

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de Technologie  
Département de génie mécanique



Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE  
Filière : GENIE MECANIQUE  
Spécialité : ENERGETIQUE  
Thème

## **Amélioration du système de ventilation naturelle par l'utilisation de la cheminée solaire**

**Présenté Par :**

1) M. Errouane Mohamed

**Devant le jury composé de :**

Pr. NEHARI Driss	Pr	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr. BERREZOUG Imane	MCB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examinatrice
Dr. BENZENINE Hamidou	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

*Année Universitaire 2020/2021*

## ***REMERCIEMENTS***

Avant toute chose, je remercie Allah de m'avoir guidé et aidé à persévérer dans mes études et rencontré des enseignants attentifs.

Tout d'abord ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement de mon chère **Dr BENZENINE Hamidou**, je le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant ma préparation de ce modeste mémoire.

Je tiens à remercier **Pr NEHARI Driss** en étant président du jury et **Dr BERREZOUG Imane** d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude à **Dr BOUDJEMA Moussa Fethi**, et le remercier pour ces conseils et son aide, ainsi que son soutien moral qui m'a donné le courage de mener à bien ce projet.

Mes remerciements s'adressent à **Mlle CHERIET Rahmouna** pour son aide et son soutien moral ainsi que ses encouragements.

Mes remerciements s'adresse également à tous mes professeurs et pour leur générosité ainsi que leur grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Je tiens également à remercier tous ceux qui m'ont aidé et soutenu de près ou de loin.

## *Dédicace*

Je remercie :

-Mes parents,

-Mes frères et sœurs,

-Ma famille

-Mes amies (s)

Pour leur soutien, leur affection, leur amitié et leurs encouragements.

Je leurs dédie ma mémoire de fin d'études.

## *Résumé*

Le système de climatisation est une exigence de confort thermique en été, mais il entraîne une augmentation de la demande et de la consommation d'énergie compte tenu de ses prix élevés. Parmi les nouveaux moyens d'apporter un confort thermique d'été et permettant de réduire significativement la consommation d'énergie, on citera la cheminée solaire.

Ce travail porte sur l'amélioration des performances de la cheminée solaire pour la ventilation naturelle. Tout d'abord, une simulation numérique sera menée et comparée à d'autres expérimentales afin de vérifier la validité des résultats obtenus.

Six modèles de cheminées différents ont été pris, trois d'entre eux sont de formes différentes (plane, trapézoïdale, triangulaire), et les trois autres sont de longueurs de base différentes (0,3, 0,5 et 0,7 m). Le comportement thermique et dynamique de l'écoulement d'air à l'intérieur de ces différents cas a été analysés et comparés pour différentes valeurs de rayonnement solaire (200-1000 W/m<sup>2</sup>) et pour d'autres valeurs différentes de la vitesse de l'air (0,05-0,2 m/s) à l'entrée de la cheminée.

Les contours de température, les champs de vitesse et la variation de température à la sortie de la cheminée en fonction du rayonnement solaire et en fonction de la vitesse de l'air d'entrée et du temps de renouvellement d'air pour chaque modèle ont été présentés, analysés, comparés et interprétés en détail dans ce mémoire.

Tout cela a été fait avec l'aide du code de calcul ANSYS FLUENT pour résoudre les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement ainsi que la conservation de l'énergie par la méthode des volumes finis.

## **Mots clés**

Ventilation naturelle, cheminée solaire, simulation numérique, rétrécissement progressif.

## *Abstract*

The air conditioning system is a requirement for thermal comfort in summer, but it leads to increased demand and consumption of energy due to its high prices. Among the new means of providing thermal comfort in summer and allowing a significant reduction in energy consumption, we can mention the solar chimney.

This work focuses on improving the performance of the solar chimney for natural ventilation. First of all, a numerical simulation will be carried out and compared to other experiments in order to check the validity of the results obtained.

Six different chimney models were taken, three of them are of different shapes (plane, trapezoidal, triangular), and the other three are of different base lengths (0.3, 0.5 and 0.7m). The thermal and dynamic behavior of the air flow inside these different cases has been analyzed and compared for different values of solar radiation (200-1000 W/m<sup>2</sup>) and for other different values of the speed air (0.05-0.2 m/s) at the entrance to the chimney.

The temperature curves, the velocity fields and the temperature variation at the outlet of the chimney as a function of solar radiation and as a function of the speed of the inlet air and the air renewal time for each model have been presented, analyzed, compared and interpreted in detail in this thesis.

This was all done with the help of the ANSYS FLUENT computer code to solve the equations of conservation of mass, momentum as well as conservation of energy by the finite volume method.

## **Keywords**

Natural ventilation, solar chimney, numerical simulation, progressive shrinkage.

## ملخص

يعتبر نظام تكييف الهواء من متطلبات الراحة الحرارية في الصيف ، ولكنه يؤدي إلى زيادة الطلب والاستهلاك للطاقة بسبب ارتفاع أسعارها. من بين الوسائل الجديدة لتوفير الراحة الحرارية في الصيف والسماح بتخفيض كبير في استهلاك الطاقة، يمكننا أن نذكر المدخنة الشمسية.

يركز هذا العمل على تحسين أداء المدخنة الشمسية للتهوية الطبيعية. بادئ ذي بدء ، سيتم إجراء محاكاة عددية ومقارنتها بالتجارب الأخرى من أجل التحقق من صحة النتائج التي تم الحصول عليها.

تم أخذ ستة نماذج مختلفة من المداخل ، ثلاثة منها بأشكال مختلفة (مستوية، شبه منحرف، مثلثية)، والثلاثة الأخرى بأطوال قاعدية مختلفة (0.3 ، 0.5 و 0.7 متر). تم تحليل السلوك الحراري والديناميكي لتدفق الهواء داخل هذه الحالات المختلفة ومقارنتها بقيم مختلفة من الإشعاع الشمسي (1000-200 واط / م<sup>2</sup>) وقيم مختلفة أخرى لسرعة الهواء (0.05-0.2 م / ث) عند مدخل المدخنة.

تم تقديم مخطط درجة الحرارة ومجالات السرعة وتغير درجة الحرارة عند مخرج المدخنة بدلالة الإشعاع الشمسي و بدلالة سرعة الهواء الداخل ووقت تجديد الهواء لكل نموذج وتحليلها ومقارنتها وتفسيرها بالتفصيل في هذه الأطروحة.

كل هذا تم بمساعدة كود الكمبيوتر ANSYS FLUENT لحل معادلات انحفاظ الكتلة واستمرارية الحركة وكذلك انحفاظ الطاقة بطريقة الحجم المحدود.

## كلمات مفتاحيه

تهوية طبيعية، مدخنة شمسية، محاكاة عددية، انكماش تدريجي.

## *Sommaire*

REMERCIEMENTS.....	i
Dédicace.....	ii
Résumé .....	iii
Abstract.....	iv
ملخص .....	v
Sommaire .....	vi
Liste des figures .....	x
Liste des tableaux .....	xiii
Nomenclature .....	xiv
Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I : Généralités.....</b>	<b>4</b>
I.1 Introduction.....	5
I.2 Généralité sur le transfert thermique .....	5
I.2.1 Modes du transfert de la chaleur.....	5
I.2.1.1 La conduction.....	5
I.2.1.2 La convection .....	6
I.2.1.3 Le rayonnement.....	6
I.3 Energie renouvelables .....	7
I.3.1 Energie solaire .....	7
I.3.1.1 Energie solaire thermique .....	8
I.4 La ventilation .....	8
I.4.1 Le but de ventilation .....	9
I.4.1.1 Pour le confort.....	9
I.4.1.1.1 Le confort thermique.....	9
I.4.1.2 Pour la santé .....	11

I.4.2	Type de ventilation .....	11
I.4.2.1	Ventilation mécanique .....	11
I.4.2.2	Ventilation naturelle .....	11
I.5	Généralité sur la ventilation naturelle.....	12
I.5.1	Principe de la ventilation naturelle .....	12
I.5.1.1	Ouverture des fenêtres .....	13
I.5.1.2	La ventilation traversant .....	13
I.5.1.3	Le tirage thermique.....	13
I.5.2	Modélisation de la ventilation naturelle .....	14
I.5.2.1	Modèles CFD .....	14
I.5.3	Avantages et inconvénients de ventilation naturelle.....	15
I.5.3.1	Avantage .....	15
I.5.3.2	Inconvénients .....	15
I.5.4	Différentes cavités utilisé en ventilation naturelle.....	16
I.5.4.1	Le mur trombe.....	16
I.5.4.2	La cheminée solaire .....	17
I.6	Généralité sur la cheminée solaire .....	18
I.6.1	Effet de cheminée .....	18
I.6.2	Description .....	18
I.6.3	Modes d'opérations d'une cheminée solaire.....	19
I.6.4	Les constituants d'une cheminée solaire .....	20
I.6.5	Fonctionnement .....	21
I.6.6	Types de cheminée solaire .....	21
I.6.6.1	Cheminée solaire verticale .....	21
I.6.6.2	Cheminée solaire inclinée .....	22
I.7	Conclusion .....	22
	<b>Chapitre II : Recherches bibliographiques .....</b>	<b>23</b>



II.1 Introduction .....	24
II.2 Utilisation de la cheminée solaire .....	24
II.3 Etude des performances de ventilation naturelle par la cheminée solaire.....	25
II.4 L'effet de l'inclinaison sur les performances de la cheminée solaire .....	32
II.5 Conclusion.....	35
<b>Chapitre III : Résolution numérique</b> .....	<b>36</b>
III.1 Introduction .....	37
III.2 Modèle physique.....	37
III.3 Hypothèses simplificatrices.....	40
III.4 Equations générales du problème .....	40
III.4.1 La conservation de la masse .....	40
III.4.2 La conservation de la quantité de mouvement.....	41
III.4.3 La conservation de l'énergie .....	41
III.5 Principes des codes CFD.....	41
III.6 Présentation du logiciel ANSYS <b>Workbench</b> .....	42
III.6.1 Partie de géométrie .....	43
III.6.2 Partie maillage.....	43
III.6.3 ANSYS FLUENT .....	44
III.6.3.1 Choix des deux modes de calcul.....	45
III.6.3.2 Choix de régime.....	46
III.6.3.3 Les propriétés thermo physique des matériaux utilisés .....	46
III.6.3.4 Conditions aux limites.....	47
III.6.3.5 Les schémas numériques .....	48
III.6.3.5.1 Résolution du couplage vitesse-pression .....	48
III.6.3.5.2 Schémas de discrétisation spatiale .....	48
III.6.3.6 Facteurs de sous relaxation.....	49
III.6.3.7 La convergence .....	49

III.7 Conclusion.....	50
<b>Chapitre IV : Résultats et discussion .....</b>	<b>51</b>
IV.1 Introduction .....	52
IV.2 Validation du modèle numérique .....	52
IV.3 Influence de la longueur de base .....	54
IV.3.1 Contour de température .....	54
IV.3.2 Champs de vitesse .....	57
IV.4 Influence de forme.....	59
IV.4.1 Contour de température .....	59
IV.4.2 Champs de vitesse .....	62
IV.5 Evolution de la température moyenne en fonction de l'intensité solaire.....	64
IV.5.1 Pour les trois différentes longueurs de base .....	64
IV.5.2 Pour les trois différentes formes .....	66
IV.6 Evolution température moyenne à la sortie en fonction de la vitesse d'entrée .....	68
IV.6.1 Pour les trois différentes formes .....	68
IV.6.2 Pour les trois différentes longueurs de base .....	69
IV.7 Le temps de renouvellement d'air .....	69
IV.8 Conclusion .....	71
Conclusion générale .....	72
Références bibliographiques.....	75

## *Liste des figures*

### **Chapitre I : Généralités.**

Figure I. 1 : Les différentes filières d'énergie solaire. ....	7
Figure I. 2 : Echange de chaleur entre le corps humain et son environnement .....	10
Figure I. 3 : Les sources de chaleur et de froid .....	11
Figure I. 4 : Action du vent sur les bâtiments .....	12
Figure I. 5 : Effet du tirage thermique dans les bâtiments.....	12
Figure I. 6 : Principe de la ventilation traversant .....	13
Figure I. 7 : Effets combinés du vent et du tirage thermique.....	14
Figure I. 8 : Illustration de la modélisation CFD .....	15
Figure I. 9 : Diagramme schématique de trois types de cavité pour le chauffage passif et la ventilation naturelle .....	16
Figure I. 10 : Mur Trombe utilisé comme : a) ventilateur, b) chauffage.....	17
Figure I. 11 : photo réelle de la cheminée solaire .....	18
Figure I. 12 : Les trois modes de fonctionnement d'une cheminée solaire .....	20
Figure I. 13 : Les principaux composants de la cheminée solaire .....	20
Figure I. 14 : Types de cheminée solaire selon l'ouverture d'entrée, et leur position pour la ventilation naturelle .....	21
Figure I. 15 : Installation d'une cheminée solaire inclinée.....	22

### **Chapitre II : Recherche bibliographique.**

Figure II. 1 : Schéma de principe d'une cheminée solaire avec HE .....	25
Figure II. 2 : Cheminée solaire expérimentale de type mural.....	27
Figure II. 3 : Principe de l'effet de cheminée solaire desservant la région expérimentale de la salle de classe du niveau 1 dans le bâtiment à énergie zéro considéré (dimensions en mètres).....	28
Figure II. 4 : Schéma des configurations et du fonctionnement des cheminées solaires. ....	30
Figure II. 5 : Schéma du bâtiment prototype (à gauche : plan, à droite : section, unités : mm). .....	31
Figure II. 6 : Concept de ventilation naturelle dans le bâtiment prototype .....	32

Figure II. 7 : Montage expérimental pour l'étude des performances d'une cheminée solaire inclinée.....	33
Figure II. 8 : Schéma d'une cheminée solaire bidimensionnelle (IPWSC) fixée à une pièce.....	34
Figure II. 9 : Vue schématique d'un modèle expérimental de cheminée solaire à paroi passive inclinée.....	35

### **Chapitre III : Résolution numérique.**

Figure III. 1 : Shéma générale du domaine physique.....	38
Figure III. 2 : l'interface de logiciel <b>ANSYSWorkbench</b> .....	42
Figure III. 3 : l'interface du logiciel ANSYS Design Modeler.....	43
Figure III. 4 : Le maillage généré final de domaine étudié.....	44
Figure III. 5 : Fenêtre de démarrage de fluent. ....	45
Figure III. 6 : La convergence des résidus.....	50

### **Chapitre IV : Résultats et discussion.**

Figure IV. 1 : comparaison de l'évolution de la température à la sortie en fonction de la radiation solaire, avec les résultats d'O. Belhadj et al.....	53
Figure IV. 2 : comparaison de l'évolution de la vitesse à la sortie en fonction de la radiation solaire, avec les résultats d'O. Belhadj et al .....	53
Figure IV. 3 : Contours de la température pour différentes longueurs de base de la cheminée à une intensité solaire de $870 \text{ W/m}^2$ .....	55
Figure IV. 4 : Champ de vecteur de vitesse pour différentes longueur de base de la cheminée à une intensité solaire de $870 \text{ W/m}^2$ .....	58
Figure IV. 5 : Contours de la température pour différentes formes de la cheminée à une intensité solaire de $870 \text{ W/m}^2$ . ....	60
Figure IV. 6 : Champ de vecteur de vitesse pour différentes formes de la cheminée à une intensité solaire de $870 \text{ W/m}^2$ . ....	63
Figure IV. 7 : Evolution de la température moyenne à la sortie de la cheminée en fonction de l'intensité solaire pour différentes longueurs de base. ....	64
Figure IV. 8 : Evolution de la température moyenne de vitrage en fonction de l'intensité solaire pour différentes longueurs de base.....	65

Figure IV. 9 : Evolution de la température moyenne de l'absorbeur en fonction de l'intensité solaire pour différentes longueurs de base.....	65
Figure IV. 10 : Evolution de la température moyenne à la sortie de cheminée en fonction de l'intensité solaire pour les trois différentes formes. ....	66
Figure IV. 11 : Evolution de la température moyenne de vitrage en fonction de l'intensité solaire pour les trois différentes formes.....	66
Figure IV. 12 : Evolution de la température moyenne de l'absorbeur en fonction de l'intensité solaire pour les trois différentes formes.....	67
Figure IV. 13 : Evolution de la température moyenne à la sortie en fonction de la vitesse d'entrée pour les trois différentes formes étudiée. ....	68
Figure IV. 14 : Evolution de la température moyenne à la sortie en fonction de la vitesse d'entrée pour les trois différentes longueurs de base. ....	69
Figure IV. 15 : Temps de renouvellement d'air pour les six modèles étudiées. ....	71

## *Liste des tableaux*

### **Chapitre III : Résolution numérique.**

Tableau III. 1 : Différents modèles physique étudiées (six cas) .	38
Tableau III. 2 : Les caractéristiques géométriques de différentes cheminées solaires étudiées. .....	39
Tableau III. 3 : Les détails du maillage généré. ....	44
Tableau III. 4 : Les propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés. ....	46
Tableau III. 5 : Type des conditions aux limites programmés dans fluent. ....	47
Tableau III. 6 : Schémas de discrétisation spatiale par fluent. ....	48
Tableau III. 7 : Facteur de sous-relaxation. ....	49

### **Chapitre IV : Résultats et discussion.**

Tableau IV. 1 : Comparaison entre la température moyenne d'absorbeur et le débit d'air d'entrée pour les trois longueurs de base. ....	56
Tableau IV. 2 : Comparaison entre la vitesse moyenne de l'air à la sortie pour les trois longueurs de base. ....	58
Tableau IV. 3 : Comparaison entre les températures moyennes à la sortie pour les trois formes. ....	61
Tableau IV. 4 : Comparaison entre la vitesse d'air à la sortie pour les trois formes. ....	64
Tableau IV. 5 : Temps de renouvellement d'air pour les 6 modèles étudiées. ....	70

## *Nomenclature*

<b>Symboles</b>	<b>Désignations</b>	<b>Unités</b>
$L$	Longueur à l'entrée	$mm$
$A$	Largeur à l'entrée	$mm$
$h$	Hauteur de la cheminée	$mm$
$e$	L'âme d'air	$mm$
$e_v$	Epaisseur de vitrage	$mm$
$e_A$	Epaisseur de l'absorbeur	$mm$
$e_i$	Epaisseur de l'isolant	$mm$
$L'$	Longueur à la sortie	$mm$
$\rho$	Masse volumique	$kg/m^3$
$C_p$	Capacité thermique spécifique	$j/kg.k$
$\lambda$	Conductivité thermique	$w/m.k$
$\mu$	Viscosité dynamique	$Kg/m.s$
$V$	Vitesse	$m/s$
$Re$	Nombre de Reynolds	-
$D_h$	Diamètre hydrolique	$m$
$P_{moillé}$	Périmètre mouillé	$m$
$\emptyset$	Flux de chaleur	$w/m^2$
$T$	Température	$K$
$Q_v$	Débit volumique	$m^3/s$
$Q_m$	Débit massique	$Kg/s$
$S$	Section	$m^2$
$t$	Temps de renouvellement d'air	$h$

# **Introduction générale**



### Introduction générale

Dans les bâtiments, l'énergie est principalement consommée dans la climatisation par les climatiseurs, qui est l'une des technologies de refroidissement passif connues pour être attrayantes, répandues et très recherchées, malgré leur menace pour la santé de l'individu.

Ces dernières années, l'énergie a été exploitée et utilisée à grande échelle et sous diverses formes, car la forte demande d'énergie a considérablement augmenté ses prix. Pour cela, l'attention a été attirée sur les sources d'énergie renouvelables gratuites, telles que l'énergie solaire thermique (rayonnement solaire). Ce type d'énergie est utilisé dans plusieurs processus, y compris le processus de ventilation naturelle.

La ventilation naturelle est l'une des méthodes précédemment utilisées dans l'architecture traditionnelle des villes de l'ouest algérien, qui est encore utilisée aujourd'hui dans certaines parties du sud de l'Algérie pour réduire la consommation d'énergie électrique des systèmes de climatisation.

La ventilation naturelle d'un logement contribue à maintenir la santé de ses occupants en éliminant les polluants, en assurant un air frais dans la maison et en améliorant la qualité de l'air intérieur. Surtout, il permet d'atteindre le confort thermique, devenu à son tour une exigence majeure à l'intérieur des bâtiments, qui évolue avec les fluctuations du climat extérieur.

La cheminée solaire est l'un des systèmes de ventilation naturelle permettant de stocker une quantité d'énergie solaire qui contribue à l'augmentation de température d'une colonne d'air entraînant l'écoulement de l'air vers l'extérieur et un rafraîchissement dans l'espace.

Les cheminées solaires sont un moyen d'améliorer la ventilation naturelle. Elles aspirent l'air chaud dans la maison pour passer à travers une conduite et fonctionnent pour le chauffer à l'intérieur en l'exposant au rayonnement solaire, ce qui conduit à convoquer l'air jusqu'à ce qu'un mouvement thermique d'air se forme, ce qui conduit à la ventilation naturelle de la maison.

Dans ce travail, on cherche à améliorer les performances d'une cheminée solaire au moyen d'une étude numérique utilisant un code de calcul ANSYS FLUENT version 14.0.

## Introduction générale

---

L'objectif de ce mémoire est l'amélioration des performances de la ventilation naturelle par l'utilisation d'une cheminée solaire, donc, pour faciliter la compréhension du lecteur de ce mémoire et de bénéficier des analyses, conclusions et résultats obtenus, on organise le travail en quatre chapitres pour cette étude numérique.

- Le premier chapitre présente un aperçu de transfert thermique et l'énergie solaire thermique avec des généralités sur le confort thermique, la ventilation naturelle et la cheminée solaire.
- Le deuxième chapitre réservé à une recherche bibliographique sur la ventilation naturelle par la cheminée solaire.
- Le troisième chapitre comporte une description des modèles physique étudiée, et il donne des équations générales qui régissent l'écoulement du fluide et le résoudre par logiciel ANSYS FLUENT.
- Le quatrième chapitre englobe les interprétations et les résultats de simulation numérique de l'écoulement dans la configuration étudiée afin de bien comprendre des phénomènes qui régissent le transit d'air.

Finalement, ce mémoire est terminé par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus.

# **Chapitre I**

# **Généralités**

## I.1 Introduction

La ventilation naturelle est utilisée en approche bioclimatique pour fournir l'air frais nécessaire aux occupants pour leur santé, et de contrôler la température pour leur confort.

La ventilation a pour vocation de faciliter l'aération des locaux en évacuant l'air vicié et en renouvelant par l'air frais.

Parmi les cavités qui améliorent l'efficacité de cette ventilation naturelle figurent les cheminées solaires, bien sûr, via l'énergie solaire thermique. Nous allons discuter de tout cela en général dans ce chapitre.

## I.2 Généralité sur le transfert thermique

Le transfert de chaleur est une science qui contient plusieurs concepts pratiques de base utilisés dans de nombreuses applications industriels. Le transfert de chaleur peut s'effectuer au moyen de trois mécanismes différents, **la conduction**, **la convection** et **le rayonnement**. Les connaissances de base dans ce domaine, sont donc indispensables pour comprendre et maîtriser l'utilisation pratique de ces phénomènes. [1]

### I.2.1 Modes du transfert de la chaleur

#### I.2.1.1 La conduction

Ce mode de transfert est le seul à exister dans un solide opaque (qui absorbe tous les rayons). Pour les solides transparents, une partie de l'énergie peut être transmise par rayonnement. Avec les fluides (gaz ou liquides), la convection et le rayonnement peuvent se superposer à la conduction. [1]

La loi fondamentale de la transmission de la chaleur par conduction, a été proposée par le mathématicien et physicien Français, **Jean Baptiste Joseph Fourier** en 1822.

$$Q = K \cdot \frac{S}{e} \cdot \Delta T \quad \text{I. 1}$$

Tels que :

**Q** : La quantité de chaleur échangée à travers la surface (S).

**K** : Le facteur de proportionnalité appelé conductivité thermique qui est une caractéristique du matériau, son unité de mesure est [W/m.K] ou [kcal/h.m.C].

