitesse soit observée aux extrémités. Enfin, le Cas 4 affiche la vitesse la plus élevée de tous, avec une augmentation progressive et continue le long du collecteur

jusqu'à sa sortie. Cette évolution des profils de vitesse traduit une amélioration progressive des performances du système.

La figure IV.7 présente les profils de vitesse à l'entrée de la cheminée, en fonction de la distance transversale r, pour quatre cas distincts. Dans l'ensemble des cas, la vitesse augmente très rapidement au niveau des bords de l'entrée, puis devient quasi constante au centre. Cette distribution suggère un écoulement plus uniforme au cœur de la cheminée. L'augmentation progressive de la vitesse d'un cas à l'autre reflète une évolution des conditions de fonctionnement du système. En particulier, le Cas 4, correspondant aux conditions les plus intenses, présente les vitesses les plus élevées à l'entrée de la cheminée. Cette amélioration peut être attribuée à une élévation de la température, à une augmentation de la pression, ou à une amélioration des performances des composants en amont du système.

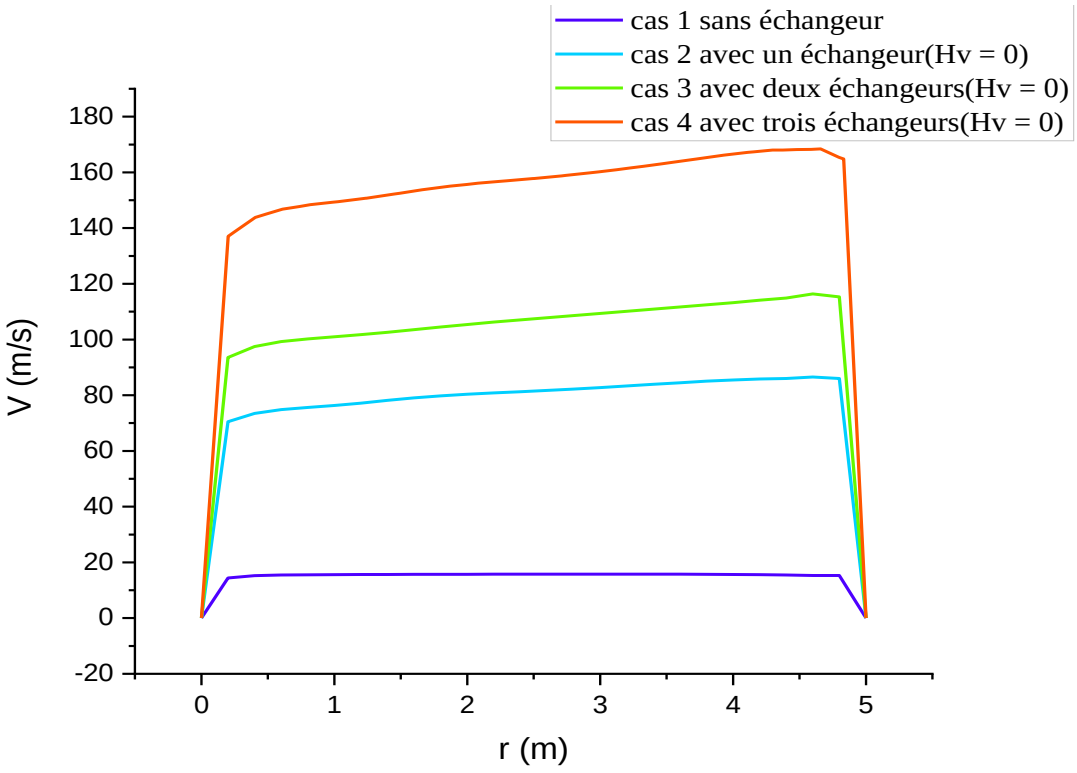


Fig. IV. 7: Profil de vitesse à l'entrée de la cheminée pour (Hv=0m)

	T moy(k)		V moy(m/s)	
Cases	Sortie collecteur	Milieu collecteur	Sortie collecteur	Entrée cheminée
Cas 1	311.061	303.2514	4.768437	14.38644
Cas 2	293.2136	291.3302	25.44253	74.64166
Cas 3	292.0436	290.3879	33.72112	98.75098
Cas 4	290.5843	289.4442	50.91887	150.7097

Tableau. IV. 1: Représentation de Tmoy et Vmoy à la sortie du collecteur et à l'entrée de la cheminée et au milieu collecetur pour (Hv=0m)

2.2. L'échangeur à vapeur sur le collecteur bas (H_V=0.3m ; L_V=1m)

La figure IV.8 illustre les champs de température pour les quatre configurations étudiées (cas 1, cas 5, cas 6 et cas 7) avec une hauteur H v=0,3m. La température initiale à l'entrée du collecteur est de 288 K et augmente progressivement le long du collecteur jusqu'à l'entrée de la cheminée, où elle devient uniforme. La température maximale est observée dans la zone inférieure du collecteur, à proximité des échangeurs à vapeur. On note que la valeur la plus élevée, atteignant environ 375 K, correspond au cas 5 (un seul échangeur à vapeur), tandis que la valeur la plus basse, environ 320 K, est enregistrée pour le cas 1 (sans échangeur à vapeur).

La figure IV.9 présente les champs de vitesse pour les mêmes configurations (cas 1, cas 5, cas 6 et cas 7), en comparant les situations avec et sans échangeurs à vapeur. On observe que la vitesse est faible à l'entrée du collecteur, puis augmente graduellement le long de celui-ci pour atteindre son maximum à l'entrée de la cheminée. La plus faible vitesse, d'environ 13 m/s, est relevée pour le cas 5 (un échangeur à vapeur), tandis que la plus élevée, atteignant 20 m/s, est observée pour le cas 7 (trois échangeurs à vapeur)

