

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT PHYSIQUE
N° PH/ENR/12/2025



DOMAINE : Sciences de la matière
FILIERE : Physique
OPTION : Physique Énergétique et
Energie renouvelable

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par : Dahmani Chimaa

Intitulé

**Etude numérique de l'effet du courant d'air
extérieur sur le rendement de la cheminée
solaire**

Soutenu le 11 / 06 / 2025 devant le jury composé de:

Salmi Mohamed	Université Med Boudiaf, M'sila	Président
Boulechfar Hichem	Université Med Boudiaf, M'sila	Rapporteur
Bourouina Hicham	Ecole Normale Supérieure, Bou-Saada	Examinateur
Benmensour Nadia	Université Med Boudiaf, M'sila	Examinateur

Année universitaire : 2024/2025

Dédicace

Louange à Allah, au commencement et à la fin, intérieurement et extérieurement, pour l'aide et la réussite qu'Il m'a accordées, et pour Ses innombrables bienfaits dont Il m'a comblé.

Je ne considère pas ce travail comme la fin de mon parcours, mais plutôt comme une nouvelle étape qui m'ouvre des horizons vers davantage d'ambition et de quête d'excellence.

Je dédie ce travail, auquel je tiens particulièrement,

À moi-même... En gratitude pour chaque instant d'effort qui s'est transformé en progrès, pour chaque découragement que j'ai surmonté avec détermination, et pour chaque patience qui m'a permis d'atteindre cette étape. Ma confiance en moi et ma persévérance sont ce qui m'a permis de réaliser cette réussite.

À ma chère famille... À mon père et à ma mère, mon soutien indéfectible sur lequel je me suis toujours appuyé à chaque tournant de ma vie.

À mes frères et ma sœur... les personnes les plus proches de mon cœur et mes plus sincères soutiens.

À chaque main secourable et aide, qu'elle soit proche ou lointaine. Et à mes professeurs distingués, phares de science et de savoir, qui ont illuminé mon chemin à chaque étape de mes études.

À vous tous, mes sincères remerciements et ma profonde gratitude. Votre gentillesse envers moi est immense, et votre influence sur mon parcours professionnel est inoubliable.

REMECIMENTS

Avant tout, je remercie et loue Dieu de m'avoir donné la volonté, la patience et la motivation pour accomplir ce travail.

Tout d'abord, je tiens à exprimer, plus particulièrement, ma sincère reconnaissance et ma profonde gratitude à Monsieur **Boulechfar Hichem** pour avoir accepté d'encadrer ce mémoire, pour son suivi attentif, ses encouragements continus tout au long de la réalisation de ce travail.

J'adresse également mes plus sincères remerciements et ma profonde considération à Monsieur **Salmi Mohamed** pour avoir gracieusement accepté de présider mon jury de soutenance.

Je tiens également à remercier le Monsieur **Bourouina Hichem** qui m'a fait l'honneur d'examiner ce travail et de faire partie de cet honorable jury.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à Madame **Benmansour Nadia** pour avoir accepté d'examiner ce travail et de faire partie à mon jury de soutenance.

Nomenclature

Lettres latines:

C_p	Chaleur massique à pression constante	J/kg.K
g	Accélération de la pesanteur	m/s^2
Pr	Nombre de Prandtl [=v/α]	
Ra	Nombre de Rayleigh, [= $\frac{g \beta_T \Delta T D^3}{\nu \alpha}$]	
t	Temps	s
T	Température du fluide	K
T_0	Température de référence	K
T_f	Température froide	K
T_c	Température chaude	K
v_r	Composante de la vitesse suivant r	m/s
v_θ	Composante de la vitesse suivant θ	m/s
v_z	Composante de la vitesse suivant z	m/s
\vec{v}	Vecteur vitesse	m/s
r, θ, z	Coordonnées cylindriques	m
h	Hauteur du collecteur	m
H	Hauteur de la cheminée	m
P	Pression	pa
K	Tenseur des contraintes.	

Lettres grecques :

α	Diffusivité thermique	m^2/s
λ	Conductivité thermique	W/m.K
ν	Viscosité cinématique	m^2/s
ρ	Masse volumique du fluide	kg/m^3
ρ_0	Masse volumique du fluide à la température de référence	kg/m^3
β_T	Coefficient d'expansion volumique thermique	

Exposants :

+	Paramètres adimensionnels
---	---------------------------

TABLE DES MATIERES

DEDICACE

REMERCIEMENTS

NOMENCLATURE.....i

LISTE DES FIGURES.....ii

TABLE DES MATIERES.....v

INTRODUCTION GENERALE.....01

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA CHEMINEE SOLAIRE

I Généralités sur la cheminée solaire.....05

I.1 Introduction.....05

I.2 Histoire de la cheminée solaire.....05

I.3 Principe de fonctionnement d'une cheminée solaire.....06

I.4 Les différents composants de la cheminée solaire.....07

I.4.1 Le collecteur.....07

I.4.2 La turbine.....08

I.4.3 La cheminée.....09

I.5 Les différents phénomènes intervenants dans la cheminée solaire.....09

I.6 Les différents types de cheminées solaires.....10

I.6.1 Types conventionnels.....10

I.6.2 Types non conventionnels.....12

I.7 Les applications de la cheminée solaire.....13

I.7.1 Production d'électricité.....13

I.7.2 Séchage solaire14

I.7.3 Confort thermique15

I.8 Les avantages et les inconvénients des cheminées solaires.....16

I.8.1 Les avantages.....16

I.8.2 les inconvénients.....16

I.9 Une revue de littérature.....16

CHAPITRE II : MODELESATION MATHEMATIQUE

II.1 Introduction.....	22
II.2 Description géométrique de la cheminée solaire.....	22
II.3 Modèle mathématique générale.....	23
II.4 Modèle mathématique en coordonnées cylindriques.....	24
II.5 Les hypothèses simplificatrices	25
II.6 Conditions aux limites.....	26
II.7 Formulation adimensionnelle.....	27
II.7.1 Modèle mathématique adimensionnel.....	27
II.7.2 Conditions aux limites adimensionnelles.....	28

CHAPITRE III : INTRODUCTION AU LOGICIEL COMSOL

III.1 Introduction	30
III.2 Structure des logiciels CFD	30
III.3 Présentation de Comsol Multiphysics.....	31
III.3.1 Méthode des éléments finis (FEM).....	31
III.3.2 Avantages et caractéristiques	31
III.3.3 Applications et domaines d'utilisation.....	31
III.4 Les étapes de simulation numérique.....	32

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1 Introduction.....	41
IV.2 Cas d'une cheminée solaire sans diffuseur ($h_d/h_c = 0$).....	41
IV.2.1 Effet de la vitesse de l'air extérieur (V_{Ext}) sur les champs de températures et de vitesse	41
IV.2.2 Effet de la vitesse de l'air extérieur (V_{Ext}) sur la vitesse verticale (V_{z+}).....	47
IV.3 Cas d'une cheminée solaire avec diffuseur ($h_d/h_c = 1$)	49
IV.3.1 Effet de la vitesse de l'air extérieur (V_{Ext}) sur les champs de températures et de vitesses.....	49
IV.3.2 Effet de la vitesse de l'air extérieur (V_{Ext}) sur la vitesse verticale (V_{z+}).....	55
Conclusion.....	57
Références bibliographiques.....	60

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Cheminée solaire	5
Figure I.2 : (a) Représente le barbecue de Da Vinci, (b) représente le diagramme de projet d'Isodoro	6
Figure I.3 : Principe de fonctionnement d'une cheminée solaire.....	7
Figure I.4 : Collecteur	8
Figure I.5 : Turbine	8
Figure I.6 : Exemple de cheminée (La tour)	9
Figure I.7 : Schéma d'une cheminée solaire pour ventilation naturelle	11
Figure I.8 : Schéma de la cheminée solaire sur le toit	11
Figure I.9 : Schéma de la cheminée solaire flottante	12
Figure I.10 : Schéma de la cheminée solaire inclinée	13
Figure I.11 : Centrale à cheminée solaire	13
Figure I.12 : Le séchoir solaire direct	14
Figure I.13 : Le séchoir solaire indirect	15
Figure I.14 : La ventilation naturelle	15

Chapitre II

Figure II .1 : Géométrie tridimensionnelle de la cheminée solaire étudiée.....	22
Figure II .2 : Géométrie bidimensionnelle de la cheminée solaire.....	23
Figure II. 3 : Conditions aux limites	27
Figure II. 4 : Conditions aux limites adimensionnelles.....	28

Chapitre III

Figure III .1 : L'interface Comsol Multiphysics.....	32
Figure III .2 : Fenêtre du navigateur du modèle	33
Figure III .3 : Création de la géométrie	33
Figure III .4 : Saisie des constantes	34
Figure III .5 : Fenêtre de réglage du sous-domaine en mode Navier-stokes Incompressible	34
Figure III .6 : Fenêtre de réglage du sous-domaine en mode convection et conduction... ..	35

Figure III .7 : Définition des conditions aux limites en convection et conduction pour le sol et diffuseur.....	35
Figure III .8 : Définition des conditions aux limites en mode convection and conduction l'entrée et la cheminée	36
Figure III .9 : Définition des conditions aux limites en mode incompressible Navier-stokes pour l'entrée.....	36
Figure III .10 : Définition des conditions aux limites en mode incompressible Navier-stokes pour la sortie	37
Figure III .11 : Fenêtre de maillage affiné	37
Figure III .12 : Fenêtre des paramètres du solveur.....	38
Figure III .13 : Affichage et sélection de différents résultats de simulation	39

Chapitre IV

Figure IV.1 :Champ de températures pour $h_d/h_c = 0$, $V_{Ext}=0$ m/s, $Ra=5 \times 10^5$	42
Figure IV.2 : Champ de vitesses pour $h_d/h_c = 0$, $V_{Ext}=0$ m/s, $Ra=5 \times 10^5$	43
Figure IV.3 :Champ de températures pour $h_d/h_c = 0$, $V_{Ext}=0.1$ m/s, $Ra=5 \times 10^5$	43
Figure IV.4 :Champ de vitesses pour $h_d/h_c = 0$, $V_{Ext}=0.1$ m/s, $Ra=5 \times 10^5$	44
Figure IV.5 :Champ de températures pour $h_d/h_c = 0$, $V_{Ext}=0.28$ m/s, $Ra=5 \times 10^5$	44
Figure IV.6 : Champ de vitesses pour $h_d/h_c = 0$, $V_{Ext}=0.28$ m/s, $Ra=5 \times 10^5$	45
Figure IV.7 : Champ de températures pour $h_d/h_c = 0$, $V_{Ext}=0.5$ m/s, $Ra=5 \times 10^5$	45
Figure IV.8 : Champ de vitesses pour $h_d/h_c = 0$, $V_{Ext}=0.5$ m/s, $Ra=5 \times 10^5$	46
Figure IV.9 : Champ de températures pour $h_d/h_c = 0$, $V_{Ext}=1$ m/s, $Ra=5 \times 10^5$	46
Figure IV.10 : Champ de vitesses pour $h_d/h_c = 0$, $V_{Ext}=1$ m/s, $Ra=5 \times 10^5$	47
Figure IV.11 : Les variations axiale (a) et radiale (b) de la composante de vitesse verticale (V_z^+) en fonction de (V_{Ext}) pour $h_d/h_c=0$, $Ra=5 \times 10^5$	48
Figure IV.12 : Champ de températures pour $h_d/h_c = 1$, $V_{Ext} = 0$ m/s, $Ra=5 \times 10^5$	50
Figure IV.13 : Champ de vitesses pour $h_d/h_c = 1$, $V_{Ext} = 0$ m/s, $Ra=5 \times 10^5$	50
Figure IV.14 : Champ de températures pour $h_d/h_c = 1$, $V_{Ext} = 0.1$ m/s, $Ra=5 \times 10^5$	51
Figure IV.15 : Champ de vitesses pour $h_d/h_c = 1$, $V_{Ext}=0.1$ m/s, $Ra=5 \times 10^5$	51
Figure IV.16 : Champ de températures pour $h_d/h_c = 1$, $V_{Ext}=0.28$ m/s, $Ra=5 \times 10^5$	52
Figure IV.17 : Champ de vitesses pour $h_d/h_c = 1$, $V_{Ext}=0.28$ m/s, $Ra=5 \times 10^5$	52
Figure IV.18 : Champ de températures pour $h_d/h_c = 1$, $V_{Ext}=0.5$ m/s, $Ra=5 \times 10^5$	53

Figure IV.19 : Champ de vitesses pour $h_d/h_c = 1$, $V_{Ext}=0.5$ m/s, $Ra=5 \times 10^5$	53
Figure IV.20 : Champ de températures pour $h_d/h_c = 1$, $V_{Ext}=1$ m/s, $Ra=5 \times 10^5$	54
Figure IV.21 : Champ de vitesses pour $h_d/h_c = 1$, $V_{Ext}=1$ m/s, $Ra=5 \times 10^5$	54
Figure IV.22 : Les variations axiale (a) et radiale (b) de la composante de vitesse verticale (V_z^+) en fonction de (V_{Ext}) pour $h_d/h_c=1$, $Ra=5 \times 10^5$	56

Introduction générale

Dans un contexte de consommation énergétique mondiale en constante augmentation et alimentée par une dépendance généralisée aux énergies conventionnelles telles que les combustibles fossiles, considérés comme un moteur essentiel de la croissance économique au XXI^e siècle les préoccupations liées aux impacts environnementaux, notamment l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, ne cessent de croître. Face aux complexités et aux risques associés à l'approvisionnement en énergies traditionnelles ainsi qu'à la volatilité de leurs prix, les grandes entreprises et institutions de recherche ont entrepris d'explorer des solutions innovantes visant à diversifier les sources d'énergie et à rechercher des alternatives durables, capables de garantir la sécurité énergétique tout en réduisant les risques environnementaux et économiques. Les énergies vertes et renouvelables se sont ainsi imposées comme une option prometteuse en raison de la diversité de leurs sources, notamment l'énergie solaire, la biomasse, l'énergie marémotrice, l'hydrogène, l'énergie éolienne et la géothermie. Parmi ces sources, l'énergie solaire se distingue par son abondance et son coût relativement faible. La cheminée solaire s'inscrit dans ce cadre comme l'une des technologies prometteuses pour exploiter cette ressource. Son principe de fonctionnement repose essentiellement sur le phénomène de convection thermique naturelle, provoqué par la variation de la densité de l'air due à la différence de température entre le sol et le collecteur solaire.

Notre étude actuelle se concentre sur une analyse approfondie de l'impact des courants d'air extérieurs avec et sans diffuseur, un facteur environnemental influent sur l'efficacité et la performance de la cheminée solaire, en utilisant le logiciel de simulation avancé Comsol Multiphysics. Ce travail de recherche est structuré en quatre chapitres, conçus pour offrir une compréhension globale du sujet et présentés comme suit :

Le premier chapitre, intitulé "Généralités sur la cheminée solaire", constitue une introduction générale au domaine des énergies renouvelables, avec un accent particulier sur la technologie de la cheminée solaire. Il présente ensuite le concept ainsi que ses principes de fonctionnement et ses composants fondamentaux. Le chapitre se termine par une revue détaillée de la littérature traitant des études antérieures relatives aux cheminées solaires et à leurs différents aspects et applications.

Le deuxième chapitre, intitulé "Modélisation et formulation mathématique du problème", introduit de manière claire la problématique de recherche, en représentant la cheminée solaire comme un système symétrique autour de son axe. Une représentation schématique détaillée est utilisée pour illustrer ses dimensions et sa géométrie. Le chapitre aborde ensuite la description

physique du problème en établissant les équations gouvernantes qui décrivent le mouvement de l'air et le transfert de chaleur à l'intérieur de la cheminée, à l'aide d'un système de coordonnées cylindriques.

Le troisième chapitre, intitulé "Introduction au logiciel Comsol Multiphysics", est consacré à l'outil numérique utilisé dans cette étude. Il débute par une présentation des logiciels dans le domaine de la simulation physique et de l'ingénierie. Ensuite, il détaille les différentes étapes méthodologiques suivies pour réaliser la simulation numérique, notamment la résolution des équations fondamentales décrivant le comportement de la cheminée solaire. Ce chapitre comprend également une introduction simplifiée à la méthode des éléments finis (FEM), qui constitue la méthode de calcul utilisée dans ce travail.

Le quatrième et le dernier Chapitre, intitulé "Résultats et discussion", présente les résultats clés de la recherche, obtenus à partir des différentes simulations. Les résultats sont illustrés à l'aide de figures et de graphiques pour faciliter l'analyse et la compréhension.

Enfin, une conclusion qui récapitule la méthodologie, objectif et résultats.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LA CHEMINEE SOLAIRE

I. Généralités sur la cheminée solaire

I.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie inépuisables et produites en continu, ce qui en fait une alternative durable et sûre aux énergies conventionnelles. Parmi ces énergies, l'énergie solaire se distingue comme une source non polluante, ne produisant pas de gaz à effet de serre et n'épuisant pas les ressources naturelles. L'énergie solaire peut être convertie en énergie électrique ou thermique à l'aide de plusieurs technologies. Parmi ces technologies, la conversion photovoltaïque joue un rôle majeur en transformant directement le rayonnement lumineux en électricité à l'aide de cellules solaires photovoltaïques. De plus, il existe la conversion thermique de l'énergie solaire, qui se base sur la transformation de l'énergie solaire en chaleur, soit de manière directe pour le chauffage domestique, soit de manière indirecte à travers des concentrateurs ou cheminées solaires pour la production de l'électricité.



Figure I.1 : Cheminée solaire [1].

I.2 Histoire de la cheminée solaire

D'après une étude menée par Al-Kayiem et al [2], Léonard de Vinci a été le premier à concevoir un mécanisme rotatif intégrant une cheminée et un moulin à vent dans l'antiquité illustré dans la figure (I.2). Le moulin à vent est relié à une broche de rôtissage, qui tourne lorsque le moulin à vent est mis en mouvement par l'air chaud qui s'élève, et qui est utilisée pour cuire le poulet.

Plus tard, précisément au 20ème siècle, en 1903, le colonel espagnol Isidoro Cabanyes a été le premier à décrire le concept de la cheminée solaire en présentant son projet de moteur solaire afin de produire de l'énergie électrique.

En 1968, l'ingénieur allemand Jörg Schlaich a proposé la technologie de la centrale solaire à cheminée (Solar Chimney Power Plant), qu'il a présentée dans les années 1970. Entre 1980 et 1989, le prototype de cheminée solaire de Manzanares, en Espagne, a été installé et exploité avec succès jusqu'à ce qu'il soit officiellement mis hors service.

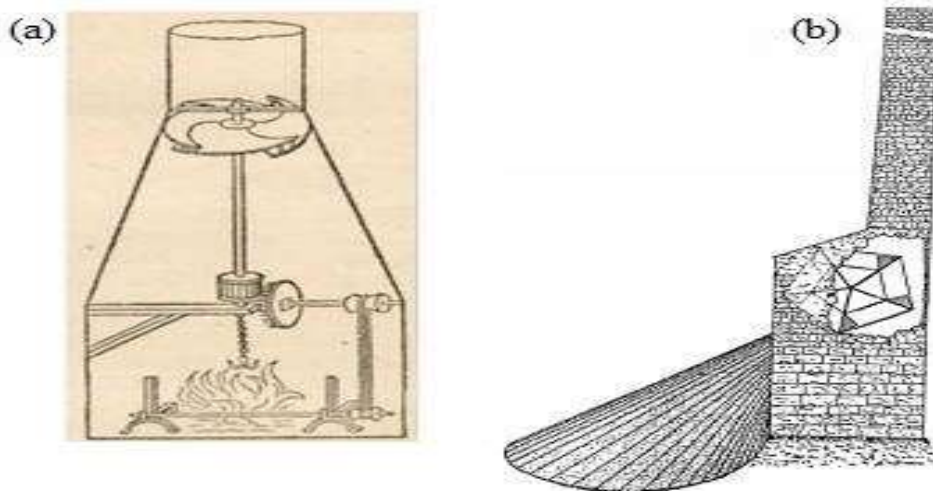


Figure I.2 : (a) Représente le barbecue de Da Vinci, (b) représente le diagramme de projet d'Isodoro [2].

I.3 Principe de fonctionnement d'une cheminée solaire

La cheminée solaire est un dispositif de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Le principe de fonctionnement est basé sur le réchauffement d'une couche d'air sous la surface horizontale du collecteur par l'effet de serre à l'intérieur de la cheminée solaire, ce qui conduit à un gradient de température entre les différentes couches d'air sous le collecteur, cette différence de température produit des courants d'air sous l'effet de la convection naturelle et ce courant est dirigé à travers la cheminée verticale où la turbine est entraînée par l'air qui circule et cela conduit à la production d'électricité [3].

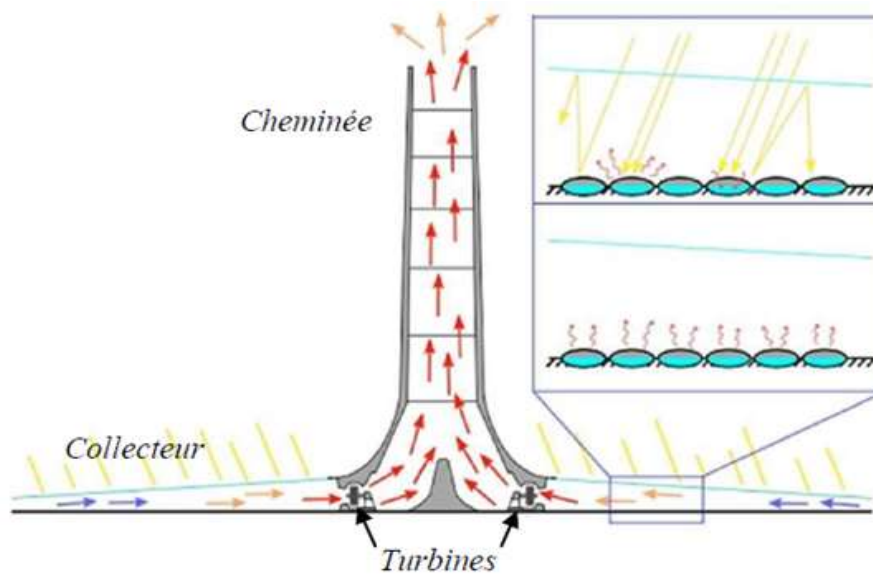


Figure I.3 : Principe de fonctionnement d'une cheminée solaire [3].

I.4 Les différents composants de la cheminée solaire

Le système se compose de trois parties principales, le collecteur, la turbine et la cheminée.

I.4.1 Le Collecteur

Le collecteur solaire se compose d'une matrice de support, d'une structure de colonnes et d'un toit transparent, soit en verre, soit en plastique [4], utilisé pour générer de l'air chaud par effet de serre, présente généralement une hauteur entre de 2 à 6 mètres et couvre une superficie pouvant atteindre plusieurs milliers de mètres carrés (Figure I.4).

Il n'y a pas de limite stricte à la surface du collecteur, plus la surface est grande, plus la quantité d'énergie produite par la tour solaire augmente. La hauteur sous la serre doit croître progressivement du bord vers le centre pour réduire les pertes dues aux frottements. Plusieurs matériaux peuvent être utilisés pour couvrir la serre, tels que du verre ou des films plastiques.

Le collecteur en verre est le plus performant en termes de rendement énergétique, avec une conversion de l'énergie solaire en chaleur plus élevée.