$e$  : L'épaisseur d'une plaque plane.

$\Delta T$  : La variation de température à travers la surface  $S$ .

### I.2.1.2 La convection

Le transfert de la chaleur par convection, se produit entre deux phases dont l'une est généralement au repos et l'autre en mouvement, en présence d'un gradient de température. Le mouvement du fluide peut résulter de la différence de masses volumiques ( $\rho$ ) due aux différences de températures. [1]

La loi fondamentale de la convection est la loi d'**Isaac Newton** (1643-1727), traduite par la relation expérimentale de flux de chaleur échangé par convection entre un fluide et une paroi solide.

$$Q = h.S(T_{chaud} - T_{froid}) \quad \text{I. 2}$$

Tel que  $h$  : représente le coefficient du transfert de chaleur par convection : [W/m<sup>2</sup>.K] ou [Kcal/h.m<sup>2</sup>.C].

### I.2.1.3 Le rayonnement

Le rayonnement est le transfert d'énergie électromagnétique d'un milieu à haute température vers un autre milieu à basse température sans aucun support matériel (il peut s'effectuer dans le vide) [1].

Le flux de chaleur rayonné par un milieu de surface ( $S$ ) et de température ( $T$ ) s'exprime grâce à la loi de Joseph Stefan (1835-1893) et Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906).

$$\Phi_{émis} = \varepsilon . \sigma . S . T^4 \quad \text{I. 3}$$

Tel que :

$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann,  $\sigma = 5,7 . 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 . \text{k}^4)$

$\varepsilon$  : L'émissivité de la surface sans unité.

### I.3 Energie renouvelables

Le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux sont autant de ressources naturelles capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par les hommes. Leur relatif faible impact sur l'environnement en fait des énergies d'avenir face au problème de la gestion des déchets du nucléaire et aux émissions de gaz à effet de serre [2].

On distingue 5 catégories d'énergies renouvelables (ER) suivant les sources :

- Soleil : Energies solaires.
- Vent : Energie éolienne.
- Eau : Energie hydraulique.
- Vivant : Biomasse.
- Terre : Energie géothermique.

#### I.3.1 Energie solaire [3]

Cette énergie provient directement du soleil sous forme d'énergie lumineuse, qui est de type rayonnante.

L'homme a de tout temps utilisé l'énergie solaire pour la conservation des aliments, le séchage et l'extraction du sel de l'eau de mer.

- Les technologies solaires thermiques (chauffe-eau, cuisinière, distillateurs, séchoirs solaires).
- les cellules solaires photovoltaïques qui convertissent l'énergie solaire en électricité par exemple pour pomper l'eau ou pour alimenter de petits réseaux électriques.

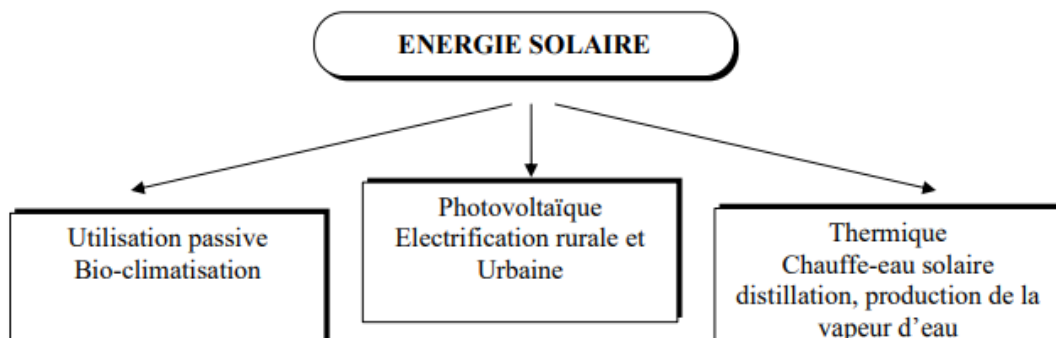


Figure I. 1 : Les différentes filières d'énergie solaire [4].

### I.3.1.1 Energie solaire thermique

L'énergie solaire thermique consiste à transformer le rayonnement solaire en énergie thermique (chaleur). Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans un site donné et au cours d'une période donnée. L'étude du gisement est le point de départ de toute investigation. Cette étude est très indispensable dans le domaine de l'énergie solaire afin de simuler le fonctionnement probable du système énergétique de s'assurer de son intérêt et de sa faisabilité. Le principe consiste à capter le rayonnement solaire et à le stocker dans le cas des systèmes passifs (véranda, serre, façade vitrée) ou, s'il s'agit de système actif, à redistribuer cette énergie par le biais d'un fluide caloporteur qui peut être de l'eau, un liquide antigel ou même de l'air [3].

L'énergie solaire thermique trouve de nombreuses applications [3] :

- La production d'eau chaude.
- Le chauffage des maisons.
- Le chauffage de l'eau des piscines.
- Le séchage des récoltes.
- La réfrigération par absorption pour les bâtiments.
- La production de très haute température.

### I.4 La ventilation

Il existe plusieurs façons de renouveler l'air : au moyen d'équipements spéciaux (ventilation), par l'ouverture de portes ou fenêtres (ventilation intensive en complément à la ventilation ou l'aération s'il y a pas de dispositifs prévus pour la ventilation) et par les interstices et les fentes (infiltration/exfiltration). Ces différentes manières ne sont pas toutes aussi efficaces. [3]

- **Ventiler** signifie apporter de l'air frais et évacuer l'air humide et vicié d'une pièce de façon permanente. Ventiler se fait au moyen de dispositifs spécialement prévus à cet effet qui donnent la possibilité à l'habitant d'assurer un renouvellement de l'air permanent mais réglable. Il existe différents systèmes de ventilation. [3]
- Par contre, **Aérer** est l'action de renouveler des quantités relativement importantes d'air, de manière non permanente, en ouvrant les portes et/ou les fenêtres, le but étant d'atteindre les mêmes résultats qu'en ventilant de manière contrôlée. C'est la méthode

la plus simple pour renouveler l'air intérieur, mais pas la plus efficace. Car chaque fois que l'on aère, l'air est souvent renouvelé plus que nécessaire (5 à 40 fois plus), mais l'effet du renouvellement disparaît assez rapidement, en fonction de la situation et du degré de pollution de l'air intérieur (souvent, les concentrations de certains paramètres comme le CO<sub>2</sub> sont à nouveau dépassées après 1 heure. [3]

#### **I.4.1 Le but de ventilation [3]**

Différents problèmes peuvent surgir suite au manque ou à l'excès de ventilation ou d'aération. Ces problèmes se situent soit au niveau de la santé, soit au niveau du confort, soit au niveau du bâtiment lui-même ou encore au niveau de la consommation énergétique. La ventilation consiste à renouveler l'air d'une pièce ou d'un bâtiment.

- Elle agit directement sur la température de l'air, puisqu'on remplace un volume d'air à la température intérieure par un volume d'air équivalent à la température extérieure.
- Elle agit indirectement, donc plus lentement, sur les températures de surface des parois, car ces dernières peuvent se refroidir ou se réchauffer par convection au contact d'un air plus froid ou plus chaud.

##### **I.4.1.1 Pour le confort**

Le confort est une notion globale: chaleur et froid, lumière, bruit, paysage, eau, verdure, prestige.... et autre, sont autant d'éléments définissant plusieurs paramètres climatiques, esthétiques, psychologiques du confort. Le confort est également la sensation subjective qui n'existe pas en lui-même. [6]

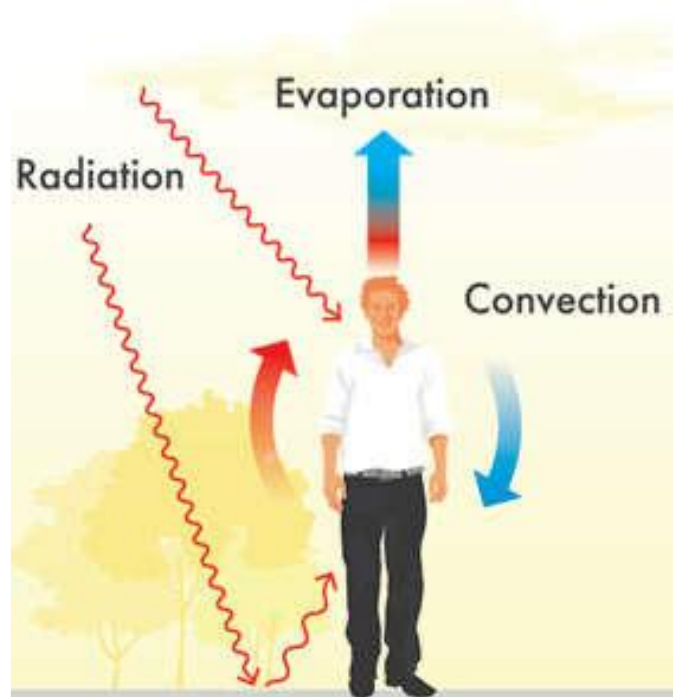
##### **I.4.1.1.1 Le confort thermique**

Dans les milieux bâtis, le confort thermique constitue une exigence essentielle à laquelle le concepteur doit apporter les réponses nécessaires. L'environnement thermique est caractérisé par quatre grandeurs physiques (la température de l'air, l'intensité de rayonnement solaire, l'humidité et la vitesse de l'air). Ces variables réagissent avec l'activité et la vêtue du corps humain pour établir son état thermique et constituent ensemble les six paramètres de base des échanges thermiques entre l'homme et son environnement. [7]



**a) Paramètres affectant l'environnement thermique intérieur**

L'échange de chaleur entre le corps humain et l'environnement se produit principalement de trois manières : la radiation, la convection et l'évaporation. [8]



**Figure I. 2 :** Echange de chaleur entre le corps humain et son environnement. [8]

L'environnement thermique intérieur est affecté par des sources internes et des sources externes.

Sources courantes de chaleur :

- Les équipements électriques.
- Les radiations du soleil.
- La présence humaine.

Sources courantes du froid :

- Les surfaces vitrées.
- Les murs faiblement isolés.
- Les ponts thermiques dans les constructions.

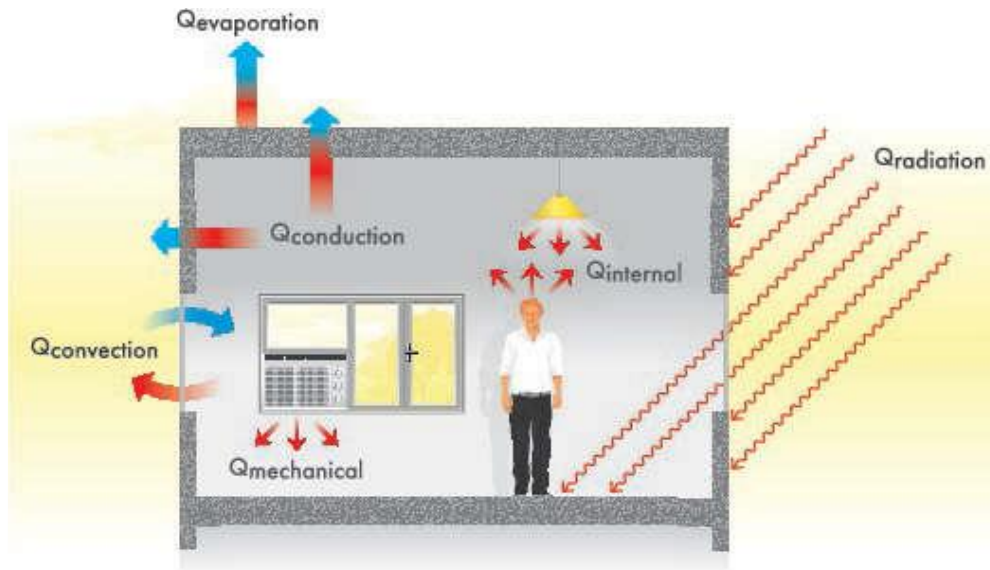


Figure I. 3 : Les sources de chaleur et de froid. [8]

#### I.4.1.2 Pour la santé

Tous les êtres vivants, qu'ils soient animaux ou végétaux respirent. Ils consomment alors de l'oxygène et rejettent du  $CO_2$ . Si une maison, ou n'importe quel habitacle, n'est pas ventilée, le taux d'oxygène va diminuer ce qui peut être à terme dangereux. En ventilant, on amène de l'air neuf qui permet d'apporter de l'oxygène. Le développement des virus est également limité lorsque la maison est bien ventilée. [9]

### I.4.2 Type de ventilation

#### I.4.2.1 Ventilation mécanique

La ventilation mécanique consiste à recourir à des systèmes mécaniques pour apporter et extraire l'air des bâtiments. Elle permet d'affranchir des conditions climatiques.

L'air frais est aspiré par des ventilateurs électriques et amené dans les locaux secs au moyen de conduits et de bouches d'insufflation. Ce type de ventilation n'est pas approfondi. [3]

#### I.4.2.2 Ventilation naturelle

La ventilation naturelle est un système de ventilation permettant de renouveler l'air intérieur des bâtiments en reposant sur l'action de deux forces principales, le vent et l'écart de température entre l'air extérieur et l'air intérieur (Figure I.4 et Figure I.5). Ces deux moteurs sont variables dans le temps et suivant le site et rendent ainsi difficile le contrôle des débits d'air internes. [3]

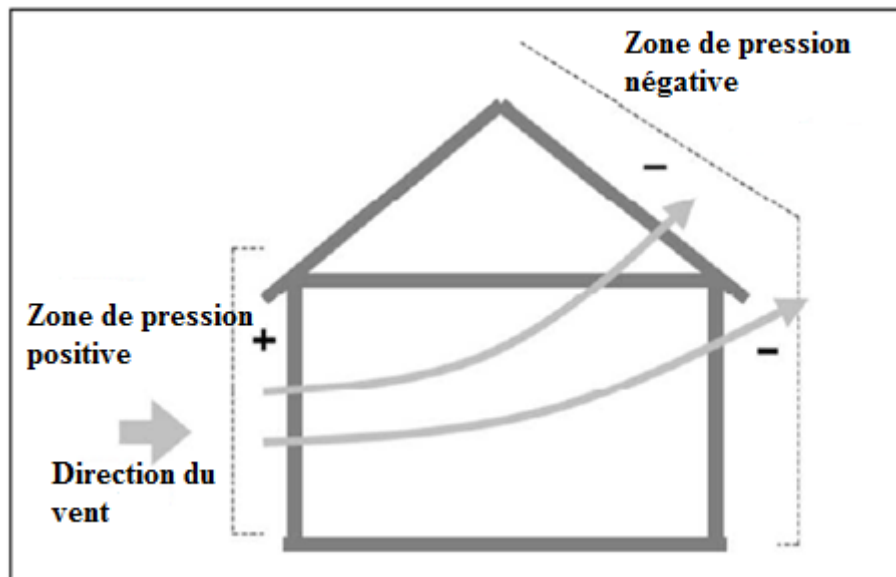


Figure I. 4 : Action du vent sur les bâtiments [10].

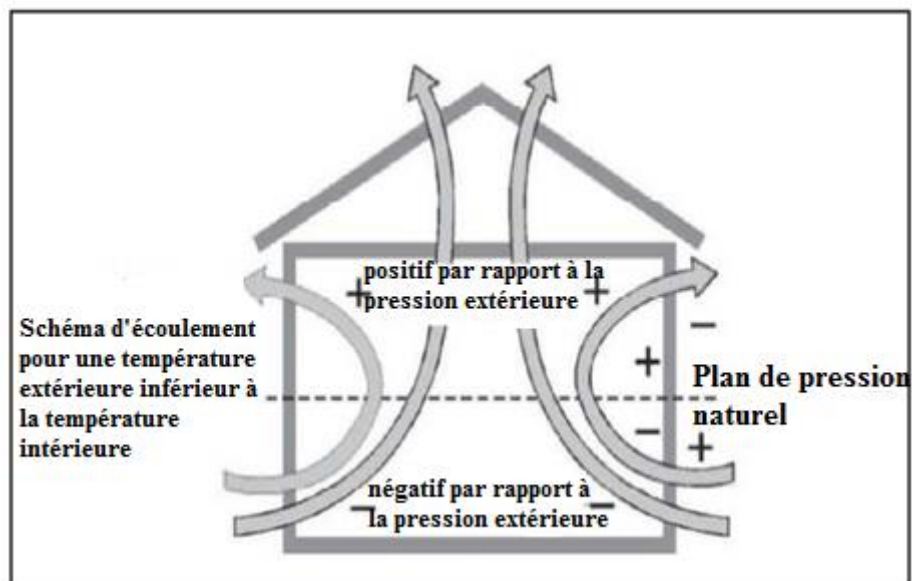


Figure I. 5 : Effet du tirage thermique dans les bâtiments. [10]

## I.5 Généralité sur la ventilation naturelle

### I.5.1 Principe de la ventilation naturelle

La ventilation naturelle se base sur plusieurs principes simples et faciles à mettre en œuvre. Il s'agit en effet d'aérer le logement sans aide mécanique en se basant sur : [11]

1. L'ouverture des fenêtres.
2. La ventilation traversant.
3. Le tirage thermique.

### I.5.1.1 Ouverture des fenêtres

C'est le procédé d'aération le plus simple. C'était d'ailleurs le seul principe de ventilation pendant longtemps. La ventilation naturelle par ouverture des fenêtres permet de réduire les infiltrations d'air par les défauts d'étanchéité de l'enveloppe et donne aux occupants la possibilité de contrôler les ouvertures des fenêtres et des entrées d'air en façade. [3]

### I.5.1.2 La ventilation traversant

Cette méthode repose sur l'existence d'une circulation d'air entre deux ouvertures opposées c'est-à-dire une différence de pression entre les ouvertures, causée par l'effet du vent et du tirage thermique (Figure I.6). Par conséquent, s'il n'y a aucun obstacle à l'écoulement (portes fermées, par exemple), l'air entre du côté en surpression et sort du côté en dépression. Ainsi, l'utilisation de la ventilation naturelle traversant nécessite une étude architecturale approfondie, afin de profiter au mieux de l'effet du vent et du tirage thermique [12].

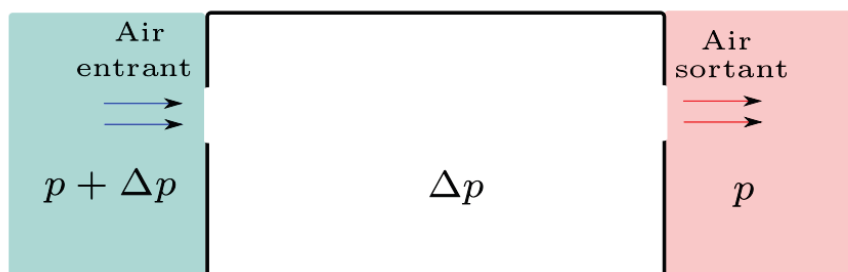


Figure I. 6 : Principe de la ventilation traversant. [12]

Il existe deux types de ventilation naturelle traversant : La ventilation traversant horizontale et verticale [12].

### I.5.1.3 Le tirage thermique

Le tirage thermique repose sur une différence de masse volumique entre l'air intérieur et l'air extérieur d'un bâtiment ou entre deux zones, (Figure I.7). La masse volumique de l'air dépend de sa température et de son taux d'humidité<sup>1</sup>. Ainsi, le fait que les masses volumiques de l'air intérieur et extérieur soient différentes, crée une différence de pression hydrostatique, appelé tirage thermique ou effet de cheminé [10].

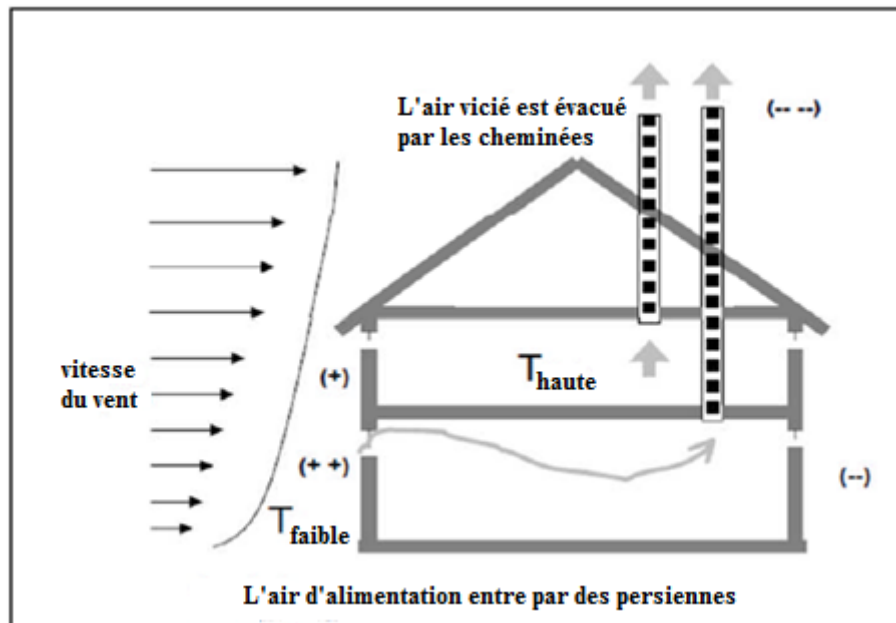


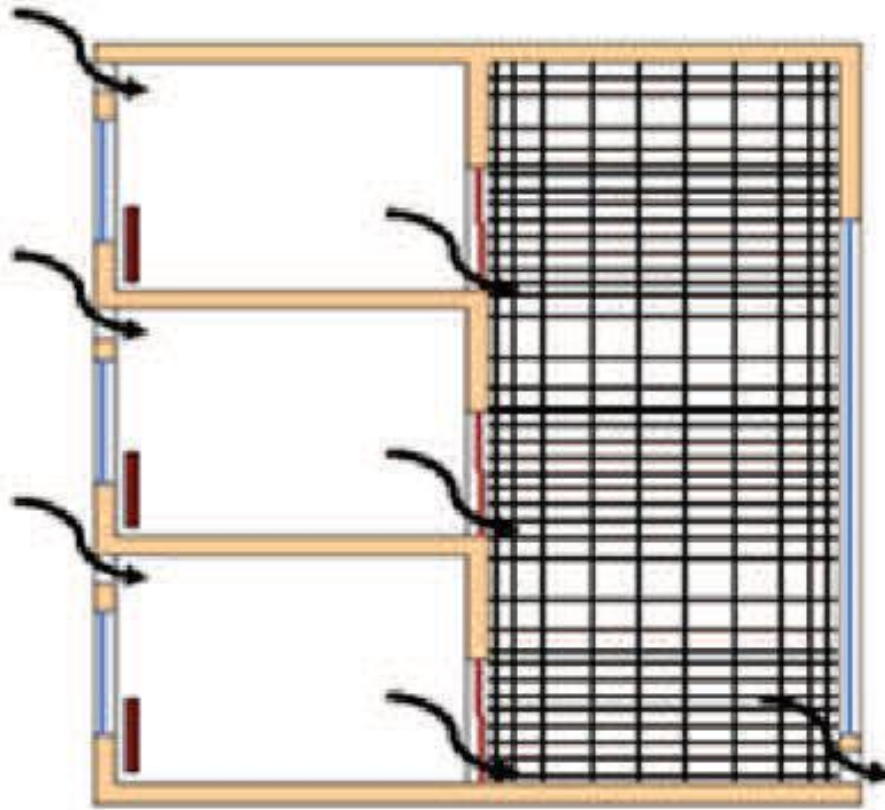
Figure I. 7 : Effets combinés du vent et du tirage thermique [10].