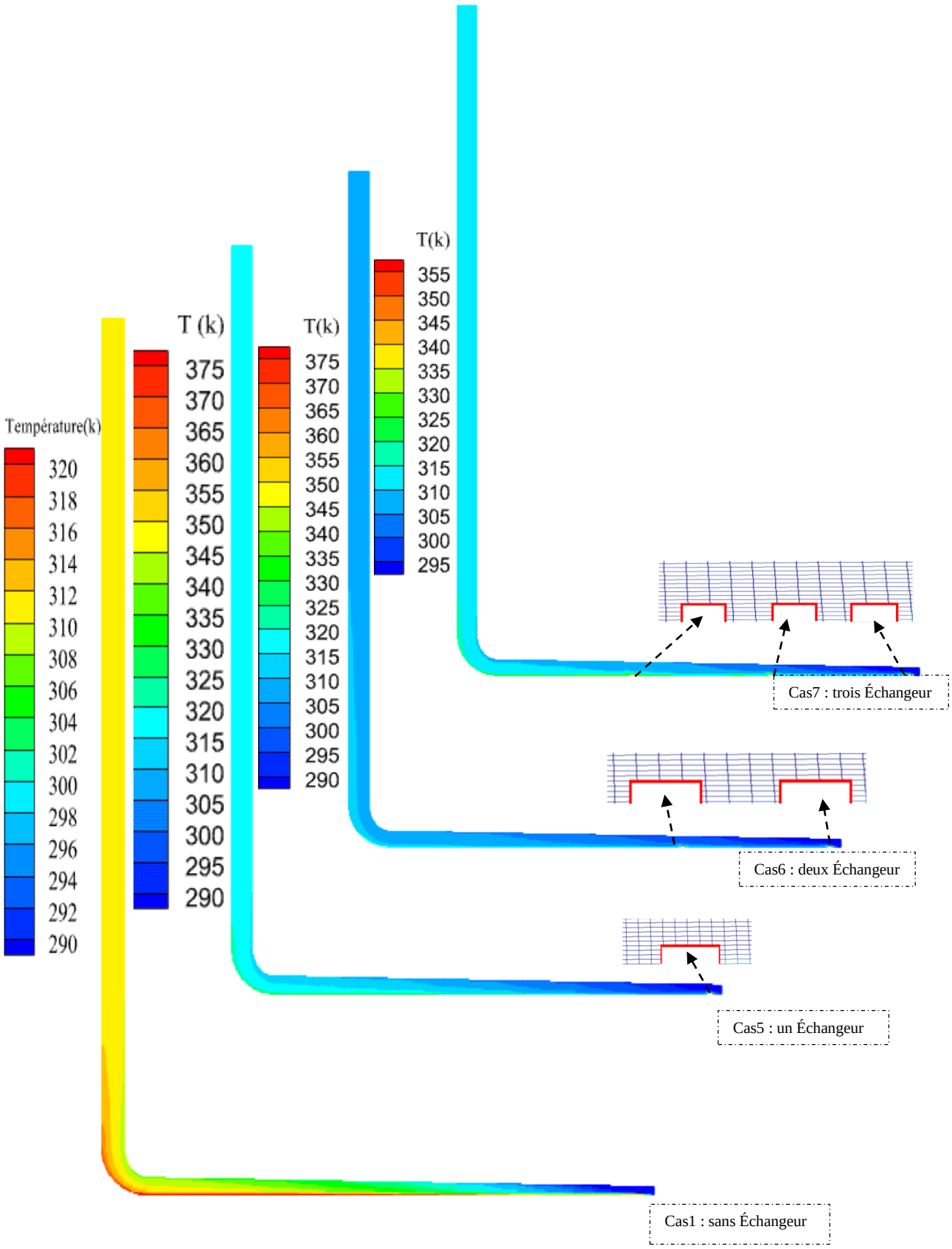


Fig. IV. 8: Les champs températures pour les cas (1) (5) (6) (7) pour (Hv=0.3m)

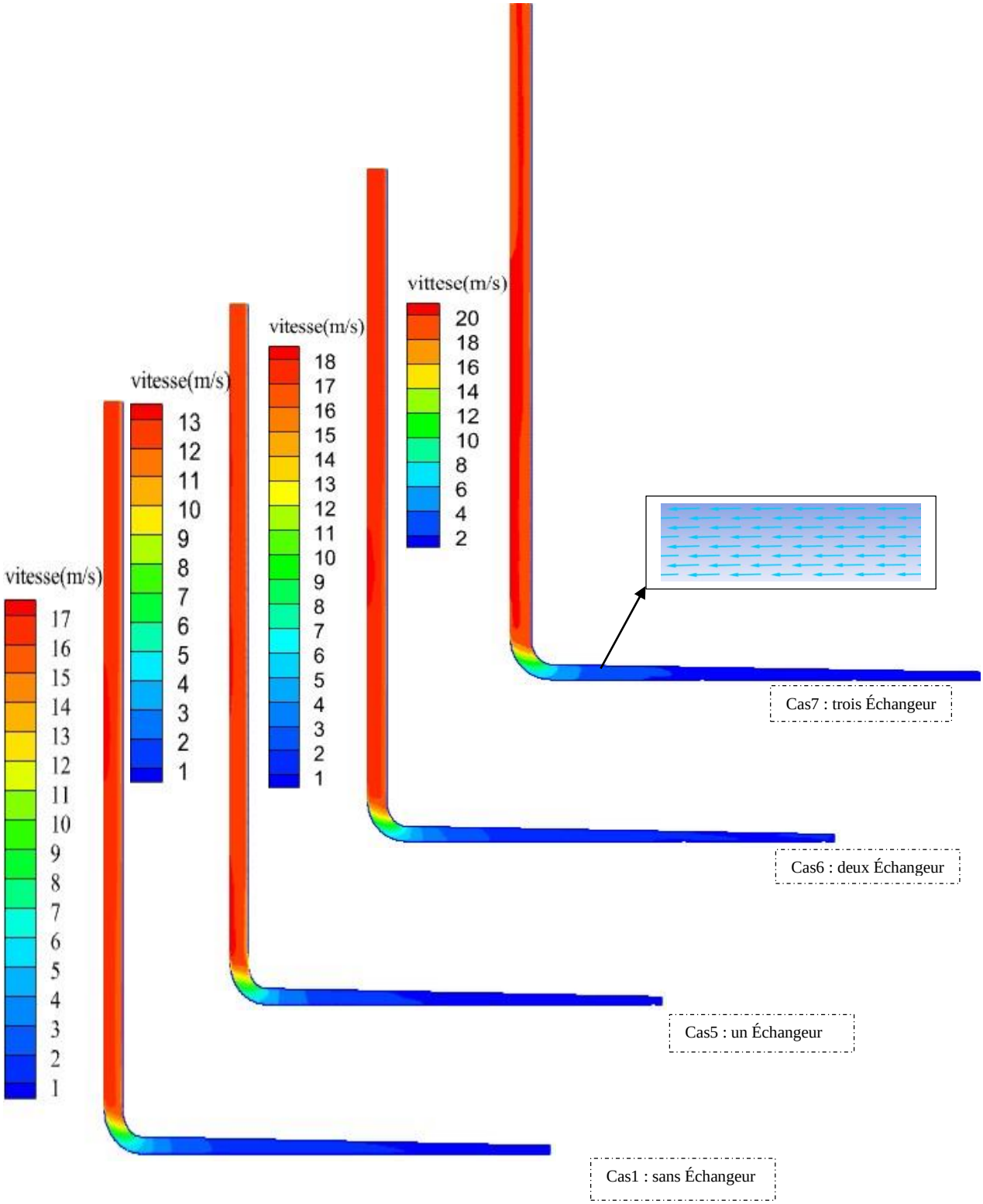


Fig. IV. 9: Les champs des vecteurs de vitesses pour les cas (1) (5) (6) (7) pour (Hv=0.3m)

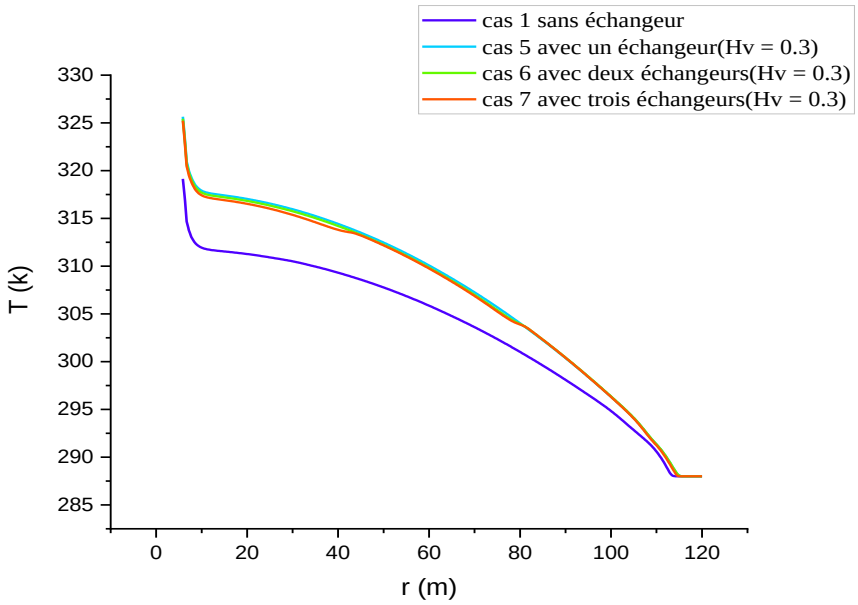


Fig. IV. 10: Profil de température au milieu du collecteur (z)=0.9m pour (Hv=0.3m)

La température le long du collecteur pour quatre cas différents est représentée sur la figure IV.10. Toutes les courbes montrent une augmentation progressive de la température, ce qui indique que le fluide à l'intérieur du collecteur absorbe de la chaleur de manière continue en se déplaçant de l'entrée vers la sortie. Le cas 1 présente l'augmentation de température la plus faible, ce qui correspond à la performance thermique la plus basse. Le cas 7 affiche l'augmentation de température la plus élevée, traduisant une meilleure performance thermique et les cas 5 et 6 ont des performances intermédiaires, situées entre ces deux extrêmes.

Les courbes confirment donc un chauffage progressif du fluide le long du collecteur, avec le cas 7 comme plus performant et le cas 1 comme le moins efficace.

La figure IV.11 illustre les profils de température à la sortie du collecteur, pour quatre cas différents. Le cas 1 présente les températures les plus basses parmi les quatre scénarios. Les cas 5, 6 et 7 affichent des profils de température très similaires, avec des valeurs plus élevées que celles du cas 1, et une différence légère entre eux. On observe une chute rapide de la température au début du collecteur. Le cas 1 se démarque nettement des autres, ce qui traduit des conditions de fonctionnement moins efficaces. Les meilleures performances thermiques sont obtenues pour les cas 5 et 6.