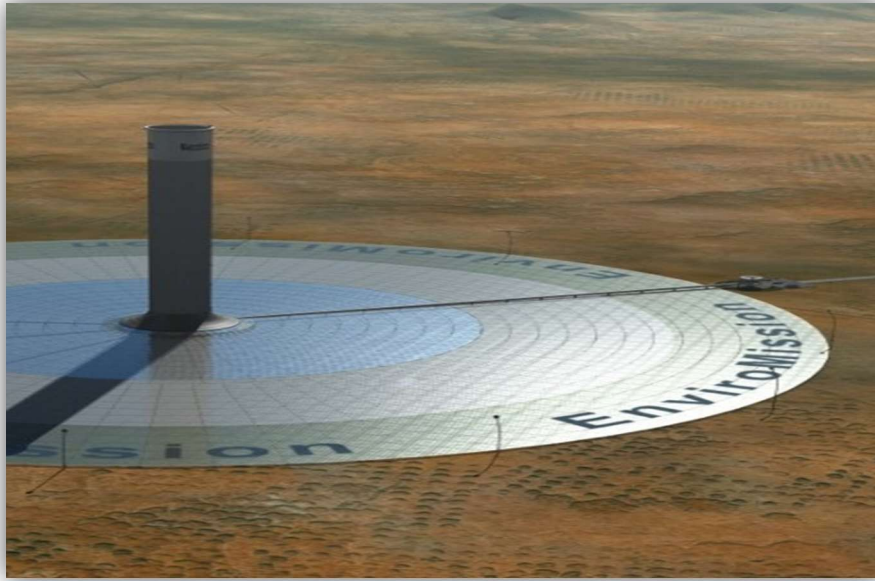


Figure I.4 : Collecteur [5].

I.4.2 La turbine

La ou les turbines sont généralement installées à la base de la cheminée, où la vitesse de l'air est la plus élevée, afin de maximiser la conversion de l'énergie cinétique en énergie mécanique qui est ensuite transformée en énergie électrique par un générateur.

Il est possible d'utiliser une seule turbine dont les pales couvrent la totalité de la section transversale de la cheminée, ou bien plusieurs petites turbines réparties sur toute la section. Une autre configuration consiste à placer un grand nombre de petites turbines à axes horizontaux, entre la verrière et la base de la cheminée, sur la périphérie de la section du passage du courant l'air généré.

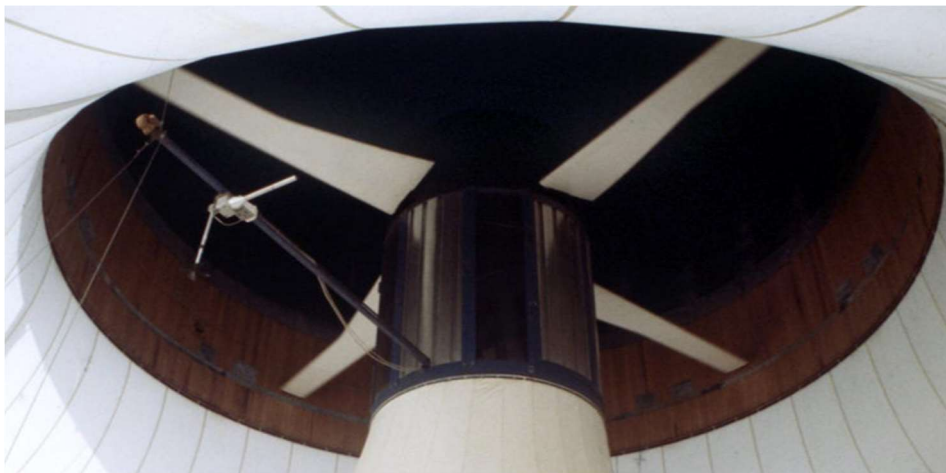


Figure I.5: Turbine [6].

I.4.3 La Cheminée

La cheminée constitue la partie essentielle de la tour solaire, fonctionnant comme une machine thermique. Grâce à des pertes par frottement minimales, elle agit comme un tube de pression. Plus la cheminée est haute, plus l'énergie générée par la tour solaire est importante. L'efficacité de la cheminée dépend davantage de la différence de température entre l'air générée et l'air extérieur au sommet de la cheminée, bien que l'efficacité augmente avec la hauteur de la cheminée, il existe des limites pratiques à cette augmentation.

Il existe deux principaux types de cheminées, les cheminées autoportées, qui sont construites en matériaux solides comme le béton ou l'acier, et les cheminées haubanées, qui sont des structures plus légères faites de tubes. Les cheminées en béton ont une durée de vie bien plus longue que celles en membranes.



Figure I.6 : Exemple de cheminée (La tour) [7].

I.5 Les différents phénomènes intervenants dans la cheminée solaire

Le projet de tour solaire suscite un grand intérêt en raison des divers phénomènes physiques qui y interviennent et qui sont bien compris et maîtrisés depuis des décennies [8].

- **L'effet Venturi :** Ce phénomène, nommé d'après le physicien Giovanni Venturi, se produit lorsque l'air accélère et subit une baisse de pression, en raison d'un rétrécissement de la zone par laquelle il circule, cela est particulièrement important dans le contexte de la cheminée solaire où l'air chaud est accéléré.

- **L'effet de serre :** Le collecteur de la cheminée solaire, fait de verre ou de plastique, est transparent aux rayonnements lumineux et qui permet de créer un effet de serre qui emprisonne la chaleur à l'intérieur.
- **L'effet de convection naturelle :** Lorsque l'air est chauffé, il s'élève sous l'effet de la poussée d'Archimède. Inversement, l'air froid sa densité augmente et descend sous l'effet de la gravité. Cette différence de densité crée un courant d'air qui se déplace de façon circulaire sous le collecteur et poussant l'air à travers la cheminée.
- **Stockage d'énergie :** La production d'énergie ne s'arrête pas la nuit grâce à un système de stockage de chaleur. Des cylindres opaques remplis de liquide captent la chaleur pendant la journée et la libèrent pendant la nuit, permettant ainsi de maintenir une production d'énergie minimale.

I.6 Les différents types de cheminées solaires

Les cheminées solaires sont classées en deux catégories : Conventionnelles et non conventionnelles, en fonction de leur but d'utilisation et de leur concept.

I.6.1 Types conventionnels

I.6.1.1 Cheminée solaire produisant de l'énergie électrique

La majorité des technologies de cheminées solaires utilisées actuellement sont des centrales solaires à cheminée traditionnelles, où l'objectif est d'utiliser une ou plusieurs turbines installées à l'intérieur de la cheminée pour convertir l'énergie cinétique du flux d'air en électricité.

I.6.1.2 Cheminée solaire murale

La cheminée solaire murale, est généralement utilisée pour le chauffage domestique en hiver et le rafraîchissement en été. Elle est construite avec un mur de stockage intérieur et un vitrage extérieur. Le vitrage extérieur permet aux radiations solaires de chauffer. Ensuite, l'air dans la chambre monte en raison du gradient thermique comme montré sur la figure (I.7).

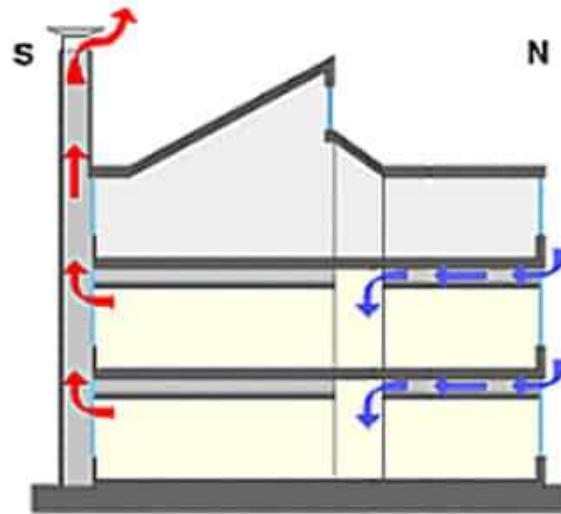


Figure I.7 : Schéma d'une cheminée solaire pour ventilation naturelle [9].

I.6.1.3 Cheminée solaire sur le toit

Pratiquement, il n'y a pas de différence significative entre les deux structures, à l'exception de la position du mur ou de la tour (cheminée) et de l'absorbeur. L'absorbeur dans une cheminée solaire maximise l'énergie thermique générée par le soleil, ce qui crée une différence de température significative entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment, générant ainsi un gradient de température entre l'air à l'intérieur du canal de la cheminée et l'air à l'entrée de la cheminée solaire. Cela force l'air plus froid à être aspiré depuis la pièce adjacente et l'air chaud à être expulsé par la cheminée. La cheminée solaire facilite la ventilation naturelle de l'espace en répétant ce processus [10].

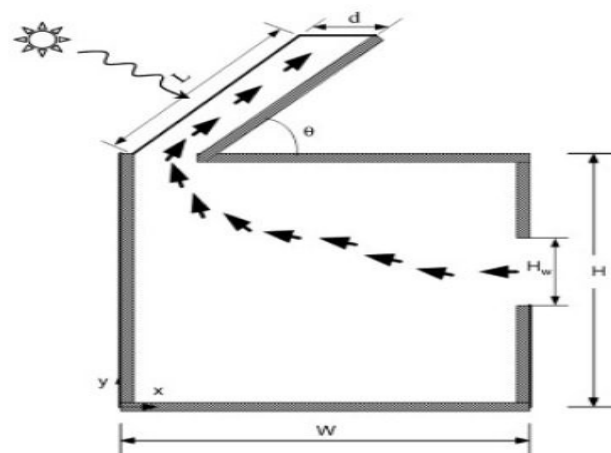


Figure I.8: Schéma de la cheminée solaire sur le toit [11].

I.6.2 Types non conventionnels

I.6.2.1 Cheminée solaire flottante

La station de production d'énergie par cheminée solaire flottante, nommée par l'auteur "Solar Aero-Electric Power Plant" (SAEP) [12], est similaire à une centrale hydroélectrique, c'est une alternative économiquement compétitive et à faible coût par rapport à la cheminée solaire en béton classique. Elle possède les mêmes composants principaux que les centrales solaires à cheminée classiques (SCPP), mais diffère par la section centrale de la cheminée (le cylindre), qui est constituée de bagues de ballon connectées, faites d'un tissu léger et durable [13], comme illustré dans la figure (I.9). Elle est flexible et mobile et se déplace avec les courants de vent externes.

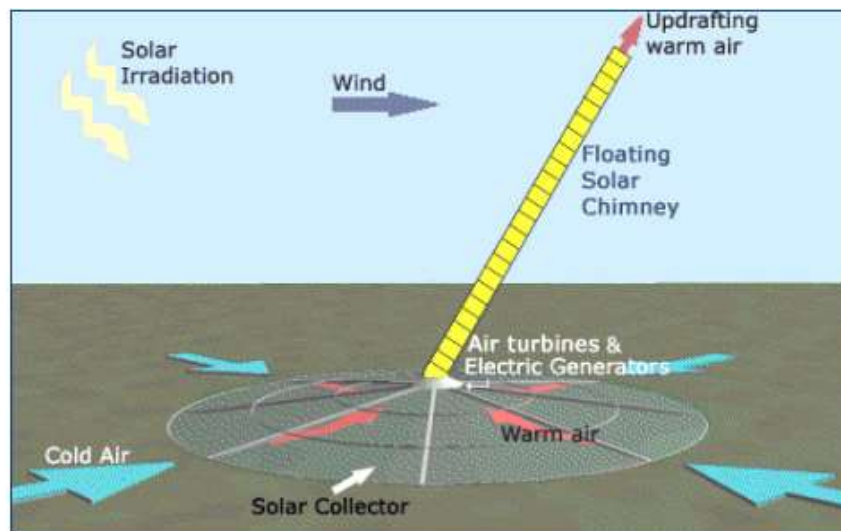


Figure I.9 : Schéma de la cheminée solaire flottante [14].

I.6.2.2 Cheminée solaire inclinée

L'idée principale était de construire une cheminée avec un collecteur dans une unité inclinée. Plus tard, Pance et al. ont suggéré que la face inclinée de la montagne agissait comme une cheminée en plus du collecteur. Une nouvelle étude proposée par Zhou et al. a suggéré qu'un trou pourrait être créé au centre d'une montagne pour générer de l'électricité. La zone du collecteur a été construite autour de la montagne afin de produire plus d'énergie [15].

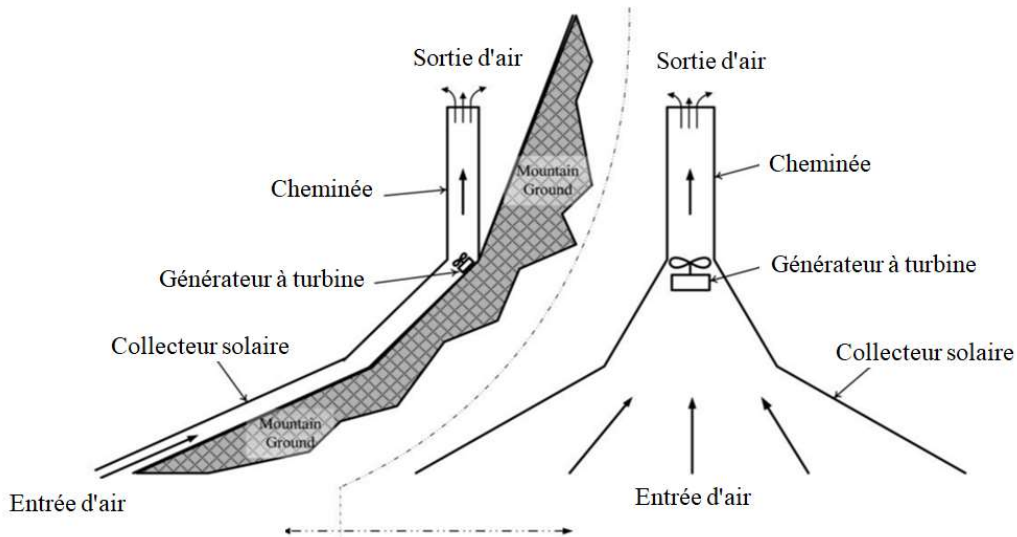


Figure I.10 : Schéma de la cheminée solaire inclinée [16].

I.7 Les applications de la cheminée solaire

Les cheminées solaires ont une large gamme d'applications dans divers domaines, notamment :

I.7.1 Production d'électricité

L'électricité est produite par une centrale à cheminée solaire (SCPP) en convertissant l'énergie solaire reçue en énergie électrique.

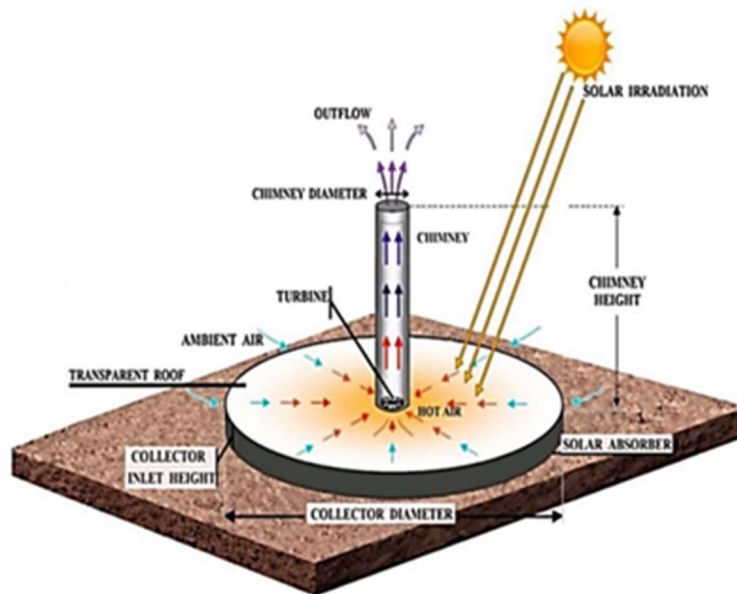


Figure I.11 : Centrale à cheminée solaire [17].

I.7.2 Séchage solaire

Le séchage solaire est effectué par des séchoirs solaires qui stockent les aliments en les exposant à la chaleur du soleil. Il existe deux types de systèmes de séchoirs solaires : directs et indirects [18].

- **Système direct :** Le séchoir solaire direct permet de sécher les aliments en les plaçant sous un verre ou une plaque plastique transparente résistante au soleil, dans un cadre comportant des ouvertures pour la ventilation (l'air étant nécessaire) afin d'éviter la condensation. Grâce à l'effet de serre, le taux d'humidité des aliments est réduit.

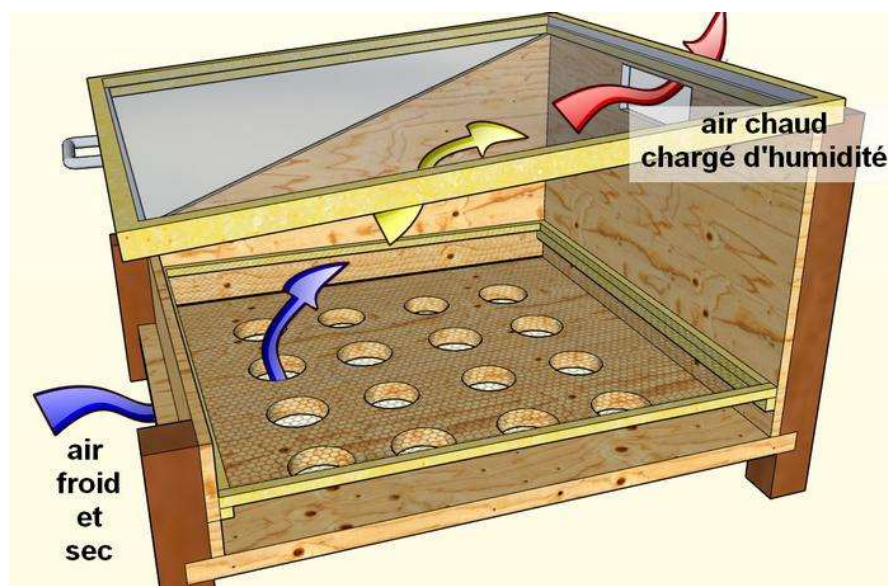


Figure I.12 : Le séchoir solaire direct [19].

- **Système indirect :** Le séchoir solaire indirect permet de faire circuler de l'air chaud autour des aliments dans un cadre. L'air chaud entre par le bas, chauffant les aliments posés sur des grilles est expulsé par le haut. Le cadre est équipé d'une plaque de verre ou de verre de maille inclinée à 45 degrés pour garantir une exposition maximale au soleil, avec une plaque noire (pour l'absorption thermique) permettant de réchauffer l'air autour des aliments.



Figure I.13 : Le séchoir solaire indirect [20].

I.7.3 Confort thermique

Le confort thermique est généré par la ventilation naturelle est lié à quatre variables physiques (température de l'air, intensité du rayonnement solaire, humidité et vitesse de l'air). Ces variables interagissent avec le corps humain pour atteindre ce confort par des moyens naturels qui remplacent l'air intérieur par de l'air frais extérieur, comme les cheminées solaires utilisées dans les bâtiments.

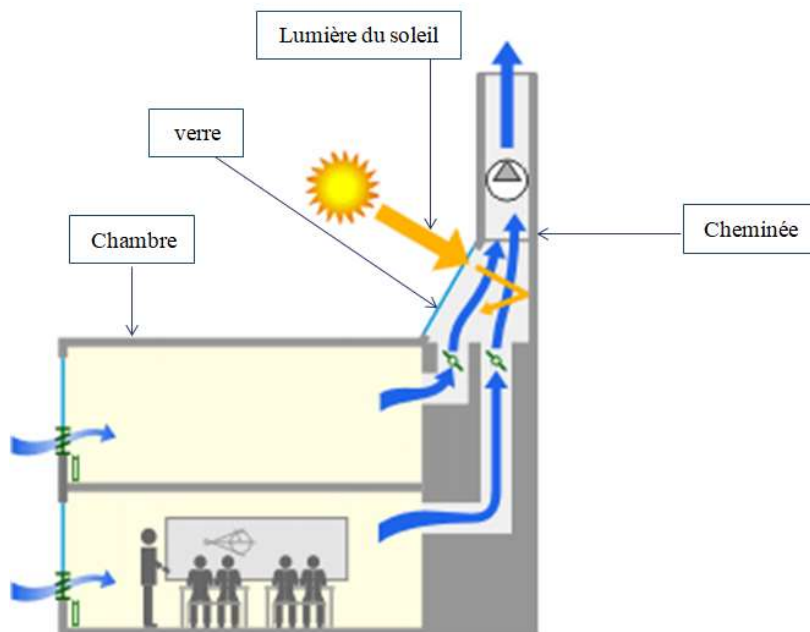


Figure I.14 : La ventilation naturelle [21].

I.8 Les avantages et les inconvénients des cheminées solaires

I.8.1 Les avantages :

Les principaux avantages de cette technologie sont les suivants :

- Le système utilise le rayonnement solaire direct et diffus qui est une source inépuisable et gratuite. Avec une possibilité du stockage d'énergie thermique qui assure un fonctionnement continu.
- Aucune émission de gaz à effet de serre n'est générée.
- La cheminée solaire demande peu d'entretien par rapport aux autres types de centrales énergétiques (conventionnelles, à concentration, nucléaires...etc.).
- Aucun coût supplémentaire n'est nécessaire pour le refroidissement de l'installation.
- Ce type de système est particulièrement adapté pour la production d'électricité dans les zones arides à faible valeur commerciale, mais bénéficiant d'un fort gisement solaire.
- Ne nécessite pas un carburant pour le fonctionnement.

I.8.2 Inconvénients [22] :

Cheminées solaires présentent certains inconvénients qui sont :

- Un investissement initial élevé.
- Un impact visuel négatif, certains considérant qu'elle dégrade le paysage.
- Elle ne peut rivaliser avec le nucléaire en termes de puissance, étant jusqu'à sept fois moins performante qu'un réacteur nucléaire (par exemple, les plus grandes tours atteignent 200 MW, tandis qu'un réacteur nucléaire en produit 1500 MW).
- Sa construction nécessite une grande expertise en ingénierie en raison de la complexité de la structure.

I.9 Une revue de littérature

L'objectif d'une étude menée par **Boualleg Salim, M. [23]**, est d'analyser la performance énergétique d'une centrale solaire à cheminée en utilisant plusieurs modèles mathématiques. La validation des résultats obtenus à partir de ces différents modèles théoriques, en les comparant aux données pratiques du prototype de Manzanares, permet d'améliorer la prévision des performances de la centrale solaire à cheminée à courant ascendant.

À l'Université de Téhéran, une recherche analytique et numérique menée par **Alibakhsh Kasaeian et al. [24]**, sur l'optimisation géométrique d'un prototype de cheminée solaire a été réalisée avec succès. Un modèle mathématique de base décrivant l'écoulement a été fourni. La performance d'une cheminée solaire a été évaluée en utilisant différentes configurations fonctionnelles et géométriques. Les prédictions informatiques ont été confirmées par une comparaison avec les données expérimentales du prototype de cheminée solaire, qui avait une hauteur de 2 m et un rayon de collecteur de 3 m.

Les résultats suggèrent qu'une entrée de collecteur de 6 cm, une hauteur de cheminée de 3 m et un diamètre de cheminée de 10 cm étaient les options optimales pour le prototype de cheminée solaire construit. Il a été découvert que la vitesse du flux pouvait être augmentée de 4 à 25 % dans différentes conditions ; l'étude a également révélé que la hauteur et le diamètre de la cheminée sont les éléments physiques les plus essentiels pour la conception de la cheminée solaire.

Toufik Chergui et al. [25], ont présenté des travaux d'analyse sur le transfert de chaleur et l'écoulement de l'air dans les cheminées solaires, basés sur plusieurs caractéristiques significatives. Cette recherche comprend un cas typique d'application. Elle consiste à étudier un problème de transfert thermique convectif naturel laminaire dans une cheminée. Le transport de chaleur et la dynamique des fluides sont donc étudiés en utilisant un système axisymétrique sous forme sans dimension, avec des conditions aux limites bien définies. La distribution de la température et le champ de vitesses dans la cheminée et le collecteur sont calculés en résolvant l'équation de l'énergie et les équations de Navier-Stokes à l'aide de la méthode des volumes finis. La solution de référence de Vahl Davis est utilisée pour valider le code numérique basé sur cette modélisation.