### I.5.2 Modélisation de la ventilation naturelle

Il existe plusieurs modèles de ventilation naturelle (modèles empiriques, modèles monozones, modèle CFD, modèles multizones, modèles zonaux) ce qui nous intéresse dans ce travail est le modèle CFD.

#### I.5.2.1 Modèles CFD

Les modèles CFD sont employés dans de nombreux domaines de l'ingénierie et notamment dans le bâtiment, afin de prédire les écoulements fluides. Ils permettent une évaluation plus détaillée de la distribution spatiale et temporelle des grandeurs physiques de l'écoulement telles que la vitesse d'air, la température, la pression, la concentration en polluant, etc. Ils nécessitent alors un maillage du domaine étudié beaucoup plus fin que les autres modèles de ventilation naturelle (Figure I.8). [12]



**Figure I. 8** : Illustration de la modélisation CFD. [12]

### I.5.3 Avantages et inconvénients de ventilation naturelle [13]

#### I.5.3.1 Avantages

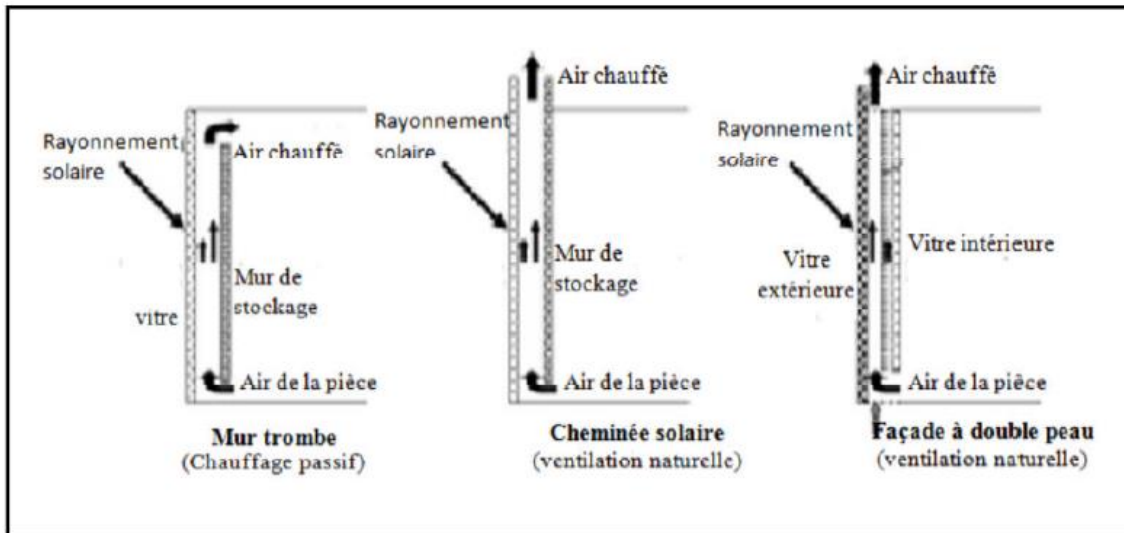
- Limitation de la consommation d'énergie.
- Autorégulation : plus de la chaleur se dégage plus il en est évacué.
- Arrivée supplémentaire de la lumière du jour par les ouvertures.
- Investissement et amortissement réduits.
- Durée de vie plus longue.
- fonctionnement silencieux.
- faible demande d'entretien et moins de sensibilité aux pannes.

#### I.5.3.2 Inconvénients

- Soumise aux aléas climatiques.
- Pertes d'énergie l'hiver.

### I.5.4 Différentes cavités utilisé en ventilation naturelle

Les cheminées solaires, les façades à doubles peaux et les murs trombe sont des cavités ouvertes, ont conçu pour se servir de l'énergie solaire pour le chauffage passif, ventilation naturelle et dans le cas de la façade à double peau fournie également la lumière du jour. La figure (I.9) montre les trois types de cavité pour le chauffage passif et la ventilation naturelle dans des bâtiments. La flottabilité thermique est le mécanisme principal pour la circulation d'air dans les cavités ouvertes. [3]



**Figure I. 9 :** Diagramme schématique de trois types de cavité pour le chauffage passif et la ventilation naturelle [14].

#### I.5.4.1 Le mur trombe

Le mur Trombe-Michel, ou mur trombe, est basé sur le même phénomène physique que le mur capteur. Le rayonnement solaire vient chauffer une lame d'air présente entre un vitrage à faible émissivité et un mur à forte inertie thermique. Via un système de clapets situés en partie supérieure et inférieure du mur, une circulation d'air est possible entre l'intérieur de la pièce et la lame d'air chauffée. Il existe deux modes de fonctionnement : [3]

- Lorsque le rayonnement est présent dans la journée, il est possible d'ouvrir les clapets afin de permettre une convection naturelle. L'air de la pièce, relativement plus froid, vient se réchauffer au contact du mur capteur, et ainsi créer un mouvement convectif qui va permettre le réchauffement de la pièce en contact avec le mur. Il y a donc circulation aéraulique entre la lame d'air et le volume adjacent.

- En l'absence d'ensoleillement, on ferme les clapets, et la chaleur emmagasinée par le mur capteur est restituée par rayonnement à la pièce, créant ainsi une convection naturelle, mais cette fois-ci sans mouvement d'air.

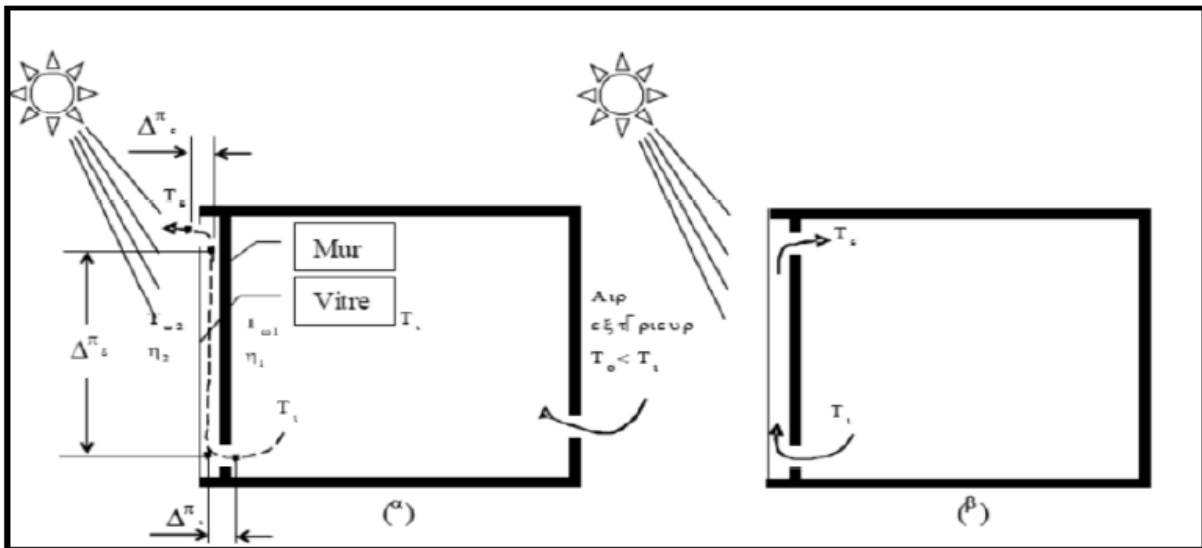


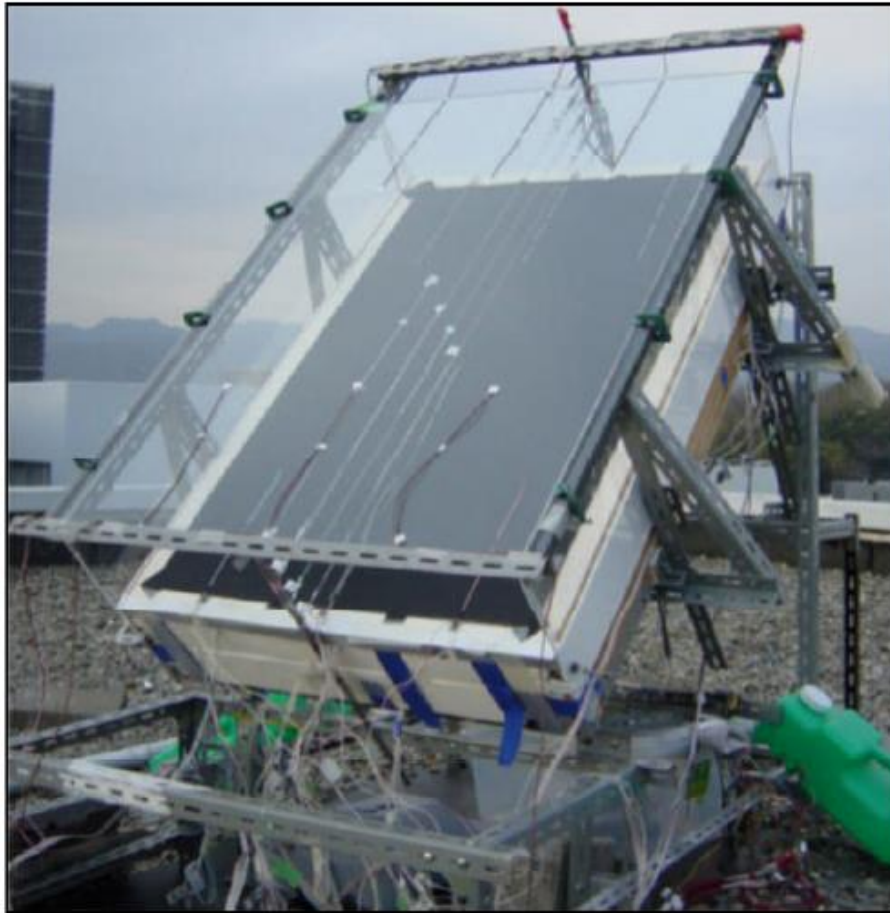
Figure I. 10 : Mur Trombe utilisé comme : a) ventilateur, b) chauffage. [3]

#### I.5.4.2 La cheminée solaire

La cheminée solaire a une structure et un mécanisme de fonctionnement semblable au mur trombe. La différence distincte entre les deux, est que le mur trombe absorbe l'énergie solaire, et le recyclage d'air chaud résulte le chauffage passif du bâtiment. La cheminée solaire fournit au bâtiment la ventilation pendant le jour sans recyclage d'air dans la pièce.

Une cheminée solaire peut être un des composants d'un bâtiment, dans lequel un ou plus de murs d'une cheminée sont transparents, le mur vitré permet le rayonnement solaire s'accumuler assez de chaleur pour induire l'effet de cheminée. L'énergie solaire réchauffe l'air à l'intérieur de la cheminée. En raison de la différence de la température d'air, un gradient de densité entre l'intérieur et l'extérieur de la cheminée provoque un mouvement ascendant d'air [15].





**Figure I. 11** : photo réelle de la cheminée solaire [16].

## **I.6 Généralité sur la cheminée solaire**

### **I.6.1 Effet de cheminée**

L'effet de cheminée est la tendance d'un fluide qu'en s'échauffant s'élève, en raison de la diminution de sa densité, résultant des différences de la température et d'humidité. On utilise ce phénomène thermique naturel pour évacuer la surchauffe de l'intérieur d'une construction en facilitant la sortie de l'air tiède ou chaud à travers des ouvrants en partie haute. Ce tirage thermique peut induire une dépression intérieure susceptible d'aspirer l'air plus frais du dehors à travers des ouvrants en partie basse [15].

### **I.6.2 Description [11]**

Dans sa plus simple forme, la cheminée solaire est constituée d'une cheminée peinte en noir. Pendant le jour, l'énergie solaire réchauffe le conduit de la cheminée et l'air contenu à l'intérieur, y créant un appel d'air. L'aspiration ainsi créée à sa base peut être utilisée pour ventiler et refroidir le bâtiment en dessous.

Les cheminées solaires se déclinent en plusieurs genres. Les éléments de base d'une cheminée solaires sont :

1. La surface du capteur solaire : Elle peut être située dans la partie supérieure du conduit de cheminée ou peut être le tube tout entier. L'orientation, le type de vitrage, l'isolation et les propriétés thermiques du tube sont cruciaux pour exploiter, retenir et utiliser les gains solaires.
2. Le puits de ventilation principal : le lieu, la hauteur, les sections et les propriétés thermiques de cette structure sont également très importants.
3. Les entrées et sorties d'air : leurs dimensions, leur emplacement, aussi bien que leur aspect aérodynamique sont aussi cruciaux.

### I.6.3 Modes d'opérations d'une cheminée solaire

Trois modes d'opérations de la cheminée solaire, qui sont appropriés à chaque saison [15] sont illustrés dans la figure (I.12).

- Cas de chauffage : la cheminée solaire fonctionne en mode de chauffage passif. L'air extérieur est entré dans la cheminée, et réchauffé par l'énergie solaire absorbée. L'entrée d'air chaud dans la salle contribue à la réduction d'une charge thermique.
- Cas de refroidissement avec la température d'extérieure est inférieure à la température d'air dans la pièce : la cheminée solaire peut fonctionner dans le mode de ventilation et le refroidissement passif.
- Cas de refroidissement est et la température d'extérieure est supérieur à la température d'intérieure : la cheminée solaire n'est pas employée pour augmenter la ventilation parce que l'introduction d'air extérieure sans pré réfrigéré résulte une augmentation de la température à l'intérieur. Par conséquent, l'air entre dans la cheminée et s'échapper vers l'extérieur par l'ouverture supérieur. Ce mode d'opération s'appelle l'isolation thermique, a un effet de la diminution d'un gain de la chaleur dans la salle par la cheminée solaire.

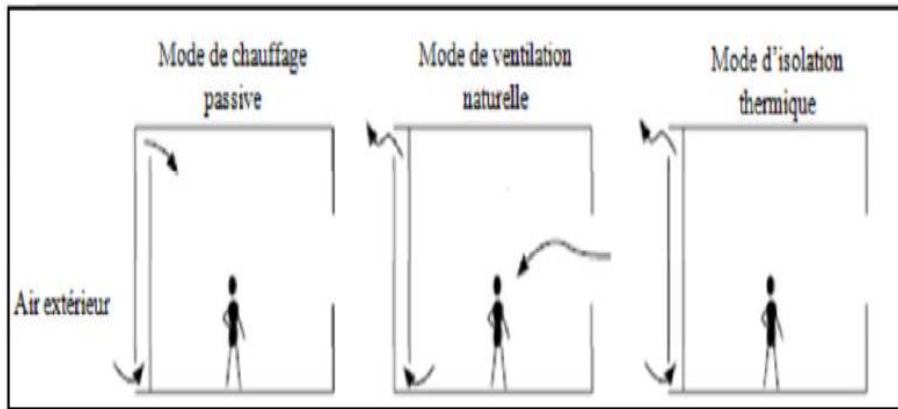


Figure I. 12 : Les trois modes de fonctionnement d'une cheminée solaire [15].

#### I.6.4 Les constituants d'une cheminée solaire

Les principaux composants de la cheminée solaire présentée sur la figure (I.13) sont :

- (1) : l'air qui traverse la cheminée.
- (2) : l'absorbeur.
- (3) : le vitrage.
- (4) : l'isolation de l'absorbeur.

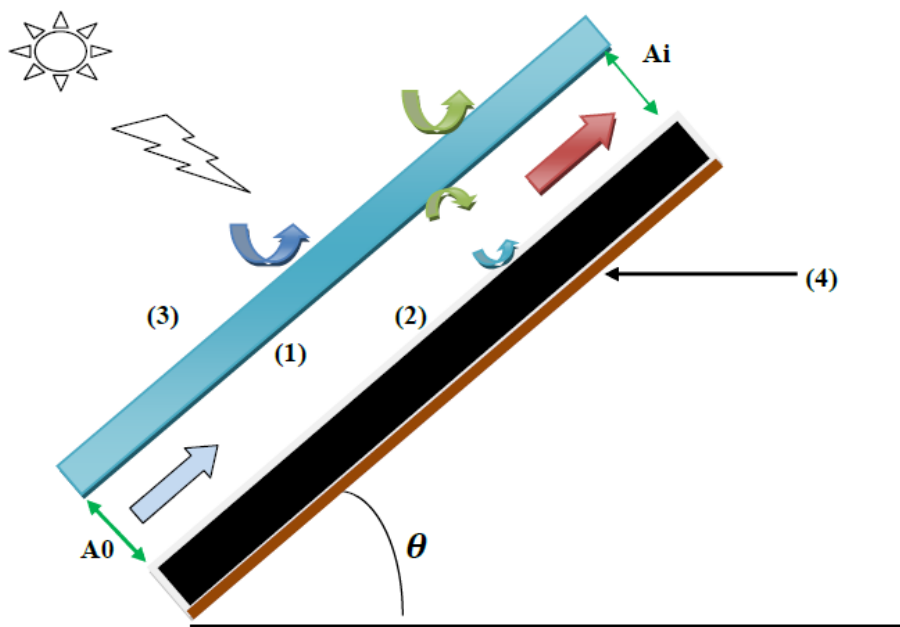


Figure I. 13 : Les principaux composants de la cheminée solaire. [3]

### I.6.5 Fonctionnement

Le fonctionnement de la cheminée de ventilation naturelle assisté par un système solaire est le suivant : [11]

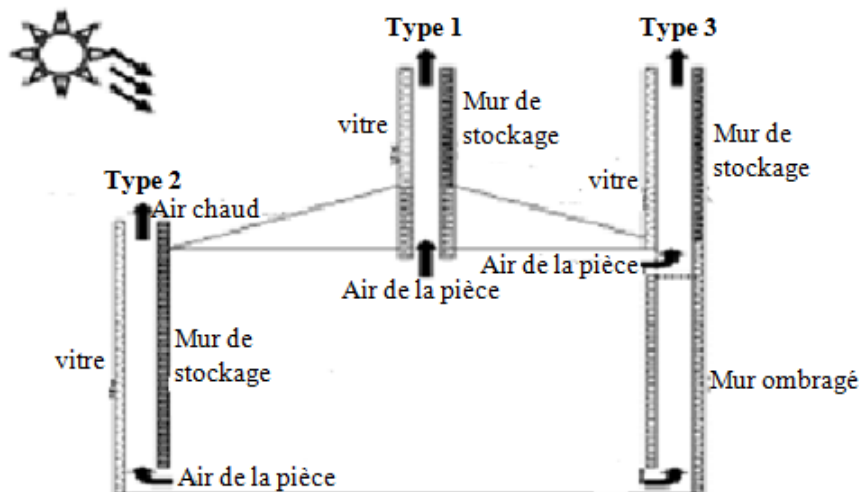
1. L'air frais entrant dans les salles de classe à travers des murs est préchauffé derrière les radiateurs. L'air des salles de classe est extrait vers les axes principaux d'extraction.
2. L'air monte dans les axes d'extraction grâce à l'effet de cheminée
3. L'air entre dans la cheminée solaire
4. L'air est chauffé dans des collecteurs solaires d'air qui augmentent l'effet de cheminée
5. L'air est évacué par le haut des cheminées solaires.

### I.6.6 Types de cheminée solaire

Actuellement, on peut distinguer deux types de cheminée.

#### I.6.6.1 Cheminée solaire verticale

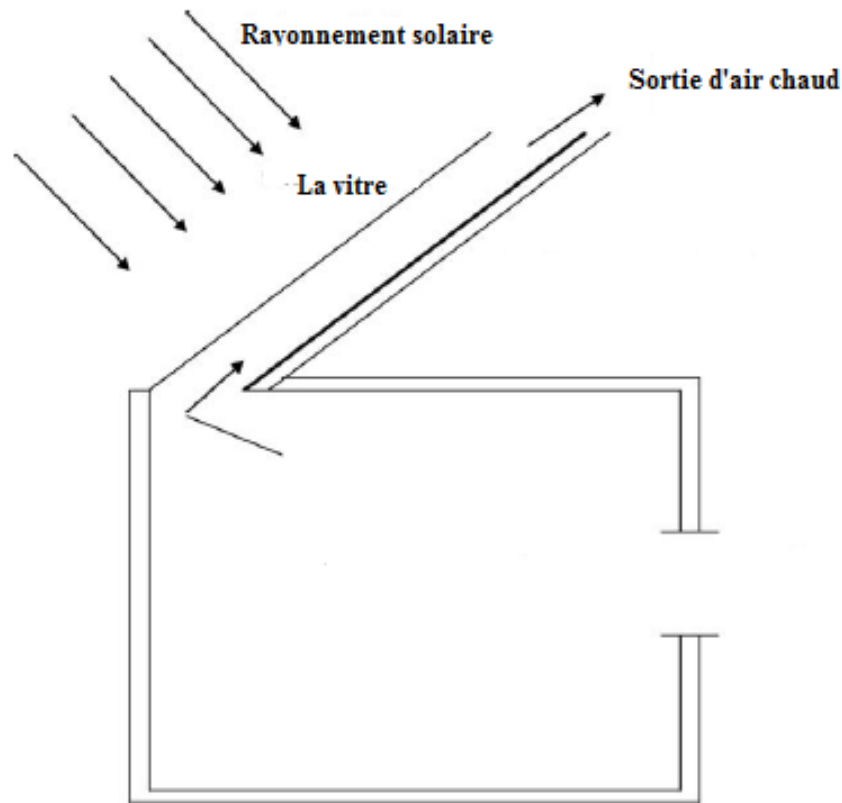
Ce type est le plus rencontré, où l'entrée d'air se fait par l'ouverture au fond et la sortie par l'ouverture au-dessus. Par convention, trois types de cheminée sont dénotés selon l'admission (figure I.14). Le positionnement de l'ouverture d'admission représente trois manières possibles, d'intégrer La cheminée solaire dans un bâtiment pour la ventilation naturelle [7].



**Figure I. 14** : Types de cheminée solaire selon l'ouverture d'entrée, et leur position pour la ventilation naturelle [7].

### I.6.6.2 Cheminée solaire inclinée

Conceptuellement, les cheminées solaires inclinées sont semblables aux cheminées solaires verticales. La seule différence est qu'elles sont intégrées d'une façon inclinée à un certain angle approprié, pour capturer le maximum de rayonnement solaire possible [7].



**Figure I. 15 :** Installation d'une cheminée solaire inclinée [7].

## I.7 Conclusion

Dans ce chapitre une étude descriptive est présentée sur cheminées solaire, ses composants, ses types, les caractéristiques et les paramètres de fonctionnement. et généralités sur le confort thermique et la ventilation naturelle, nous avons également donné un aperçu des méthodes de transfert de chaleur et de l'énergie solaire thermique.

# **Chapitre II**

## **Recherches bibliographiques**

## II.1 Introduction

La cheminée solaire est une idée attrayante pour beaucoup de chercheurs dans différents champs. En vue d'améliorer la ventilation naturelle, différentes configurations de la cheminée ont été étudiées et expérimentées. Le présent chapitre décrit ces différentes configurations, les conditions expérimentales et les différents résultats atteints, par certains auteurs.