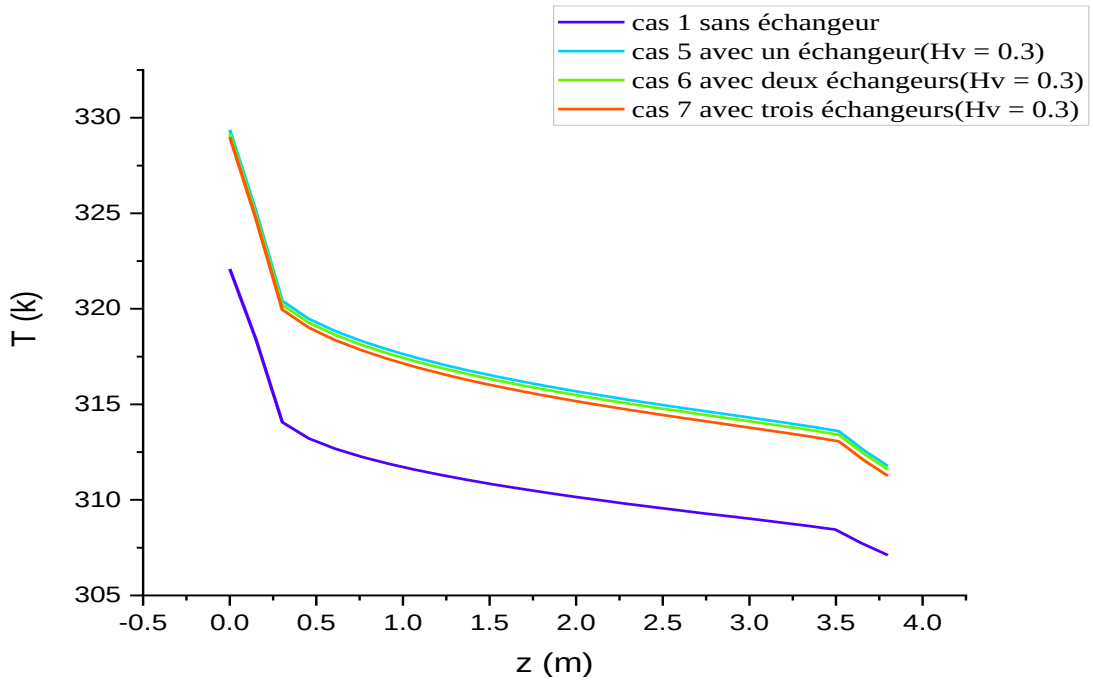


Fig. IV. 11: Profil de température à la sortie du collecteur pour (Hv=0.3m)

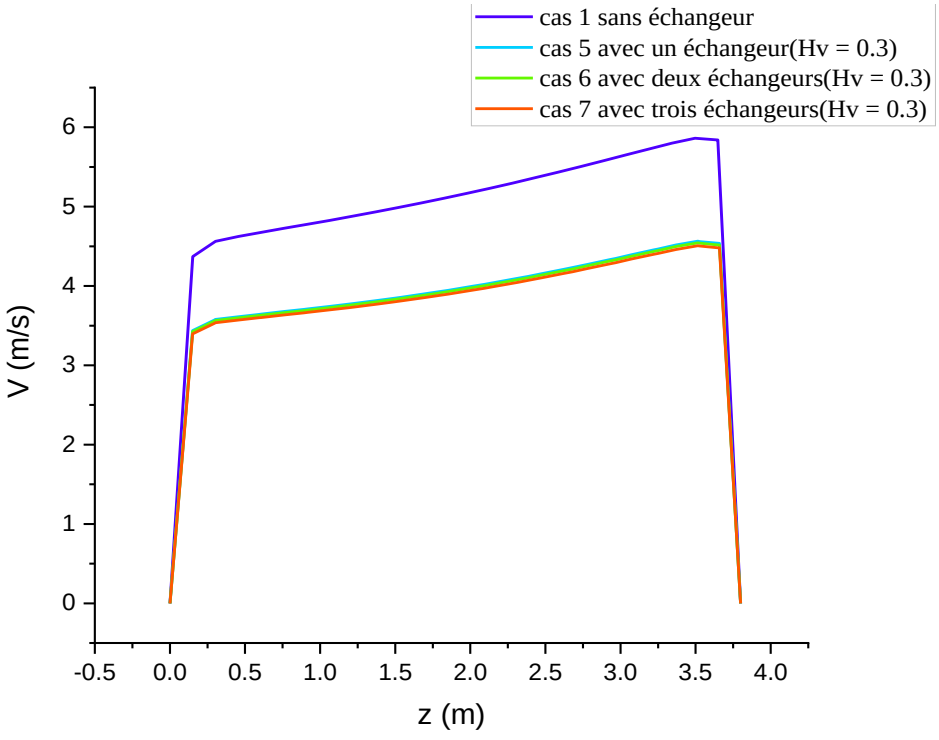


Fig. IV. 12: Profil de vitesse à la sortie du collecteur pour (Hv=0.3m)

Le profil de vitesse à la sortie du collecteur est présenté sur la figure VI.12. Pour les quatre cas étudiés, la vitesse est quasi nulle aux extrémités du collecteur, puis augmente brusquement pour se stabiliser dans la zone centrale. Le cas 1 présente la vitesse la plus élevée, atteignant environ 6 m/s, ce qui indique de meilleures performances en termes de vitesse d'écoulement. Les cas 5 et 6 affichent des courbes presque identiques, avec une vitesse maximale d'environ 4,3 m/s, traduisant des performances similaires pour ces deux configurations. Le cas 7 présente une vitesse légèrement inférieure, notamment dans la zone centrale du collecteur, ce qui suggère une performance légèrement moindre

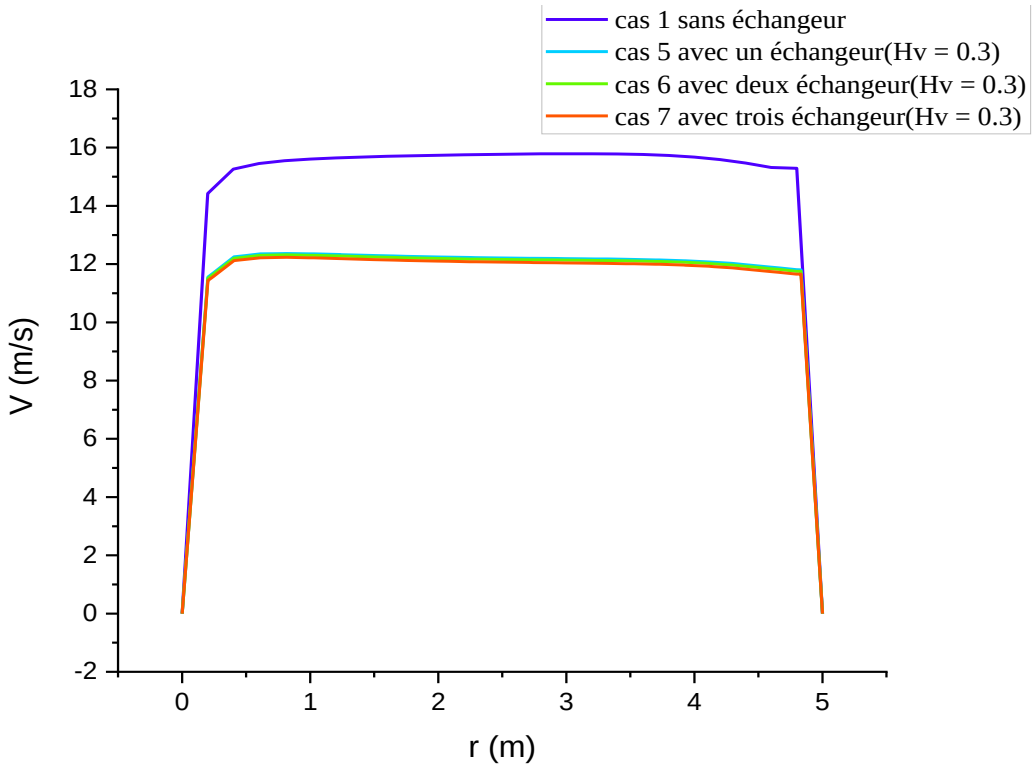


Fig. IV. 13: Profil de vitesse à l'entrée de la cheminée pour (Hv=0.3m)

La figure IV.13 présente les profils de vitesse à l'entrée de la cheminée pour différents cas. Le cas 1, sans échangeur à vapeur, affiche la vitesse la plus élevée, atteignant environ 16,5 m/s. L'intégration d'échangeurs à vapeur de chaleur entraîne une diminution de la vitesse à l'entrée de la cheminée : plus le nombre d'échangeurs augmente, plus la vitesse de l'écoulement diminue. Cette réduction s'explique par le fait qu'une partie de l'énergie thermique est utilisée pour chauffer les échangeurs à vapeur, ce qui réduit la poussée thermique disponible et donc la vitesse du flux entrant dans la cheminée.