Davood Toghraie et al. [26], ont étudié quantitativement les effets des paramètres géométriques sur une cheminée solaire dans ce travail, en utilisant le modèle de turbulence $\kappa-\varepsilon$. À l'intérieur d'une centrale solaire à cheminée, les équations de continuité, de mouvement et d'énergie sont résolues à l'aide d'une technique volumétrique en 3D. Le rayon du collecteur, la hauteur du collecteur, la hauteur de la cheminée, le rayon de la cheminée et le flux thermique étaient tous impliqués. Les variations de ces facteurs ont été étudiées pour leur impact sur les distributions de température, de vitesse, de pression, ainsi que sur l'efficacité et la puissance de sortie. Selon les résultats, la puissance de sortie et l'efficacité de la cheminée solaire ont une

relation positive avec la hauteur de la cheminée et le rayon du collecteur, mais une relation négative avec la hauteur du collecteur. En outre, il a été découvert que le rayon de la cheminée a une plage idéale offrant les meilleures valeurs pour l'efficacité et la puissance de sortie.

Akchiche Zineb et al. [27] ont proposé une méthode de ventilation et de refroidissement naturel pour les zones chaudes dans cette étude. Une cheminée solaire crée un écoulement d'air à travers l'enclos. Pour prévoir le comportement de la cheminée, un dispositif expérimental a été créé, suivi d'une simulation à l'aide du logiciel Fluent pour une cheminée solaire avec différentes formes et deux inclinaisons. Afin de prévoir le taux de ventilation, une application a été réalisée sur une zone de taille (1m x 1m x 1m) équipée d'une cheminée solaire inclinée à 45 degrés par rapport à l'horizontale, intégrée sur la section supérieure.

Pour améliorer la qualité de la ventilation et réduire l'utilisation de l'électricité tout en maintenant le confort thermique, un dispositif sol-air a été introduit. Ils ont pu créer une conception air/sol grâce à la baisse de température à l'entrée de la pièce, et ils en sont arrivés à la conclusion que :

- ⊗ Le mécanisme devient plus efficace à mesure que les niveaux de radiation solaire augmentent.
- ⊗ La quantité d'écoulement d'air est fortement déterminée par la taille de la cheminée.
- ⊗ Un angle de 45 degrés par rapport à l'horizontale correspond à la meilleure circulation thermique.
- ⊗ La quantité de radiation solaire affecte la température et le flux d'air à la sortie de la cheminée.

Arkan Kh. Al-Taie et Ali Hayder Mutib [28], ont fourni une simulation numérique pour examiner l'efficacité d'une centrale solaire à cheminée. Le logiciel FLUENT a été utilisé pour modéliser et analyser une centrale solaire à cheminée à petite échelle, afin de résoudre les équations gouvernantes de conservation de la masse, du mouvement, de l'énergie, de l'intensité D_0 , k et des équations associées. Le collecteur à toit vitré, la cheminée (tour) et la turbine éolienne sont les trois principaux composants des centrales solaires à cheminée. La vitesse d'entrée dans la turbine éolienne détermine la puissance de sortie du système. Le type de connexion entre le collecteur et la cheminée influence la vitesse d'entrée de la turbine. Les résultats ont montré que les caractéristiques de performance, en particulier la vitesse du flux d'air, sont influencées par la forme de la région d'entrée (type de connexion collecteur-cheminée). Comparé à une connexion droite, l'utilisation d'une jonction courbée ou arrondie avec un déflecteur augmente le taux de masse du système de 37,65 %.

Selon Emad Abdelsalam et al. [29], l'effort actuel implique une version mise à jour de la construction classique de la centrale solaire à cheminée, connue sous le nom de Centrale Solaire à Double Cheminée (SDCPP) (SCPP). Afin d'augmenter la production d'énergie, la conception de la SCPP a été modifiée par l'ajout d'une cheminée extérieure secondaire concentrique à la structure de la SCPP, avec 10 tours de refroidissement (CT) équipées de pulvérisateurs d'eau et de turbines pour une production d'énergie supplémentaire garantissant un bon fonctionnement (jour et nuit). À l'aide de MATLAB, un modèle mathématique intégrant les équations de masse et l'équilibre énergétique du système a été créé. La combinaison de matériaux de la nouvelle conception a produit une efficacité thermique de 1,6 %, soit 200 fois plus que la SCPP. Selon l'analyse économique, le coût local de l'énergie (LCOE) pour le nouveau système était 50 % inférieur à celui de la SCPP conventionnelle.

Rashid, F. L., et Alnomani, S.N. [30], ont effectué une analyse numérique utilisant le modèle K dans l'application CFD FLUENT, d'une cheminée solaire avec un collecteur conique ayant des dimensions particulières. Pour étudier l'impact de la section transversale carrée de la spirale sur la distribution de la vitesse de l'air, celle-ci a été attachée au collecteur.

Arkan K. Al-Taaie et al. [31], ont développé un système de cheminée solaire inclinée et ont effectué des mesures de la centrale solaire à cheminée à Bagdad, en Irak, en utilisant Fluent. Les équations gouvernantes pour les écoulements incompressibles, tridimensionnels, stables et turbulents standards $\kappa-\varepsilon$ avec l'approximation de Boussinesq ont été résolues, en plus des équations de continuité, de Navier-Stokes, d'énergie et de transfert de radiation. En tenant compte de l'intensité de radiation et des conditions de l'angle du collecteur (0° , 15° , et 30°), les résultats montrent qu'à mesure que l'angle du collecteur augmente, la vitesse augmente également, atteignant un maximum pour un angle de 30° , autour des périodes d'intensité solaire accrue (7h30, 8h15, 9h, 10h). La température augmente avec l'angle du collecteur, mais baisse à 12h30. L'étude montre que le climat irakien est adapté à ce système.

Le projet de Gahgah, M [32], inclut la simulation des écoulements dans les cheminées solaires numériquement. La méthode de modélisation mathématique utilisée est basée sur les écoulements dans un enclos ouvert à deux parties, consistant en un cylindre et un disque. Pour modéliser l'écoulement d'air dans une cheminée tout en tenant compte des différents régimes d'écoulement (laminaire et turbulent), cette étude consiste à créer un logiciel informatique avec des variables sans dimension et des coordonnées généralisées, en utilisant la technique des

volumes finis avec des conditions aux limites appropriées dans une géométrie complexe, comme une centrale solaire à cheminée. Ce travail est une pierre angulaire pour comprendre l'analyse thermo fluide de l'efficacité des cheminées solaires dans les centrales solaires à cheminée sous des paramètres d'état stable.

CHAPITRE II
MODELISATION MATHEMATIQUE

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous formulons le problème physique en décrivant la géométrie et l'ensemble des équations aux dérivées partielles, représentées par les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie. Ces équations sont exprimées dans un système de coordonnées cylindriques.

II.2 Description géométrique de la cheminée solaire

Dans ce travail, nous étudions l'impact du courant d'air extérieur sur l'écoulement de l'air ainsi que le transfert de chaleur dans la cheminée solaire ayant la forme géométrique illustrée dans les figures (II.1).

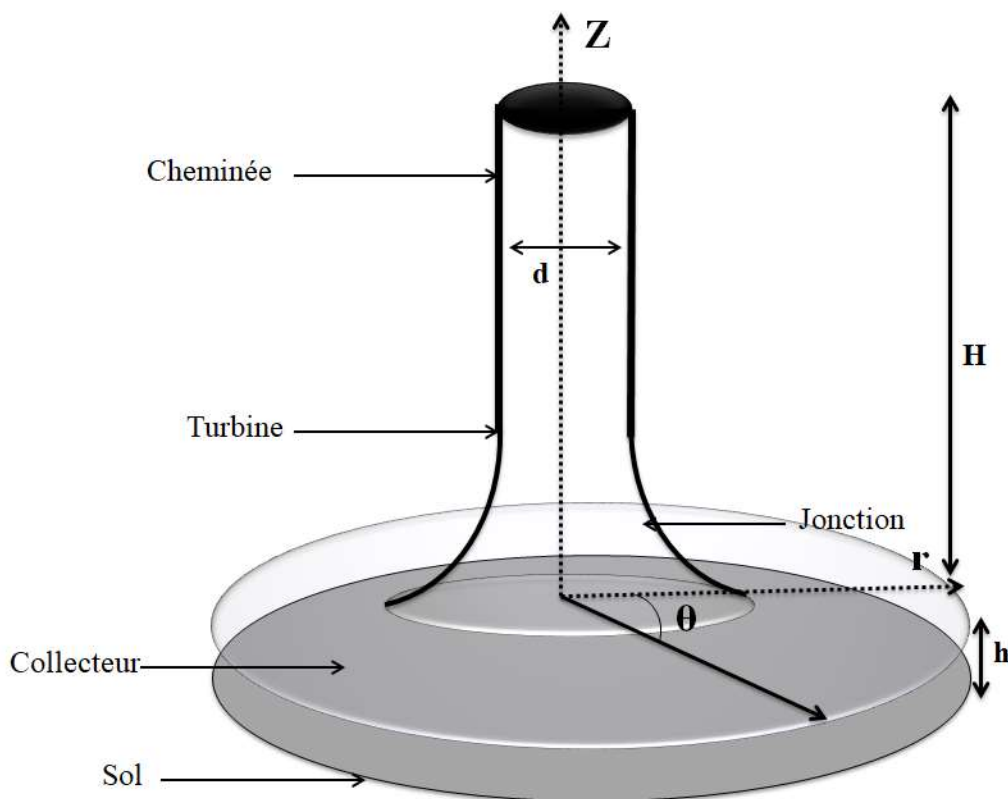


Figure II .1 : Géométrie tridimensionnelle de la cheminée solaire étudiée.

Le passage de la géométrie tridimensionnelle à la géométrie bidimensionnelle dans l'étude de la cheminée solaire est une étape essentielle pour simplifier les modèles mathématiques. Cette transformation repose sur la symétrie axiale caractéristique de la cheminée solaire, où l'effet de l'écoulement de l'air et de la répartition de la chaleur se distribue de manière symétrique autour de l'axe principal du système, le domaine physique est donc représenté par la figure (II.2).

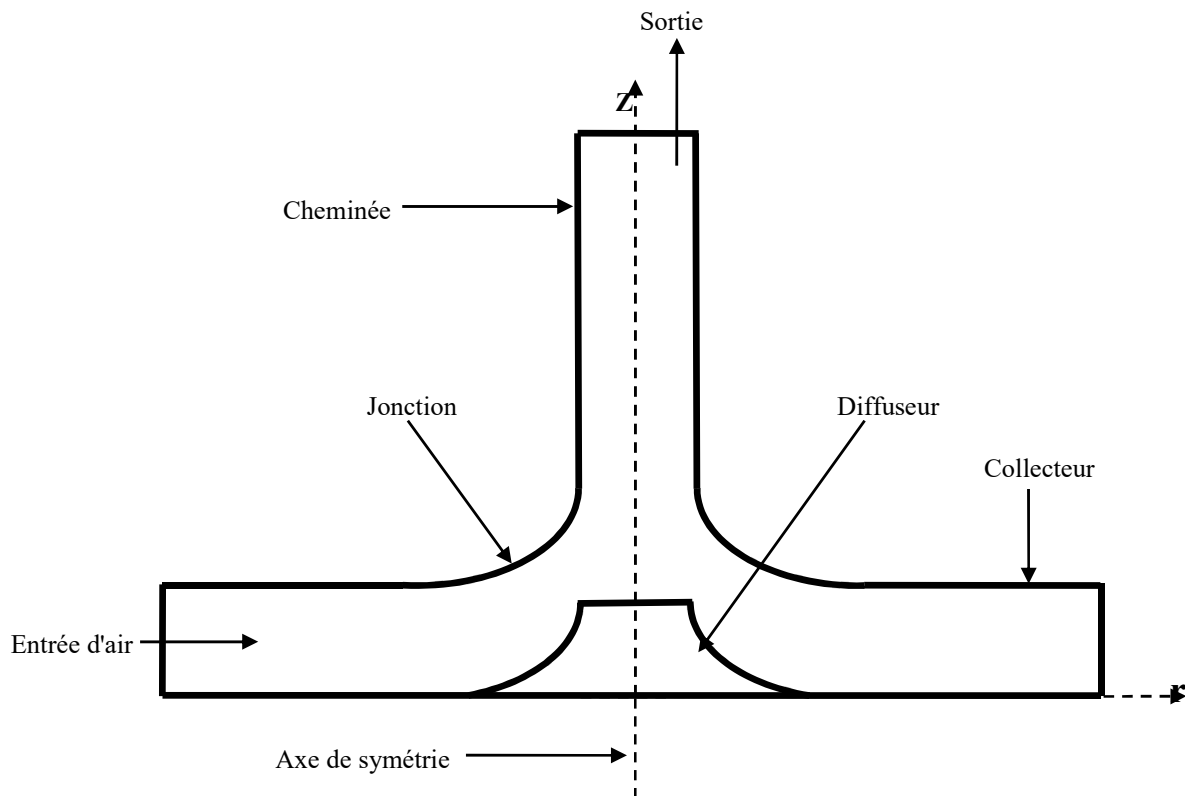


Figure II .2 : Géométrie bidimensionnelle de la cheminée solaire.

Les parois extérieures sont supposées être isothermes et maintenues à une température constante T_f , tandis que le sol est également considéré comme une paroi isotherme, mais à une température constante plus élevée T_c avec $T_c > T_f$.

II.3 Modèle mathématique général

Les équations mathématiques appropriés pour décrire cet écoulement sont les équations de Navier- stockes qui sont représentées par :

- **Equation de continuité :**

L'équation qui exprime la loi de conservation de la masse est la suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot \vec{v}) = 0 \quad (\text{II.1})$$

ρ : Densité du fluide.

\vec{v} : Vecteur vitesses

- **Equation du mouvement :**

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'exprimer l'équation du mouvement sous la forme suivante :

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} \vec{v}) \right) = -\vec{\nabla} p + \rho \vec{g} + \mu \Delta \vec{k} \quad (\text{II.2})$$

\vec{g} : Accélération de la pesanteur.

\mathbf{k} : Tenseur des contraintes.

\vec{v} : Vecteur vitesses.

p : Pression du fluide.

- **Equation de l'énergie :**

L'équation de conservation de l'énergie est dérivée du premier principe fondamental de la thermodynamique :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T) = \frac{\lambda}{\rho C_p} \Delta T \quad (\text{II.3})$$

Avec :

T : Température du fluide.

λ : Conductivité thermique du fluide.

C_p : Capacité calorifique à pression constante du fluide.

t : Temps.

II.4 Modèle mathématique en coordonnées cylindriques

Les équations générales sont définies comme suit dans les coordonnées cylindriques (r, θ, z) :

- **Equation de continuité :**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r V_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) + \left(V_r \frac{\partial \rho}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial \rho}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) = 0 \quad (\text{II.4})$$

- **Equation du mouvement :**

Selon la coordonnée (r)

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + V_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \rho g_r + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) - \frac{v_r}{r^2} + \right.$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \quad (\text{II.5})$$

Selon la coordonnée(θ)

$$\rho \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{v_r v_\theta}{r} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_\theta + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} \right) - \frac{v_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II.6})$$

Selon la coordonnée(Z)

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II.7})$$

• **Equation de l'énergie :**

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II.8})$$

II.5 Les hypothèses simplificatrices

- L'écoulement est supposé permanent et laminaire.
- Le fluide est supposé newtonien et incompressible.
- L'écoulement est supposé axisymétrique, $\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$
- La conduction et le rayonnement à travers le collecteur sont négligés.
- La dissipation de la viscosité et les forces de pression sont négligées dans l'équation de l'énergie.
- L'approximation de Boussinesq est utilisée pour les variations de la densité dans les termes de force volumique, directement corrélées à la température T. La température de référence T_0 contrôle les propriétés physiques du fluide, qui sont constantes dans les autres termes des équations.

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta_T (T - T_0)) \quad (\text{II.9})$$

Où ρ_0 : La densité à la température T_0 .

$$\beta_T = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial T} : \text{Le coefficient d'expansion volumique thermique.}$$

Selon les hypothèses mentionnées précédemment, le système d'équations est reformulé comme suit :

- **Equation de continuité :**

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rV_r)}{\partial r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (\text{II.10})$$

- **Equation du mouvement :**

Selon la coordonnée (r)

$$\rho \left(V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_r}{\partial r} \right) - \frac{V_r}{r^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II.11})$$

Selon la coordonnée(Z)

$$\rho \left(V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \beta_T \rho g_z (T - T_0) + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II.12})$$

μ : Viscosité cinétique.

- **Equation de l'énergie :**

$$V_r \frac{\partial T}{\partial r} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II.13})$$

$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$: Coefficient de diffusion thermique.

II.6 Conditions aux limites:

Les conditions aux limites sont présentées de la manière suivante :

- **À l'entrée de l'air :**

$$T = T_f, v_r, v_z = 0$$

- **À la sortie :**

$$\frac{\partial V_z}{\partial z} = \frac{\partial V_r}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$$

- **Conditions aux limites au sol et au niveau du diffuseur :**

$$T = T_c, v_r = 0, v_z = 0$$

- **Conditions aux limites au collecteur :**

$$T = T_f, v_r = 0, v_z = 0$$

Les conditions aux limites sont résumées sous la forme dans la figure (II.3) :

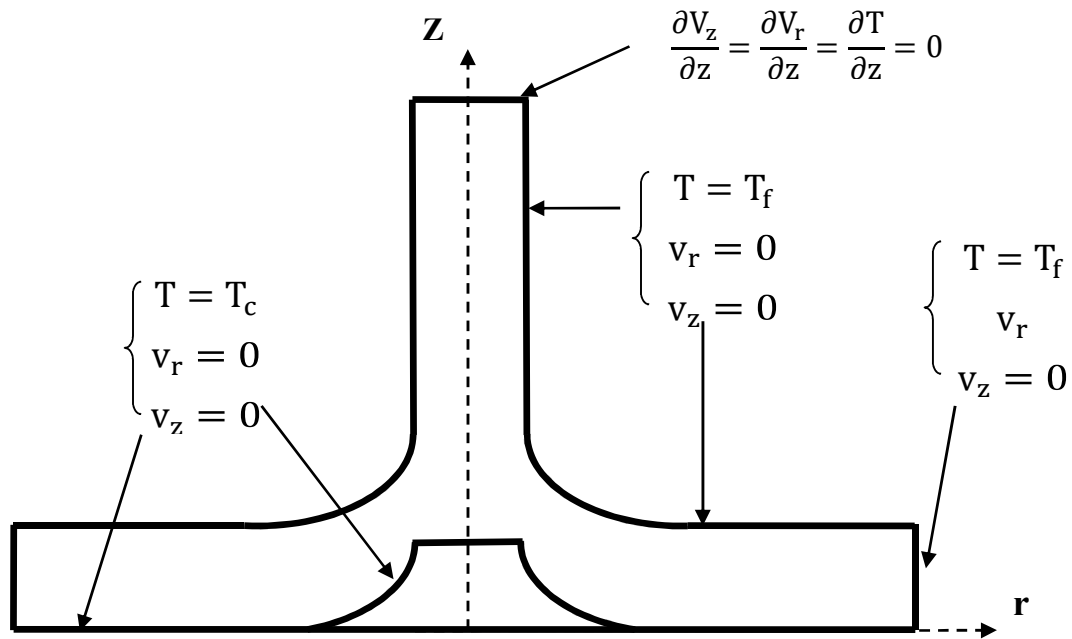


Figure II. 3 : Conditions aux limites

II.7 Formulation adimensionnelle:

II.7.1 Modèle mathématique adimensionnel

Nous pouvons écrire le modèle mathématique représenté par les équations précédentes sous forme adimensionnelle afin de pouvoir montrer les nombres adimensionnels à travers lesquels le phénomène physique est contrôlé et ceci en utilisant des critères de référence sélectionnés donnés comme suit :

$$\begin{aligned}
 r^+ &= \frac{r}{D} & z^+ &= \frac{z}{D} \\
 T^+ &= \frac{T - T_f}{T_c - T_f} & P^+ &= \frac{P}{\rho(\alpha/D)^2} \\
 V_z^+ &= \frac{V_z}{(\alpha/D)} & V_r^+ &= \frac{V_r}{(\alpha/D)}
 \end{aligned}$$

Nous obtenons les nombres adimensionnels qui sont le nombre de Prandtl P_r et le nombre de Rayleigh R_a

- Equation de continuité :

$$\frac{1}{r^+} \frac{\partial(r^+ V_r^+)}{\partial r^+} + \frac{\partial V_z^+}{\partial z^+} = 0 \tag{II.14}$$

- Equation du mouvement :

Selon la coordonnée(r)

$$V_r^+ \frac{\partial V_r^+}{\partial r^+} + V_z^+ \frac{\partial V_r^+}{\partial z^+} = -\frac{\partial p^+}{\partial r^+} + P_r \left(\frac{1}{r^+} \frac{\partial}{\partial r^+} \left(r^+ \frac{\partial V_r^+}{\partial r^+} \right) - \frac{V_r^+}{r^{+2}} + \frac{\partial^2 V_r^+}{\partial z^{+2}} \right) \tag{II.15}$$

Selon la coordonnée(Z)

$$V_r^+ \frac{\partial V_z^+}{\partial r^+} + V_z^+ \frac{\partial V_z^+}{\partial z^+} = -\frac{\partial p^+}{\partial z^+} + R_a \cdot P_r \cdot T^+ + P_r \left(\frac{1}{r^+} \frac{\partial}{\partial r^+} \left(r^+ \frac{\partial V_z^+}{\partial r^+} \right) + \frac{\partial^2 V_z^+}{\partial z^{+2}} \right) \tag{II.16}$$

- Equation de l'énergie :

$$V_r^+ \frac{\partial T^+}{\partial r^+} + V_z^+ \frac{\partial T^+}{\partial z^+} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left(\frac{1}{r^+} \frac{\partial}{\partial r^+} \left(r^+ \frac{\partial T^+}{\partial r^+} \right) + \frac{\partial^2 T^+}{\partial z^{+2}} \right) \tag{II.17}$$

II.7.2 Conditions aux limites adimensionnelles

Les conditions limites adimensionnelles sont résumées dans la figure (II.4) :

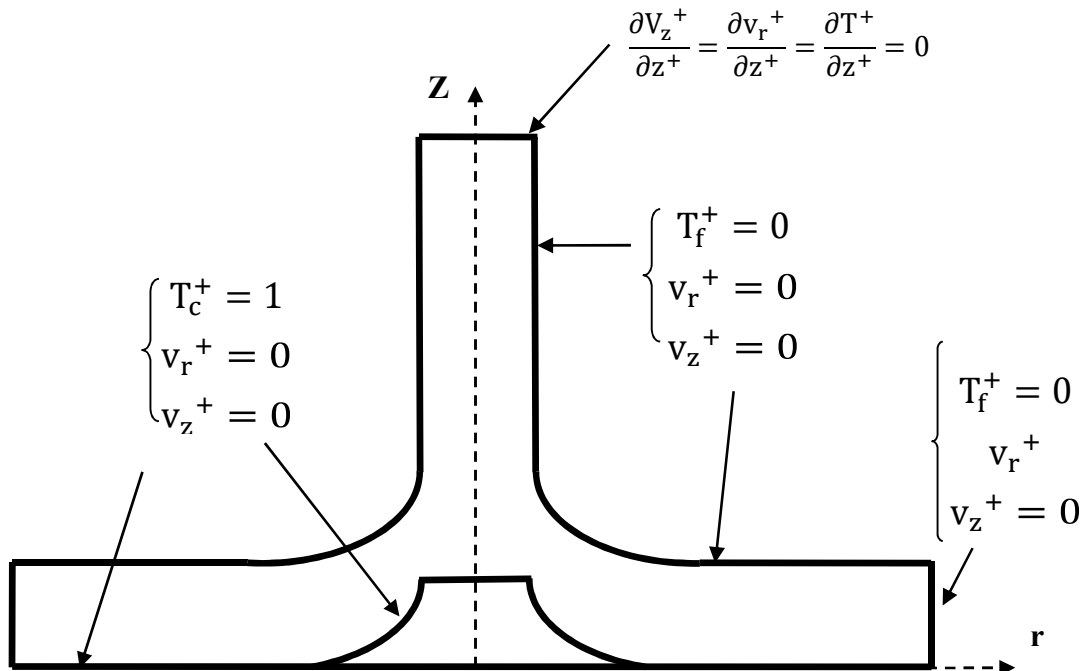


Figure II. 4 : Conditions aux limites adimensionnelles.