Après des recherches approfondies, nous avons résumé ce chapitre en trois grands domaines importants :

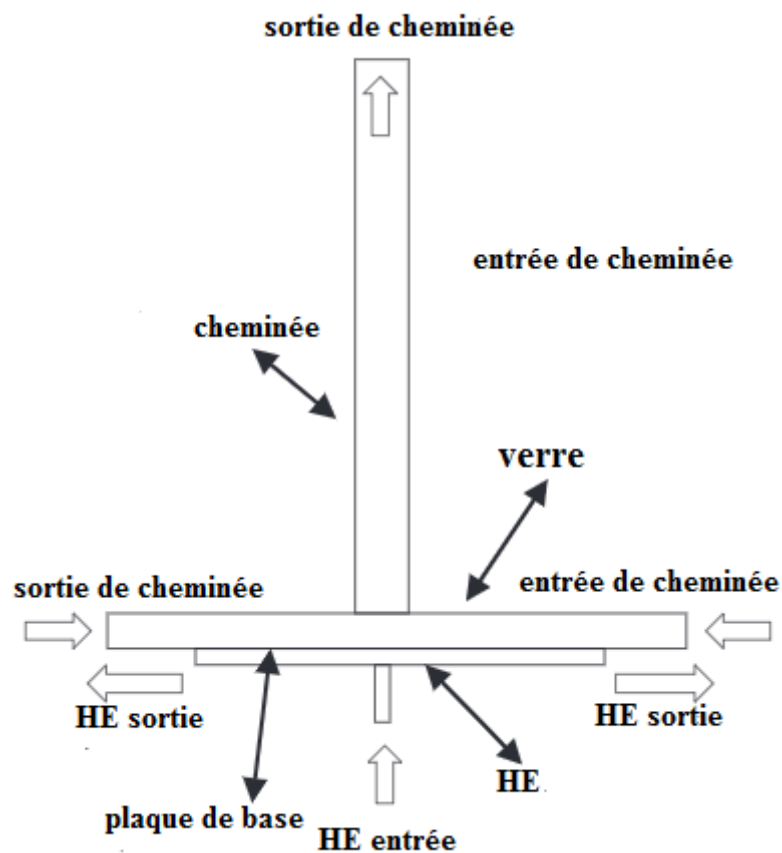
- Utilisation de la cheminée solaire.
- Etude des performances de ventilation naturelle par la cheminée solaire.
- L'effet de l'inclinaison sur les performances de la cheminée solaire.

## II.2 Utilisation de la cheminée solaire

Mukundjee, Pandey et al. [17] ont proposé une méthode CFD pour la modification et l'amélioration de la cheminée solaire de Manzanares (Espagne) avec un échangeur de chaleur à récupération de chaleur perdue pour une utilisation nocturne.

L'objectif de leur travail est de modifier le modèle existant afin qu'il puisse être utilisé pour la production d'énergie même dans des conditions nocturnes et nuageuses. La chaleur résiduelle peut être utilisée pour chauffer la base ou l'absorbeur du capteur de la cheminée solaire, ou pour chauffer l'air circulant à l'intérieur de la cheminée. Une plaque d'échangeur de chaleur (HE) en alliage d'aluminium a été utilisée avec du syltherm-800 comme fluide caloporteur (HTF), et échangeant la chaleur avec l'air à l'intérieur de la cheminée près de sa base. L'effet de différents paramètres comme la température d'entrée du FTH, le débit massique du FTH, la température ambiante de l'air et le diamètre de la plaque de l'échangeur de chaleur sur les performances du capteur solaire de la cheminée a été analysé. De plus, l'efficacité de conversion maximale d'environ 5 % est atteinte, ce qui est supérieur à la cheminée solaire fonctionnant dans des conditions normales de jour. Les limites du présent travail sont liées au stockage de la chaleur pendant la journée ou à la fourniture continue de chaleur résiduelle pendant les opérations de la cheminée[17].

Ils ont conclu que les quatre paramètres sont cruciaux pour l'amélioration de la performance d'une cheminée solaire de récupération de chaleur. Mais la plus importante d'entre elles est l'augmentation du diamètre de l'HE, c'est-à-dire l'augmentation de la surface de contact entre le HTF et l'air. Ensuite, en termes de priorité, le deuxième paramètre devrait être l'augmentation de la température ambiante, tandis que le troisième paramètre est l'augmentation du débit massique et le dernier est l'augmentation de la température d'entrée du FTH respectivement [17].



**Figure II. 1 :** Schéma de principe d'une cheminée solaire avec HE [17].

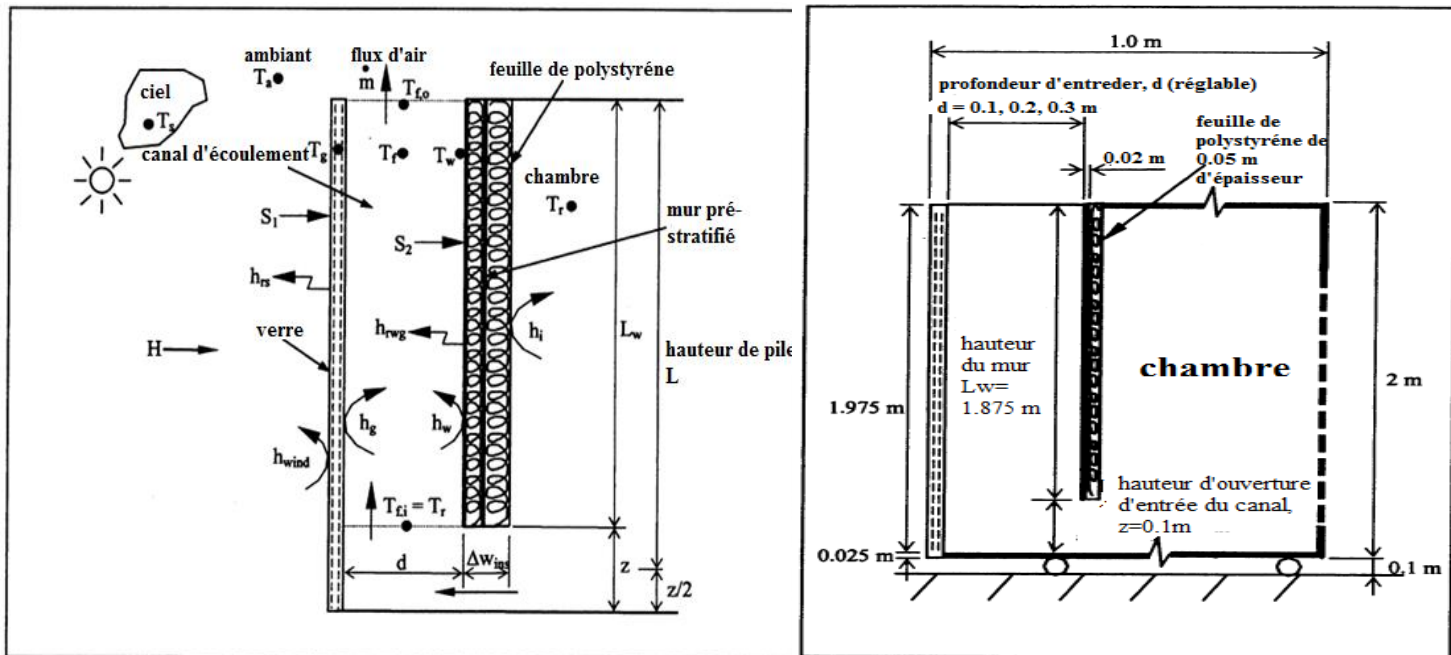
### II.3 Etude des performances de ventilation naturelle par la cheminée solaire

Un modèle mathématique d'une cheminée solaire a été proposé par K.S. Ong et C.C. Chow [18] afin de prédire ses performances dans des conditions ambiantes et géométriques variables. Les performances de la cheminée ont été évaluées en prédisant les températures du vitrage et de la paroi absorbant la chaleur, ainsi que la température et la vitesse du flux d'air



induit dans la cheminée. Les effets de la lame d'air et de l'intensité du rayonnement solaire sur les performances de différentes cheminées ont été étudiés. Afin de vérifier le modèle théorique, des expériences ont été menées sur un modèle physique de 2 m de haut et de 30,45 m de large avec des espaces d'air de 0,1, 0,2 et 0,3 m. Les expériences ont été réalisées à l'extérieur sur le toit et le modèle expérimental a été exposé au rayonnement solaire direct et diffus. Des vitesses d'air comprises entre 0,25 m/s et 0,39 m/s pour une intensité de rayonnement allant jusqu'à 650 W/m<sup>2</sup> ont été obtenues. Aucune circulation inverse du flux d'air n'a été observée, même avec un grand écart de 0,3 m.

Un accord qualitatif et satisfaisant a été obtenu entre les résultats expérimentaux et théoriques pour le flux d'air. L'étude a montré aussi une augmentation de la température de l'air pour l'espace d'air plus grand de 0,3 m entre les valeurs d'intensité de rayonnement de 200 à 650 W/m<sup>2</sup>.

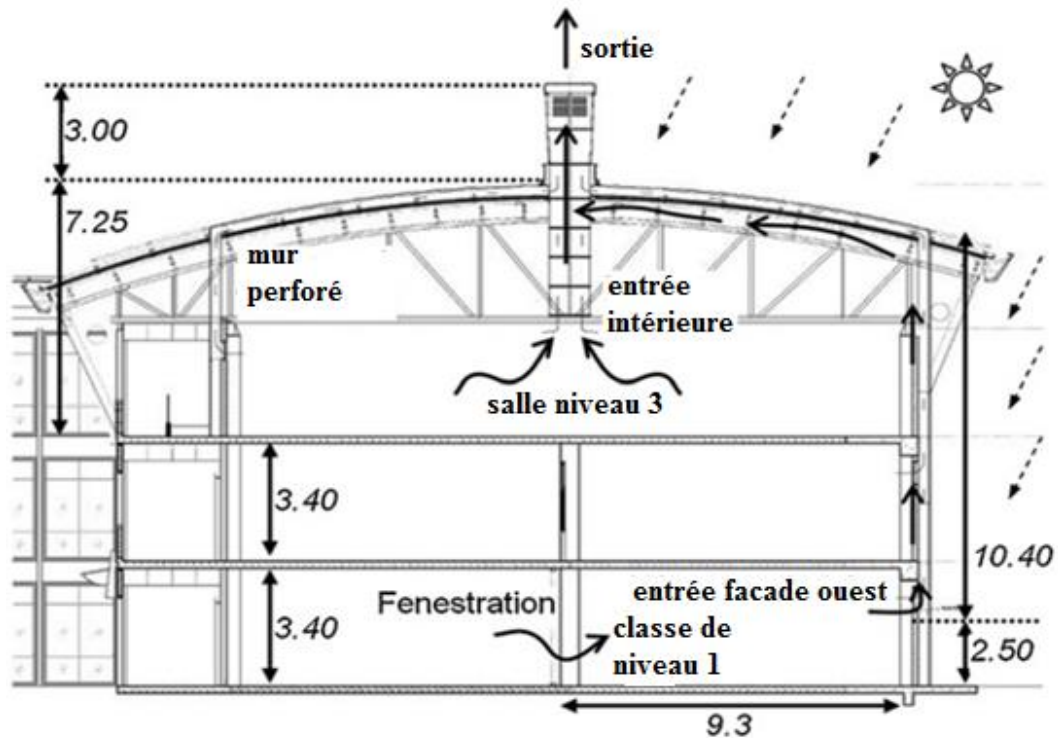


Modèle physique de cheminée.

Vue en coupe.

Figure II. 2 : Cheminée solaire expérimentale de type mural [18].

Le "Zero Energy Building" est un bâtiment de trois étages situé à Singapour, qui a été récemment rénové en 2009 et doté d'une série de caractéristiques écologiques. Alex Yong et al. [19] ont construit un système de cheminée solaire pour améliorer la ventilation de l'air dans les espaces intérieurs en utilisant une série de conduits à assistance solaire qui relient les salles de classe du rez-de-chaussée et le hall de l'étage supérieur. Le mécanisme du système de cheminée solaire est expliqué en détail et les expériences menées ont séparé la salle de classe en régions expérimentale et de référence de volumes similaires. Les résultats ont montré que le système de cheminée solaire fonctionne bien dans les régions tropicales chaudes et humides, y compris les jours plus frais. En outre, la présence du système de cheminée solaire a effectivement fait en sorte que la vitesse de l'air intérieur de la région expérimentale atteigne un maximum de 0,49 m/s et que la température de l'air intérieur se réchauffe plus lentement et se refroidisse plus rapidement de 1 à 2 heures par rapport à la région de référence. Enfin, la position de l'entrée de la cheminée solaire à l'intérieur de la salle de classe s'est avérée significative, en l'abaissant à la hauteur d'occupation de 1,20 m, la vitesse de l'air intérieur a augmenté pour atteindre un maximum de 0,60 m/s.



**Figure II. 3 :** Principe de l'effet de cheminée solaire desservant la région expérimentale de la salle de classe du niveau 1 dans le bâtiment à énergie zéro considéré (dimensions en mètres) [19].

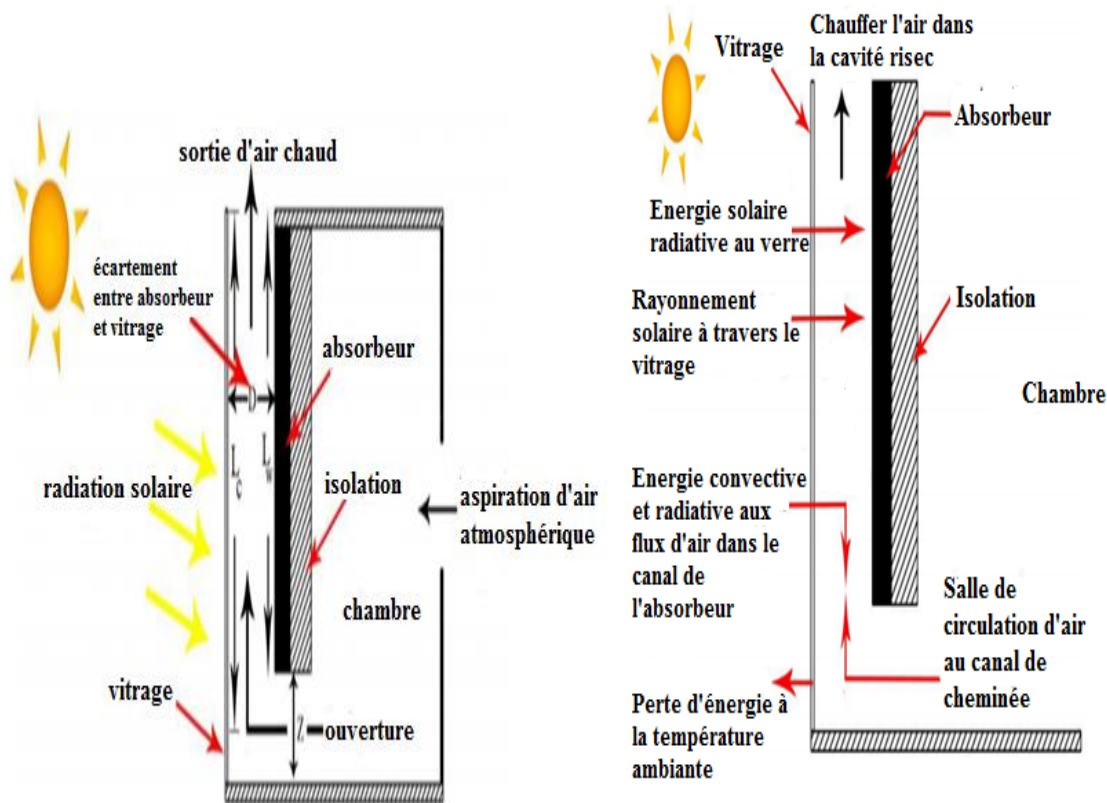
Ils ont conclu [19] :

- Les résultats montrent que dans les conditions nuageuses de Singapour pendant la mousson pluvieuse, le faible rayonnement solaire, associé à l'interconnexion des cheminées thermiques dans le hall, peut induire une vitesse d'air moyenne de 1,5 m/s et 0,4 m/s dans la cheminée solaire et la salle de classe de niveau 1 respectivement.
- De plus, la position de l'entrée de la cheminée solaire à l'ouest de l'entrée du hall a une influence limitée sur la performance de l'air dans les conduits de la cheminée solaire et sur la température de l'air dans la salle de classe du niveau 1. Cependant, les données expérimentales et les tests de fumée dans la salle de classe de niveau 1 montrent que l'abaissement de l'entrée est significatif dans l'amélioration de la vitesse de l'air intérieur où l'abaissement de l'entrée de la cheminée solaire face, Ade ouest à la hauteur de l'occupation de 1,20 m, la vitesse de l'air intérieur augmente à un maximum de 0,6 m/s.

- Comme la cheminée solaire dans le bâtiment à énergie zéro considéré est une étude pilote et donc bien que son opérabilité soit vérifiée, des recherches supplémentaires peuvent être effectuées pour optimiser ses performances en variant ses paramètres de conception.

M.A. Hosien et S.M. Selim [20] ont étudié les performances d'une cheminée solaire utilisée pour la ventilation naturelle d'une enceinte fermée afin d'économiser de l'énergie. Les paramètres géométriques et opérationnels ont été pris en compte. Ces paramètres comprennent : le rayonnement solaire incident, la vitesse du vent, la température ambiante et les dimensions de la cheminée solaire : hauteur, écartement et largeur. En outre, différents matériaux de couverture de cheminée ont été examinés. Les résultats du modèle mathématique ont été comparés aux données publiées disponibles.

Les résultats ont montré que le taux de renouvellement d'air par heure (ACH) dépendait significativement de la vitesse du vent ainsi que des dimensions (hauteur, espace et largeur). L'ouverture de la cheminée, la vitesse du vent influencent largement le débit d'air. L'effet de la hauteur de la cheminée n'était pas assez important pour être rentable. Les résultats ont montré que le taux de renouvellement de l'air par heure (ACH) tout au long de l'année était supérieur aux normes de ventilation souhaitées dans les espaces clos. L'utilisation de matériaux autres que le verre pour construire le couvercle extérieur de la cheminée a permis d'obtenir un débit plus élevé que le taux de renouvellement de l'air par heure (ACH) standard [20].

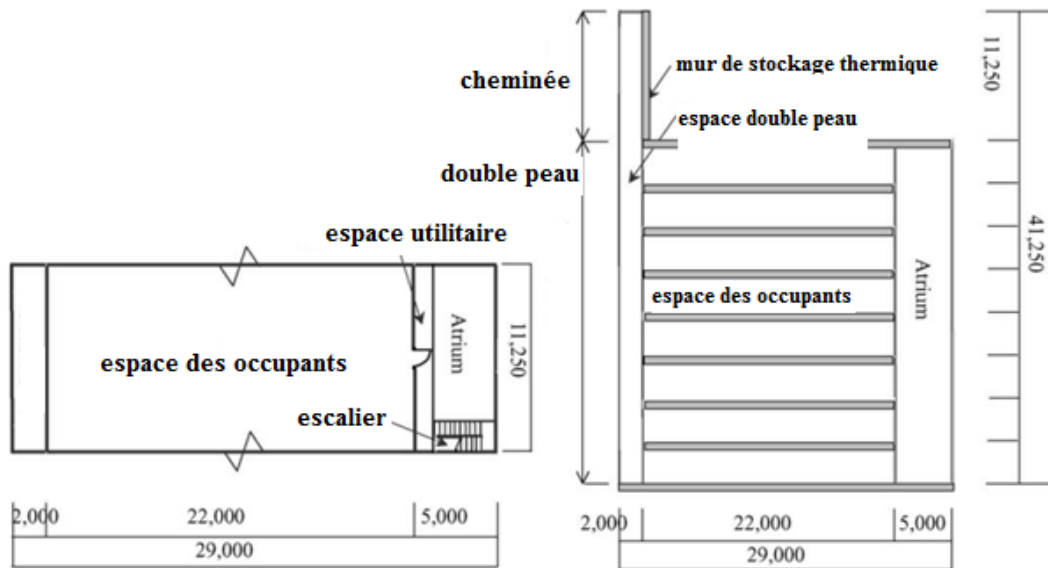


### Configuration des cheminées solaires.

### Fonctionnement de la cheminée solaire

**Figure II. 4 :** Schéma des configurations et du fonctionnement des cheminées solaires [20].

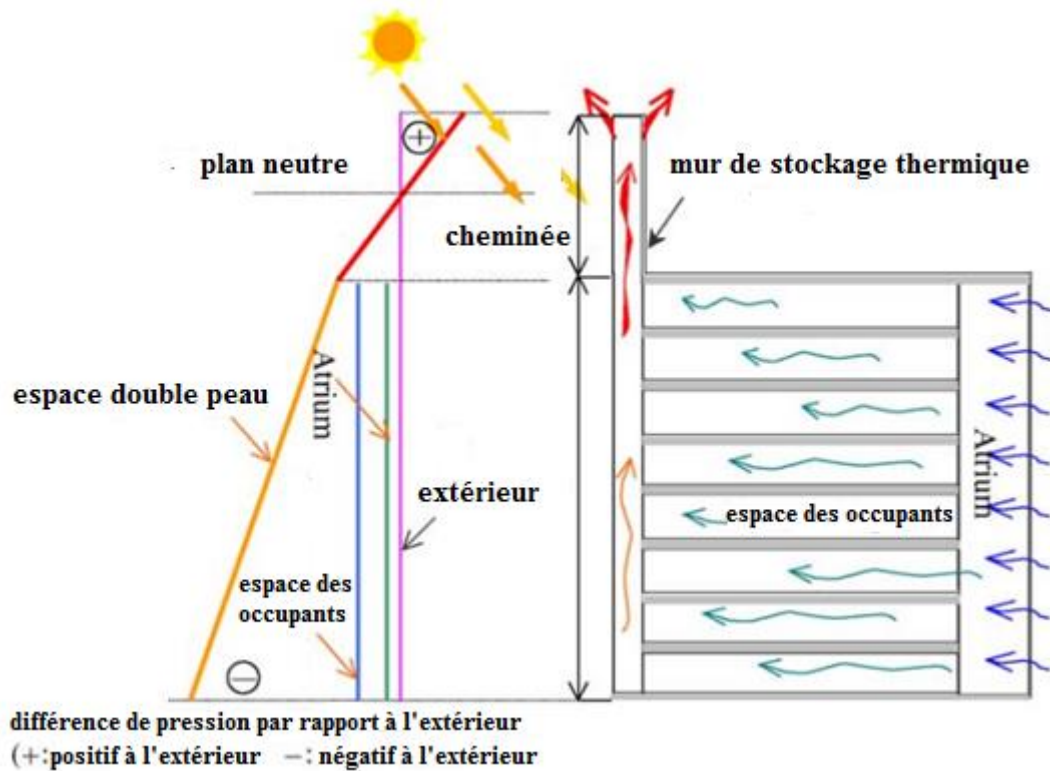
Wenting Dinga et al. [21] ont fait une étude sur les performances de ventilation naturelle d'une façade double peau sont mises en évidence. Un bâtiment prototype est proposé. Il s'agirait d'un immeuble de bureaux de huit étages avec un atrium sur le côté nord. La façade sud du bâtiment est une façade à double peau et un espace de stockage thermique appelé cheminée solaire est considéré au-dessus de l'espace à double peau. En fait, l'espace double peau est relié au canal de la cheminée. Des expériences à échelle réduite et des analyses de dynamique des fluides numériques (CFD) sont réalisées dans le cadre de cette recherche pour évaluer les performances de ventilation naturelle du bâtiment prototype.