	T moy(k)		V moy(m/s)	
Cases	Sortie collecteur	Milieu collecteur	Sortie collecteur	Entrée cheminée
Cas 1	311.061	303.2514	4.768437	14.38644
Cas 5	316.5477	307.0213	3.802377	11.62147
Cas 6	316.3512	306.8858	3.786108	11.57272
Cas 7	316.0469	306.7286	3.756185	11.48491

Tableau. IV. 2: Représentation de Tmoy et Vmoy à la sortie du collecteur et à l'entrée de la cheminée et au milieu du collecteur pour (Hv=0.3m)

2.3. L'échangeur à vapeur sur le collecteur bas (H_V=0.5m ; L_V=1m)

La figure IV.14 présente l'évolution des températures pour les cas 1, 8, 9 et 10 avec Hv=0,5 m, la température augmente le long du collecteur et atteint son maximum (334 K) dans le cas 9 (deux échangeurs), tandis que la plus basse (301 K) apparaît dans le cas 8 (un échangeur).

La figure IV.15 montre que la vitesse croît le long du collecteur pour parvenir au maximum à l'entrée de la cheminée : elle varie de 17 m/s (cas 1, sans échangeur) à 340 m/s (cas 9, deux échangeurs).

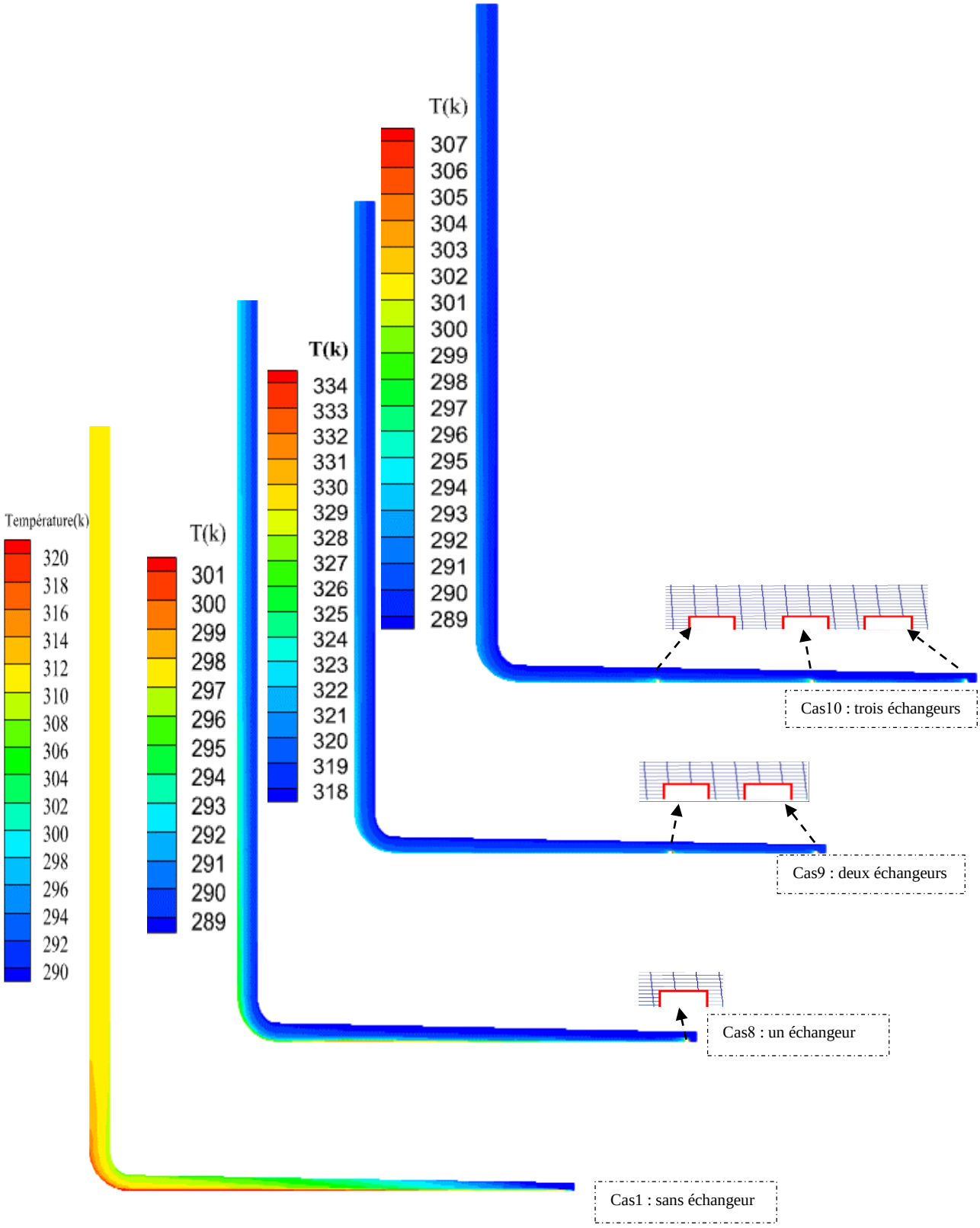


Fig. IV. 14: Les champs températures pour les cas (1) (8) (9) (10) pour (Hv=0.5m)