CHAPTRE III

INTRODUCTION AU LOGICIEL COMSOL

MULTIPHYSICS

III.1 Introduction

La solution du calcul numérique offre une alternative aux recherches physiques et aux études d'ingénierie qui seraient difficiles à réaliser expérimentalement et très compliquées analytiquement. En exploitant un logiciel de simulation numérique optimisé pour les processeurs d'ordinateurs, il est possible de résoudre un large éventail de problèmes tout en prenant en compte la géométrie, les paramètres physiques et les conditions aux limites spécifiques. Cette méthode permet d'effectuer des analyses détaillées et de modéliser des phénomènes complexes de manière plus rapide et économique par rapport aux approches expérimentales classiques.

Dans ce chapitre, une simulation numérique d'un écoulement du fluide par convection naturelle est développée à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics. Le modèle choisi est utilisé pour simuler le phénomène physique à l'intérieur de la cheminée solaire en résolvant les équations gouvernantes, exposées dans le chapitre précédent. Cette simulation permet d'analyser de manière approfondie les comportements thermiques et fluidiques au sein du système, offrant ainsi une meilleure compréhension du fonctionnement de la cheminée solaire et la possibilité d'optimiser ses performances en fonction des différentes conditions de fonctionnement.

III.2 Structure des logiciels CFD

Les logiciels de dynamique des fluides computationnelle (CFD) se divisent généralement en trois composants principaux [33] :

- **Préprocesseur : Modélisation et Maillage**

Le préprocesseur est responsable de la création du modèle géométrique et de son maillage. Cela inclut la définition de la forme et de la structure du domaine, ainsi que la discrétisation de cet espace en éléments plus petits pour permettre la résolution numérique des équations différentielles.

- **Solveur : Calcul Numérique**

Le solveur applique des méthodes numériques telles que les différences finies, les éléments finis, les volumes finis, ou les méthodes spectrales pour résoudre les équations gouvernantes du système. Ce processus permet de déterminer les valeurs des variables physiques (comme la pression, la température, la vitesse) sur chaque élément du maillage.

- **Post processeur : Analyse et Visualisation des Résultats**

Le post processeur prend les résultats du solveur et les présente sous forme graphique, permettant aux chercheurs et ingénieurs d'analyser et d'interpréter les résultats de manière claire et utile, généralement à travers des visualisations comme des graphiques, des courbes et des surfaces...etc.

III.3 Présentation de Comsol Multiphysics.

III.3.1 Méthode des Éléments Finis (FEM)

COMSOL utilise la méthode des éléments finis (FEM), qui permet de diviser un problème complexe en petites sections ou "éléments", pour résoudre des équations différentielles partielles (EDP). Cela rend possible l'analyse de phénomènes physiques variés de manière précise et efficace.

III.3.2 Avantages et Caractéristiques

- **Modélisation dans Divers Domaines Spatiaux:**

Comsol permet de résoudre des systèmes dans des domaines unidimensionnels, bidimensionnels et tridimensionnels, offrant ainsi une grande flexibilité dans la modélisation des problèmes complexes.

- **Couplage Multidimensionnel:**

Comsol permet de coupler des champs ayant des dimensions d'espace différentes dans le même problème, ce qui simplifie la modélisation et accélère le temps de mise en œuvre.

- **Interface Conviviale:**

Comsol se distingue par une interface conviviale, qui rend la simulation plus accessible et plus efficace pour les scientifiques et les ingénieurs, facilitant ainsi leur travail au quotidien.

III.3.3 Applications et Domaines d'Utilisation

Comsol est utilisé dans de nombreux domaines, y compris le transfert thermique, la géophysique, l'écoulement des milieux poreux, la propagation des ondes et la dynamique des fluides. Il est adapté à l'étude de phénomènes couplés, où plusieurs effets interagissent simultanément.

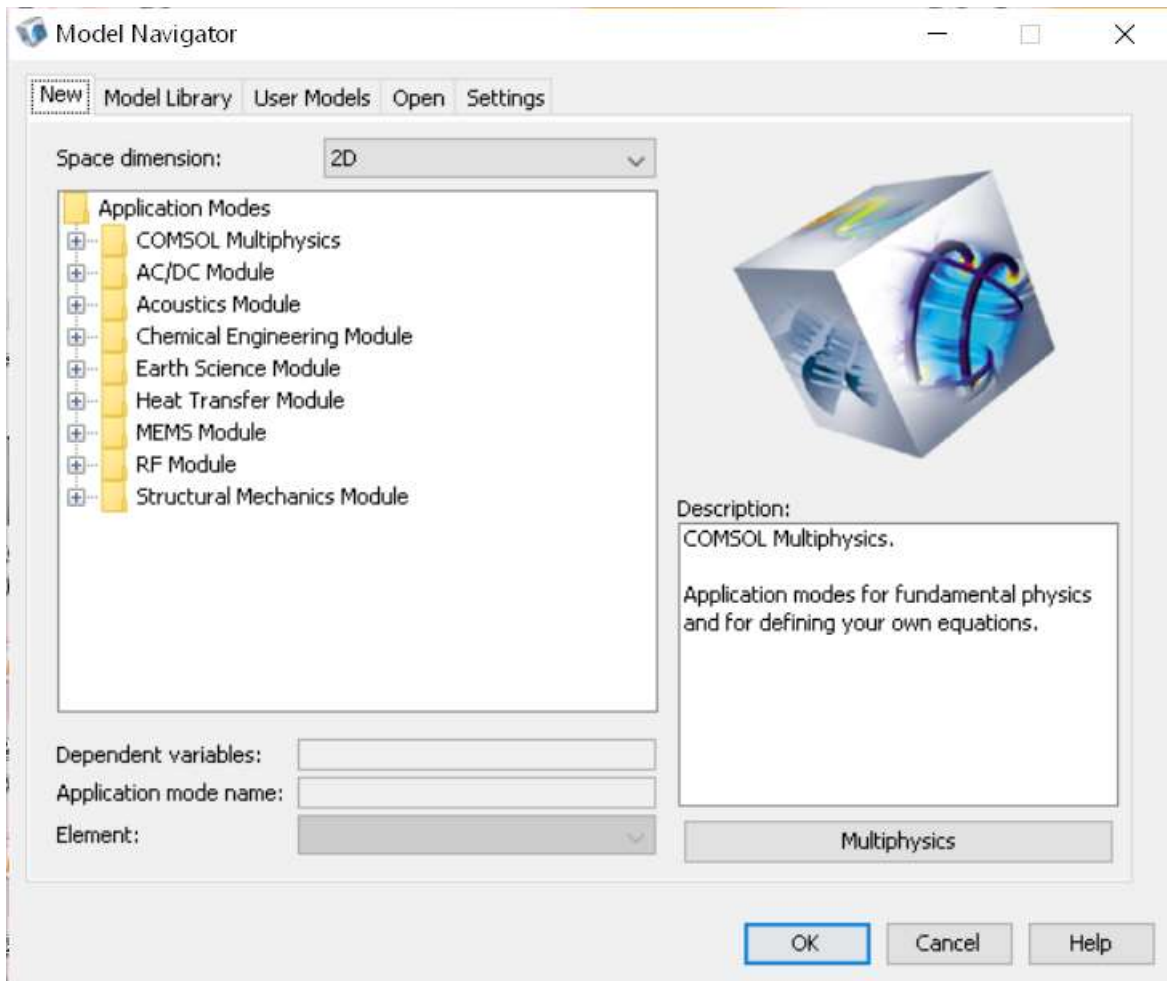


Figure III .1 : L'interface Comsol Multiphysics

III.4 Les étapes de simulation numérique

Étape 01 : Sélection du mode d'application.

La première étape consiste à choisir le mode et les dimensions spatiales appropriés (dans ce cas, 2D). Vous devez également sélectionner les variables de **Multiphysics**, puis cliquer sur le bouton « **Model Navigator** ». Dans notre cas, l'arbre du modèle contient les éléments suivants :

- Geom1 (2D):

- Incompressible Navier-Stokes (ns).
- Convection and conduction (cc).

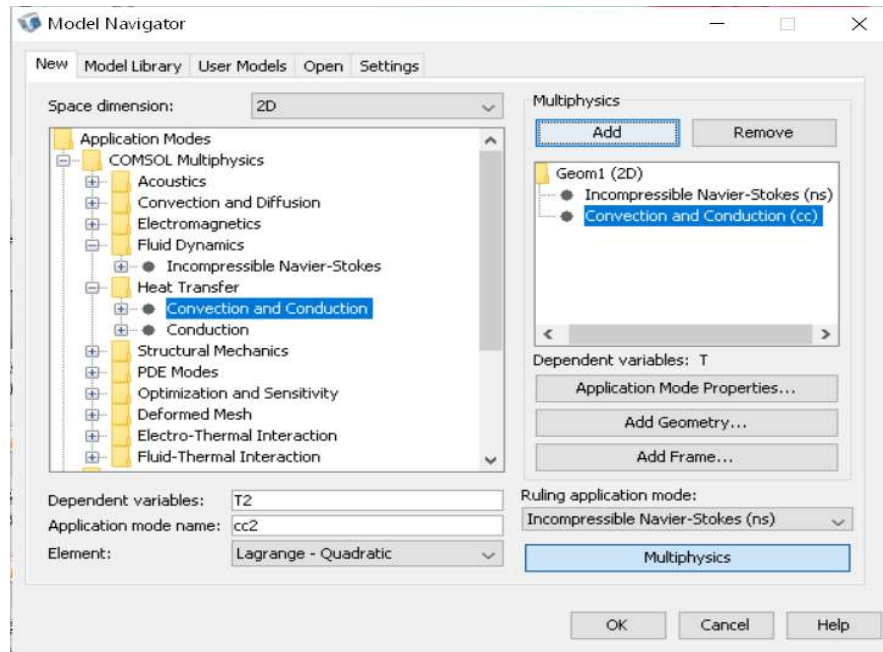


Figure III .2 : Fenêtre du navigateur du modèle.

Étape 02 : La création de la géométrie.

La géométrie physique est créée à l'aide des outils de conception disponibles dans le menu dessin. Un ensemble de lignes droites et de lignes courbes sont tracées, dimensionnées et combinées pour créer la forme de cheminée souhaitée, comme illustré ci-dessous.

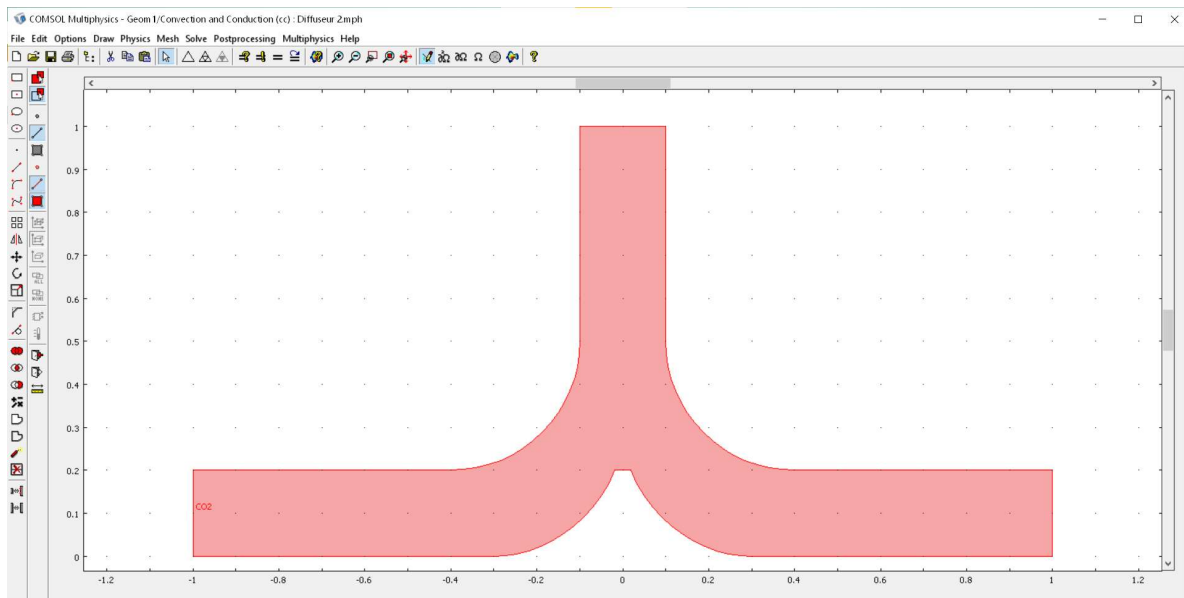


Figure III .3 : Création de la géométrie.

Étape 03: Saisie des constantes du modèle.

Cette étape permet de définir les constantes nécessaires en sélectionnant **Options**, puis **Constants** pour entrer les valeurs pertinentes.

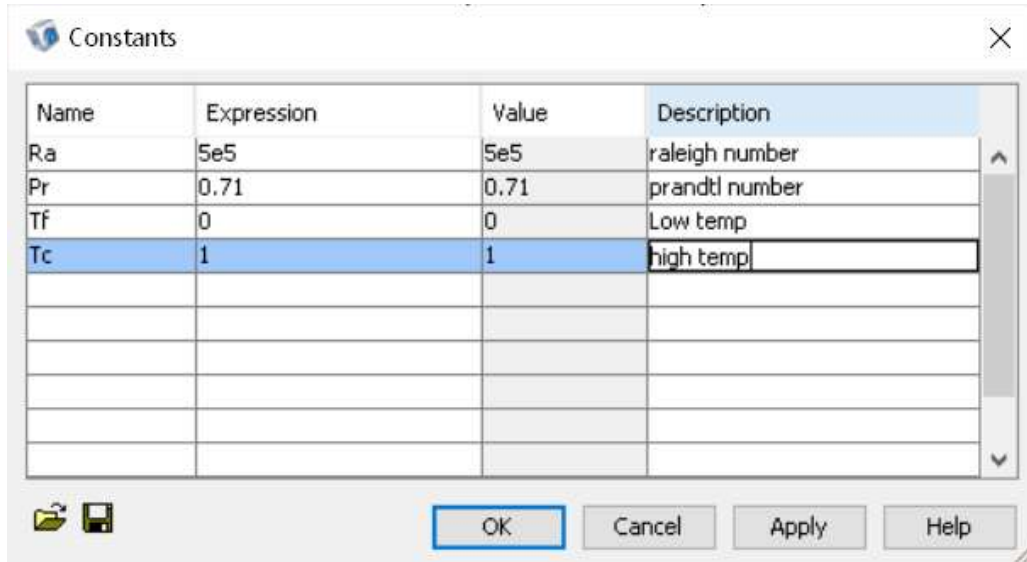


Figure III .4 : Saisie des constantes.

Étape 04 : Paramétrage du sous-domaine physique de chaque mode.

Le sous-domaine et les propriétés du fluide (dans ce cas sans dimension) pour chaque mode sont déterminés en cliquant sur **Physics** puis **Subdomain setting**.

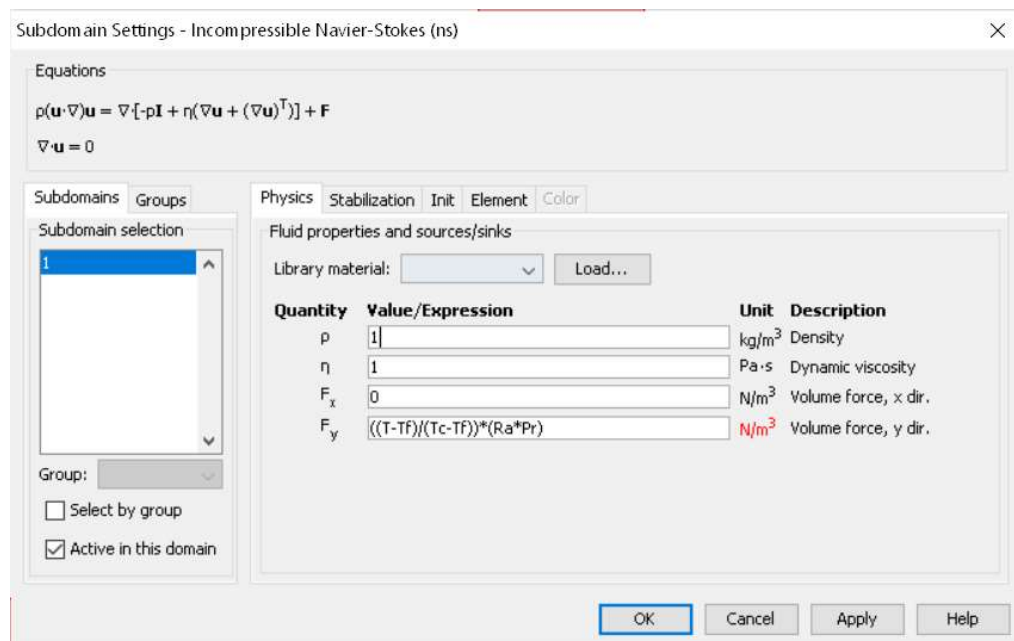


Figure III .5 : Fenêtre de réglage du sous-domaine en mode Navier-stokes incompressible.

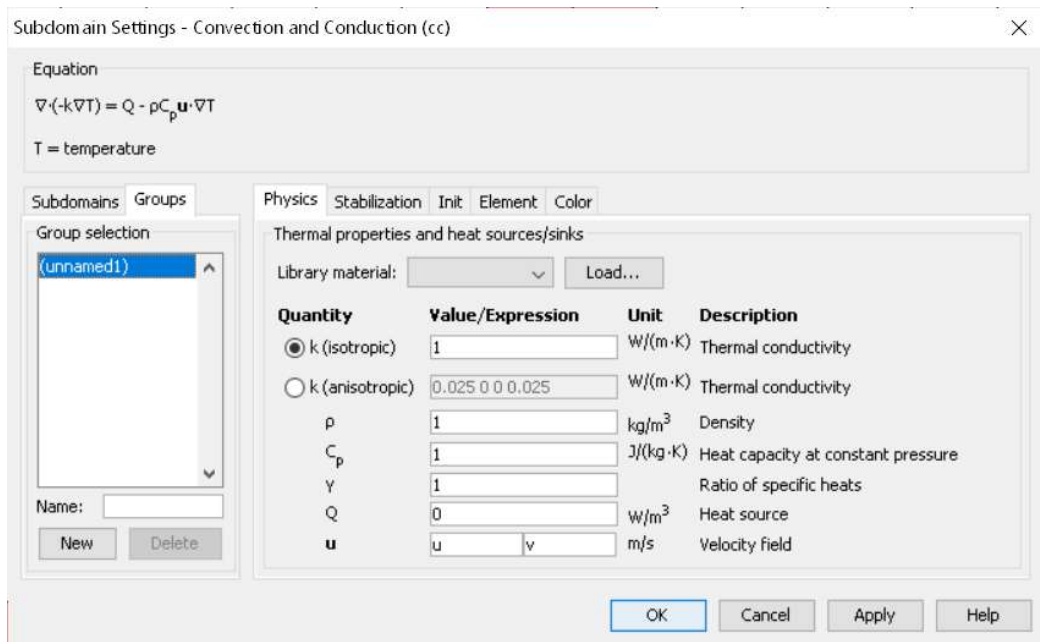


Figure III .6 : Fenêtre de réglage du sous-domaine en mode convection et conduction.

Étape 05 : Sélection des conditions limites de chaque mode.

Les conditions limites sont définies dans la fenêtre **Boundary setting**, puis spécifiez les conditions d'entrée, de sortie, de diffuseur, de sol et de cheminée, et cliquez sur **Apply**.

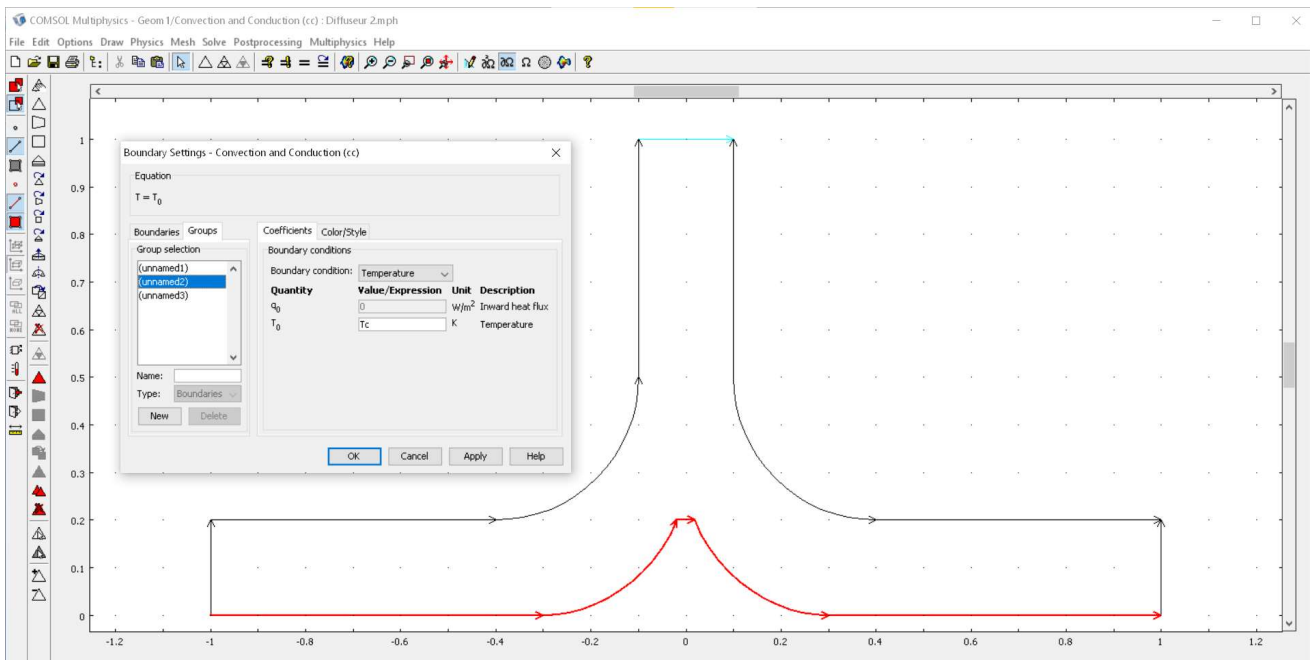


Figure III .7 : Définition des conditions aux limites en convection et conduction pour le sol et diffuseur.

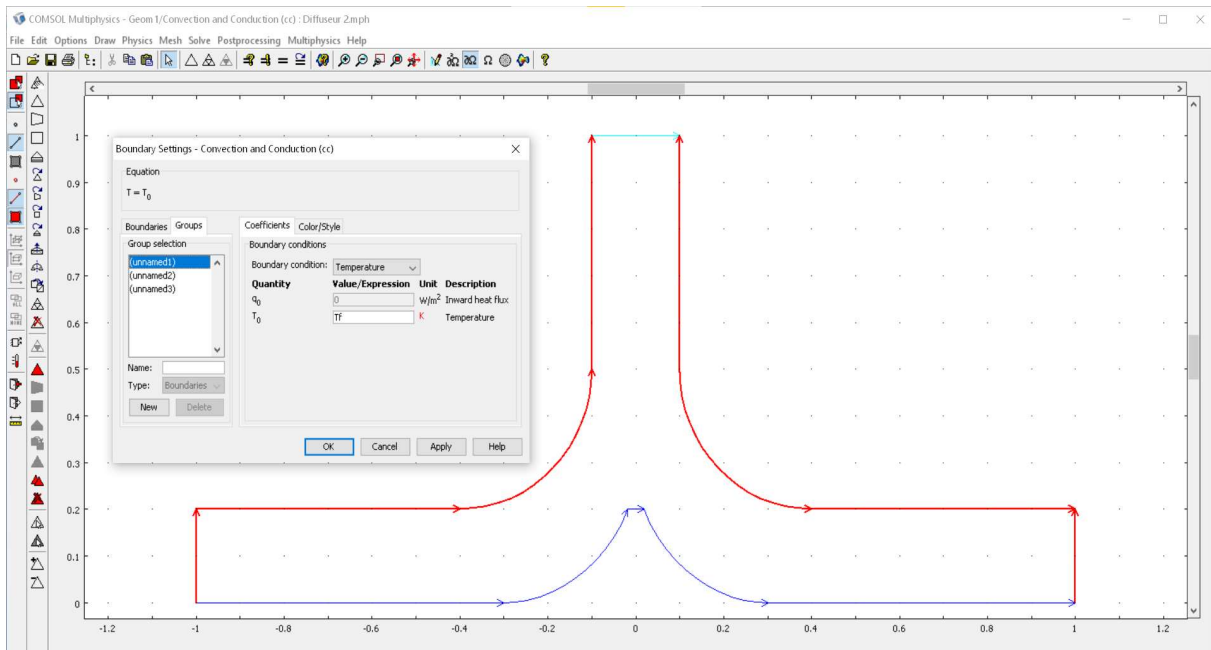


Figure III.8 : Définition des conditions aux limites en mode convection and conduction l'entrée et la cheminée.