**Figure II. 5** : Schéma du bâtiment prototype (à gauche : plan, à droite : section, unités : mm) [21].

Ils ont conclu que [21] :

- 1- Pour assurer une circulation d'air optimale au dernier étage, il est recommandé que les surfaces d'ouverture entre l'extérieur et l'atrium ne soient pas inférieures à  $16 \text{ m}^2$  ( $2 \text{ m}^2$  par étage).
- 2- Bien que des zones d'ouverture plus grandes entre l'espace des occupants et l'espace à double paroi permettent d'augmenter le débit de ventilation, elles sont désavantageuses pour les étages supérieurs du point de vue de la différence de pression. Comme la croissance du taux de renouvellement de l'air diminue fortement lorsque les zones d'ouverture entre l'espace des occupants et l'espace à double peau deviennent supérieures à  $16 \text{ m}^2$ , des zones d'ouverture de  $16 \text{ m}^2$  ( $2 \text{ m}^2$  par étage) entre l'espace des occupants et l'espace à double peau sont considérées comme raisonnables pour obtenir des performances de ventilation préférables.
- 3- L'augmentation de la hauteur de la cheminée solaire permet d'augmenter le taux de ventilation et est également profitable pour obtenir une distribution favorable de la différence de pression. Comme il y a toujours des limites à la hauteur acceptable de la cheminée solaire, il est recommandé que la cheminée solaire ait une hauteur supérieure à deux étages.

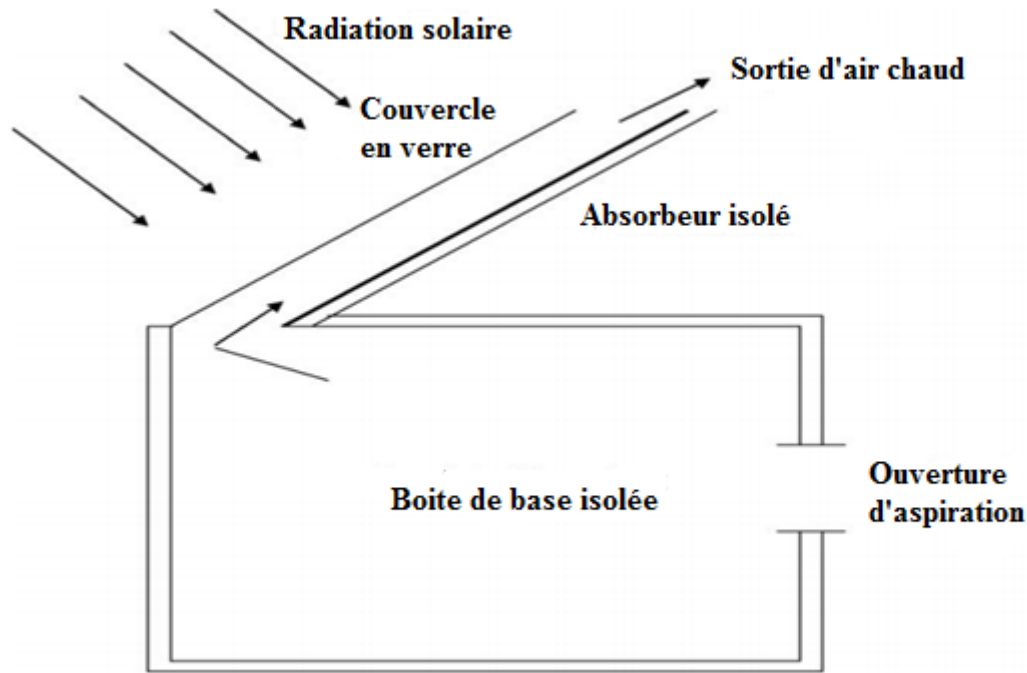


**Figure II. 6 :** Concept de ventilation naturelle dans le bâtiment prototype [21].

#### II.4 L'effet de l'inclinaison sur les performances de la cheminée solaire

Jyotirmay Mathur et al [22] ont étudié l'effet de l'inclinaison de l'absorbeur sur le débit d'air dans un système de ventilation solaire utilisant le concept de cheminée solaire de toit (RSC). Pendant les mois d'été, en raison de l'altitude plus élevée du soleil, l'absorbeur à faible inclinaison par rapport au plan horizontal capte davantage de rayonnement solaire, mais souffre de la réduction de la hauteur de la cheminée. Les résultats de la solution développée montrent que l'inclinaison optimale de l'absorbeur varie de 40° à 60° en fonction de la latitude du lieu. A Jaipur (Inde), l'inclinaison de 45° est optimale pour obtenir un taux de ventilation maximal. A cette inclinaison, le taux de ventilation est environ 10% plus élevé que pour les inclinaisons 60° et 30°. Les études expérimentales montrent un bon accord avec les résultats théoriques. Une cheminée solaire de toit de cette taille peut facilement être montée sur des bâtiments résidentiels pour améliorer la ventilation naturelle.

Ils ont conclu qu'avec l'augmentation de l'entrefer, le débit d'air augmente. De même, il a également été établi qu'avec l'augmentation de la hauteur d'entrée, le débit augmente. Les débits obtenus sont suffisants pour utiliser des cheminées solaires de toit pour induire une ventilation dans des bâtiments réels [22].

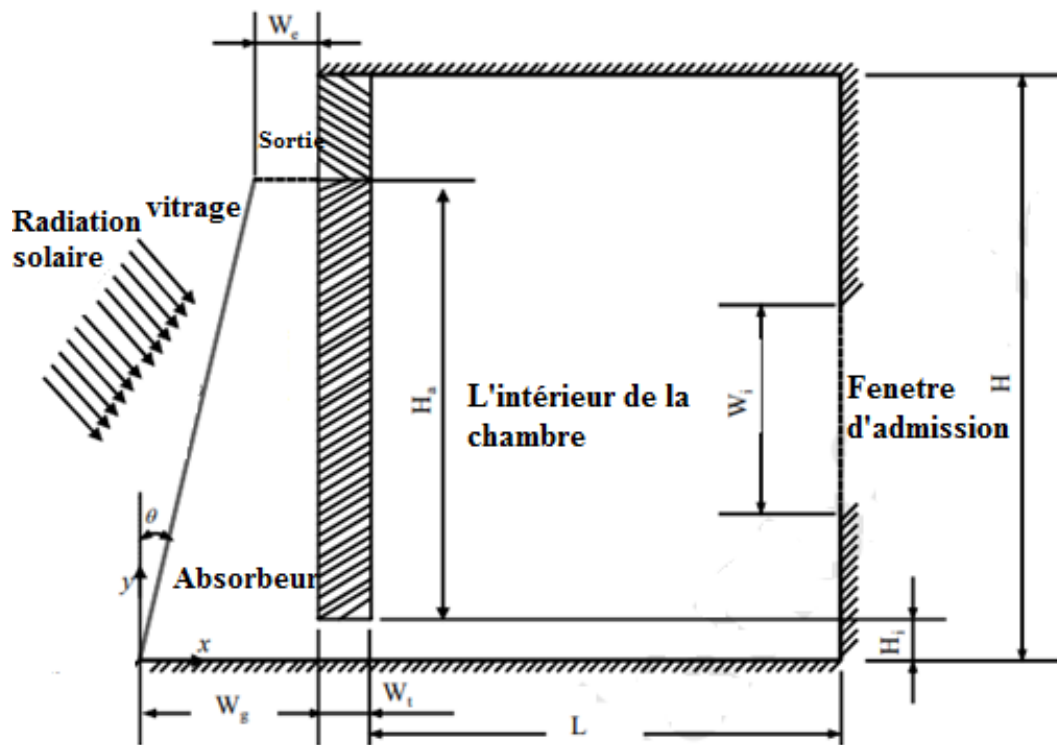


**Figure II. 7 :** Montage expérimental pour l'étude des performances d'une cheminée solaire inclinée [22].

Rakesh Khanal et Cheng wang Lei [21] ont fait une étude numérique de l'écoulement turbulent de l'air induit par la flottabilité dans une cheminée solaire à paroi passive inclinée (IPWSC) fixée à une pièce (espace ventilé) pour des applications de ventilation sur une gamme de paramètres de contrôle. Le modèle standard de turbulence  $k - \epsilon$  a été utilisé pour modéliser la turbulence de l'air dans le système de cheminée solaire. Avec une condition de chauffage iso flux spécifiée sur la paroi de l'absorbeur, la performance de ventilation de la conception IPWSC a été examinée sur la gamme de nombre de Rayleigh de  $1,36 \times 10^{13} \leq Ra \leq 1,36 \times 10^{16}$  et des angles d'inclinaison de 0 à 6 degrés.

Les résultats numériques montrent que l'énergie cinétique turbulente et l'intensité turbulente dans la cheminée solaire diminuent avec l'augmentation de l'inclinaison du mur passif. L'efficacité de la conception de l'IPWSC pour améliorer la ventilation thermique a été confirmée [21].



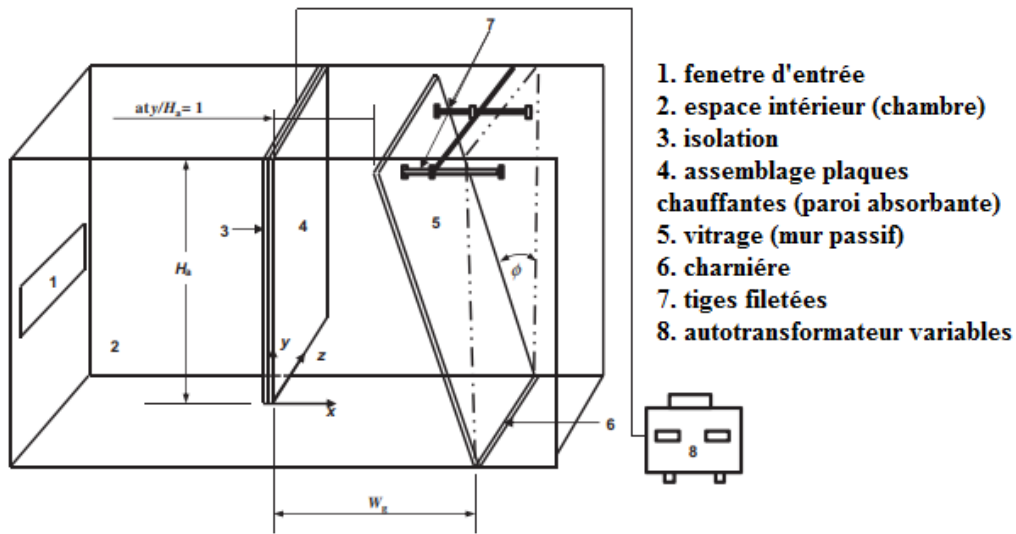


**Figure II. 8 :** Schéma d'une cheminée solaire bidimensionnelle (IPWSC) fixée à une pièce [21].

Rakesh Khanal et Cheng wang Lei [22] ont réalisé des expériences avec un modèle de cheminée solaire à paroi passive inclinée (IPWSC) avec un flux de chaleur uniforme sur la paroi active (absorbante). L'efficacité de cette conception a été examinée pour la gamme de flux de chaleur de  $100 \text{ W/m}^2$ - $500 \text{ W/m}^2$  avec une largeur de lame d'air de base fixe de  $0,1 \text{ m}$  et des angles d'inclinaison du mur passif dans la gamme de  $0$ - $6$  degrés. Les résultats expérimentaux montrent que l'angle d'inclinaison du mur passif n'a pas d'effet significatif sur la distribution de la température sur la largeur de la lame d'air et le long de la hauteur de la cheminée. D'autre part, la vitesse moyenne du flux d'air sur la largeur de la lame d'air est fortement affectée par l'angle d'inclinaison. Les résultats expérimentaux montrent que la conception de l'IPWSC peut améliorer de manière significative les performances de ventilation d'une cheminée solaire par rapport à la conception conventionnelle de la cheminée avec une configuration de mur passif vertical.

Ils ont conclu aussi que la vitesse d'écoulement est fortement affectée par l'inclinaison de la paroi passive alors que la distribution de la température est insensible à l'inclinaison de la paroi passive. Il a été démontré expérimentalement qu'en inclinant la paroi passive de la cheminée solaire tout en maintenant toutes les autres conditions inchangées, le débit d'air

augmente avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison et atteint une valeur maximale à une certaine inclinaison, au-delà de laquelle le débit d'air diminue [22].



**Figure II. 9 :** Vue schématique d'un modèle expérimental de cheminée solaire à paroi passive inclinée [22].

## II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons parlé des expériences menées par certains chercheurs et des résultats les plus importants qu'ils ont obtenus. La recherche continue sur le développement de cheminées solaires a abouti à des conceptions nouvelles et avancées.

# **Chapitre III**

## **Résolution Numérique**

### III.1 Introduction

L'étude des phénomènes intervenant dans la thermique du bâtiment consiste à étudier le transfert de chaleur par convection thermique sous ses trois formes, naturelle, forcée, et mixte. Le système d'équation obtenu traduit la conservation de la masse et de la quantité de mouvement d'air à l'intérieur de la cheminée (équations de Navier-Stokes), ainsi que la conservation de son enthalpie (équations d'énergie).

Ce système est souvent trop compliqué à résoudre, et nécessite une résolution à l'aide d'un code de calcul CFD (Computational Fluid Dynamics). Il existe un grand nombre de codes CFD disponibles, qu'ils soient commerciaux du domaine public ou encore propre à certaines institutions. Fluent est considéré l'un des logiciels les plus performants utilisés par les chercheurs ou les ingénieurs, non seulement pour calculer et analyser le comportement d'écoulement du fluide mais également pour estimer les processus du transfert de chaleur et de masse.

Dans ce chapitre on présente les équations qui régissent l'écoulement d'air à l'intérieur d'une cheminée solaire avec une présentation de code fluent et ses paramètres.

### III.2 Modèle physique

La configuration géométrique du problème étudié est schématisée sur la figure III.1. Les dimensions de la cheminée présentées et utilisée dans ce travail, sont basées sur les données expérimentales publiées par O. Belhadj et al [23]. Il s'agit d'une cheminée solaire de 750 mm de hauteur et de 0.5m de longueur de base ,munie d'une sortie de 30mm de diamètre.

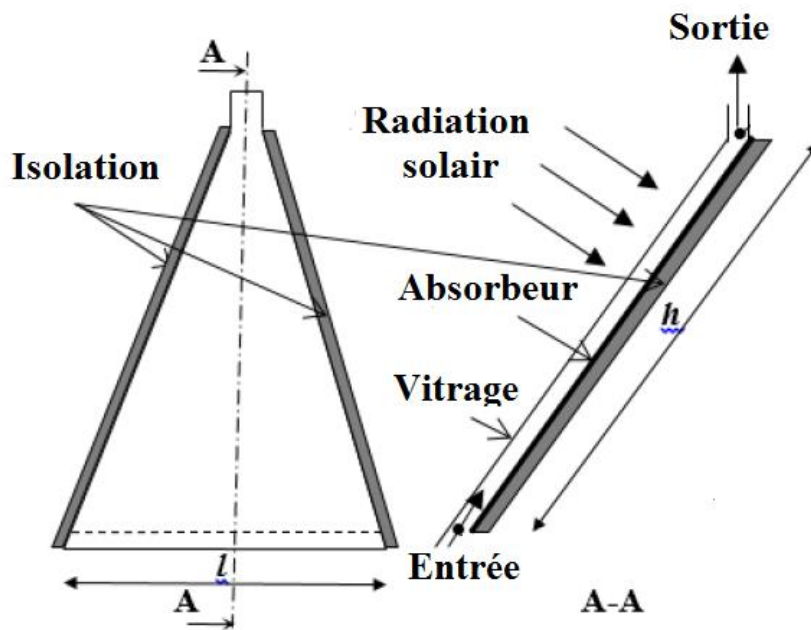


Figure III. 1 : Schéma générale du domaine physique [23].

Durant cette étude, un intérêt est porté à l'étude de l'effet de dimension du système sur le comportement dynamique et thermique du fluide, pour cela, trois formes et trois longueurs de bases différentes (Tableau III.1 )ont été examinés et comparés en détail . Les dimensions et les détails qui acompagnent chaque modèles sont également présentées sur le Tableau III.2.

Influence de longueur de base	Valeur (m)		Influence de forme	La forme	
	Modèle 1	0,3		Modèle 4	Plane
	Modèle 2	0,5		Modèle 5	Trapézoïdale
	Modèle 3	0,7		Modèle 6	Triangulaire

Tableau III. 1 : Différents modèles physique étudiées (six cas) .

		Les différents modèles étudiés					
		Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 4	Modèle 5	Modèle 6
Valeur (mm)	Dimension						
	Longueur à l'entrée (L)	300	500	700	500	500	500
	Largeur à l'entrée (A)	20	20	20	20	20	20
	Hauteur de la cheminée (h)	750	750	750	750	750	750
	Longueur à la sortie (L')	35.325	35.325	35.325	500	35.325	20
	Epaisseur de vitrage ( $e_v$ )	3	3	3	3	3	3
	Epaisseur de l'absorbeur ( $e_A$ )	2	2	2	2	2	2
	Epaisseur de l'isolant ( $e_i$ )	20	20	20	20	20	20
	L'âme d'air (espace entre l'absorbeur et le verre) (e)	20	20	20	20	20	20

**Tableau III. 2 :** Les caractéristiques géométriques de différentes cheminées solaires étudiées.

### III.3 Hypothèses simplificatrices

La formulation du problème étudié est basée sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, hypothèses liées à la géométrie, au type d'écoulement, aux mécanismes de transferts et aux problèmes de changement de phase. Afin de permettre une résolution simple et réaliste, nous avons considéré les hypothèses suivantes :

- L'écoulement de fluide est supposé permanent et en régime laminaire.
- Le fluide visqueux est newtonien et incompressible.
- Les propriétés thermo-physiques du fluide ( $C_{pf}$ ,  $\lambda_f$ ,  $\rho_f$ ,  $\mu_f$ ) et du solide ( $C_{ps}$ ,  $\lambda_s$ ,  $\rho_s$ ,  $\mu_s$ ) sont considérées constantes.
- Les profils de vitesse et de température sont uniformes à l'entrée de la cheminée.

### III.4 Equations générales du problème

Dans le cas laminaire, les problèmes de transfert de chaleur et d'écoulements de fluide peuvent être traités par la résolution de l'équation de continuité, de l'équation de Navier Stokes et l'équation d'énergie.

Les équations décrivant le phénomène d'écoulement et le transfert de chaleur à l'intérieur de la cheminée solaire sont les suivantes :

#### III.4.1 La conservation de la masse

L'équation de la conservation de la masse est la suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{d(\rho u)}{dx} + \frac{d(\rho v)}{dy} + \frac{d(\rho w)}{dz} = 0 \quad \text{III.1}$$

Puisque l'écoulement est permanent  $\Rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$

Donc l'équation devient :

$$\frac{d(\rho u)}{dx} + \frac{d(\rho v)}{dy} + \frac{d(\rho w)}{dz} = 0 \quad \text{III.2}$$

### III.4.2 La conservation de la quantité de mouvement

L'équation de la conservation du mouvement à travers le volume de contrôle est montrée comme Suivant :

➤ **Suivant la direction (x) :**

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 u}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 u}{\partial^2 z} \right) \quad \text{III. 3}$$

➤ **Suivant la direction (y) :**

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 v}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 v}{\partial^2 z} \right) \quad \text{III. 4}$$

➤ **Suivant la direction (z) :**

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 w}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 w}{\partial^2 z} \right) - \rho g \quad \text{III. 5}$$

### III.4.3 La conservation de l'énergie

L'équation de conservation de l'énergie à travers le volume de contrôle est donnée par :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 z} \right) \quad \text{III. 6}$$

### III.5 Principes des codes CFD

Les codes **CFD**, permettent de résoudre numériquement les équations régissant les mouvements d'un fluide c'est-à-dire les équations traduisent la conservation de la masse et de la quantité de mouvement du fluide (équations de Navier-Stokes), ainsi que la conservation de son enthalpie. Il existe un grand nombre de codes **CFD** disponibles, pour notre travail, nous avons choisi le code CFD **Fluent** (Workbench version 14.0), ce dernier permet en effet de répondre à nos besoins de calcul.

Pour construire, un modèle **CFD**, il y a plusieurs étapes :

- ✓ La construction de la géométrie.
- ✓ La construction du maillage.
- ✓ La sélection des modèles physiques: en fait, ce sont rarement les équations exactes de **Navier-Stokes** qui sont à l'origine des modèles **CFD** parce que la résolution des



équations exactes serait trop Coûteuse en temps de calcul comme c'est le cas pour la turbulence. Ce sont donc des équations approchées qui sont proposées pour décrire les phénomènes physiques et l'ensemble de ces équations constitue un 'modèle'.

- ✓ La prescription des conditions aux limites.
- ✓ Le traitement des résultats.

### III.6 Présentation du logiciel ANSYS Workbench

Le Workbench permet de gérer les fichiers et le lancement des différents logiciels à partir d'une fenêtre unique. C'est à partir de la fenêtre principale du *Workbench* que vont être créés les fichiers, lancés les logiciels et gérés les interactions entre les différents logiciels utilisés pour la géométrie, le maillage, la simulation proprement dite et le post-traitement.

Pour réaliser notre simulation numérique par ANSYS FLUENT, On a suivi les étapes suivantes :

- Création de la géométrie sous le logiciel Design Modeler.
- Création du maillage avec le logiciel ANSYS Meshing.
- Définition du problème sous le logiciel ANSYS FLUENT.
- Calcul avec ANSYS FLUENT pour les différents cas retenus.
- Analyse des résultats obtenus.

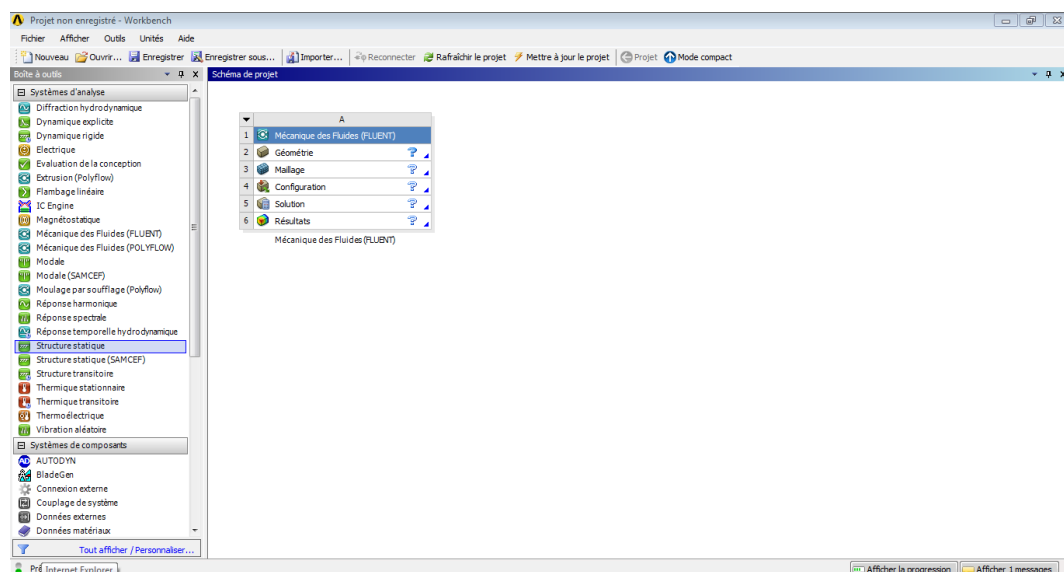


Figure III. 2 : l'interface de logiciel ANSYS Workbench.