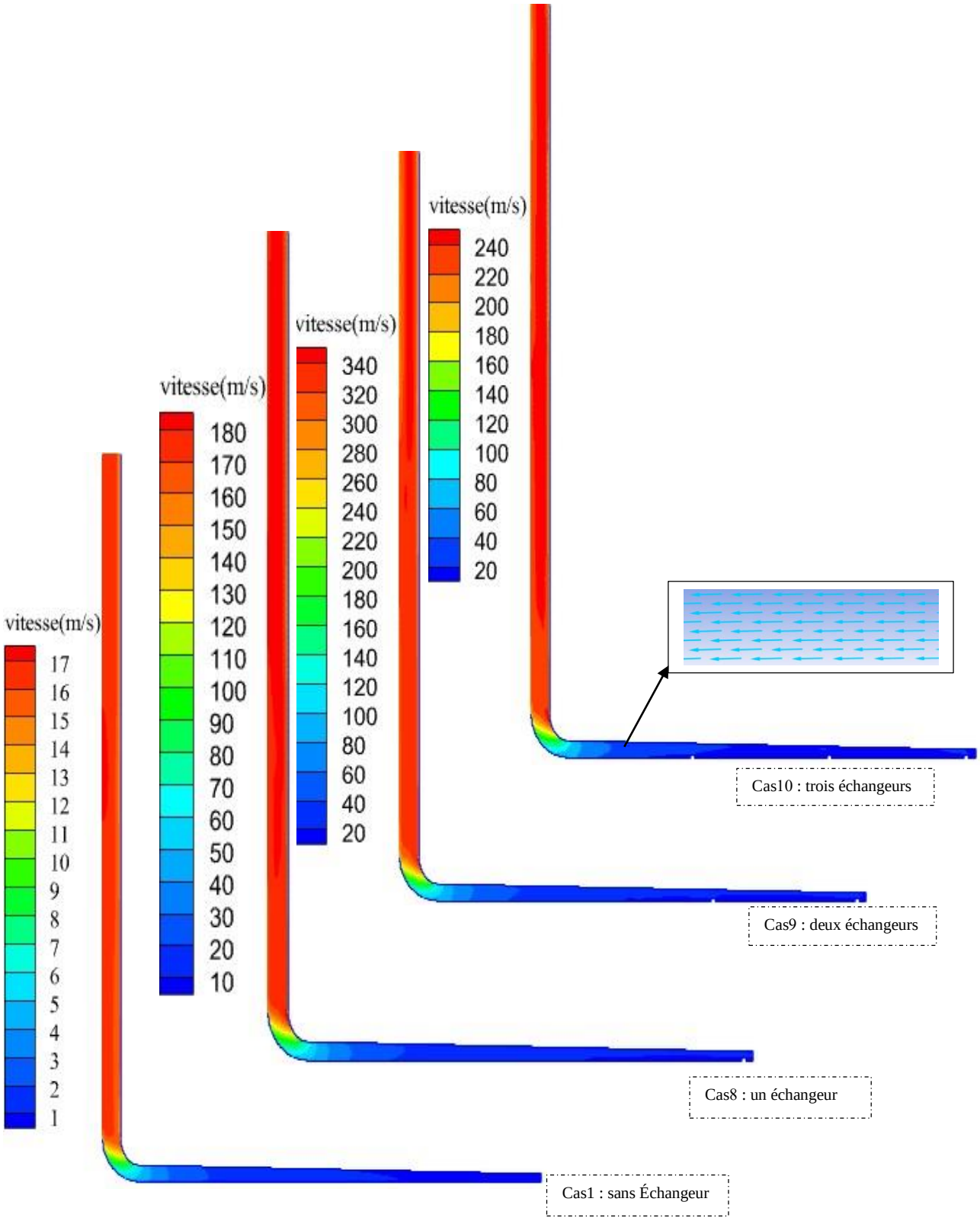


Fig. IV. 15: Les champs des vecteurs de vitesses pour les cas (1) (8) (9) (10) pour (Hv=0.5m)

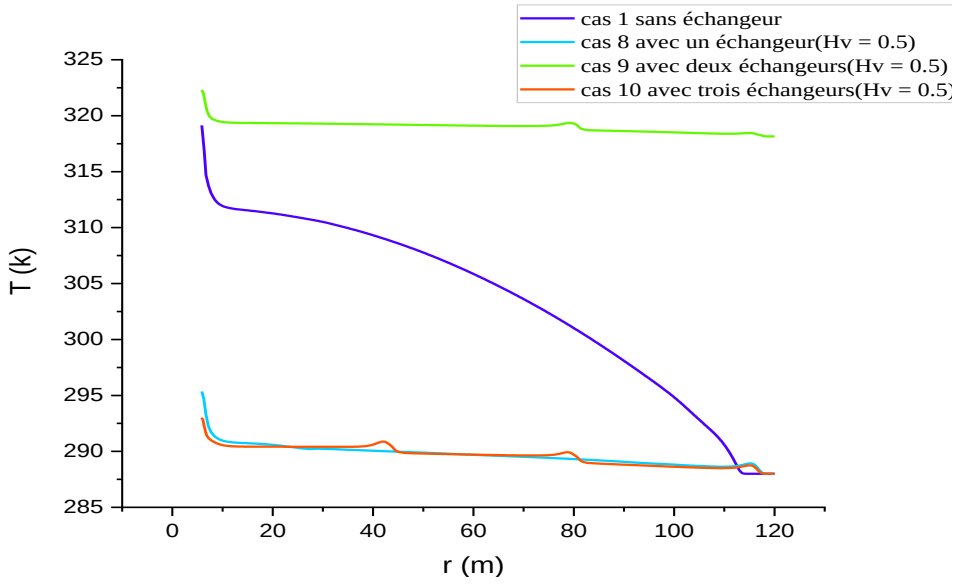


Fig. IV. 16: Profil de température au milieu du collecteur pour (Hv=0.5m)

La figure IV.16 illustre les courbes d'évolution de la température au milieu du collecteur pour quatre cas différents. La présence d'échangeurs de chaleur permet de mieux contrôler l'élévation de la température à l'intérieur du collecteur. En l'absence d'échangeur à vapeur (cas 1), la température augmente fortement vers les bords, ce qui peut affecter négativement le fonctionnement du système. L'ajout de plusieurs échangeurs contribue à maintenir une température plus basse et plus stable, améliorant ainsi l'efficacité thermique globale du collecteur.

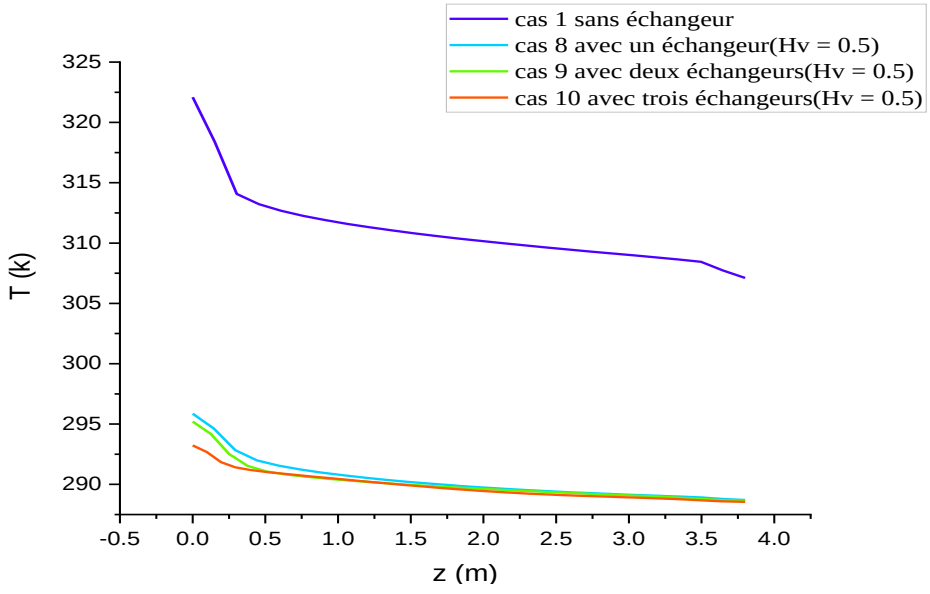


Fig. IV. 17: Profil de température à la sortie du collecteur pour (Hv=0.5m)

La figure IV.17 présente le profil de température à la sortie du collecteur en fonction du nombre d'échangeurs à vapeur. On constate que le cas 1, sans échangeur, affiche les températures les plus élevées. À l'inverse, la température de sortie diminue progressivement lorsque le nombre d'échangeurs à vapeur augmente (du cas 8 au cas 10). Ainsi, plus le nombre d'échangeurs est élevé, plus la température de sortie du collecteur est faible, traduisant une meilleure efficacité de refroidissement et d'extraction de la chaleur. Ces résultats démontrent que l'intégration d'échangeurs à vapeur améliore la performance thermique du système en limitant l'élévation de la température à la sortie du collecteur.

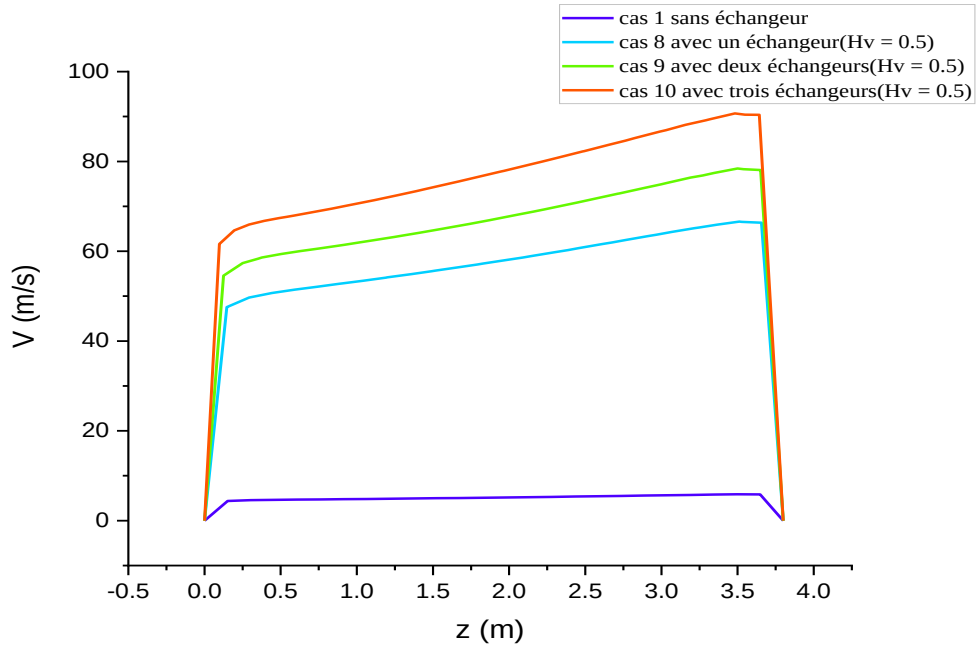


Fig. IV. 18: Profil de vitesse à la sortie du collecteur pour (Hv=0.5m)

La figure IV.18 présente les profils de vitesse à la sortie du collecteur. Il apparaît que la vitesse d'écoulement croît progressivement avec l'augmentation du nombre d'échangeurs à vapeur. Le cas 1, sans échangeur, affiche la vitesse la plus faible, tandis que les cas 8, 9 et 10, équipés respectivement d'un, deux et trois échangeurs à vapeur (Hv = 0,5), mettent en évidence une hausse notable de la vitesse, le cas 10 atteignant la valeur maximale.