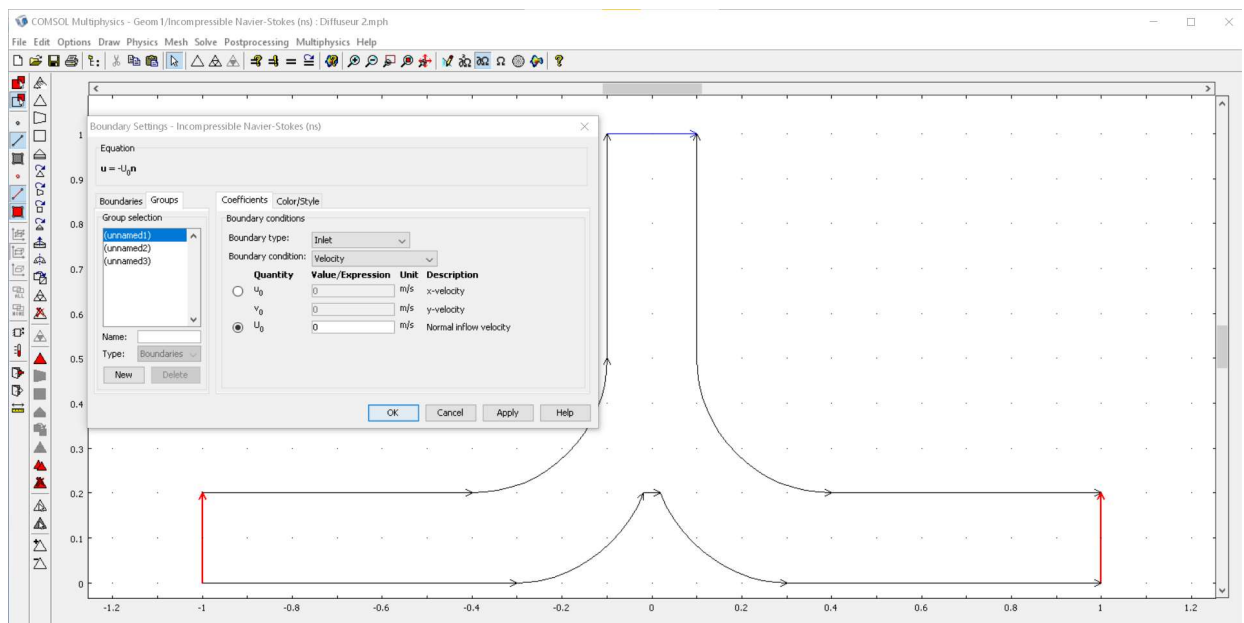


Figure III.9 : Définition des conditions aux limites en mode incompressible Navier-stokes pour l'entrée.

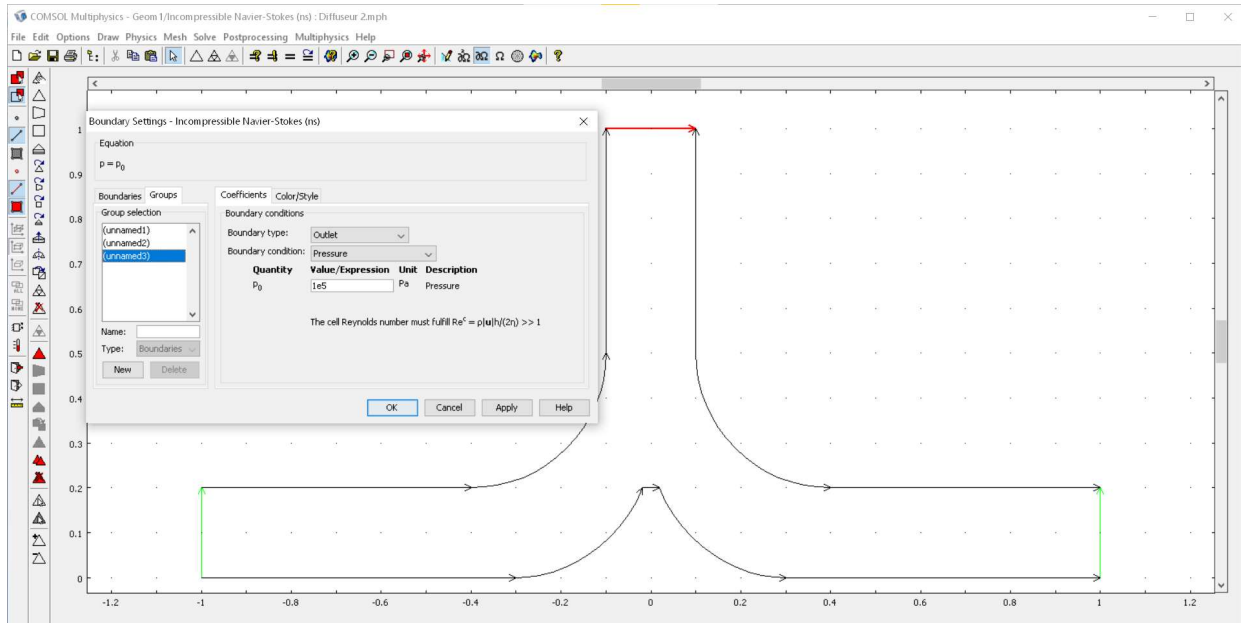


Figure III .10 : Définition des conditions aux limites en mode incompressible Navier-stokes pour la sortie.

Étape 06 : Maillage de la géométrie.

Dans cette étape, le maillage est généré en sélectionnant l'option **Mesh** dans la barre d'outils, puis **initialize mesh**. Ensuite, **refine mesh** pour une meilleure précision.

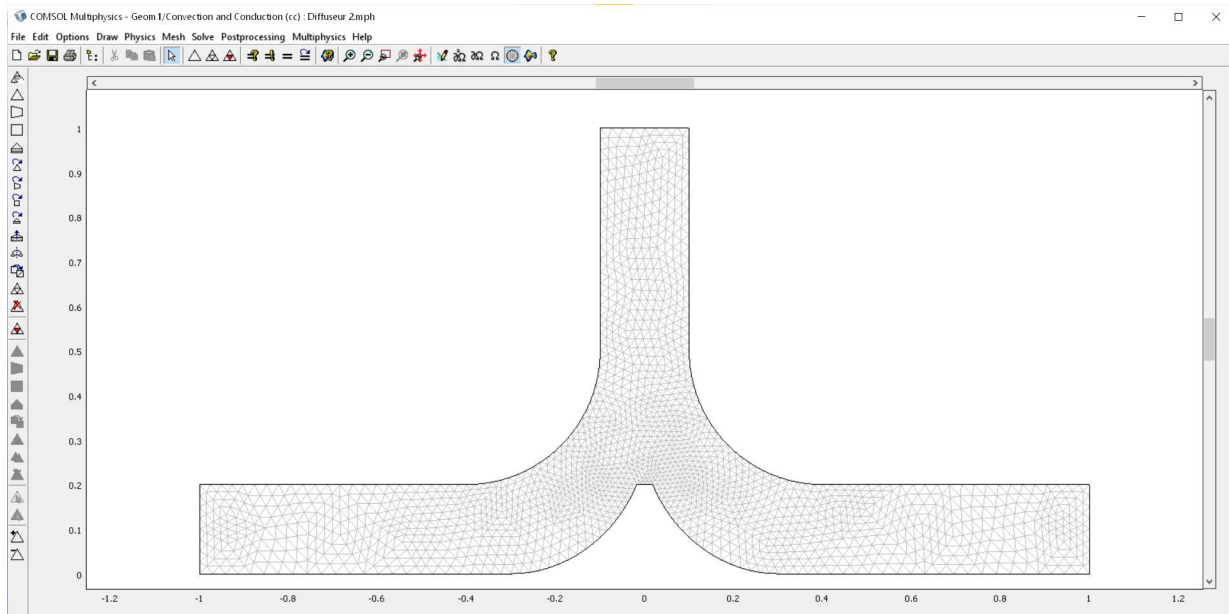


Figure III .11 : Fenêtre de maillage affiné.

Étape 07 : Résolution du modèle.

Certaines propriétés du solveur ont été ajustées. Pour ce faire, sélectionnez l'option **Solver Parameters** dans la barre de menu **Solve**.

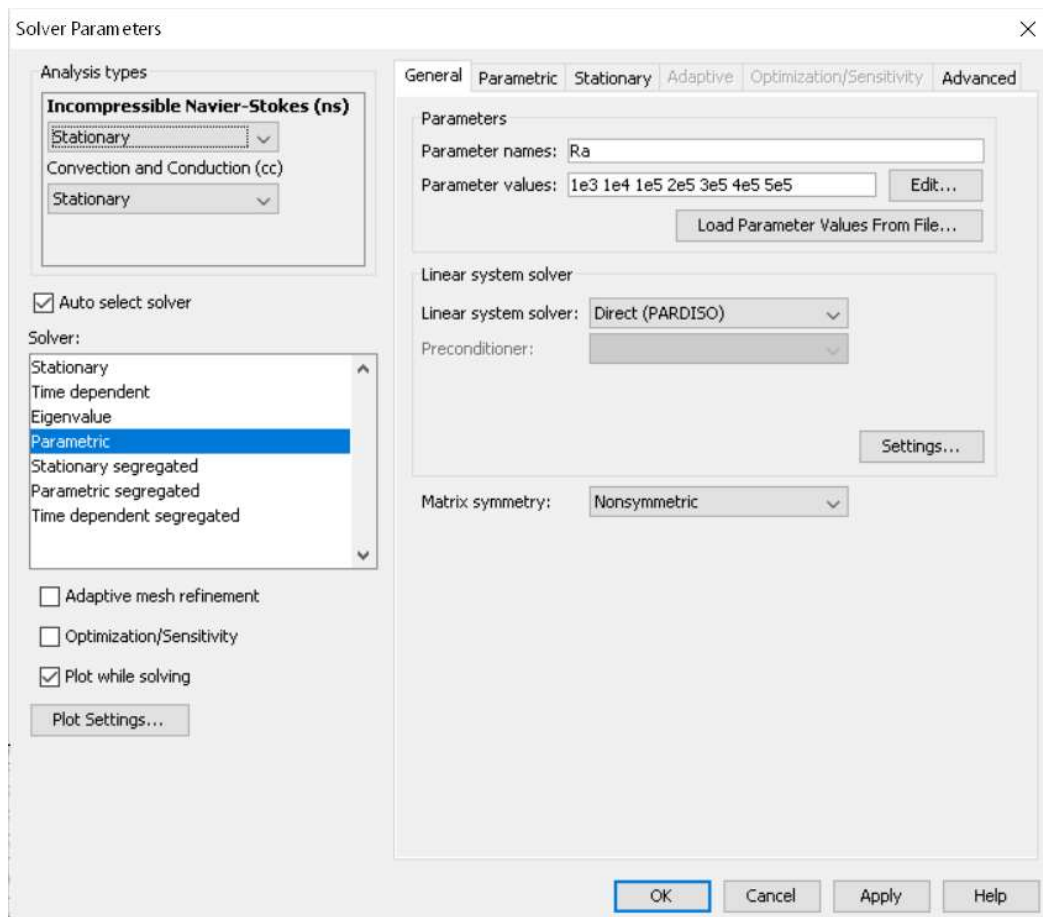


Figure III .12 : Fenêtre des paramètres du solveur.

Étape 08 : Résultats de la simulation.

Les résultats peuvent être affichés en cliquant sur **solve problem** dans la barre d'outils **solve**.

Vous pouvez également sélectionner les résultats à analyser, par exemple la température ou la vitesse, en cliquant sur **postprocessing**, puis **plot parameters**.

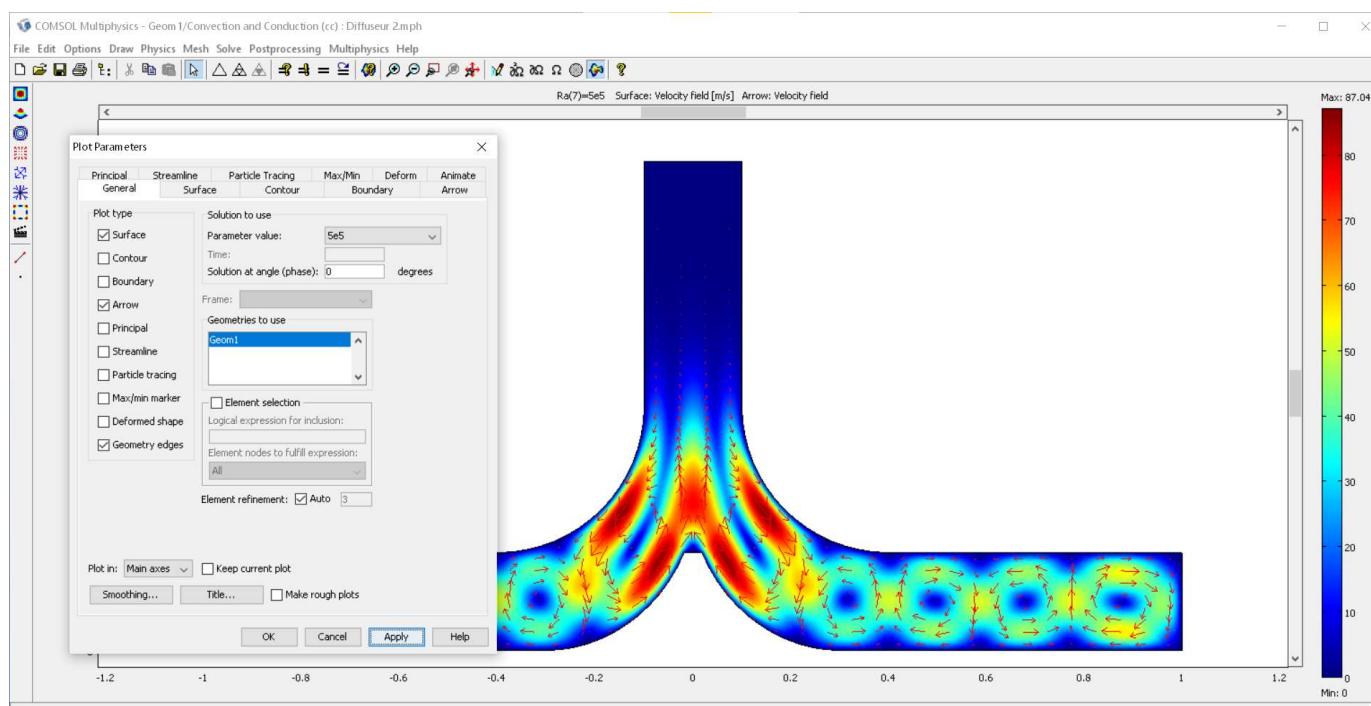


Figure III .13 : Affichage et sélection de différents résultats de simulation.

CHAPITRE IV
RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, les résultats de l'effet des paramètres géométriques du diffuseur sur l'évolution du flux d'air à l'intérieur de la cheminée solaire sont présentés. Deux cas différents sont analysés, le premier est celui d'une cheminée sans diffuseur avec ($h_d/h_c = 0$) et le second est le cas d'une cheminée avec diffuseur ($h_d/h_c = 1$). Dans ces deux cas, l'effet de la vitesse de l'air extérieur sur les champs de température et de vitesse non dimensionnels est étudié. Son effet sur la vitesse verticale de l'air, qui est le principal facteur affectant directement les performances de la turbine qui produit de l'énergie, est également étudié.

IV.2 Cas d'une cheminée solaire sans diffuseur ($h_d/h_c = 0$) :

IV.2.1 Effet de la vitesse de l'air extérieur (V_{Ext}) sur les champs de températures et de vitesses.

Les figures jointes illustrent un passage dynamique du modèle de transfert de chaleur à l'intérieur d'une cheminée solaire conçue sans diffuseur, où les gradients des lignes isothermes et le champ de vitesse adimensionnel sont analysés en détail. Cette étude a été réalisée en maintenant une valeur constante de Rayleigh, tandis que la vitesse de l'air extérieur est modifiée progressivement.

Dans le cas initial, lorsque la vitesse extérieure est nulle, comme le montre la figure 1, on observe une déformation marquée des lignes isothermes, ce qui indique que la convection naturelle est le mécanisme principal du transfert de chaleur. Cette déformation se manifeste sous forme de distorsion des lignes isothermes sous forme de vagues, où la température diminue progressivement de la surface chaude de la terre vers le plafond froid du collecteur thermique. La figure 2 montre le champ de vitesse où on constate l'effet de la convection naturelle par la formation de cellules de rotation opposées, où l'air circule dans des directions opposées, ce qui indique une instabilité du flux thermique. La cellule primaire ascendante est particulièrement importante, car elle contribue à générer le flux d'air en dirigeant l'air chaud vers le sommet de la cheminée. De plus, la vitesse adimensionnelle maximale qui atteint la valeur de 135.

Lorsque la vitesse extérieure est augmentée progressivement à 0,1 m/s, comme indiqué dans la figure 3, la distorsion des lignes isothermes diminue, ce qui suggère un affaiblissement de l'effet de la convection naturelle. Toutefois, la convection reste le principal mécanisme de transfert de chaleur, car la différence de température entre le sol et le plafond est encore suffisamment élevée pour générer des courants thermiques significatifs. La figure 4 montre une réduction notable des

cellules de rotation opposées, ce qui indique que l'écoulement devient plus stable due aux courants d'air extérieurs. Avec une augmentation plus importante de la vitesse extérieure, comme montré dans la figure 5, les distorsions des isothermes entre le sol et le collecteur disparaissent et des plaques parallèles commencent à se former, ce qui reflète une transition vers un transfert de chaleur par pseudo conduction. Dans la figure 6, on observe une disparition progressive des cellules rotatives et une réduction de la hauteur de la cellule primaire, ce qui confirme la diminution de l'effet de la convection naturelle.

Dans les figures 7 et 8, les lignes isothermes prennent la forme de plaques parallèles dans la zone de collecte thermique, et les cellules convectives de vitesse disparaissent presque entièrement, laissant la cellule primaire comme un indicateur faible de la convection. Enfin, dans les figures 9 et 10, la pseudo-conduction avec une convection thermique dominée par le flux d'air extérieur devient le mécanisme dominant du transfert de chaleur et génère un écoulement similaire à la convection mixte. Ces évolutions montrent comment le mécanisme de transfert de chaleur passe de la convection naturelle pure comme mécanisme principal à un régime mixte en tant que mécanisme dominant le transfert de chaleur et l'écoulement de l'air avec l'augmentation de la vitesse extérieure. À faible vitesse extérieure, la convection naturelle est le moteur principal du flux d'air, tandis qu'à des vitesses élevées, l'écoulement forcé devient prédominant. Comprendre ces dynamiques est essentiel pour optimiser la conception d'une cheminée solaire, permettant ainsi d'ajuster les paramètres de conception en fonction des conditions de fonctionnement variables pour garantir une efficacité maximale.

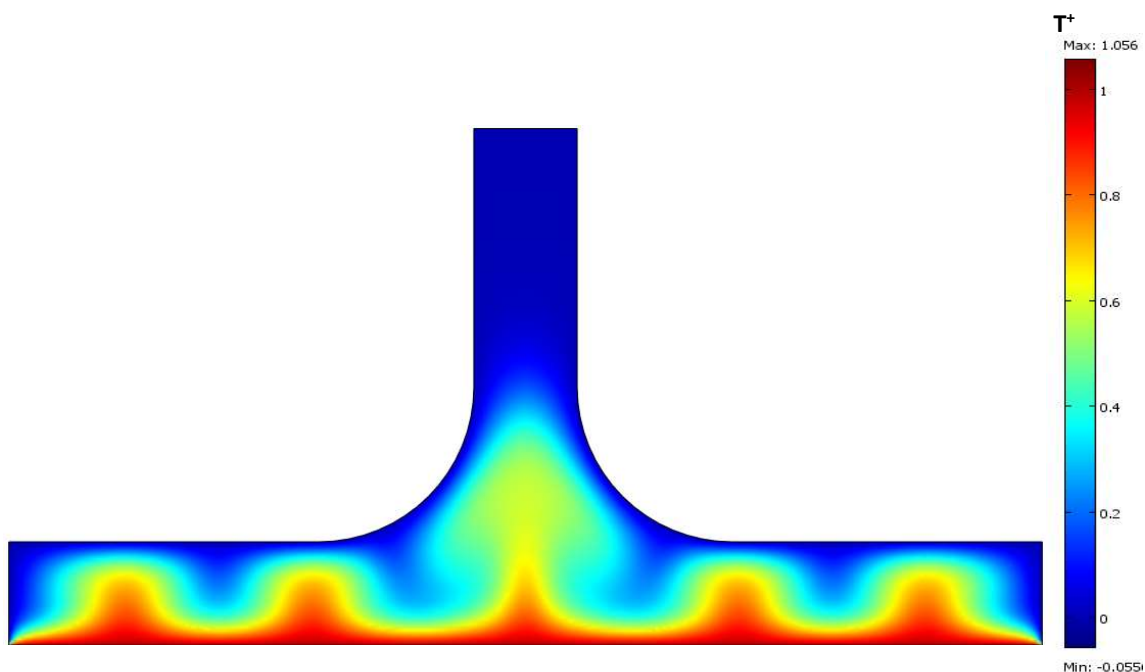


Figure IV.1 : Champ de températures pour $h_d/h_c = 0$, $V_{Ext} = 0$ m/s, $Ra = 5 \times 10^5$

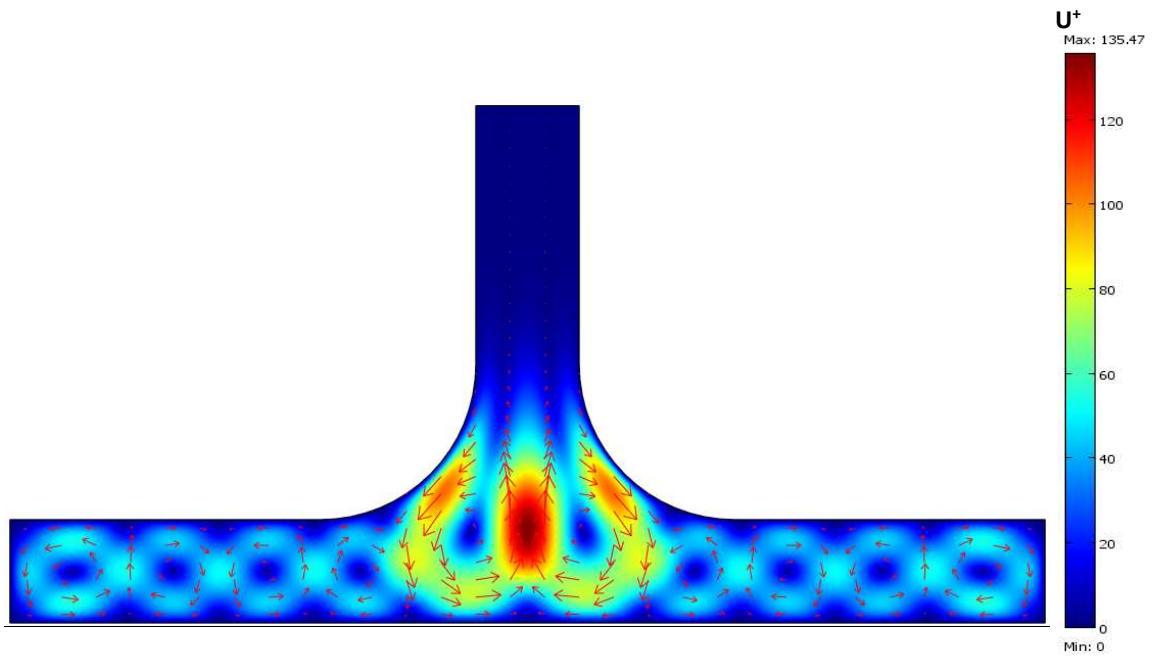


Figure IV.2: Champ de vitesses pour $h_d/h_c = 0$, $V_{Ext} = 0$ m/s, $Ra = 5 \times 10^5$