### III.6.1 Partie de géométrie

On a créé la géométrie avec Le logiciel ANSYS Design Modeler, qui permet de réaliser des tracés 2D (Sketch), de créer à partir des sketches des objets 3d (par extrusion etc...) et de manipuler les objets 3D. Dans notre cas, on a travaillé en 3D dans le plan XYZ pour créer la géométrie du problème.

Tout d'abord, le logiciel demande de choisir l'unité caractéristique du système, dans ce cas il s'agit du millimètre.

Ensuite, les étapes suivantes ont été appliquées :

- Tracer l'esquisse 1 et 2 en 2D dans deux plans différents (plan XY et le plan 4). La distance entre eux 750 mm (hauteur) suivant l'axe Z.
- Sélectionner les deux esquisse et fait le lissage entre eux.
- Ajouter le deuxième corps (corps bloqués) par extrusion.
- Mettez les deux corps sous forme une seule pièce pour aller à la partie maillage.

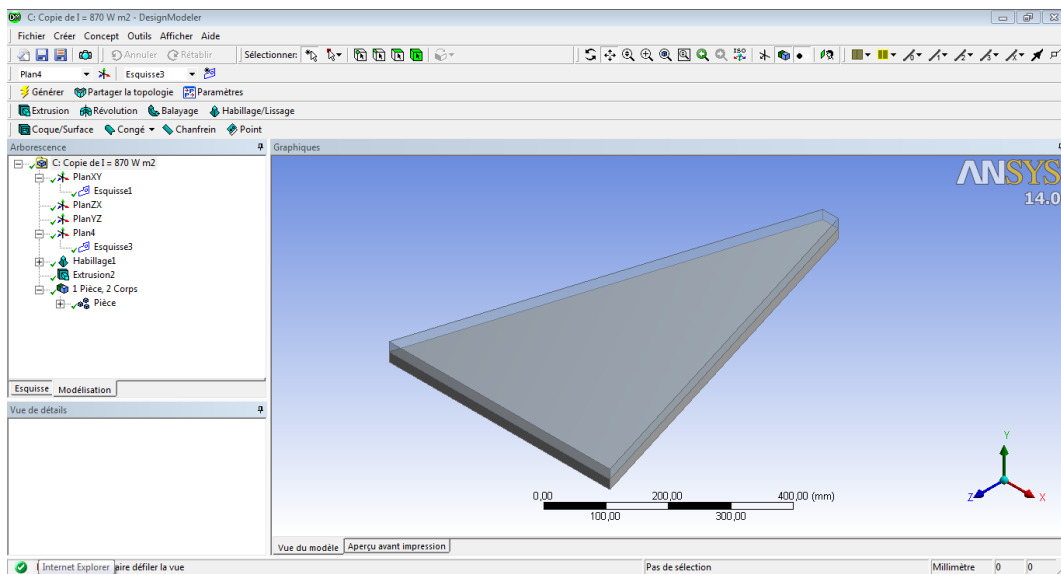


Figure III. 3 : l'interface du logiciel ANSYS Design Modeler.

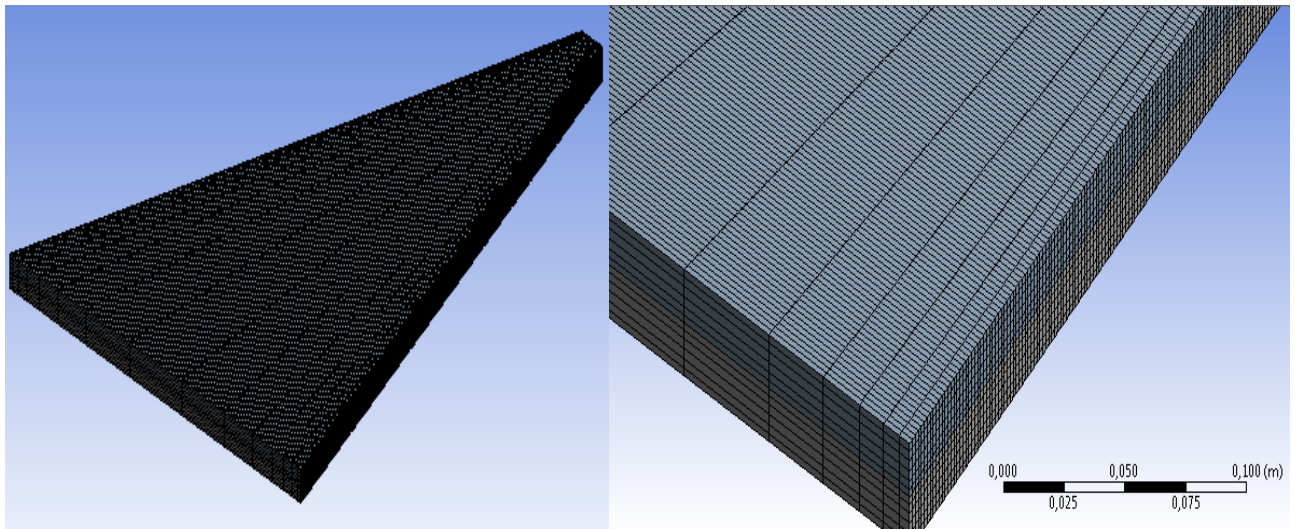
### III.6.2 Partie maillage

Pour créer le maillage, on a lancé ANSYS Meshing en double cliquant sur Maillage dans la boîte Workbench. Le choix du maillage est une étape essentielle de la simulation numérique. Il est donc important de bien choisir un maillage qui s'adapte au mieux aux problèmes considérés.

Dans cette étude, on a choisi un maillage hexaédrique structuré uniforme raffiné au niveau des parois. Les résultats de maillage générés sont présentés dans le tableau III.3.

Partitions	Nœuds	Eléments	Devisions
1	62608	54000	300

**Tableau III. 3 :** Les détails du maillage généré.



**Figure III. 4 :** Le maillage généré final de domaine étudié.

### III.6.3 ANSYS FLUENT

FLUENT est un code de calcul pour modéliser les écoulements des fluides et les transferts thermiques à l'intérieur ou autour des géométries complexes. Ce logiciel très répandu au sein de l'industrie (aérospatiale, automobile, nucléaire, chimique, biomédicales, environnement, météo, etc...), permet de résoudre des problèmes d'écoulement avec des mailles non structurées, pour des géométries complexes, avec une relative facilité.

Les types de mailles supportées sont :

- ✚ Mailles en 2D, triangulaires ou quadrilatérales,
- ✚ Mailles en 3D, tétraédriques/hexaédriques/pyramidales,
- ✚ Mailles (hybrides) mixtes.

Le logiciel FLUENT est basé sur la méthode de modélisation numérique connue pour sa puissance de calcul et facilité de mise en œuvre : **méthode des volumes finis**.

Le principe de cette méthode est basé sur une technique de discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques. Ces dernières sont résolues numériquement. La technique des volumes de contrôle consiste à l'intégration des équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle pour obtenir les équations discrétisées qui conservent toutes les grandeurs physiques sur un volume de contrôle.

### III.6.3.1 Choix des deux modes de calcul

Fluent offre deux modes de calcul:

- **Le mode double précision** : Dans le mode double précision, les nombres à virgule flottante sont représentés en utilisant 64 bits.
- **Le mode simple précision** : le mode simple précision utilise une représentation à 32 bits.

Dans notre cas (32 bits), donc on va utiliser le mode simple précision.

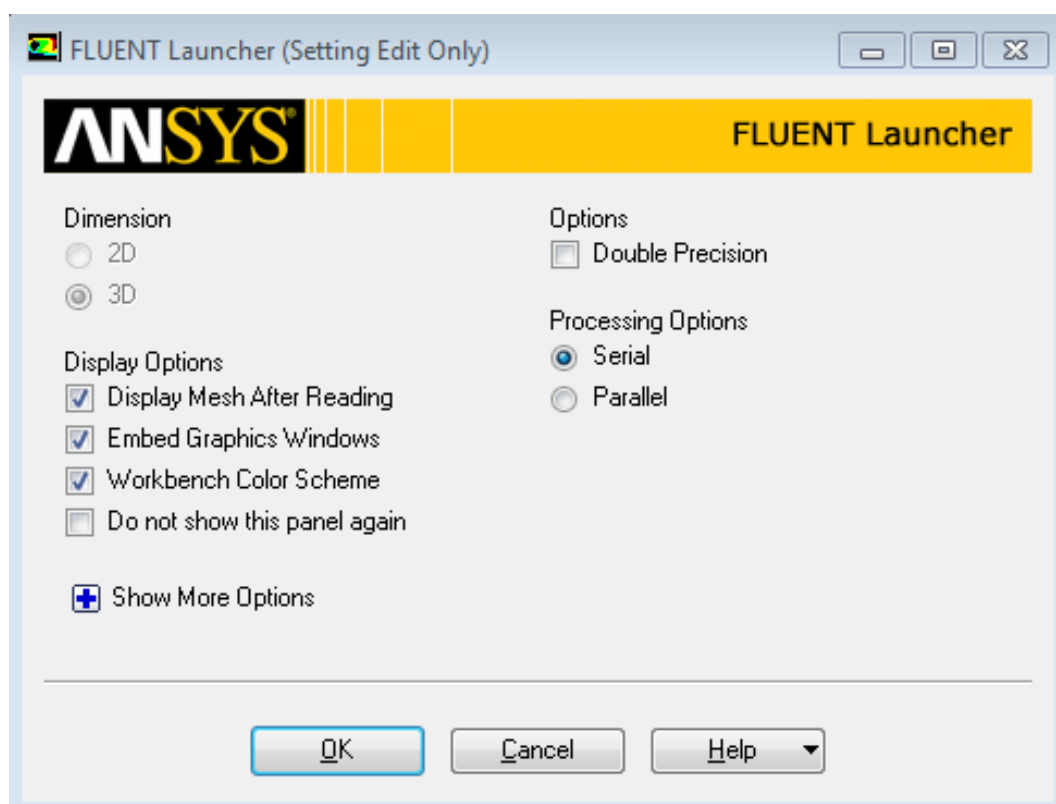


Figure III. 5 : Fenêtre de démarrage de fluent.

### III.6.3.2 Choix de régime

Le régime de l'écoulement a été déterminé en se basant sur la formule du nombre de Reynolds suivantes :

$$R_e = \frac{\rho \cdot v \cdot D_h}{\mu} \quad \text{III.7}$$

$$D_h = \frac{4 \times S}{P_{mouillé}} = \frac{4(0,5 \times 0,02)}{(0,5 + 0,02) * 2} = 0,03846 \text{ m}$$

$$\Rightarrow R_e = \frac{1,225 \times 0,059346 \times 0,03846}{1,7894 \times 10^{-5}} \Rightarrow R_e = 156,25 < 2100$$

Donc le régime d'écoulement est **laminaire**

### III.6.3.3 Les propriétés thermo physique des matériaux utilisés

Pour la simulation de notre système, on a utilisé l'air dans le domaine de calcul fluide, le bois dans le domaine de calcul solide de l'isolant, le verre et l'aluminium sont utilisés respectivement comme matériaux pour le vitrage et l'absorbeur.

Le tableau suivant montre les propriétés thermo-physiques pour les différents matériaux utilisés dans les simulations numériques.

Matériels	$\rho(kg/m^3)$	$C_p (j/kg.k)$	$\lambda (w/m.k)$	$\mu (Kg/m.s)$
Air	1,225	1006,43	0,0242	$1,789 \cdot 10^{-5}$
Aluminium	2719	871	202,4	
Verre	2530	7205	0,93	
Bois	700	2310	0,173	

**Tableau III. 4 :** Les propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés.

### III.6.3.4 Conditions aux limites

En fonction du problème physique traité, les conditions aux limites sont différentes et leur compatibilité avec les modèles numériques associés, à un impact direct sur la convergence et le réalisme des résultats des simulations numériques. Plusieurs types de conditions aux limites sont proposés en CFD.

Dans notre cas, pour résoudre le système d'équation obtenu, il est nécessaire d'introduire les conditions aux limites suivantes :

- **Entrée** : une vitesse et une température d'air uniforme sont imposées à l'entrée du domaine de calcul.
- **Au niveau de l'absorbeur et le vitrage** : Un flux radiatif de différentes intensités solaires est appliqué.
- **Sortie** : A la sortie du domaine de calcul, une pression atmosphérique est appliquée comme conditions aux limites.

Zone	Type
Absorbeur	Wall
Isolant	Wall
Vitrage	Wall
Entrée	Velocity-inlet
Domaine fluide	Interior
Domaine solide	Interior
Sortie	Pressure-outlet
Murs	Wall

**Tableau III. 5** : Type des conditions aux limites programmés dans fluent.

### III.6.3.5 Les schémas numériques

#### III.6.3.5.1 Résolution du couplage vitesse-pression

Les équations de Navier-Stokes se composent de l'équation de conservation de la masse et des équations de conservation de la quantité de mouvement. Leur résolution nécessite l'obtention à chaque instant, d'un champ de pression et d'un champ de vitesse cohérents.

Le couplage vitesse-pression est délicat à traiter pour les écoulements incompressibles car la pression n'apparaît pas explicitement dans l'équation de conservation de la masse.

FLUENT offre la possibilité de choisir parmi quatre algorithmes de couplage pression-vitesse: SIMPLE, SIMPLEC, PISO, COUPLE tous sont basés sur l'approche : prédiction-corrrection.

Dans notre étude, l'algorithme utilisé est l'algorithme SIMPLE. On suppose un champ de pression initial qu'on injecte dans les équations de quantité de mouvement. On résout le système pour trouver un champ de vitesse intermédiaire (qui n'est pas juste puisque la pression ne l'est pas). L'équation de continuité est transformée pour devenir une équation de correction de pression. Elle est résolue pour trouver une correction de pression qui permettra de réinjecter une nouvelle pression dans les équations de quantité de mouvement. Le cycle est répété autant de fois que nécessaire jusqu'à l'obtention d'une correction de pression nulle, signe de la convergence de l'algorithme.

#### III.6.3.5.2 Schémas de discrétisation spatiale

Les schémas de discrétisation spatiale établis dans notre travail, dans le cas du choix de régime laminaire sont résumés dans le tableau suivant :

Schéma	Type
Pression	Standard
Quantité de mouvement	Second OrderUpwind
Energie	Second OrderUpwind

**Tableau III. 6 :** Schémas de discrétisation spatiale par fluent.

**III.6.3.6 Facteurs de sous relaxation**

En raison de la non-linéarité des équations discrétisées, il est impératif de contrôler la variation de la quantité de variable, ceci est possible en introduisant un facteur de sous-relaxation qui limite les variations de variable pendant chaque itération. Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Les valeurs choisies dans notre cas sont indiquées par le tableau **III. 7**.

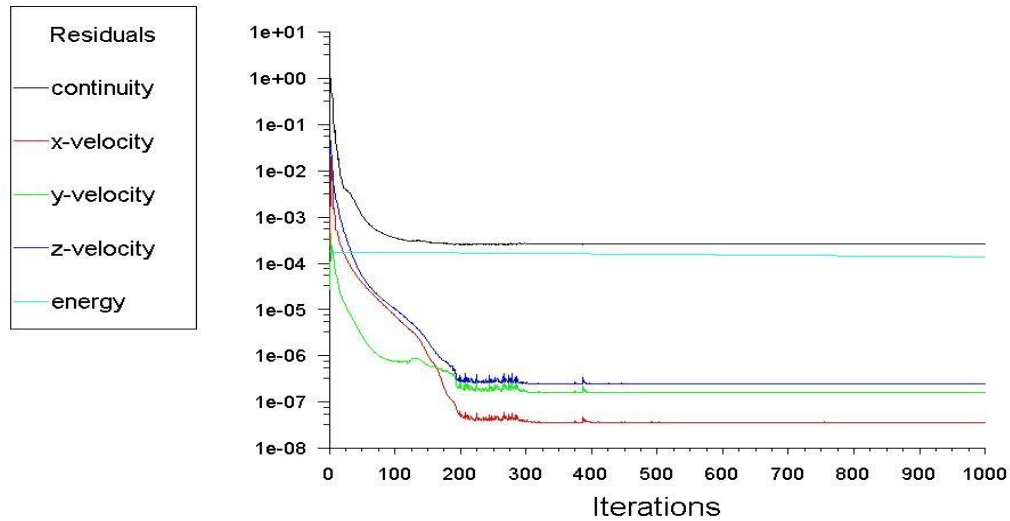
Variable	Facteur de sous relaxation
Pression	0,3
Densité	1
Force de volume	1
Quantité de mouvement	0,7
Energie	0,1

**Tableau III. 7 :** Facteur de sous-relaxation.

**III.6.3.7 La convergence**

Une solution numérique est pris convergée lorsque les résidus pour les grandeurs physiques de l'énergie et de la continuité deviennent inférieurs à  $10^{-3}$  alors que pour les composantes de l'écoulement dépassent les  $10^{-6}$  (Figure III.6).





**Figure III. 6 :** La convergence des résidus.

### III.7 Conclusion

Les différentes étapes effectuées pour mener la simulation numérique, tels que la création de la géométrie utilisant ANSYS Design Modeler, la génération de maillage utilisant ANSYS Meshing, ainsi que la mise en place de la physique et de la solution sur le code calcul Fluent, ont été montrées et expliquées en détail dans ce chapitre .

# **Chapitre IV**

## **Résultats Et**

### **Discussion**

### IV.1 Introduction

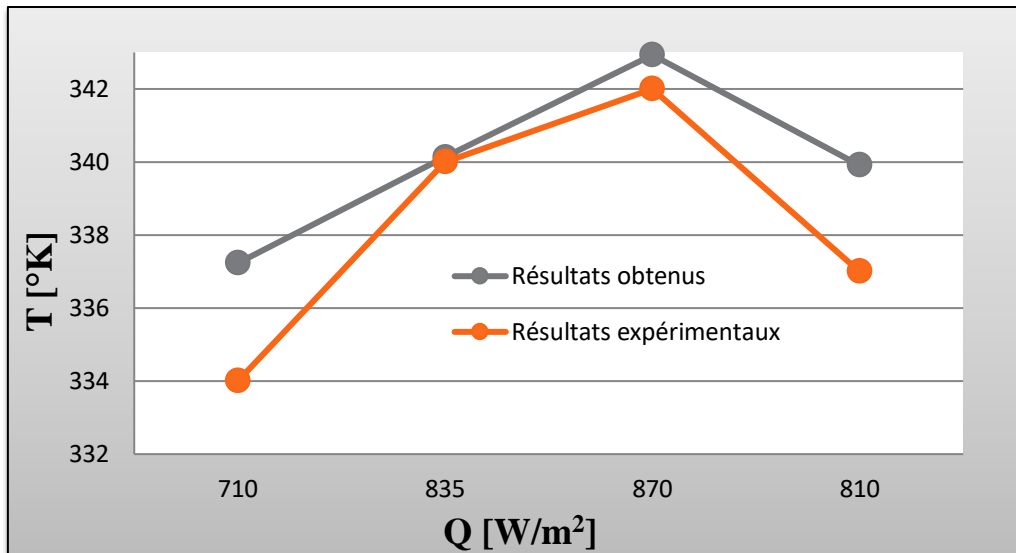
Dans ce chapitre, une analyse numérique d'un écoulement laminaire incompressible tridimensionnel d'air traversant une cheminée solaire est présentée.

Les équations gouvernantes sont résolues par la méthode des volumes finis à l'aide d'un code de calcul Fluent. Les champs de vitesse et de température ont été obtenus et présentés pour toute la géométrie considérée à différentes formes et longueurs de base de la cheminée solaire. La variation de la vitesse moyenne, de la température moyenne ainsi que le temps de renouvellement d'air pour tous les cas étudiés est également présentée dans ce chapitre pour différentes valeurs de vitesse d'entrée et pour différentes intensités du rayonnement solaire.

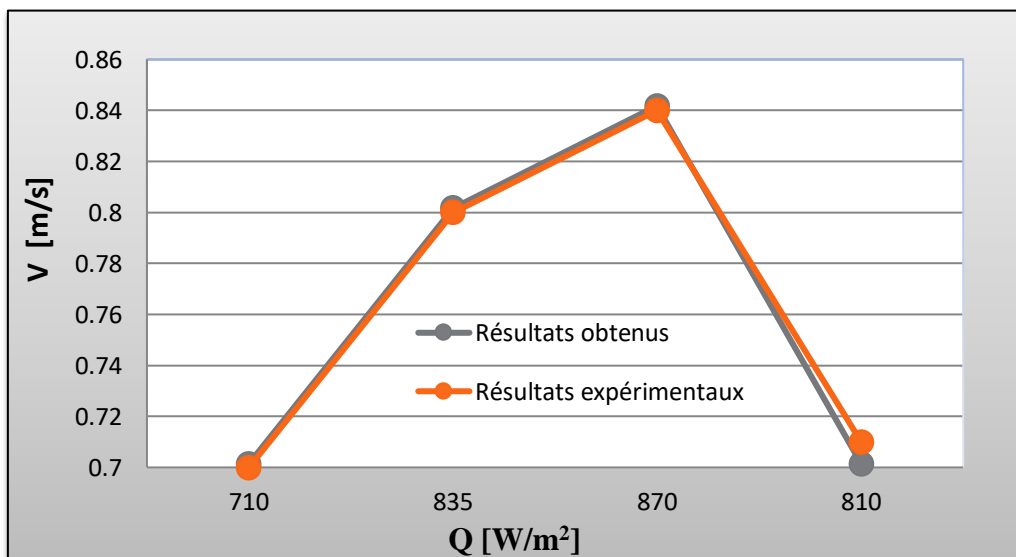
### IV.2 Validation du modèle numérique

Avant d'entamer la simulation numérique traitant l'influence des différents paramètres, une comparaison des résultats de la présente étude avec ceux obtenus par O. Belhadj et al [23] a été effectuée et cela en adoptant les conditions utilisées dans leur travail expérimental réalisé sur des cheminées solaires de forme trapézoïdale.

Trois différents rapports hauteur/longueur ( $h/l = 1$ ), ( $h/l = 1,5$ ), ( $h/l=2$ ) ont été testés par ces chercheurs. L'étude a révélé que le deuxième cas ( $h/l=1,5$ ) est le plus performant, c'est pour cette raison notre choix est basé sur cette configuration, pour mener notre étude numérique. Les données météorologiques utilisées dans cette étude sont également adoptées pour nos simulations notamment l'intensité de la radiation solaire ( $710 \text{ W/m}^2$ - $870 \text{ W/m}^2$ ), la vitesse de l'écoulement, la température d'entrée...etc.



**Figure IV. 1 :** comparaison de l'évolution de la température à la sortie en fonction de la radiation solaire, avec les résultats d'O. Belhadj et al. [23]



**Figure IV. 2 :** comparaison de l'évolution de la vitesse à la sortie en fonction de la radiation solaire, avec les résultats d'O. Belhadj et al. [23]

Les figures IV.1 et IV.2 représentent respectivement l'évolution de la température et de la vitesse de l'air à la sortie de la cheminée en fonction de la radiation solaire obtenus numériquement par Fluent et expérimentalement par O. Belhadj et al. [23].