Cette évolution indique que l'intégration d'échangeurs à vapeur améliore le transfert thermique, ce qui se traduit par une accélération du flux d'air au sein du système, optimisant ainsi la performance thermique du collecteur.

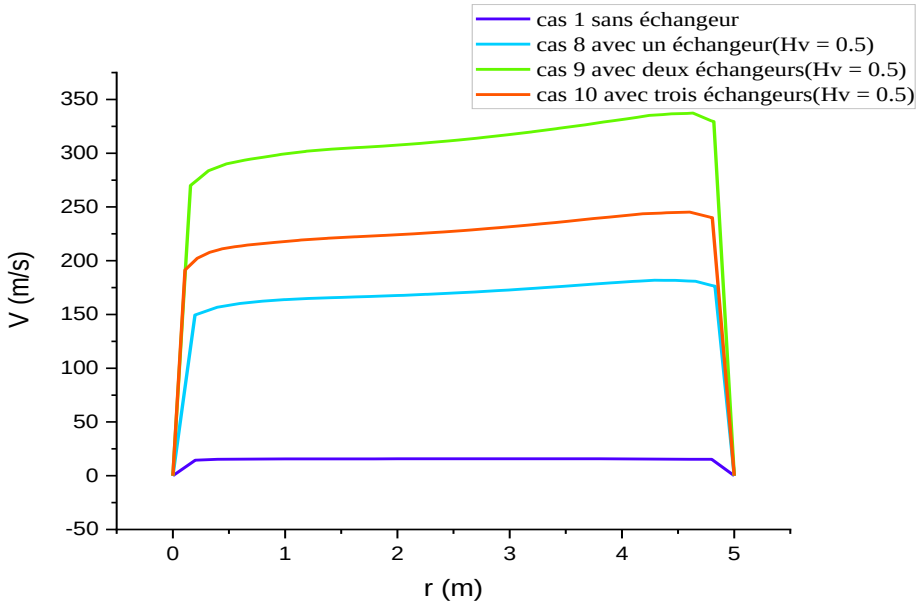


Fig. IV. 19: Profil de vitesse à l'entrée de la cheminée pour (Hv=0.5m)

La figure IV.19 illustre la variation de la vitesse de l'air à l'entrée de la cheminée en fonction du rayon (r) pour quatre configurations distinctes.

- Cas 1 (sans échangeur) : la vitesse reste faible et quasiment constante sur l'ensemble du rayon.
- Cas 8 (un échangeur, Hv = 0,5) : on observe une accélération notable du flux par rapport au cas 1, signe d'un transfert thermique accru.
- Cas 9 (deux échangeurs) : la vitesse continue de croître, attestant de l'impact cumulatif des échangeurs sur l'écoulement.
- Cas 10 (trois échangeurs) : on atteint la valeur maximale de vitesse, avec un profil plus accentué traduisant un flux à la fois plus rapide et plus uniforme.

Au fur et à mesure que le nombre d'échangeurs à vapeur augmente, le transfert de chaleur s'améliore, ce qui se traduit directement par une hausse de la vitesse de l'air à l'entrée de la cheminée et par un profil de vitesse plus marqué.

	T moy(k)		V moy(m/s)	
Cases	Sortie collecteur	Milieu collecteur	Sortie collecteur	Entrée cheminée
Cas 1	311.061	303.2514	4.768437	14.38644
Cas 8	290.3155	289.69	54.90313	163.0944
Cas 9	290.0834	319.0214	63.96114	298.7925
Cas 10	289.8978	289.6537	73.30869	216.6788

Tableau. IV. 3: Représentation de Tmoy et Vmoy à la sortie du collecteur et à l'entrée de la cheminée et à milieu collecteur pour (Hv=0.5m)

3. L'effet des échangeurs a vapeurs sur le rendement du collecteur :

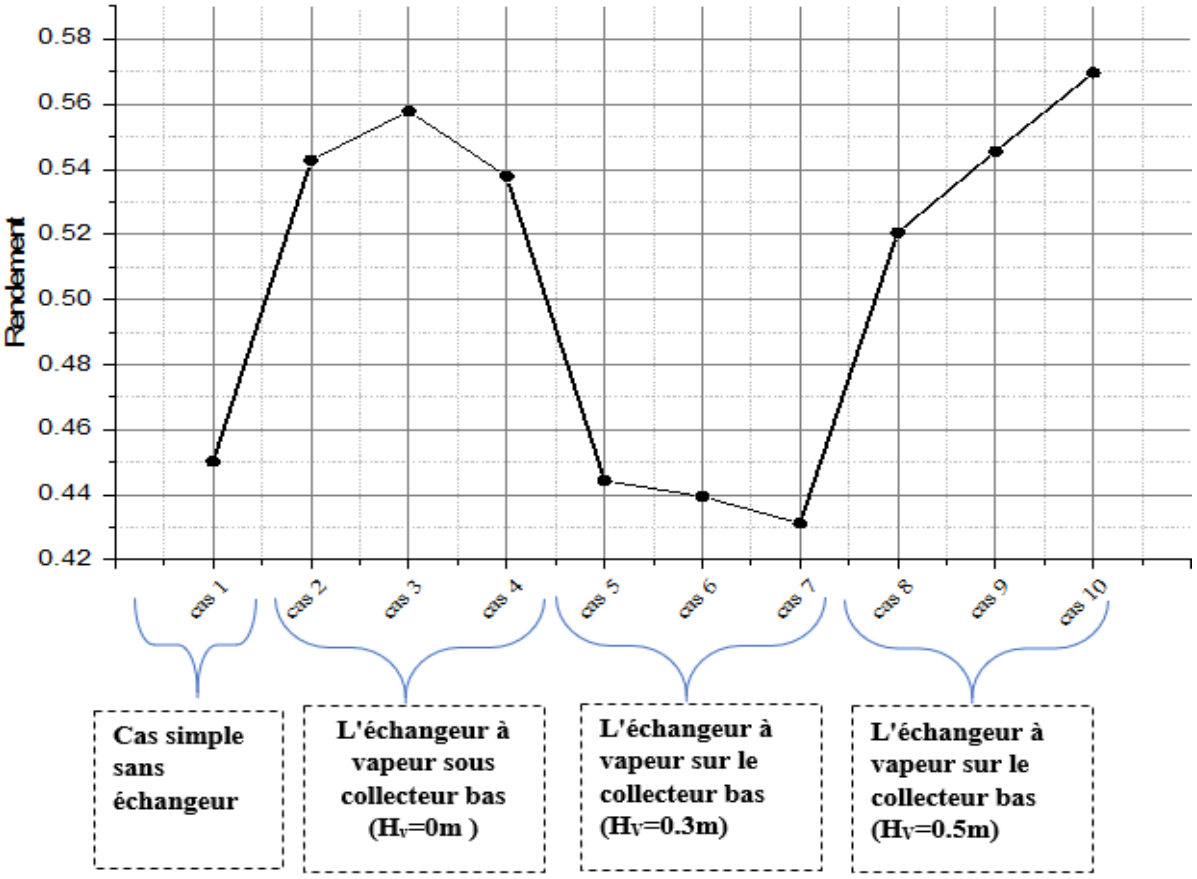


Fig. IV. 20: Rendement du collecteur pour les différents cas

Le graphique IV.20 montre l'effet de l'intégration des échangeurs à vapeur dans le collecteur d'une centrale à cheminée solaire sur le rendement de ce dernier. Il apparaît que le rendement varie en fonction du cas étudié : il débute à une valeur relativement faible pour le cas 1 (environ 0,45), puis augmente de manière notable pour atteindre un maximum au cas 3 (environ 0,56). Par la suite, une baisse significative est observée, le rendement atteignant son minimum au

cas 7 (environ 0,43). Ensuite, une augmentation progressive est constatée jusqu'au cas 10, où le rendement retrouve une valeur élevée (environ 0,57).