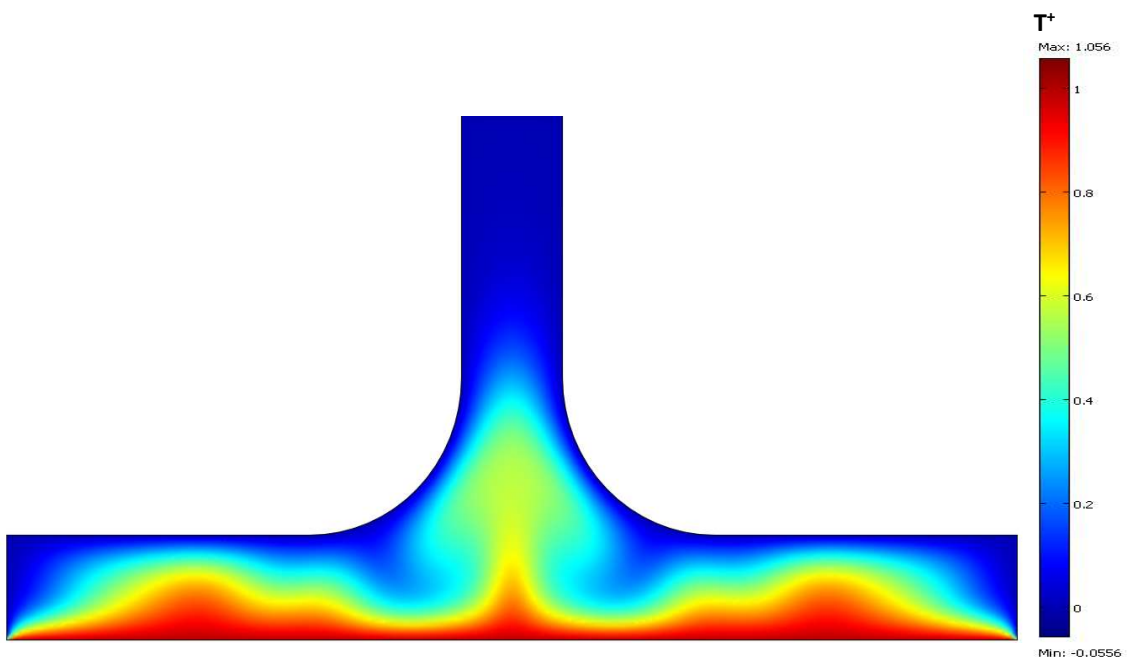


Figure IV.3: Champ de températures pour $h_d/h_c = 0$, $V_{Ext} = 0.1$ m/s, $Ra = 5 \times 10^5$

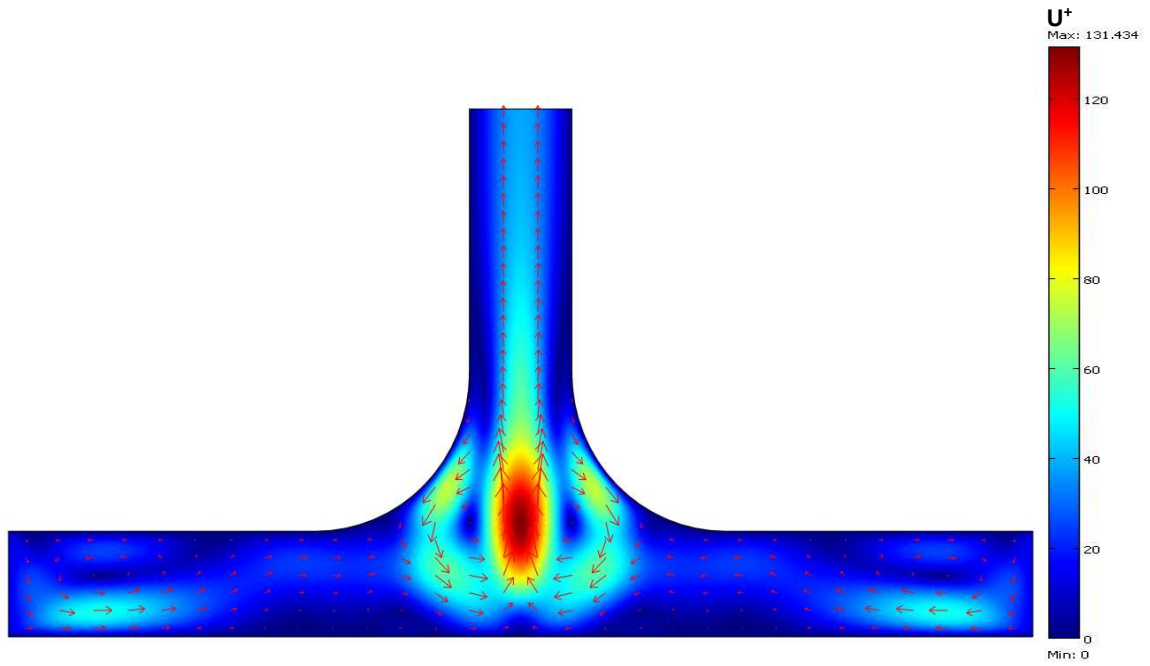


Figure IV.4: Champ de vitesses pour $h_d/h_c = 0$, $V_{Ext} = 0.1$ m/s, $Ra = 5 \times 10^5$

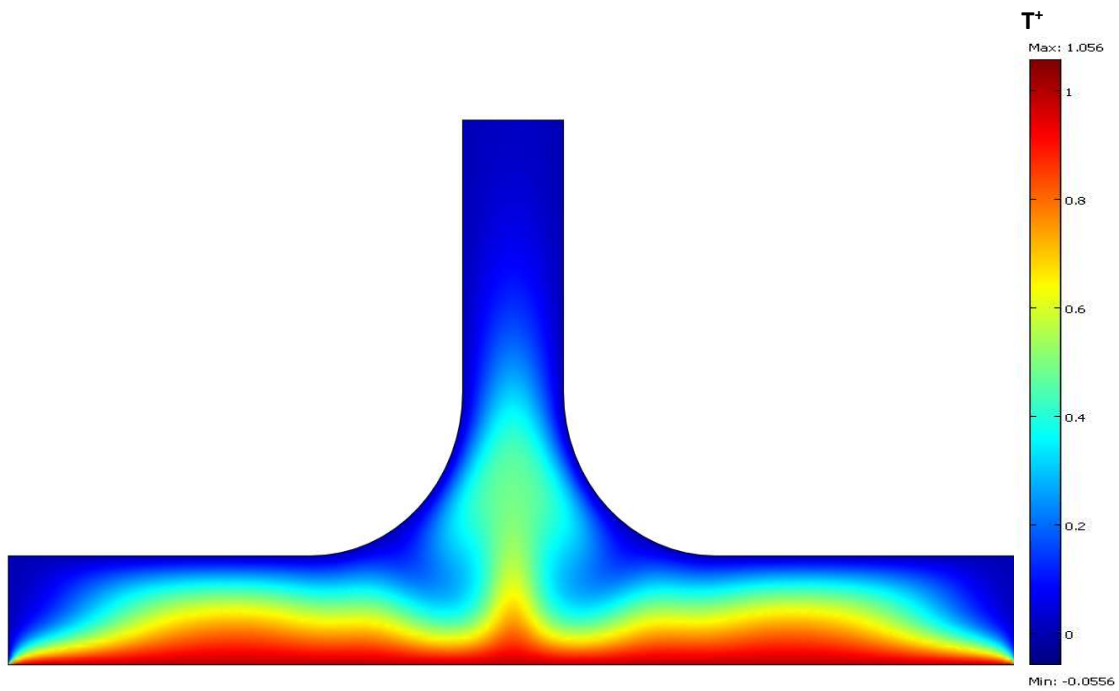


Figure IV.5: Champ de températures pour $h_d/h_c = 0$, $V_{Ext} = 0.28$ m/s, $Ra = 5 \times 10^5$

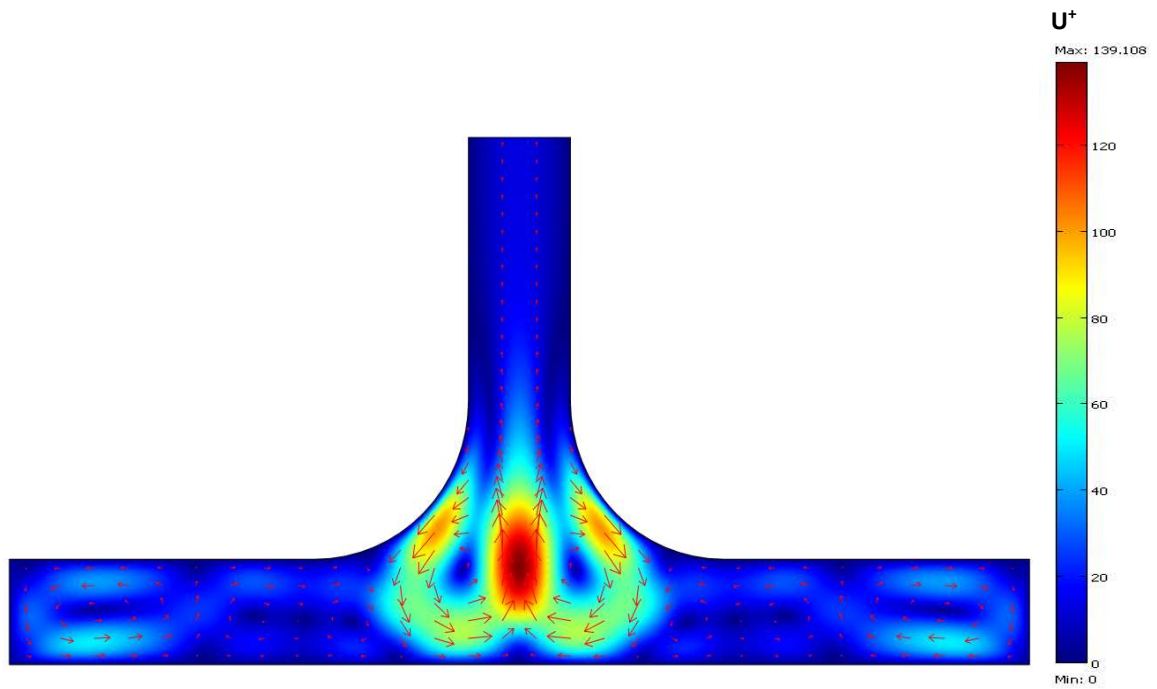


Figure IV.6 : Champ de vitesses pour $h_d/h_c = 0$, $V_{Ext} = 0.28$ m/s, $Ra = 5 \times 10^5$

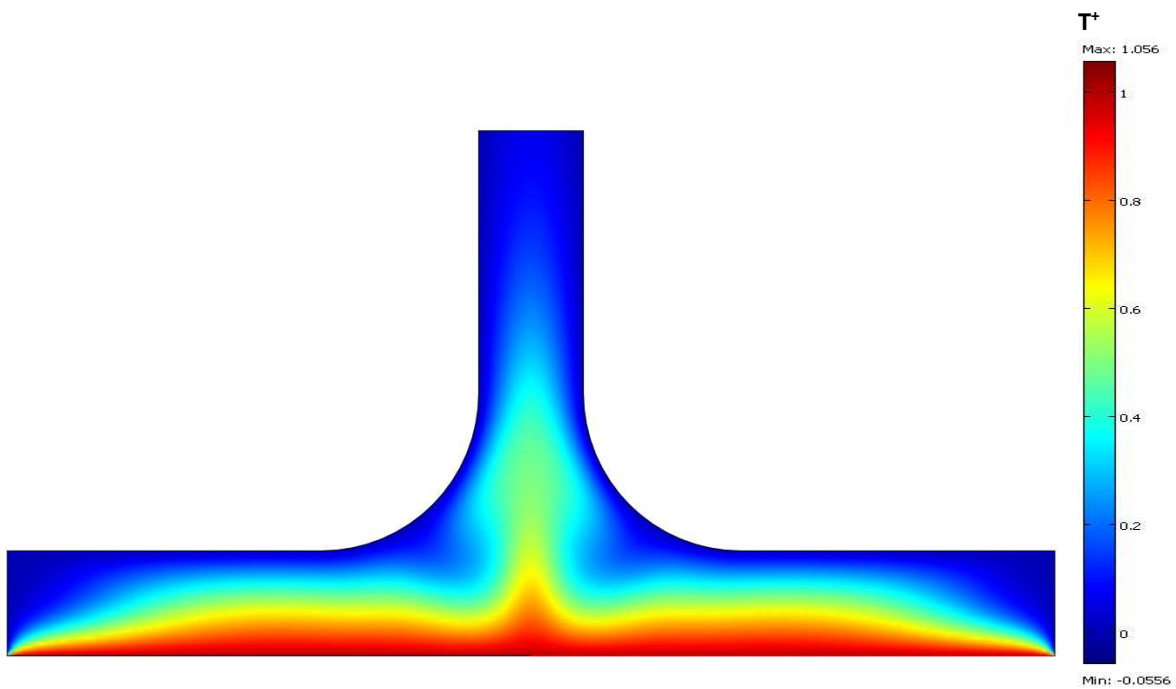


Figure IV.7 : Champ de températures pour $h_d/h_c = 0$, $V_{Ext} = 0.5$ m/s, $Ra = 5 \times 10^5$

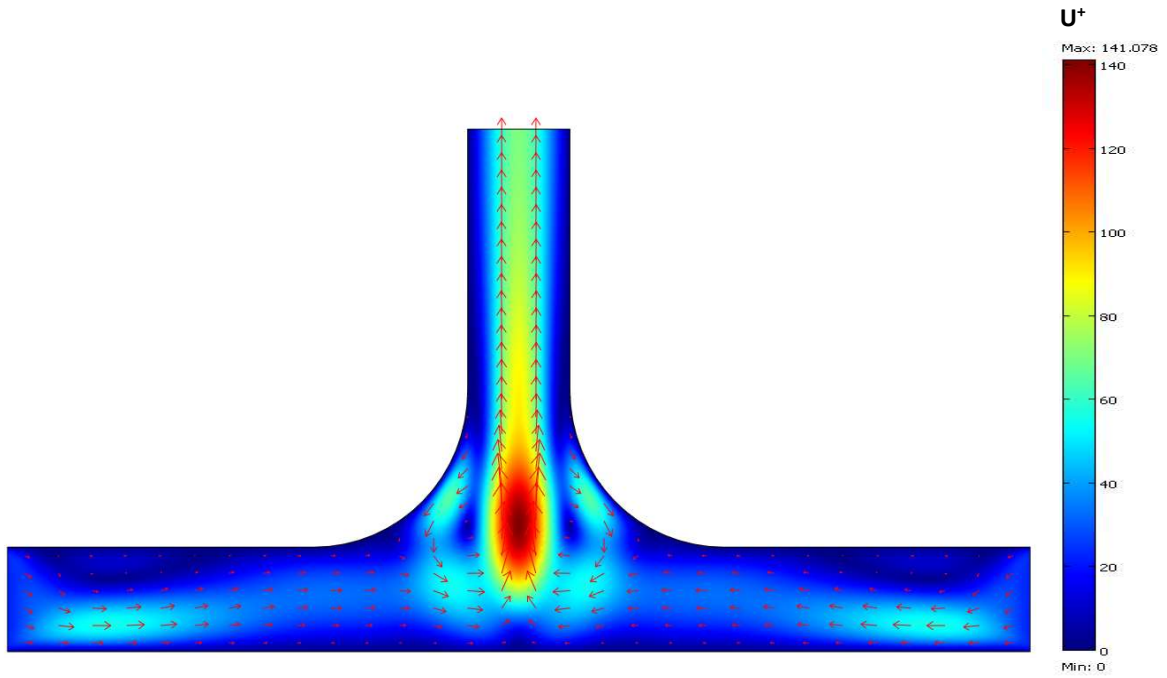


Figure IV.8 : Champ de vitesses pour $h_d/h_c = 0$, $V_{Ext} = 0.5$ m/s, $Ra = 5 \times 10^5$

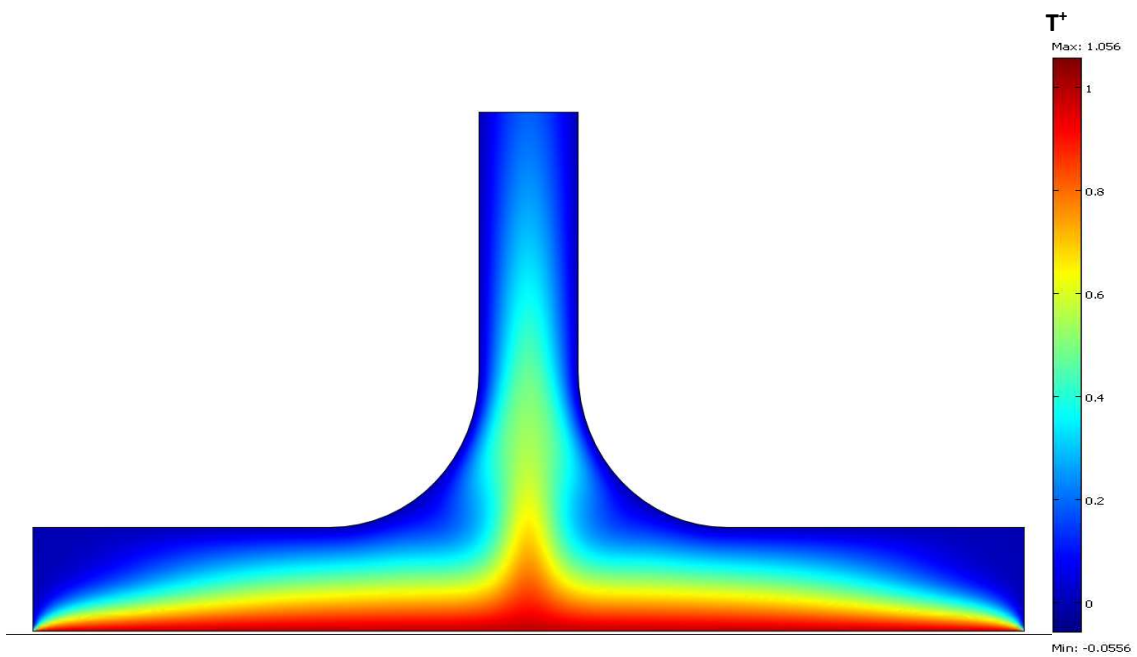


Figure IV.9 : Champ de températures pour $h_d/h_c = 0$, $V_{Ext} = 1$ m/s, $Ra = 5 \times 10^5$

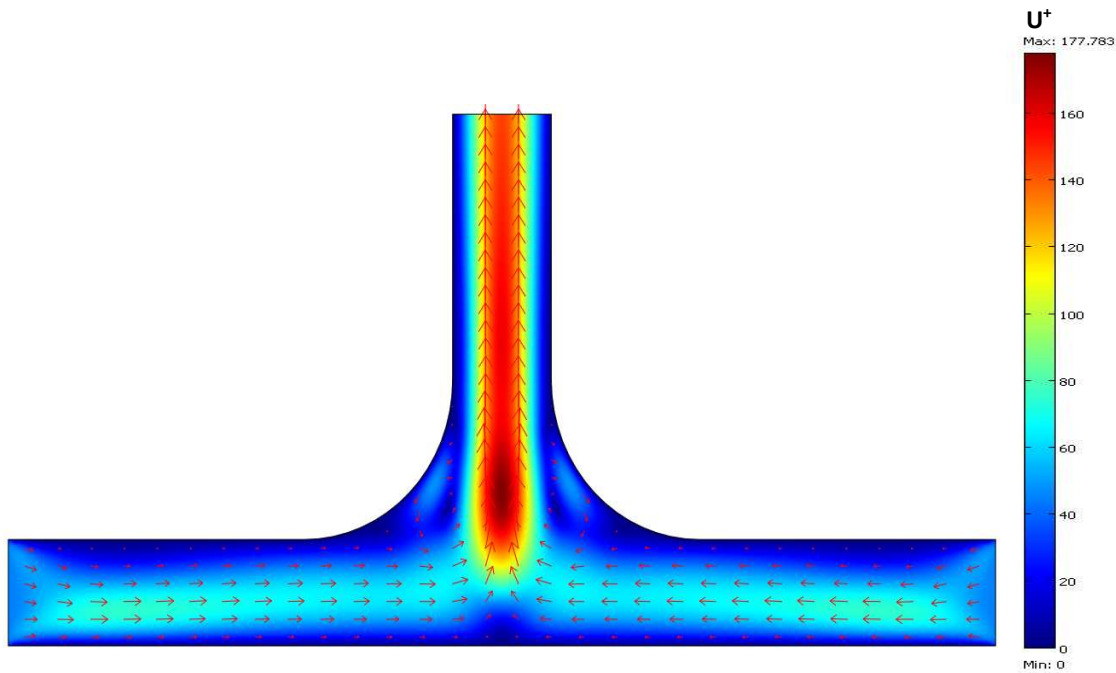


Figure IV.10 : Champ de vitesses pour $h_d/h_c = 0$, $V_{Ext} = 1$ m/s, $Ra = 5 \times 10^5$

IV.2.2 Effet de la vitesse de l'air extérieur (V_{Ext}) sur la vitesse verticale (V_z^+).

La figure 11 offre une vue d'ensemble de l'impact de la vitesse extérieure (V_{Ext}) sur la composante vertical de la vitesse (V_z^+) à l'intérieur de la cheminée solaire, en maintenant un rapport fixe de hauteur du diffuseur ($h_d/h_c = 0$) et un nombre de Rayleigh ($Ra = 5 \times 10^5$). La figure 11(a) montre la variation le long de l'axe vertical (z), tandis que la figure 11(b) illustre la variation radiale le long du rayon (r).

La figure 11(a) montre que pour le cas où la vitesse extérieure est nulle, le mécanisme principal de l'écoulement d'air dans la cheminée solaire est la convection naturelle pure. Avec l'augmentation de la vitesse extérieure (V_{Ext}), nous observons une augmentation progressive de la vitesse (V_z^+) le long de la cheminée, ce qui reflète l'augmentation de l'effet combiné entre la convection naturelle et le flux forcé généré par la vitesse extérieure. Tandis que le pic de la vitesse qui correspond à l'entrée de la cheminée au niveau de la jonction $z = 0.2$ reste presque le même, à l'exception du cas de la vitesse extérieure $V_{Ext} = 1$ m/s où la vitesse vertical augmente drastiquement. Cela améliore la distribution de l'air à l'intérieur de la cheminée et augmente la stabilité du flux, réduisant ainsi les perturbations dues à la convection naturelle. Avec l'augmentation de la vitesse extérieure, le flux devient plus uniforme et moins perturbé ainsi que la vitesse verticale qui fait tournée la turbine augmente significativement.