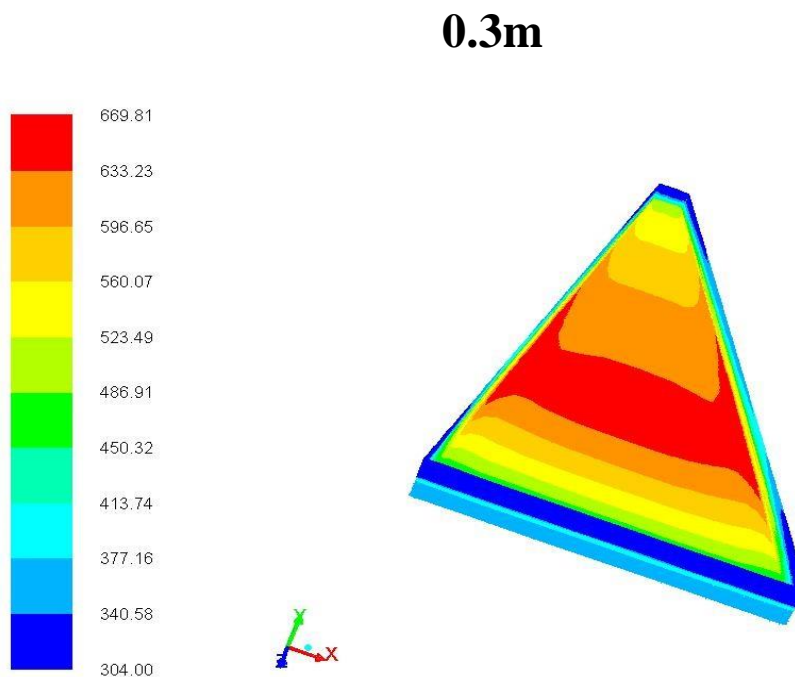
Pour la température de sortie, on constate que l'erreur moyenne des résultats obtenue avec les valeurs expérimentales [23] est de l'ordre de 0,53%. Alors pour la vitesse de l'air à la sortie de la cheminée, les résultats obtenus présentent une très bonne précision par rapport à ceux de [23].

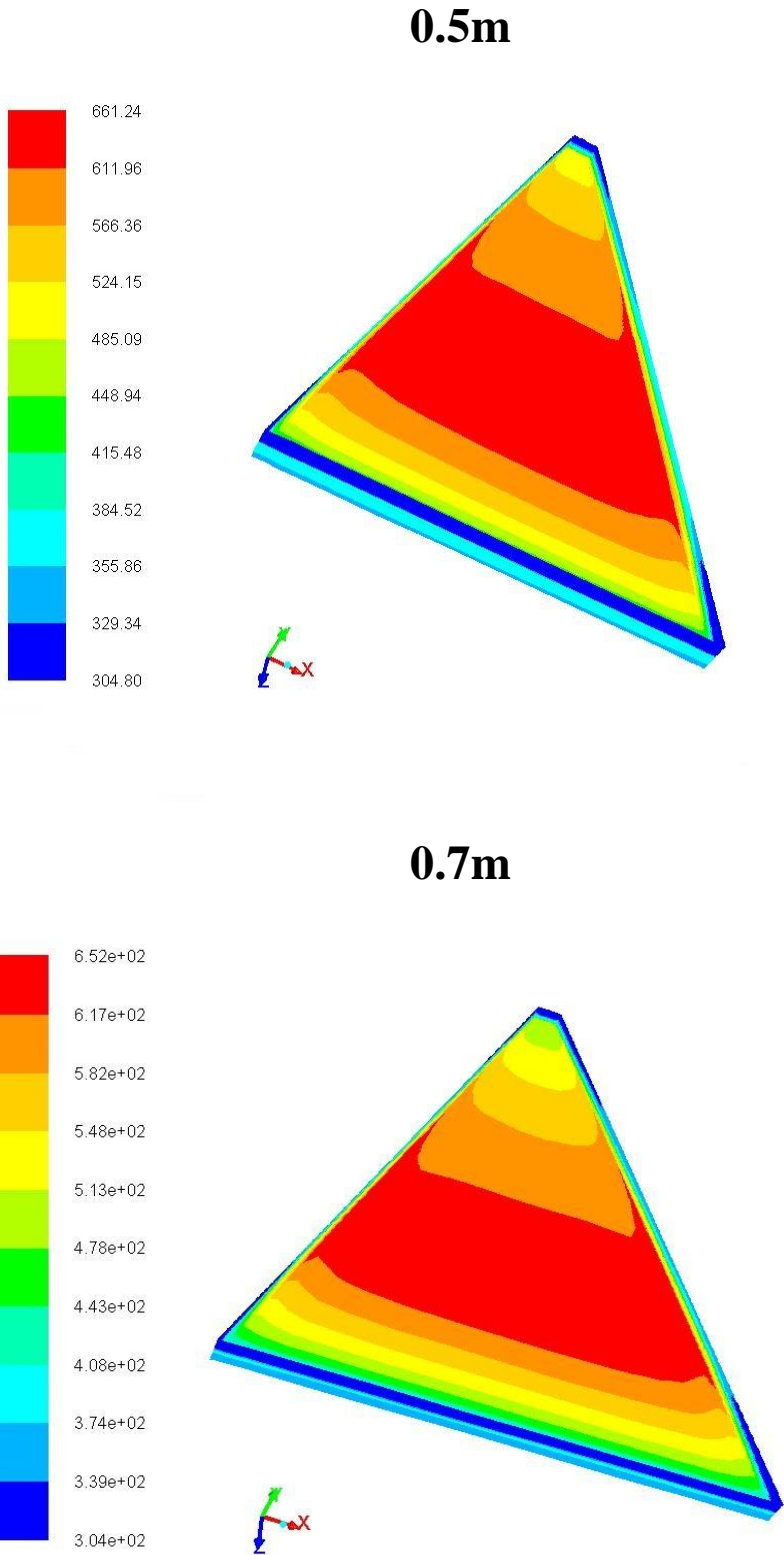
Cette comparaison montre la bonne précision de nos résultats par rapport à ceux proposés par [23] et qui peut fournir une validation aux résultats développés ci-après.

### IV.3 Influence de la longueur de base

Pour une vitesse d'entrée de l'air de 0,05 m/s, de température ambiante de 304 K et d'intensité solaire de 870W/m<sup>2</sup>. Les figures (IV.3) et (IV.4) illustrent respectivement les contours de température et les vecteurs de vitesse d'un écoulement relatif à une cheminée solaire de hauteur de 0,75 m et pour différentes longueur de base (0.3, 0.5 et 0.7 m).

#### IV.3.1 Contour de température





**Figure IV. 3 :** Contours de la température pour différentes longueurs de base de la cheminée à une intensité solaire de 870 W/m<sup>2</sup>.

La figure IV.3 représente la répartition de la chaleur dans le système pour une hauteur de 0,75m et une longueur de base respectivement égale à 0.3, 0.5 et 0.7m.

Les champs de température présentés sur la figure IV.3 sont le reflet des structures convectives et dynamiques de l'écoulement. En effet, il est clair que de faibles gradients de températures sont générés près de l'entrée de la cheminée, car l'air frais est toujours aspiré. Cependant, la température a commencé à augmenter de plus en plus à partir du milieu approchant de la sortie. Ceci est dû à l'échange de chaleur entre l'absorbeur et l'air. La chaleur est générée par l'effet de serre à l'intérieur des cheminées et par la dilatation thermique, la densité de l'air diminue pour générer une force motrice de la flottabilité et donc le processus de ventilation.

Si nous regardons la température moyenne au niveau de l'absorbeur et le débit d'air d'entrée, nous trouverons une différence entre les trois longueurs de base où :

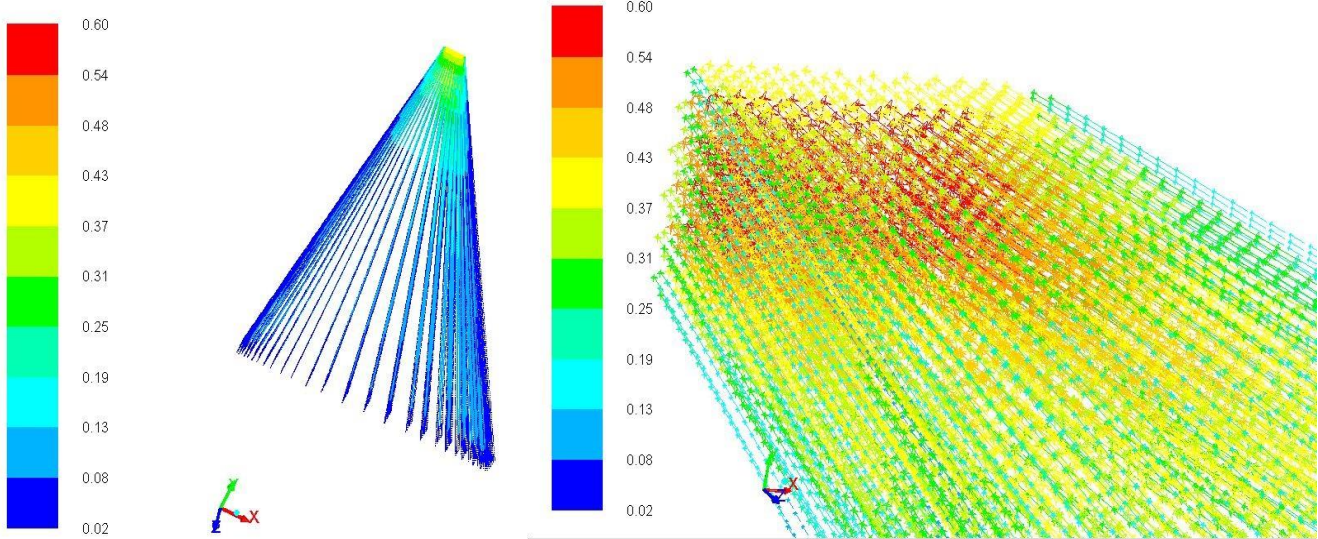
$L$ (m)	$T$ moyenne d'absorbeur (K)	$Q_m$ (Kg/s)
0.3	586.41	0.00043
0.5	585	0.00072
0.7	583.33	0.001

**Tableau IV. 1 :** Comparaison entre la température moyenne d'absorbeur et le débit d'air d'entrée pour les trois longueurs de base.

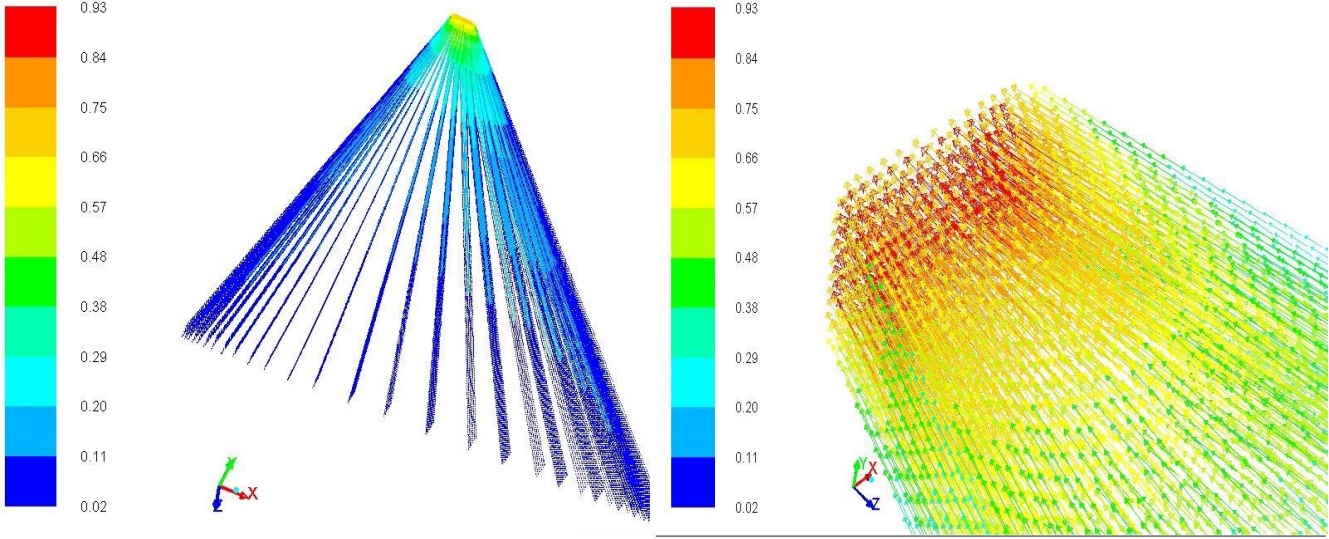
La cheminée de longue 0.7m a un débit important, contrairement à la cheminée de longue 0.3m à un faible débit. Ceci explique la différence de température entre les trois longueurs de base, où plus le débit est petit plus de l'échange de chaleur entre l'absorbeur et l'air est important.

IV.3.2 Champs de vitesse

0.3m

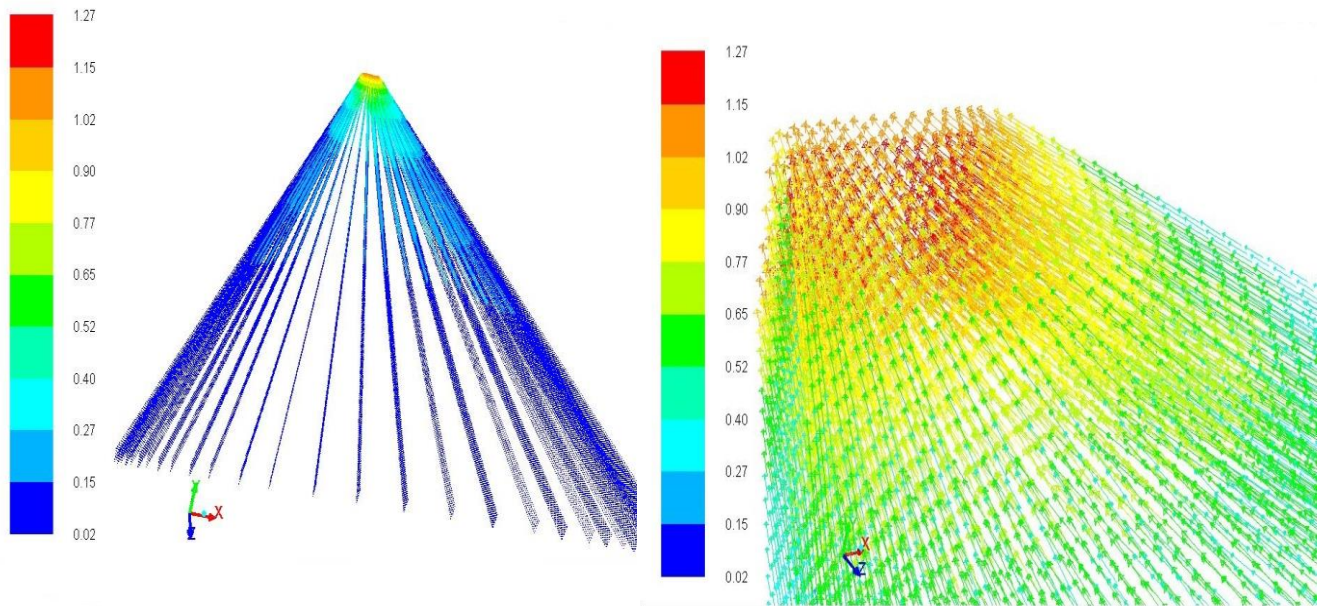


0.5m





0.7m



**Figure IV. 4 :** Champ de vecteur de vitesse pour différentes longueur de base de la cheminée à une intensité solaire de  $870 \text{ W/m}^2$ .

La figure IV.4 montre les champs des vecteurs de vitesses pour différentes longueurs de base de cheminée (30, 50,70 cm) à une intensité solaire de  $870 \text{ W/m}^2$ . Avec l'espace entre l'absorbeur et la couverture en verre (largeur de la cheminée) est toujours 20 mm pour les trois longueurs de cheminée.

$L \text{ (m)}$	V moyenne de l'air à la sortie (m/s)
0,3	0,5
0,5	0,84
0,7	1,18

**Tableau IV. 2 :** Comparaison entre la vitesse moyenne de l'air à la sortie pour les trois longueurs de base.

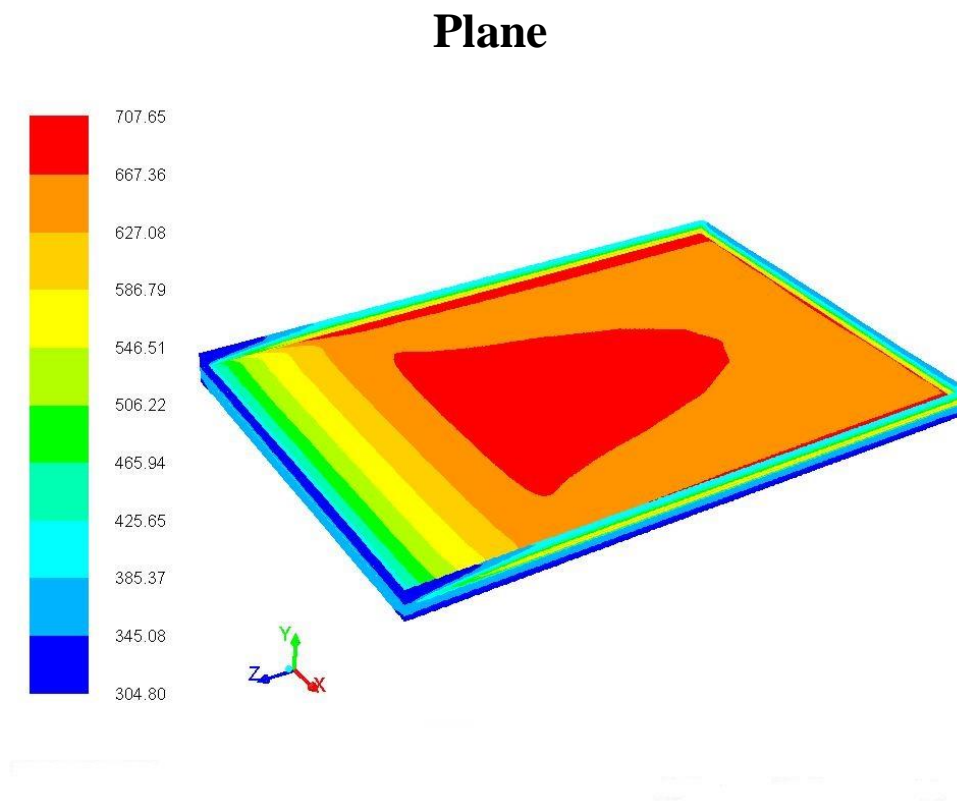
D'après la figure IV.4 et le tableau IV.2, la vitesse d'air à la sortie au niveau du système augmente avec l'augmentation de la longueur de la cheminée. Elle s'accroît de 0,5 m/s à 0,84 m/s pour une variation de longueur de la cheminée de 30 cm à 50 cm. et s'est élevé à 1,18 m/s pour 70 cm de longueur. C'est à cause du débit.

Nous savons qu'il existe une relation directe entre le débit, la surface (longueur) et la vitesse, ainsi, plus la longueur est grande, plus le débit est important, et par conséquent, plus la vitesse de sortie est élevée.

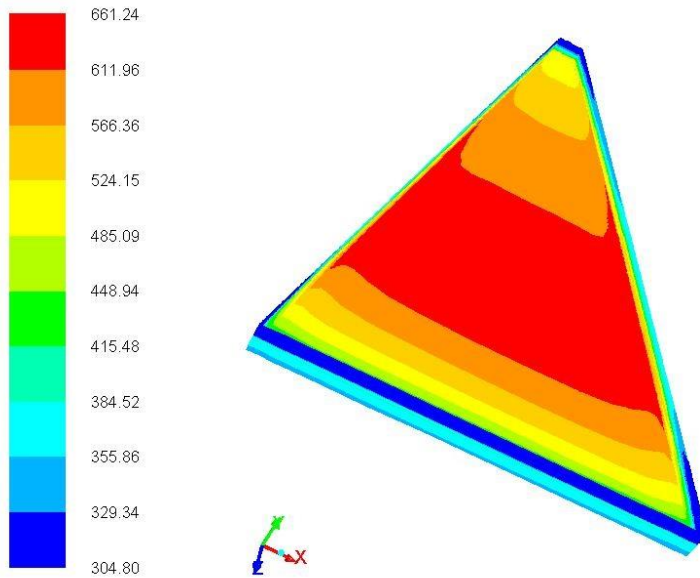
#### IV.4 Influence de forme

Les résultats représentés sur les figures IV.5 et IV.6 illustrent l'évolution des champs de vitesse et le contour de température d'un écoulement relative à une cheminée solaire pour différentes formes avec une longueur et largeur de base de 500 mm et 20 mm respectivement et pour une intensité solaire de  $870 \text{ W/m}^2$ .

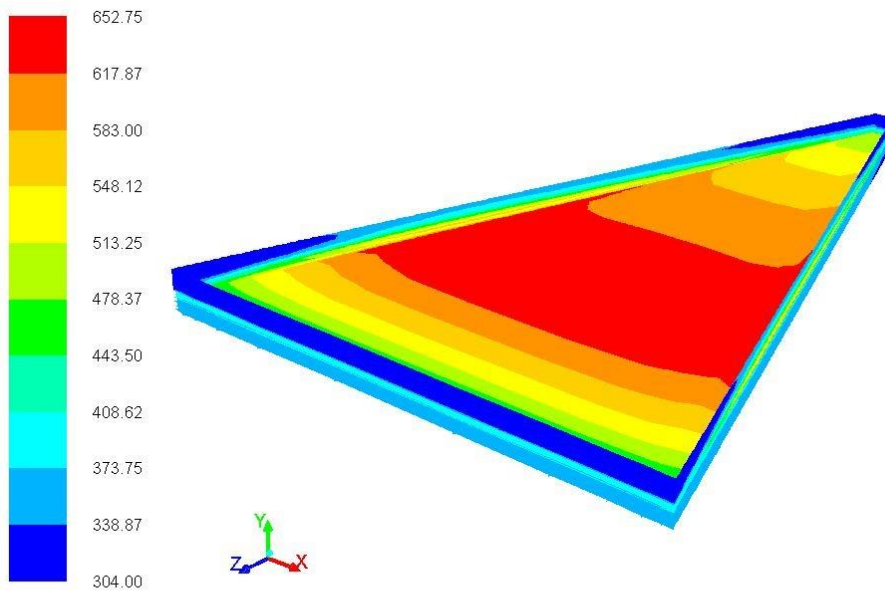
##### IV.4.1 Contour de température



### Trapézoïdale



### Triangulaire



**Figure IV. 5 :** Contours de la température pour différentes formes de la cheminée à une intensité solaire de  $870 \text{ W/m}^2$ .

La figure IV.5 représente la répartition de la chaleur dans le système pour une hauteur de 0,75m et une longueur et largeur de base respectivement égale à 500mm et 20mm pour différents formes : plane, trapézoïdale et triangulaire.

Il est clair que de faibles gradients de températures sont générés près de l'entrée et la sortie des cheminées trapézoïdale et triangulaire, le contraire de la cheminée plane qui a un gradient de température très important près de la sortie.

On remarque également un large bassin de température au centre de l'absorbeur surtout pour les formes trapézoïdale et triangulaire.

Selon notre point de vu, on peut interpréter ce phénomène comme suit : les deux formes trapézoïdale et triangulaire présentent un rétrécissement progressif de la section de passage ce qui induit à la naissance des frottements avec les parois latérales (inclinées) et par conséquent une perte d'énergie cinétique qui conduit par la suite à l'emmagasinations (accumulation) de la chaleur au centre de la cheminée.