Cette évolution met en évidence que le type, le nombre et la conception des échangeurs à vapeur ont un impact direct, positif ou négatif, sur la performance thermique du collecteur. Il est donc essentiel d'adopter une configuration adéquate et une conception optimisée des échangeurs afin d'obtenir un rendement optimal du système.

4. L'effet des échangeurs à vapeurs sur la puissance produite :

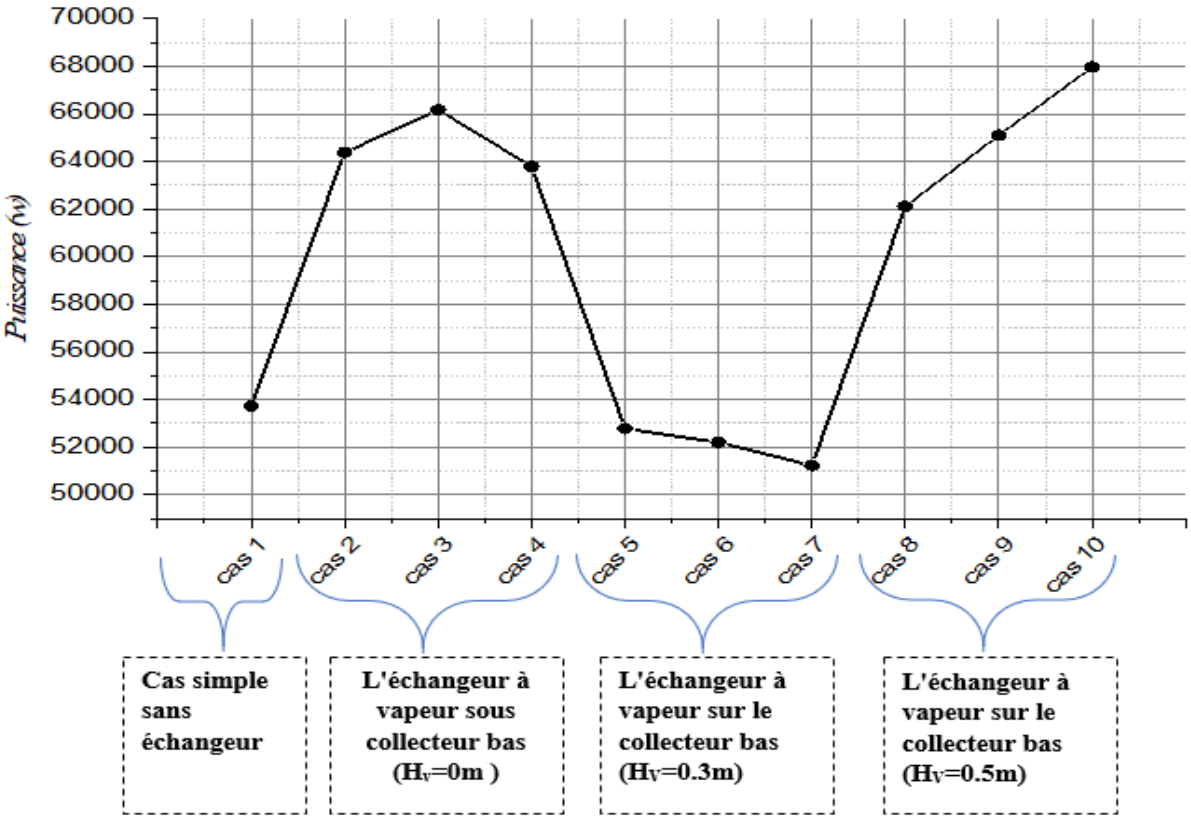


Fig. IV. 21: Puissances produite pour les différents cas

La figure IV.20 illustre l'effet de l'intégration des échangeurs à vapeur dans le collecteur d'une centrale à cheminée solaire sur la puissance produite. Il ressort que la puissance varie de manière significative selon les configurations. Dans un premier temps (du cas 1 au cas 3), on observe une augmentation notable de la puissance, passant d'environ 54 000 W à 66 000 W, traduisant une amélioration des performances du système. Ensuite, une diminution progressive est constatée du cas 4 au cas 7, la puissance atteignant un minimum d'environ 51 000 W, ce qui suggère un effet défavorable dans ces configurations. À partir du cas 8, la puissance repart à la hausse pour atteindre un maximum d'environ 68 000 W au cas 10.

Cette évolution met en évidence que le type, le nombre et la conception des échangeurs à vapeur influencent directement la puissance générée par le système. Il en découle qu'un dimensionnement et un choix appropriés de ces échangeurs sont essentiels pour optimiser la production d'énergie de la centrale.

5. Conclusion

Ce chapitre a permis d'analyser en profondeur l'impact de l'intégration des échangeurs à vapeur dans le collecteur d'une centrale à cheminée solaire sur les performances du système. Les résultats obtenus pour différentes configurations (variant le nombre d'échangeurs et leur hauteur) mettent en évidence des variations significatives des champs de température et de vitesse, ainsi que des effets notables sur le rendement et la puissance produite. Les principales observations peuvent être résumées comme suit :

Température : L'ajout d'échangeurs à vapeur influence directement les profils de température, entraînant une réduction notable dans certains cas, ce qui traduit une meilleure extraction ou dissipation de la chaleur. Les configurations comportant un nombre plus élevé d'échangeurs (cas 4, 7 et 10) permettent une maîtrise plus efficace de la température, bien que cet effet dépende également de la hauteur des échangeurs.

Vitesse : La présence d'échangeurs modifie également les profils de vitesse, avec une augmentation sensible dans certaines configurations (notamment cas 4 et cas 10), ce qui indique une amélioration de l'écoulement de l'air et du transfert énergétique.

Rendement et puissance : Les échangeurs à vapeur ont un impact direct sur le rendement du collecteur et sur la puissance produite. Certaines configurations (comme les cas 3 et 10) présentent des performances optimales, tandis que d'autres (cas 7) montrent une baisse de performance, soulignant l'importance d'un design adéquat et d'un dimensionnement approprié.

En conclusion, cette étude confirme que l'intégration des échangeurs à vapeur dans le collecteur d'une centrale à cheminée solaire constitue un levier essentiel pour améliorer les performances globales du système. Les résultats obtenus fournissent des indications précieuses pour guider la mise en œuvre pratique de ces dispositifs, en privilégiant les configurations qui maximisent à la fois le rendement énergétique et la puissance produite.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

L'énergie solaire constitue l'une des ressources les plus prometteuses pour relever les défis énergétiques et environnementaux actuels. Dans cette perspective, la centrale à cheminée solaire se distingue par son caractère innovant, offrant une conversion de l'énergie solaire en électricité de manière durable et respectueuse de l'environnement. Ce mémoire s'est intéressé aux voies d'amélioration du rendement énergétique de ces centrales, en se focalisant sur l'optimisation du collecteur solaire grâce à l'utilisation de la vapeur en sortie de turbine (fonctionnant selon un cycle de Rankine) par l'intégration d'échangeurs à vapeur dans la conception du système.

Les résultats issus des simulations numériques, effectuées à l'aide des logiciels Gambit et Fluent, ont permis d'évaluer l'impact des échangeurs à vapeur sur les performances globales du système. Divers scénarios ont été étudiés, en faisant varier le nombre et la hauteur des échangeurs, dans le but d'identifier les configurations les plus performantes. Les principales conclusions tirées de cette étude peuvent être résumées comme suit :

Pour la température et la vitesse l'ajout d'échangeurs à vapeur influence significativement les champs de température et de vitesse dans le collecteur. Certaines configurations, comme celles avec des échangeurs de hauteur intermédiaire (Hv = 0.3 m), ont montré une augmentation notable de la température de l'air, tandis que d'autres ont permis d'optimiser la vitesse d'écoulement.