La figure 11(b) illustre la variation radiale de la vitesse (V_z^+) qui présente une variation symétrique à double pic de vitesse négative inférieure à la valeur absolue de la vitesse au centre de la cheminée. Cela indique la présence de cellules de rotation opposées dans la direction radiale, ce qui résulte de l'instabilité de la convection naturelle dans la cheminée. Dans ce cas, l'air chaud ascendant du centre interagit avec l'air froid descendant sur les bords, ce qui conduit à la formation de courants opposés et à la création de cellules de rotation sur l'axe radial.

Avec l'augmentation de la vitesse extérieure, les pics négatifs diminuent progressivement, ce qui indique la disparition des cellules de rotation latérales. Par contre, le pic au centre n'augmente que légèrement. Cela montre que l'effet forcé de la vitesse extérieure renforce le flux d'air au centre du puits en conduisant à un écoulement d'air plus stable et unidirectionnel au niveau de la partie horizontale de la cheminée solaire.

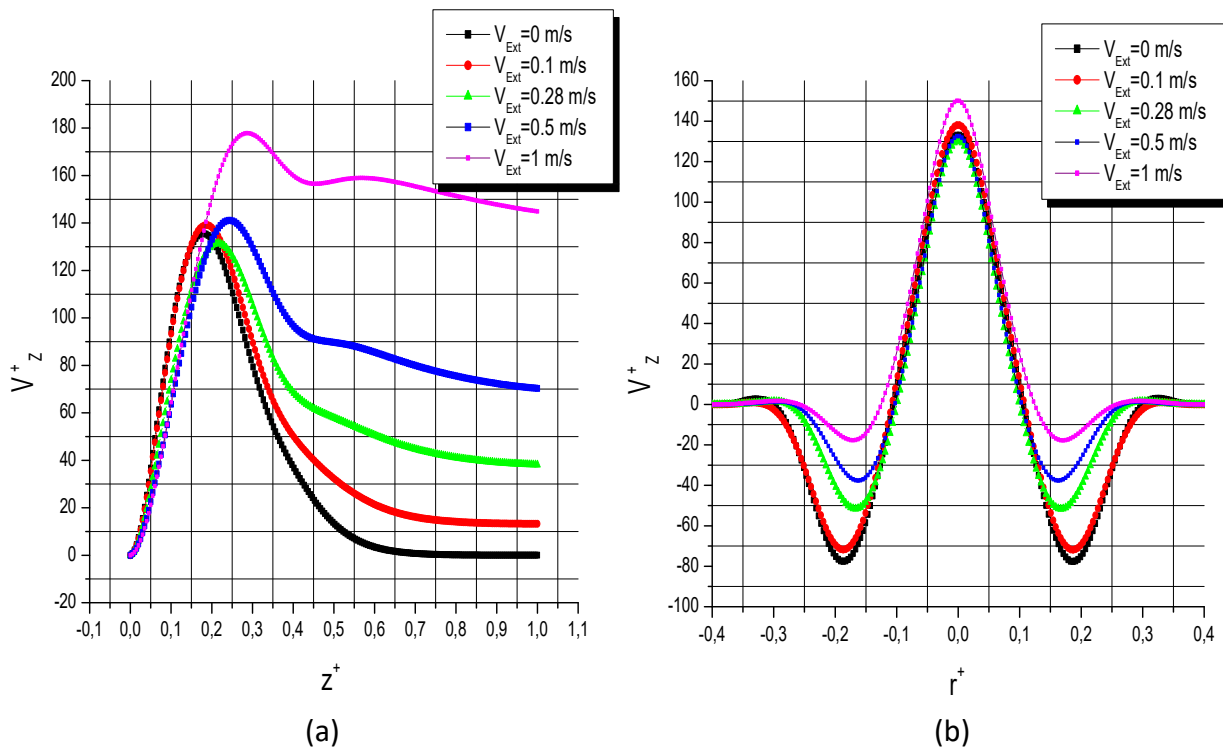


Figure IV.11 : Les variations axiale (a) et radiale (b) de la composante de vitesse verticale (V_z^+) en fonction de (V_{Ext}) pour $h_d/h_c=0$, $Ra=5 \times 10^5$

IV.3 Cas d'une cheminée solaire avec diffuseur ($h_d/h_c = 1$) :

IV.3.1 Effet de la vitesse de l'air extérieur (V_{Ext}) sur les champs de température et de vitesses.

Les figures 12 au 21 illustrent le transfert de chaleur et l'écoulement de l'air dans un modèle de cheminée solaire conçu avec un diffuseur, en analysant la distribution des isothermes et le champ de vitesse. Dans le premier cas, où la vitesse externe est nulle, comme le montre la figure 12, les lignes isothermes présentent des déformations et des ondulations claires, indiquant que la convection naturelle est le mécanisme dominant du transfert thermique. Ces déformations illustrent des gradients thermiques marqués, avec une diminution progressive de la température de la surface chaude du sol vers le toit froid, destiné à collecter le rayonnement solaire. La figure 13 met en évidence l'effet de la convection naturelle, notamment à travers la formation de cellules de convection opposées, ce qui traduit une instabilité dans le flux thermique. Parce que le diffuseur divise et dirige l'écoulement de façon symétrique, la cellule primaire centrale à l'entrée de la cheminée est composée de deux cellules contrarotatives qui jouent un rôle essentiel en favorisant la circulation de l'air. Il est également important de noter que la vitesse maximale a diminué après l'utilisation du diffuseur d'un taux de 35%.

Lorsque la vitesse extérieure est progressivement augmentée jusqu'à 0,1 m/s, comme l'illustre la figure 14, on observe une réduction significative des ondulations des lignes isothermes, ce qui indique une diminution de l'impact de la convection naturelle. Toutefois, la convection reste le mécanisme principal de transfert de chaleur, car la différence de température entre les surfaces chaude et froide continue à générer des courants de convection importants. La figure 15 révèle une diminution notable des cellules convectives opposées, ce qui montre une stabilisation du flux thermique.

Plus que la vitesse extérieure augmente davantage, comme présenté dans la figure 16, les ondulations entre le sol et le collecteur de chaleur disparaissent et des plaques parallèles commencent à se former. Cela indique que le pseudo régime de conduction thermique prend une place de plus en plus importante dans le transfert de chaleur. La figure 17 montre que les cellules convectives se dissipent progressivement et que la hauteur de la cellule primaire diminue, ce qui témoigne d'une réduction plus marquée de l'impact de la convection naturelle. Ce changement reflète le rôle croissant des forces mécaniques générées par le flux d'air forcé.

Dans les figures 18 et 19, les lignes isothermes prennent la forme de plaques parallèles dans la zone de collecte de la chaleur, tandis que les cellules disparaissent presque totalement. Enfin, dans

les figures 20 et 21, nous atteignons un point où le pseudo régime de conduction thermique devient le mécanisme prédominant du transfert de chaleur, et l'influence de la convection naturelle devient pratiquement imperceptible.

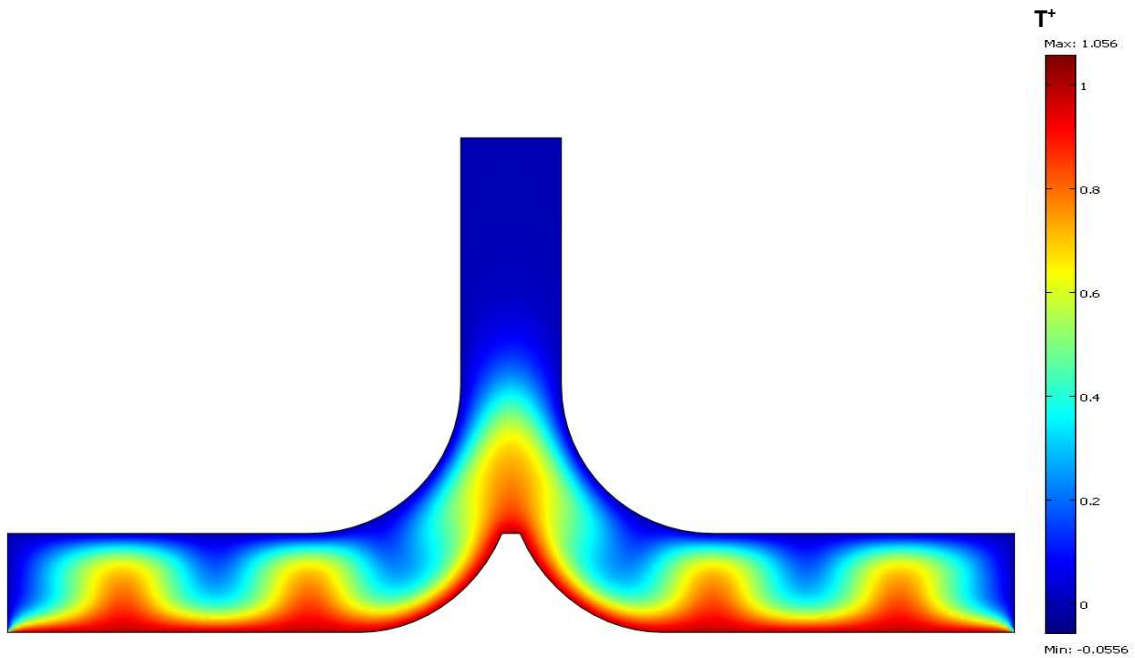


Figure IV.12 : Champ de températures pour $h_d/h_c = 1$, $V_{Ext} = 0$ m/s, $Ra = 5 \times 10^5$

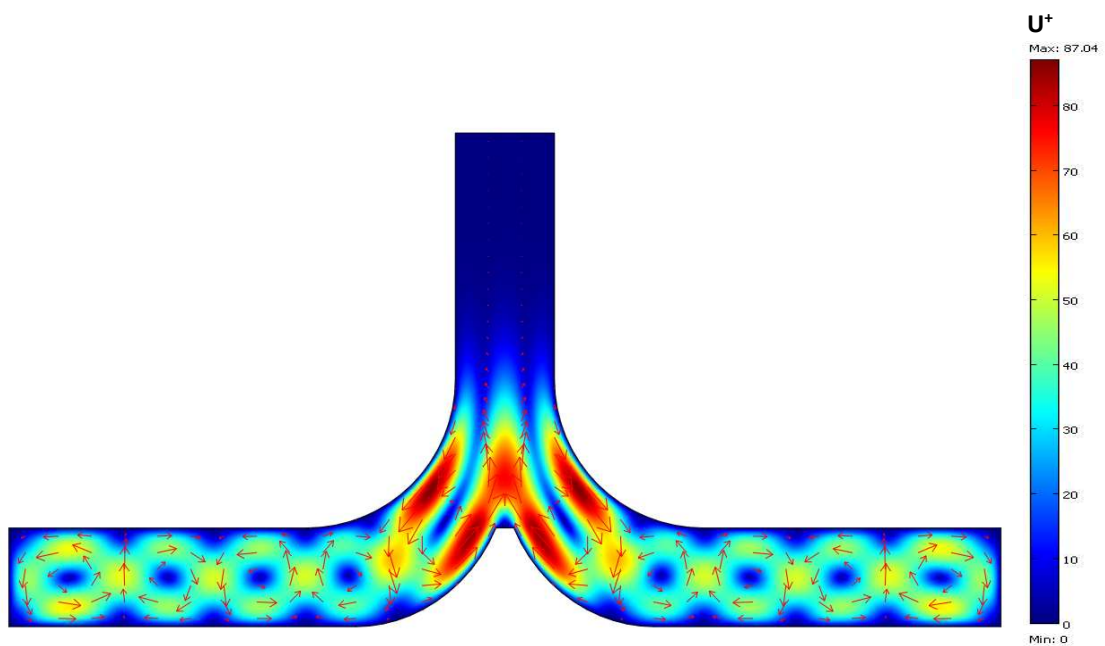


Figure IV.13 : Champ de vitesses pour $h_d/h_c = 1$, $V_{Ext} = 0$ m/s, $Ra = 5 \times 10^5$

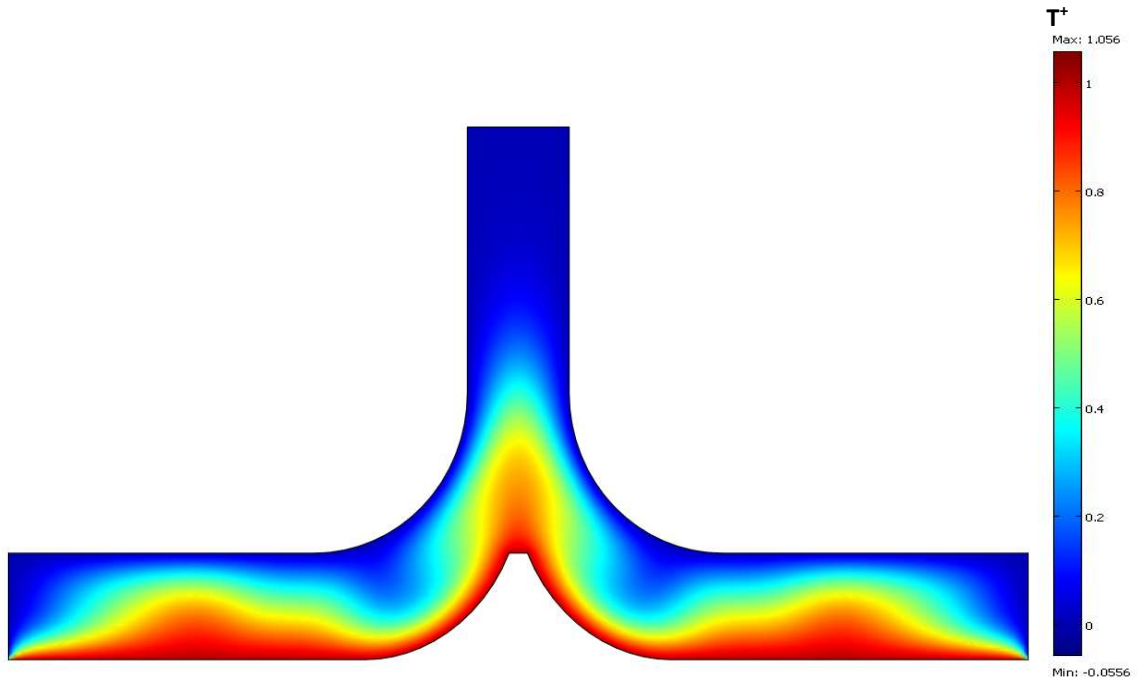


Figure IV.14 : Champ de températures pour $h_d/h_c = 1$, $V_{Ext} = 0.1$ m/s, $Ra = 5 \times 10^5$

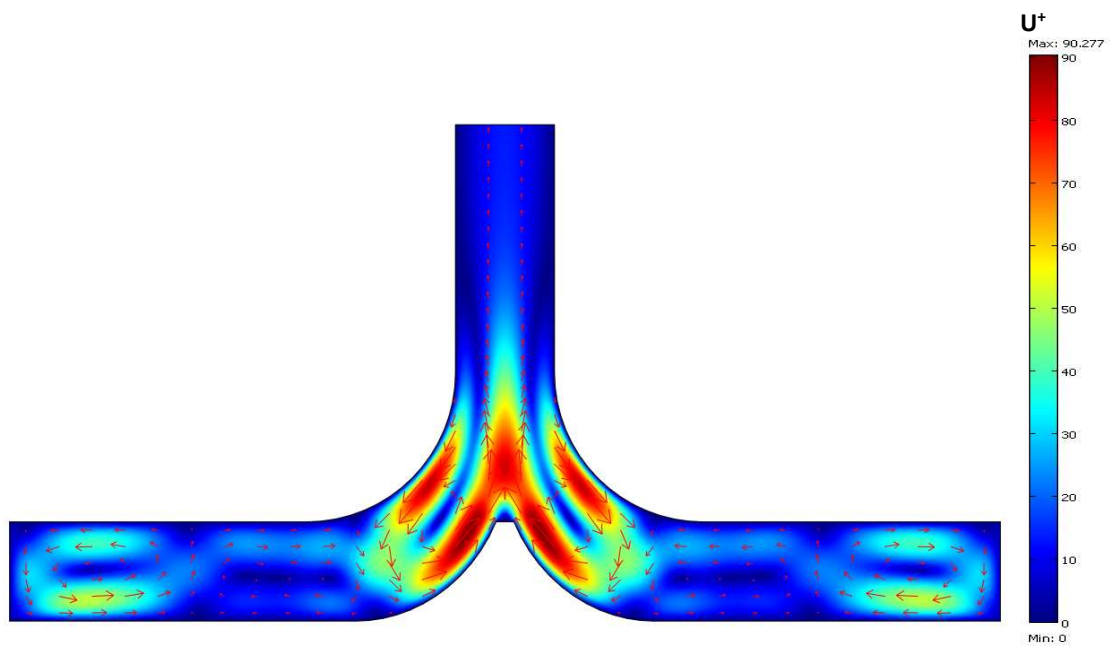


Figure IV.15 : Champ de vitesses pour $h_d/h_c = 1$, $V_{Ext} = 0.1$ m/s, $Ra = 5 \times 10^5$

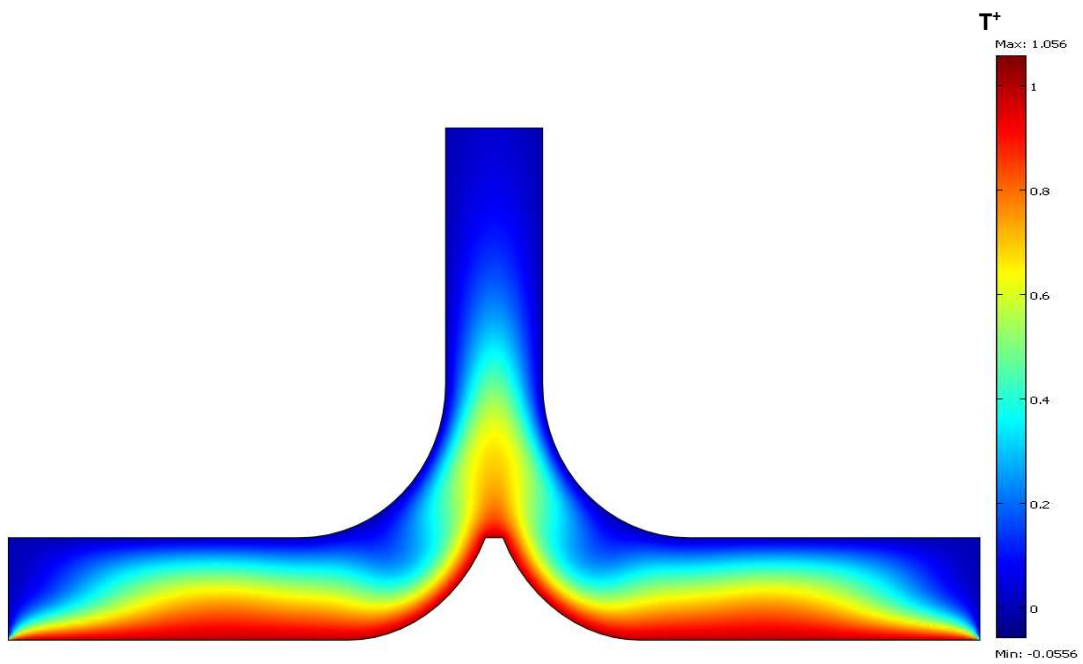


Figure IV.16 : Champ de températures pour $h_d/h_c = 1$, $V_{Ext}=0.28$ m/s, $Ra=5 \times 10^5$

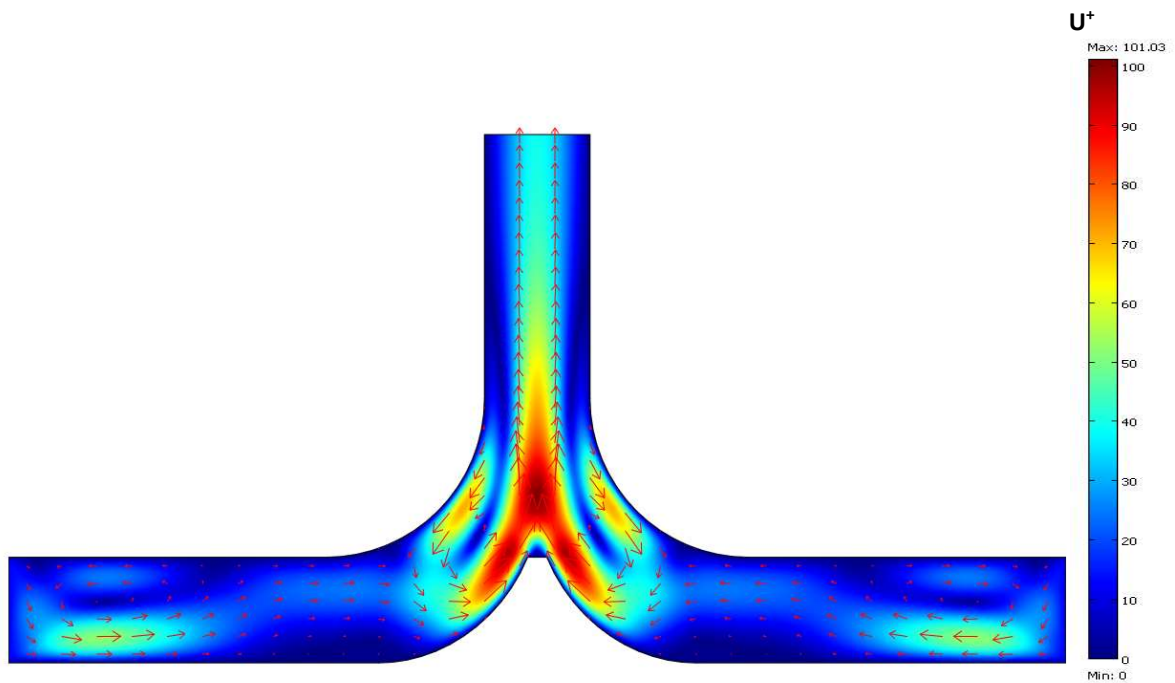


Figure IV.17 : Champ de vitesses pour $h_d/h_c = 1$, $V_{Ext}=0.28$ m/s, $Ra=5 \times 10^5$

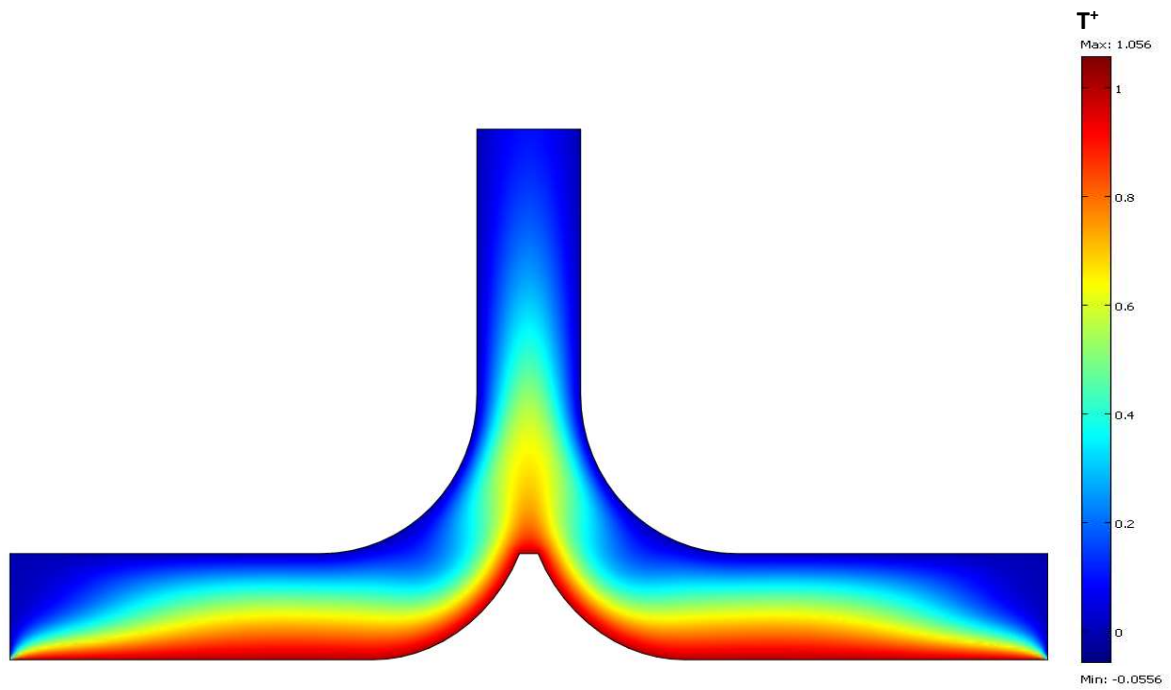


Figure IV.18 : Champ de températures pour $h_d/h_c = 1$, $V_{Ext} = 0.5$ m/s, $Ra = 5 \times 10^5$