Concernant le rendement du collecteur les échangeurs à vapeur ont un impact direct sur le rendement du collecteur. Par exemple, une configuration avec trois échangeurs de hauteur Hv = 0.5 m a permis d'atteindre un rendement de 57 %, contre 45 % pour le cas sans échangeur.

La puissance générée par la centrale est étroitement liée à la configuration des échangeurs. Les cas optimisés ont affiché une augmentation de puissance pouvant atteindre 68 000 W, démontrant ainsi le potentiel de cette approche pour améliorer la production énergétique.

En conclusion, cette étude confirme que l'intégration d'échangeurs à vapeur dans le collecteur d'une centrale à cheminée solaire constitue une solution viable pour en augmenter l'efficacité. Les résultats obtenus fournissent des pistes précieuses pour la conception de systèmes plus performants, notamment dans les régions désertiques où les conditions d'ensoleillement sont optimales. Toutefois, des travaux supplémentaires pourraient être menées pour explorer

d'autres configurations ou combinaisons de paramètres, afin de maximiser encore les performances.

Enfin, ce travail s'inscrit dans une démarche plus large de promotion des énergies renouvelables et de réduction de l'empreinte environnementale. Il ouvre la voie à des innovations futures dans le domaine des centrales solaires, contribuant ainsi à un avenir énergétique plus durable et respectueux de l'environnement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

[1] : Lebbi, M., et al. (2014). Influence du Rayonnement Solaire sur l'Ecoulement dans les Centrales à Cheminée Solaire. *Le 2ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables*. Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables.

[2] : Schlaich, J., Bergermann, R., Schiel, W., & Weinrebe, G. (2004). Sustainable electricity generation with solar updraft towers. *Structural Engineering International, 14*(3), 225–229.

[3] Mohamad, H., Medhat, E., Mohamed, R., & Muthu, M. (2021). Use of Solar Chimney in renewable energy applications–A review. Renewable Energy Research and Applications, 2(1), 117-128.

[4] : Djassem, C. (2014). Réalisation et expérimentation d'une cheminée solaire (Doctoral dissertation).

[5] Semmani, K. (2013). Simulation numérique d'une cheminée solaire (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou).

[6] : *Projet de Buronga*. (n.d.). Economie d'Energie Wikibis. Retrieved from http://www.economie-denergie.wikibis.com/projet_de_buronga.php

[7] : *Projet d'une cheminée solaire de 1000 mètres de haut*. (2008, May). Enerzine. Retrieved from http://www.enerzine.com/projet-dune-cheminee-solaire-de-1000-metres-de-haut/5239-2008-05

[8] : Mohammed, M., & Abdelaaziz, B. (2019). *Étude et réalisation d'une cheminée solaire* [Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf-M'sila].

[9] : Ming, T., Gong, T., de Richter, R. K., Liu, W., & Koonsrisuk, A. (2016). Freshwater Generation from a Solar Chimney Power Plant. *Energy Conversion and Management, 113*, 189–200.

[10] : Djimli, S., Chaker, A., Ajib, S., & Habka, M. (n.d.). Studying the Possibility of a Combined Hybrid Solar Chimney Power Plant with a Gas Turbine. *Environmental Progress & Sustainable Energy*.

[11] : Cao, F., Li, H., Ma, Q., & Zhao, L. (2014). Design and Simulation of a Geothermal–Solar Combined Chimney Power Plant. *Energy Conversion and Management, 84*, 186–195.

[12] : Zhou, X., Xiao, B., Liu, W., Guo, X., Yang, J., & Fan, J. (2010). Comparison of Classical Solar Chimney Power System and Combined Solar Chimney System for Power Generation and Seawater Desalination. *Desalination, 250*, 249–256.

[13] : Ghorbani, B., Ghashami, M., & Ashjaee, M. (2015). Electricity Production with Low Grade Heat in Thermal Power Plants by Design Improvement of a Hybrid Dry Cooling Tower and a Solar Chimney Concept. *Energy Conversion and Management, 94*, 1–11.

[14] Rankine, W. J. M. (1859). A manual of the steam engine and other prime movers. Griffin.

[15] Boussinesq, J. (1903). Théorie analytique de la chaleur. Gauthier-Villars.

[16] Patankar, S. V. (1980). Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Publishing Corporation.

[17] Schlaich, J., Bergermann, R., Schiel, W., & Weinrebe, G. (2005). Design of commercial solar updraft tower systems—Utilization of solar induced convective flows for power generation. Journal of Solar Energy Engineering, 127(1), 117-124.

[18] Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3(2), 269-289.

[19] : Asnaghi, A., & Ladjevardi, S. M. (2012). Solar Chimney Power Plant Performance in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16*(5), 3383–3390.

[20] : Dai, Y. J., Huang, H. B., & Wang, R. Z. (2003). Case Study of Solar Chimney Power Plan

[21] ANSYS, Inc. (2023). ANSYS Fluent User's Guide. ANSYS, Inc.ts in Northwestern Regions of China. *Renewable Energy, 28*(8), 1295–1304.

[22] : El Hella, A. L. (n.d.). *Analyse des écoulements dans les systèmes à base de cheminée solaire pour la ventilation des locaux d'habitation* [Doctoral dissertation, École Nationale Polytechnique, Alger].

الملخص

درس هذا البحث أثر استخدام البخار الخارج من التوربين (الذي يعمل وفق دورة رانكين) من خلال دمج مبادلات حرارية للبخار في مجمع الطاقة الشمسية لمحطة الطاقة ذات المدخنة الشمسية، بهدف تحسين أدائها الحراري والطاقوي. بعد عرض مبادئ عمل النظام والمعادلات الأساسية التي تحكم حركة الهواء المسخّن، تم تطوير نمذجة رياضية ثنائية الأبعاد لتحليل تأثير عدد المبادلات الحرارية وارتفاعها وموقعها على مجالات درجة الحرارة وسرعة الهواء. كما أُجريت محاكاة رقمية باستخدام برنامجي Gambit و Fluentلدراسة مختلف التكوينات. أظهرت النتائج أن إدماج المبادلات الحرارية يسمح بالتحكم بشكل أفضل في التدرجات الحرارية وتعديل تدفق الهواء الصاعد، مما يؤدي إلى تحسين مردود المجمع وزيادة الطاقة المنتجة في بعض التكوينات المثلى.

الكلمات المفتاحية: محطة المدخنة الشمسية، دورة رانكين، المبادلات الحرارية،

Résumé

Ce mémoire étudie l'impact de l'utilisation de la vapeur en sortie de turbine (fonctionnant selon un cycle de Rankine) par l'intégration d'échangeurs à vapeur dans le collecteur d'une centrale à cheminée solaire, dans le but d'en améliorer les performances thermiques et énergétiques. Après avoir présenté les principes de fonctionnement du système et les équations fondamentales régissant l'écoulement de l'air chauffé, une modélisation mathématique bidimensionnelle a été développée pour analyser l'influence du nombre, de la hauteur et de la position des échangeurs à vapeur sur les champs de température et de vitesse de l'air. Des simulations numériques ont été effectuées à l'aide des logiciels Gambit et Fluent pour évaluer différentes configurations. Les résultats obtenus montrent que l'intégration des échangeurs permet de mieux contrôler les gradients thermiques et de moduler le flux d'air ascendant, conduisant ainsi à une amélioration du rendement du collecteur et de la puissance produite pour certaines configurations optimisées.

Mot clés : centrale à cheminée solaire, cycle de Rankine, échangeur, Fluent, rendement collecteur

Abstract

This thesis investigates the impact of utilizing the steam exiting the turbine (operating according to a Rankine cycle) by integrating steam heat exchangers into the solar collector of a solar chimney power plant, with the aim of improving its thermal and energy performance. After presenting the system's operating principles and the fundamental equations governing the flow of heated air, a two-dimensional mathematical model was developed to analyze the influence of the number, height, and position of the steam exchangers on the temperature and velocity fields of the air. Numerical simulations were carried out using Gambit and Fluent software to evaluate different configurations. The results show that integrating steam exchangers allows for better control of thermal gradients and adjustment of the upward airflow, thus leading to improved collector efficiency and increased power output for certain optimized configurations.

Keywords: solar chimney power plant, Rankine cycle, heat exchanger, Fluent, collector efficiency.