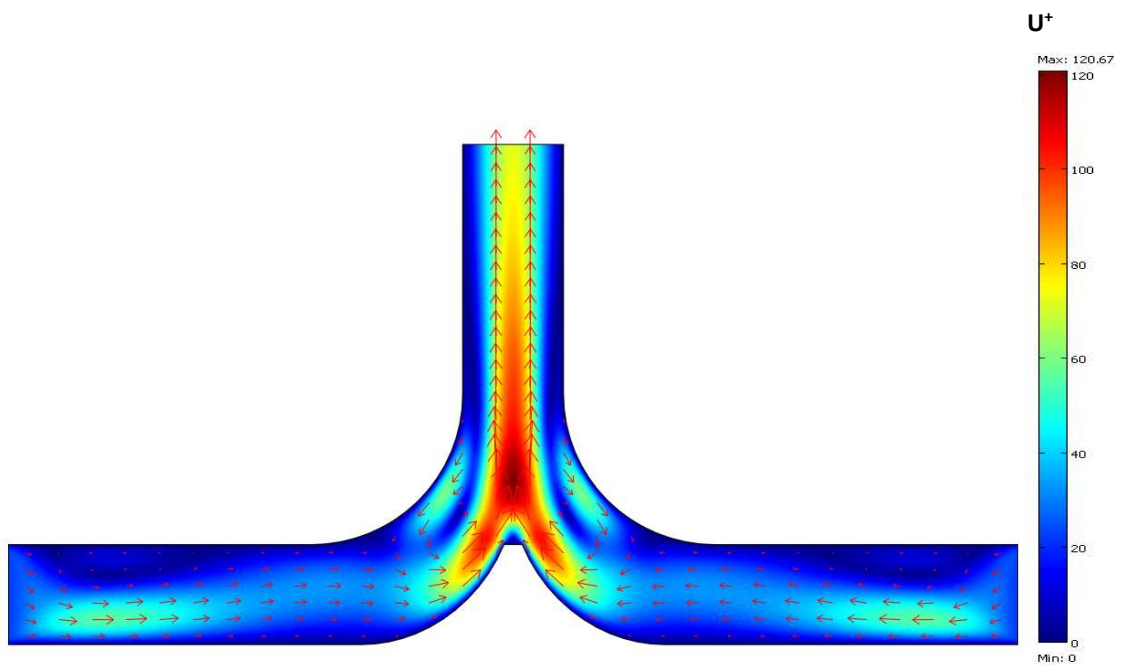


Figure IV.19 : Champ de vitesses pour $h_d/h_c = 1$, $V_{Ext} = 0.5$ m/s, $Ra = 5 \times 10^5$

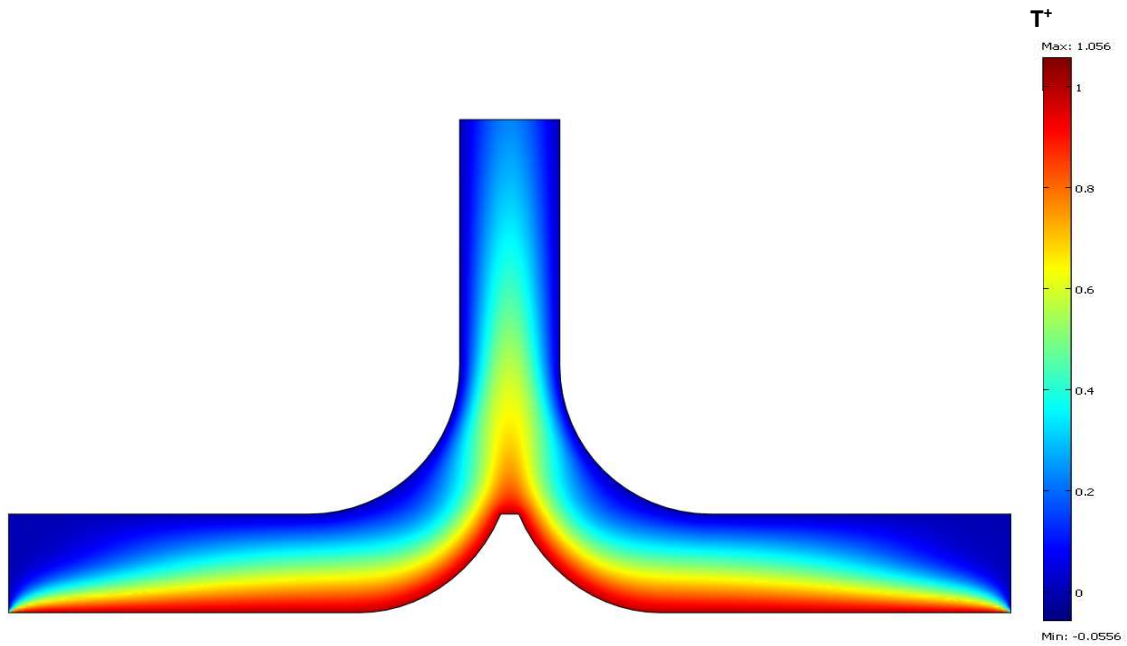


Figure IV.20 : Champ de températures pour $h_d/h_c = 1$, $V_{Ext} = 1$ m/s, $Ra = 5 \times 10^5$

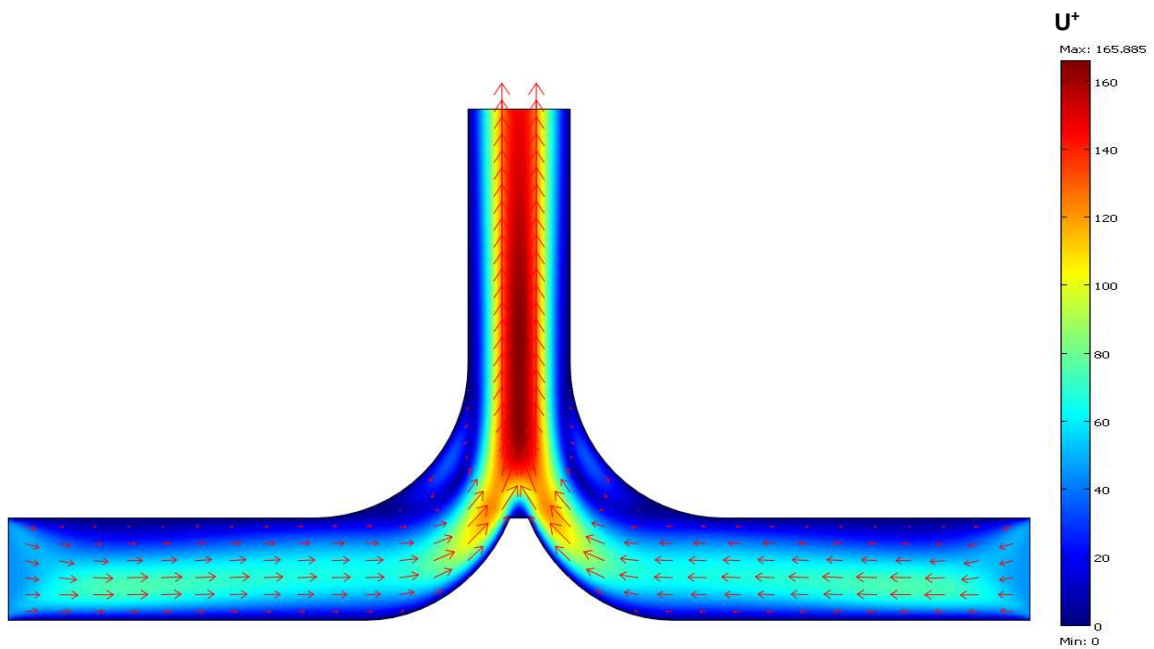


Figure IV.21 : Champ de vitesses pour $h_d/h_c = 1$, $V_{Ext} = 1$ m/s, $Ra = 5 \times 10^5$

IV.3.2 Effet de la vitesse de l'air extérieur (V_{Ext}) sur la vitesse verticale (V_z^+).

La figure 22 présente des courbes montrant les variations du composant vertical de la vitesse (V_z^+) en fonction de la vitesse extérieure (V_{Ext}), avec diffuseur ($h_d/h_c = 1$) et une valeur fixe du nombre de Rayleigh ($Ra = 5 \times 10^5$). La figure (a) illustre les variations axiales le long de l'axe z , tandis que la figure (b) montre les variations radiales le long de l'axe r .

Lorsque le diffuseur est ajouté à la cheminée solaire, des effets clairs sont observés sur la distribution verticale de la vitesse (V_z^+) le long de l'axe z . Dans le cas d'une vitesse externe nulle, le flux d'air repose principalement sur la convection naturelle, ce qui entraîne de forts courants ascendants qui produisent une vitesse maximale au point $z^+ \approx 0,2$. Cependant, lorsque la vitesse externe est augmentée avec la présence du diffuseur, une augmentation significative de la vitesse maximale (V_z^+) est observée. Le diffuseur redistribue le flux d'air, réduisant l'effet de la convection naturelle et favorisant l'écoulement ascendant de l'air dans la cheminée. En conséquence, l'écoulement devient plus stable et moins turbulent à mesure que la vitesse externe augmente, car l'effet forcé de la vitesse externe réduit les oscillations causées par la convection naturelle.

En ce qui concerne la distribution de la vitesse radiale (V_z^+) sur l'axe radial r , le cas à vitesse externe nulle qui présente une distribution à double pic, avec deux pics positifs au centre et deux pics négatifs sur les côtés, ce qui indique la présence de cellules de rotation opposées. Ce phénomène reflète un écoulement convectif dans la direction radiale, où les courants ascendants au centre de la cheminée, tandis que les courants descendants sur les côtés provoquent une recirculation opposée. Lorsque la vitesse externe augmente, les deux pics négatifs diminuent progressivement et l'écoulement devient plus stable, les deux pics positifs au centre augmentant. Cela indique que les cellules de rotation latérales s'estompent à mesure que l'effet forcé de la vitesse externe est renforcé, ce qui se traduit par un écoulement unidirectionnel plus stable contribuant ainsi à une plus grande stabilité de l'écoulement.

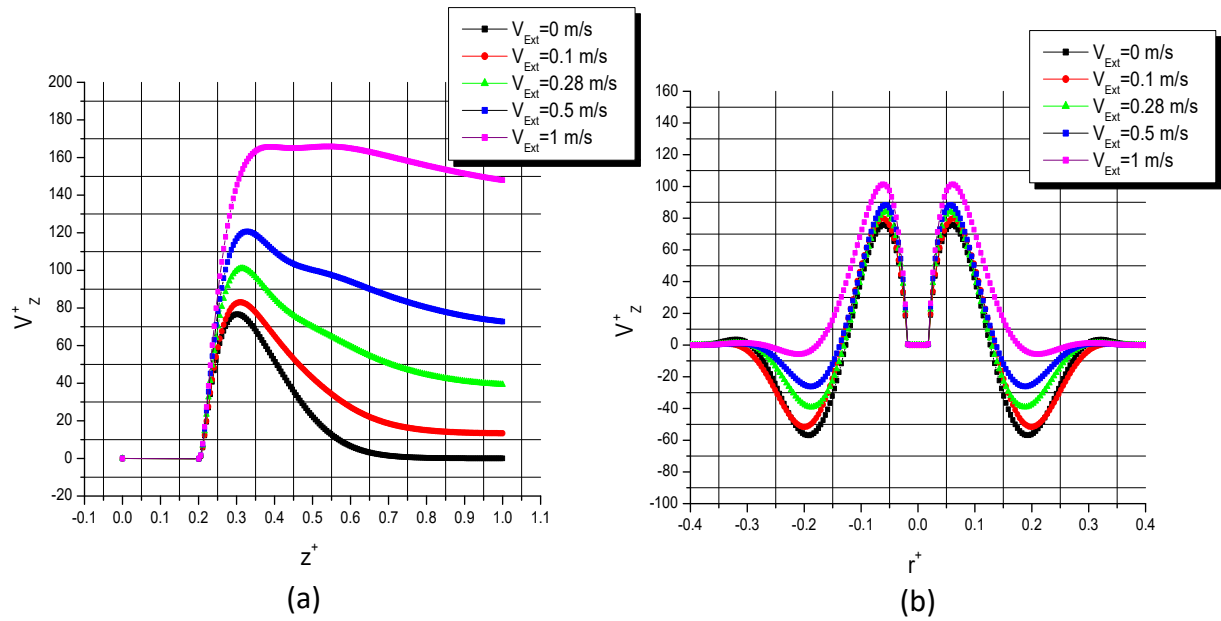


Figure IV.22 : Les variations axiale (a) et radiale (b) de la composante de vitesse verticale (V_z^+) en fonction de (V_{Ext}) pour $h_d/h_c=1$, $Ra=5 \times 10^5$

CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons développé une simulation numérique d'un écoulement d'air dans une cheminée solaire à conception à symétrie axiale, en utilisant le logiciel Comsol Multiphysics. Cette simulation a pour objectif de calculer le flux d'air généré par la convection naturelle à l'intérieur de la cheminée, en appliquant l'approximation de Boussinesq et un ensemble d'hypothèses simplificatrices en considérant l'écoulement du fluide comme laminaire, stationnaire et le fluide newtonien et incompressible, tout en utilisant le système des équations différentielles partielles en coordonnées cylindriques.

L'étude est focalisée sur l'effet de la vitesse extérieures de l'air sur le comportement de la convection naturelle à l'intérieur de la cheminée solaire pour deux différentes configurations avec et sans diffuseur.

Notre analyse de ce phénomène physique à contribuer pour mieux comprendre l'écoulement d'air généré à l'intérieur de la cheminée solaire dans ces deux parties, horizontale et verticale que représente un intérêt majeur dans la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par des turbines.

Les résultats ont montré que la conception de la cheminée solaire sans diffuseur offre une géométrie optimale pour atteindre des vitesses verticales élevés localisées a l'entrée de la de la cheminée, ce qui garantit une énergie cinétique importantes au niveau de la turbine qui a son tour fournie une conversion avec un rendement plus élevé de l'énergie solaire en énergie électrique. La cheminée solaire sans diffuseur est moins sensible au courant d'air extérieur, notamment quand la vitesse de l'air reste inférieure à 0.5 m/s correspondant à une force du vent de degré 0 selon l'échelle de Beaufort. La cheminée solaire sans diffuseur offre un seul emplacement optimal pour la turbine $z^+=0.2$, cet emplacement correspond à l'endroit où la vitesse est maximale. Cette configuration pourrait toutefois être adaptée à une turbine unique fonctionnant à des vitesses d'air élevées.

En revanche, le rôle du diffuseur est mis en évidence en présence des courants d'air extérieurs, d'un point de vue quantitatif, le diffuseur a réduit l'intensité de la vitesse d'air de 33 % à cause de la diminution de l'espace de développement de la convection naturelle ainsi que bifurcation de l'écoulement en deux zones au lieu d'une seule zone concentrée au milieu pour le cas sans diffuseur.

De plus, les profils de vitesses verticale maximales obtenus, permet une détermination précise du point où la vitesse verticale atteint sa valeur maximale, pour choisir l'emplacement

idéal pour l'installation des turbines. Pour le cas de la cheminée avec diffuseur, la distribution du champ de vitesses à l'entrée de la cheminée suggère la possibilité d'équiper la cheminée de doubles turbines afin de mieux exploiter le courant d'air généré au sein de la cheminée.

Pour approfondir cette étude, des recherches plus poussées pourraient porter sur l'effet d'autres paramètres pertinents, tels que la hauteur du diffuseur, le diamètre de la cheminée, le diamètre du collecteur solaire ...etc.

Références bibliographiques

- [1]<https://www.nbcnews.com/mach/science/skyscraper-sized-air-purifier-world-s-tallest-ncna858436> 17/05/2025
- [2] Al-Kayiem, H. H., & Aja, O. C. "Historic and recent progress in solar chimney power plant enhancing technologie", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.58, pp.1269-1292, 2016.
- [3]Bahache Hadjer, "Simulation numérique de la convection naturelle dans une cheminée solaire ", mémoire de Master Académique, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2017.
- [4] Zhou, X., Wang, F., & Ochieng, R. M, "A review of solar chimney power technology ", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(8), pp.2315-2338, 2010.
- [5]<https://www.actinnovation.com/innovation-environnement/energie-technologie-tour-solaire-800-metres-2716.html> 17/05/2025
- [6]<https://img.welt.de/img/wissenschaft/mobile101477772/4231355147-ci16x9-w1200/schlaichbig-DW-Wissenschaft-Manzanares-jpg.jpg> 17/05/2025
- [7] <https://www.electronicshub.org/market-verticals/consumer/air-purification-sustainable-living> 17/05/2025
- [8] Tayebi Tahar , "contribution à l'étude numérique de la convection naturelle laminaire d'un système radial de chauffage solaire ,thèse de Doctorat, Université Constantine 1, 2014.
- [9]<https://www.ecozimut.com/fiches-notion/fiches-techniques/ventilation-batiments-habitation/> 17/05/2025
- [10]Charitar Deepti, "Numerical study of the thermal performance of solar chimneys for ventilation in buildings ", mémoire de master, Université de Cape Town, 2015.
- [11]Al-Kayiem, H. H., & Heng, Y. M, "Experimental investigation of rooftop solar chimney for natural ventilation ", Journal of Engineering and Applied Sciences, vol: 10, 10249, (2015).
- [12] Papageorgiou, C, "Floating solar chimney technology ", Solar energy, 187-222, (2010).
- [13] <https://ijtre.com/wp-content/uploads/2021/09/2020070520.pdf> 17/05/2025
- [14]https://cdn.intechopen.com/pdfs/8557/InTechFloating_solar_chimney_technology.pdf 03/02/2025

- [15]Mohamad, H., Medhat, E., Mohamed, R., & Muthu, M, "Use of Solar Chimney in Renewable Energy Applications Review. Renewable Energy Research and Applications, 2(1), pp.117-128, 2021.
- [16]Oluwaseun Adenigba, "Performance evaluation of a solar chimney power plant using computational fluid dynamics ", (2019), DOI: 10.13140/RG.2.2.13630.13126
- [17] Alm El Din Mohamad, H., Medhat, E., Mohamad, E., Mohamed, R., & Muthu, M, "Use of Solar Chimney in renewable energy applications-A review", Journal of Renewable Energy Research and Applications (RERA), (2021).
- [18]<https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/energie-renouvelable-fonctionne-sechoir-solaire-4135/> 17/05/2025
- [19]<https://plandejardin-jardinbiologique.com/sechoir-solaire-fruitslegumes-plan.html> 17/05/2025
- [20]Boulemtafes Boukadoum, A., Benaouda, N., Derbal, H., & Benzaoui, A, "Analyse énergétique et thermique du processus de séchage de la menthe par énergie solaire", Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger, 89-96 , 2008.
- [21] <https://energieplus-lesite.be/wp-content/uploads/2019/03/TangaFct.gif> 03/02/2025
- [22]M.semai Hakim, "Recherche d'une configuration optimale d'une centrale solaire à cheminée ", thèse de doctorat, université abou-bekr belkaid Tlemcen, 2017
- [23] Boualleg salim Mekki, "Analyse des performances énergétiques des centralescheminées solaires par utilisation de différents modèles mathématiques ", mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, (2012).
- [24] Kasaeian, A., Ghalamchi, M., & Ghalamchi, M, "Simulation and optimization of geometric parameters of a solar chimney in Tehran ", Energy conversion and management, vol:83, pp: 28-34, 2014.
- [25] Chergui, T., Larbi, S., & Bouhdjar, A. "Thermo-hydrodynamic aspect analysis of flows in solar chimney power plants ", A case study. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(5), pp.1410-1418, (2010).
- [26] Toghraie, D., Karami, A., Afrand, M., Karimipour, A., "Effects of geometric parameters on the performance of solar chimney power plants ", Energy, 2018 doi:10.1016/j.energy.2018.08.086.

- [27] Akchiche Zineb, "Etude de comportement d'une cheminée Solaire en vue de l'isolation thermique ", mémoire de magister, Université Kasdi Merbah, Ouargla, (2011).
- [28] Al-Taie, A. K., & Mutib, A. H. "the effect of entrance region geometry on solar chimney power plant performance ", Muthanna Journal of Engineering and Technology(MJET), vol.3(2), 2015.
- [29] Abdelsalam, E., Kafiah, F., Almomani, F., Tawalbeh, M., Kiswani, S., Khasawneh, A & Alkasrawi, M, "An innovative design of a solar double-chimney power plant for electricity generation Energies ", 14(19), pp.6235, 2021.
- [30] Rashid, F. L., & Alnomani, S. N, "Effect of Spiral Rib on Solar Chimney Collector Performance ", Al-Qadisiyah Journal For Engineering Sciences, 9(3), pp. 349-359, 2016.
- [31] Al-Taaie, A. K., Mohammad, W. S., & Jubear, A. J, "Numerical simulation of the collector angle effect on the performance of the solar chimney power plant ", AlKhwarizmi Engineering Journal, 12(2), pp.79-89, 2016.
- [32] Gahgah Mourad, "Influence des régimes d'écoulement sur les performances énergétiques des cheminées solaires ", mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, (2008).
- [33] Comsol Multiphysics quick start and quick reference book version 3.5a © copyright 1998–2008

ملخص

تركز هذه الدراسة على تحليل ثنائي الأبعاد لتدفق الهواء الناتج عن الحمل الحراري الطبيعي داخل المدخنة الشمسية. تم تمثيل النموذج الرياضي باستخدام معادلات الاستمرارية والزخم والطاقة ضمن نظام الإحداثيات الأسطوانية، مع اعتماد تقريب بوسينيسك. تم تنفيذ المحاكاة العددية باستخدام برنامج Comsol Multiphysics، وكشفت النتائج أن أداء المدخنة الشمسية يتأثر بشكل كبير بوجود الناشر، حيث يُعد وجوده أو عدمه عاملاً حاسماً في تحديد سلوك التدفق وكفاءة النظام، لا سيما مع تأثير تيارات الهواء الخارجية.

الكلمات المفتاحية: الحمل الحراري الطبيعي، المدخنة الشمسية، المحاكاة العددية، تقريب بوسينيسك.

Abstract

This study focuses on a two-dimensional analysis of airflow induced by natural convection inside a solar chimney. The developed mathematical model use the continuity, momentum, and energy equations in cylindrical coordinates, applying the Boussinesq approximation. Numerical simulations carried out using Comsol Multiphysics. The results revealed that the performance of the solar chimney is significantly affected by the use of a diffuser, which plays a key role in determining the flow behaviour and the overall efficiency of the system, especially when external air currents are present.

Keywords : Natural thermal convection, Solar chimney, Numerical simulation, Boussinesq's approximation.

Résumé

Cette étude se concentre sur l'analyse bidimensionnelle de l'écoulement de l'air induit par la convection naturelle à l'intérieur d'une cheminée solaire. Le modèle mathématique a été formulé à l'aide des équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie, exprimées en coordonnées cylindriques, en adoptant l'approximation de Boussinesq. La simulation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics. Les résultats ont montré que la performance de la cheminée solaire est fortement influencée par la présence du diffuseur, cet élément jouant un rôle important dans le comportement de l'écoulement et l'efficacité globale du système, notamment Dans le cas de la présence des courants d'air extérieurs.

Mots-clés : Convection naturelle thermique, Cheminée solaire, Simulation numérique, Approximation de Boussinesq.