Forme	$T$ moyenne à la sortie (K)
Plane	445,79
Trapézoïdale	342.93
Triangulaire	337,77

**Tableau IV. 3 :** Comparaison entre les températures moyennes à la sortie pour les trois formes.

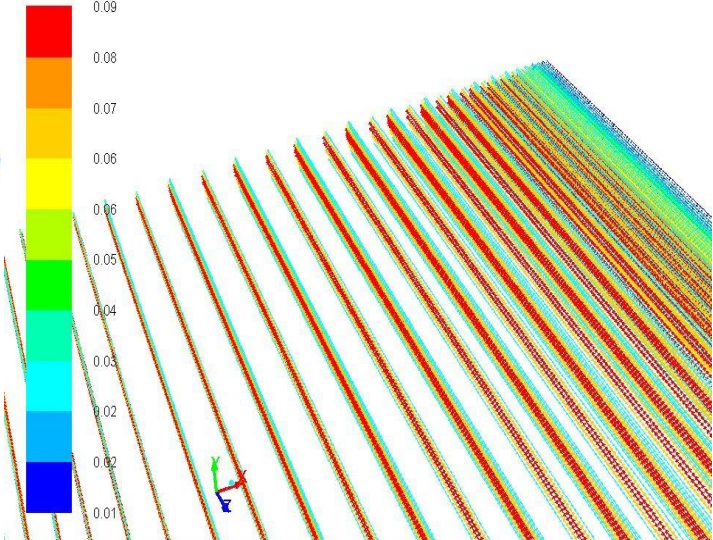
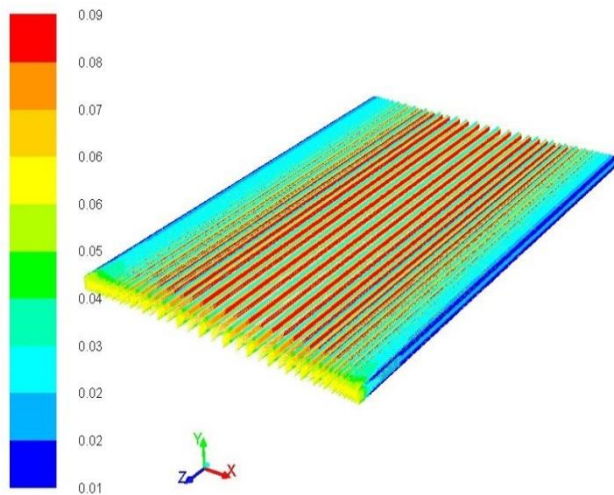
Les valeurs de températures moyennes à la sortie de la cheminée pour les trois différentes formes testées sont montrées sur le Tableau IV.3. Les résultats montrent une différence de température importante d'un cas à un autre, et cela est dû à n paramètres thermiques :

La section de captage de flux radiatif dépend directement à la forme de la cheminée, et donc plus la surface d'échange augmente, plus la différence de la masse volumique de l'air et sont effet de flottabilité devient sérieux, cela conduit automatiquement à une élévation de la température à la sortie.

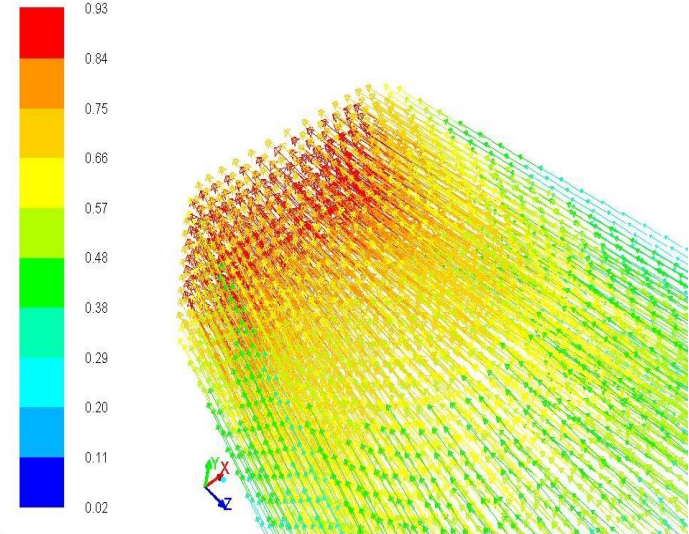
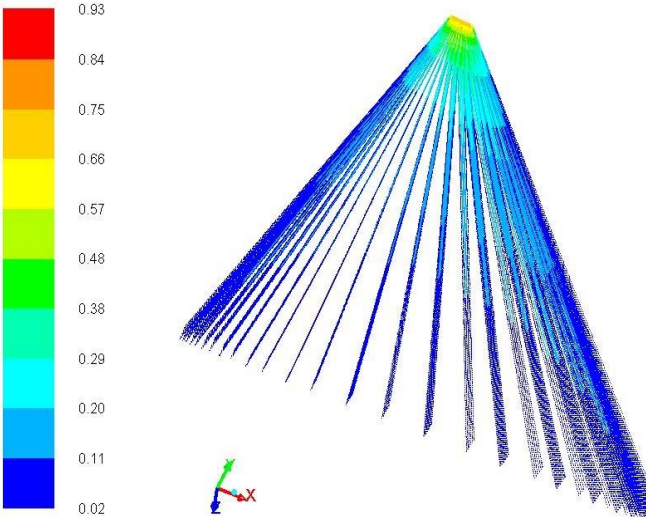


IV.4.2 Champs de vitesse

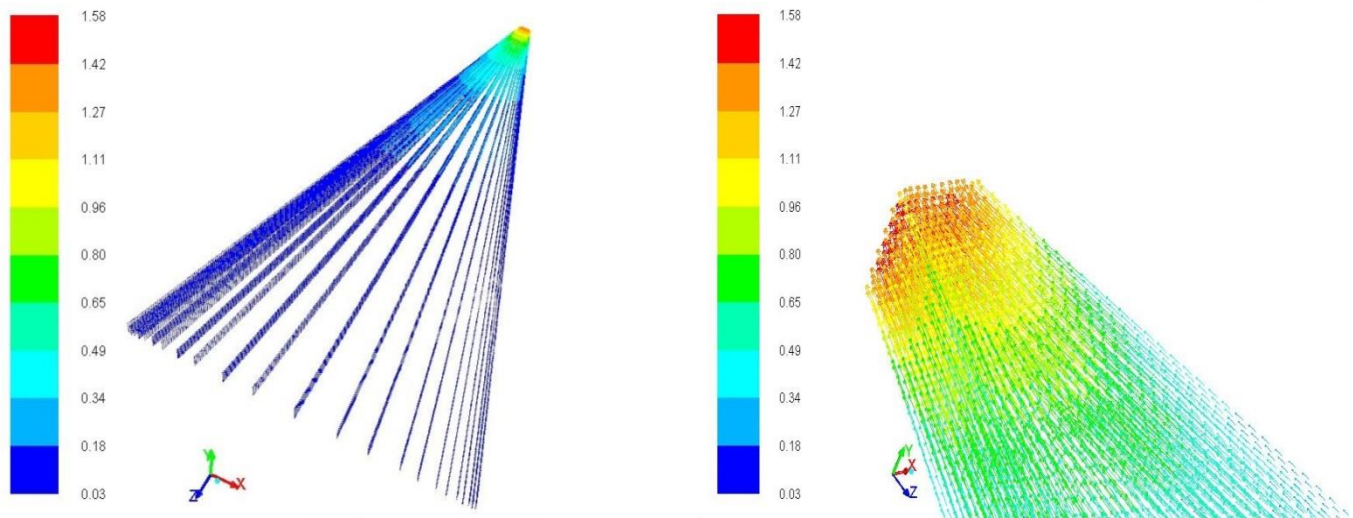
Plane



Trapézoïdale



## Triangulaire



**Figure IV. 6 :** Champ de vecteur de vitesse pour différentes formes de la cheminée à une intensité solaire de  $870 \text{ W/m}^2$ .

La figure **IV.6** représente le champ de vecteur de vitesse pour une hauteur de  $0,75\text{m}$  et une longueur et largeur de base respectivement égale à  $500\text{mm}$  et  $20\text{mm}$  pour différentes formes : plane, trapézoïdale et triangulaire.

D'après les figures présentées, on peut voir qu'il n'y a pas de différence de vitesse entre l'entrée et la sortie dans la cheminée pour la forme plane, résultat logique car cela confirme le principe de la conservation de la masse.

Les champs de vecteur de vitesse présentés pour les différents cas montrent des faibles vitesses au voisinage de parois, cela est du phénomène de frottement.

Forme	V à la sortie (m/s)	S de sortie (m <sup>2</sup> )
Plane	0,059	0,01
Trapézoïdale	0,84	0,0007
Triangulaire	1,47	0,0004

**Tableau IV. 4 :** Comparaison entre la vitesse d'air à la sortie pour les trois formes.

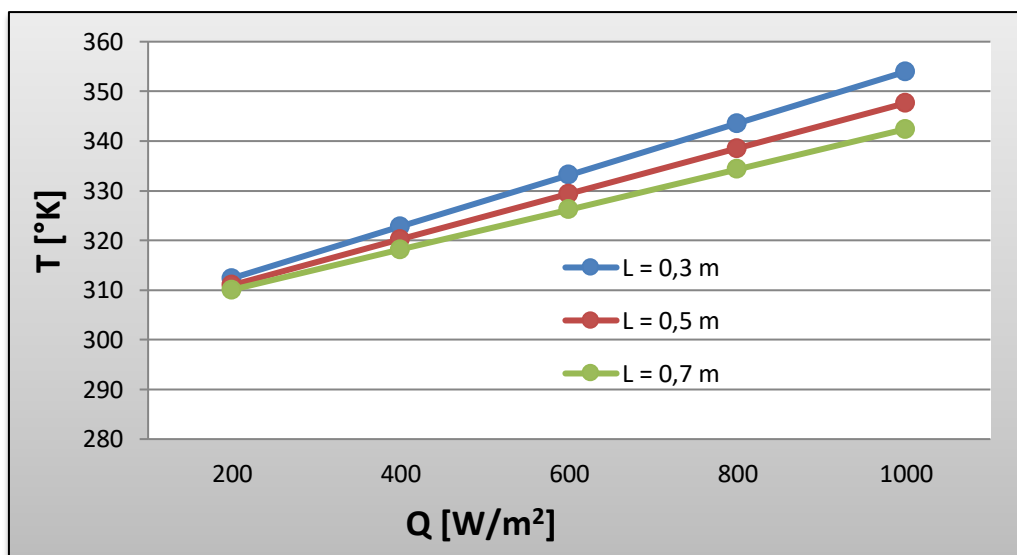
Le Tableau IV.4 réaffirme de nouveau le principe de la conservation de la masse. Il est clair que la diminution de la section de passage à une proportionnalité inverse avec l'élévation de la vitesse de l'écoulement à la sortie.

#### IV.5 Evolution de la température moyenne en fonction de l'intensité solaire

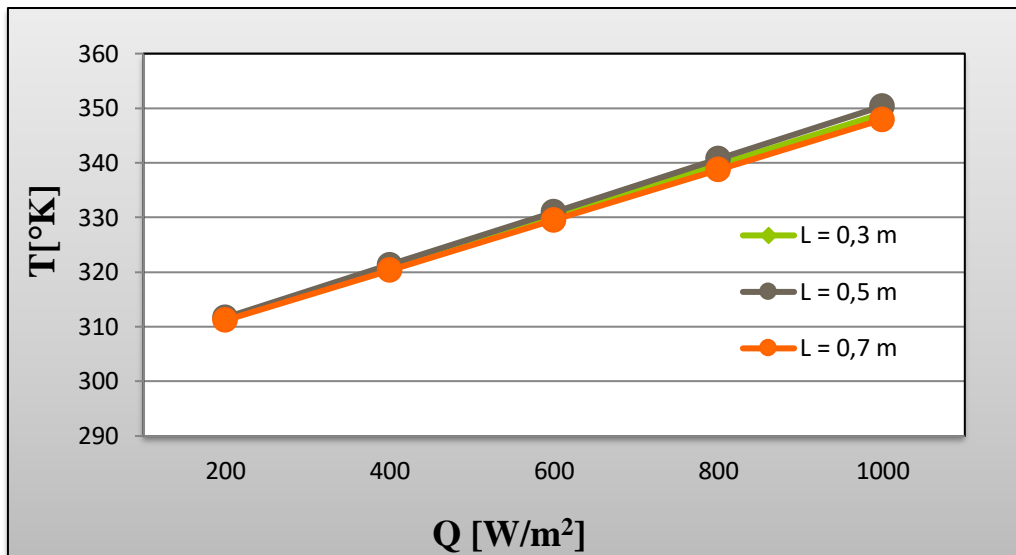
Les résultats ont été pris pour les paramètres d'entrée suivants pour chaque modèle :

- Une vitesse de 0,05 m/s.
- Une température ambiante de 302 K.

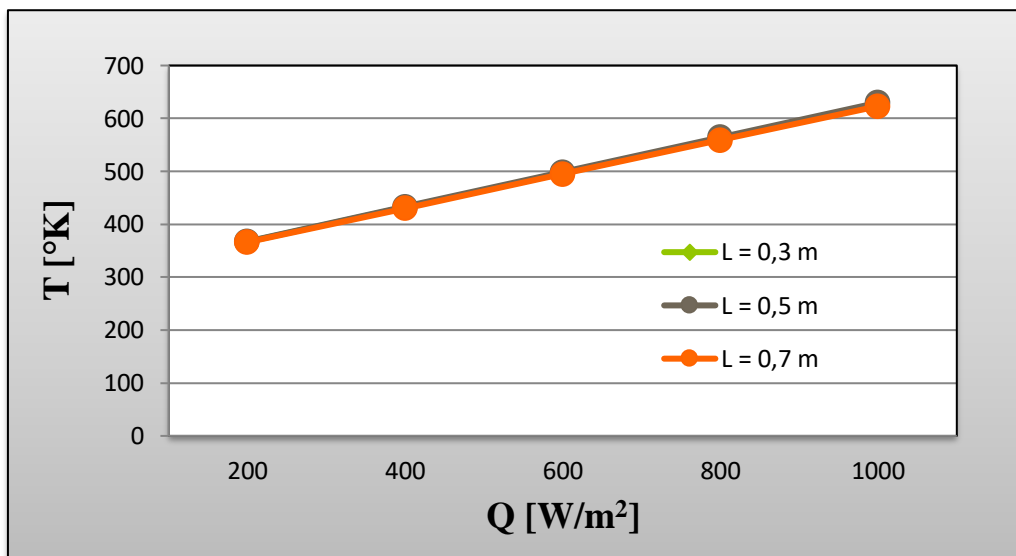
##### IV.5.1 Pour les trois différentes longueurs de base



**Figure IV. 7 :** Evolution de la température moyenne à la sortie de la cheminée en fonction de l'intensité solaire pour différentes longueurs de base.



**Figure IV. 8 :** Evolution de la température moyenne de vitrage en fonction de l'intensité solaire pour différentes longueurs de base.



**Figure IV. 9 :** Evolution de la température moyenne de l'absorbeur en fonction de l'intensité solaire pour différentes longueurs de base.



IV.5.2 Pour les trois différentes formes

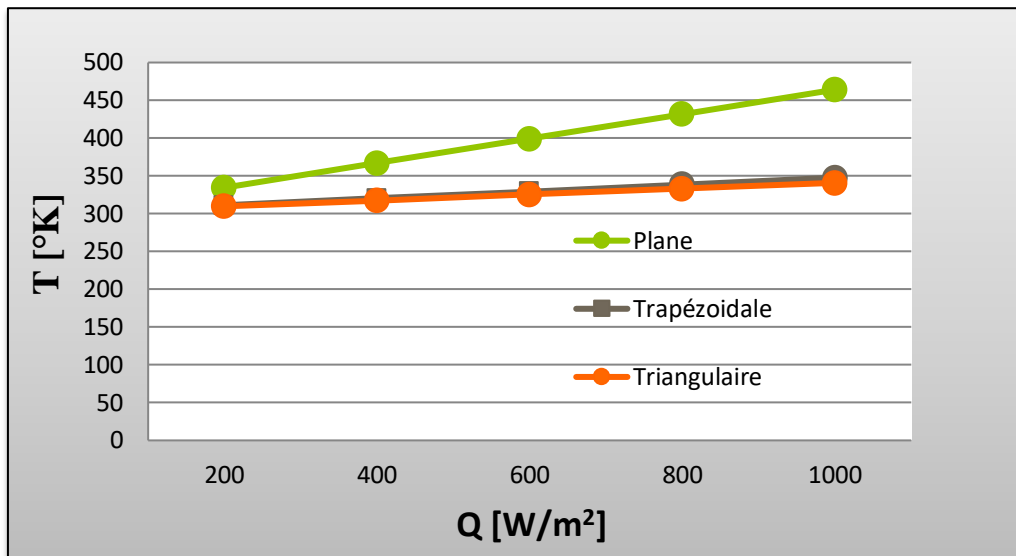


Figure IV. 10 : Evolution de la température moyenne à la sortie de cheminée en fonction de l'intensité solaire pour les trois différentes formes.

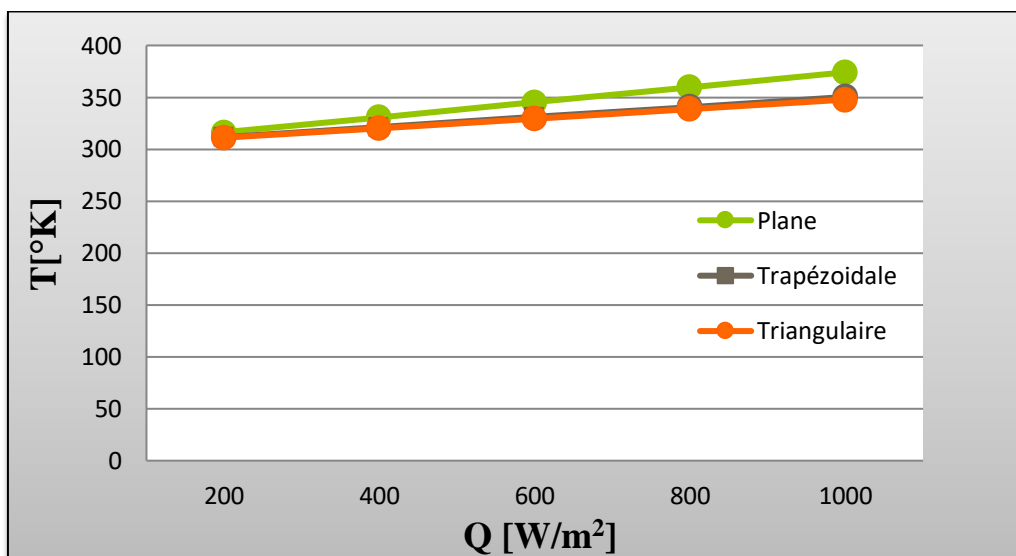
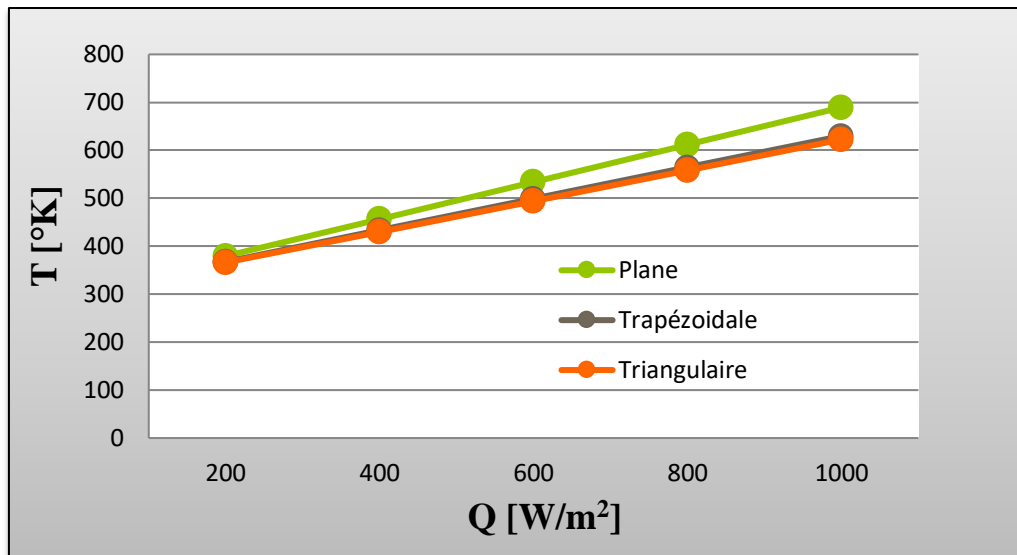


Figure IV. 11 : Evolution de la température moyenne de vitrage en fonction de l'intensité solaire pour les trois différentes formes.



**Figure IV. 12 :** Evolution de la température moyenne de l'absorbeur en fonction de l'intensité solaire pour les trois différentes formes.

Les figures ci-dessus présentés indiquent la variation de la température moyenne à la sortie de la cheminée, la température de l'absorbeur et la température au niveau de vitrage en fonction de l'intensité du rayonnement solaire pour les six modèles étudiée. On enregistre une augmentation linéaire de l'ensemble des températures.

Si on fait une comparaison entre les figures **IV.8**, **IV.9**, **IV.11** et **IV.12**, on remarque que l'intensité du rayonnement solaire à créer un gradient de température important entre le vitrage et l'absorbeur, Cette différence de température est la force motrice du système de la cheminée solaire.

On note aussi qu'il y a une légère différence de température ente le vitrage et l'absorbeur pour les faibles radiations solaire, et que plus l'intensité augmente plus la différence devient très importante.

D'après la figure **IV.10**, la température à la sortie de forme plane est trop élevée par rapport aux autres formes, atteindre 464,06 K, donc, les figures ci-dessus confirment la proportionnalité entre la température à la sortie de la cheminée et sa longueur et sa forme.

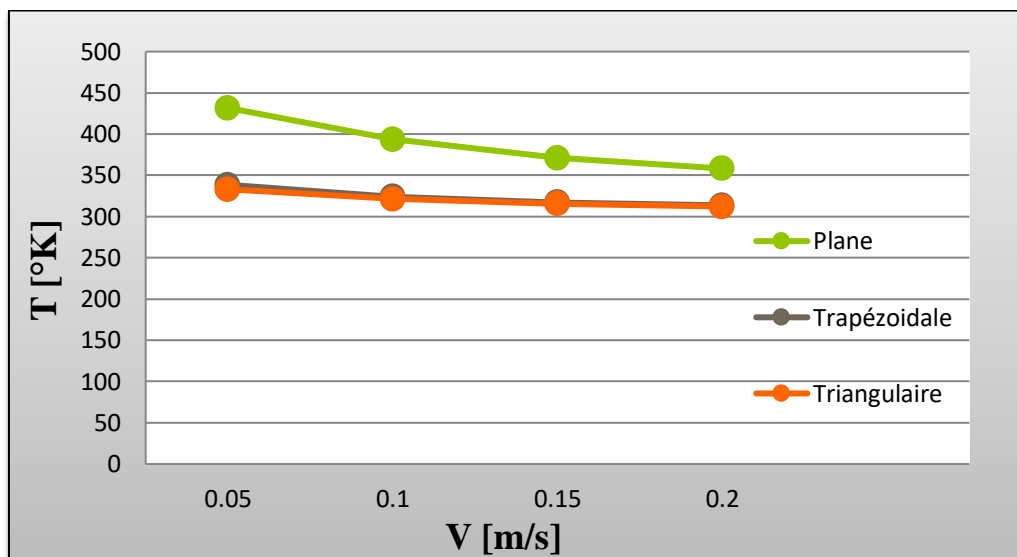
#### IV.6 Evolution température moyenne à la sortie en fonction de la vitesse d'entrée

Les résultats ont été pris pour les paramètres d'entrée suivants pour chaque modèle :

- Une intensité solaire de  $800 \text{ W/m}^2$ .
- Une température ambiante de  $302 \text{ K}$ .

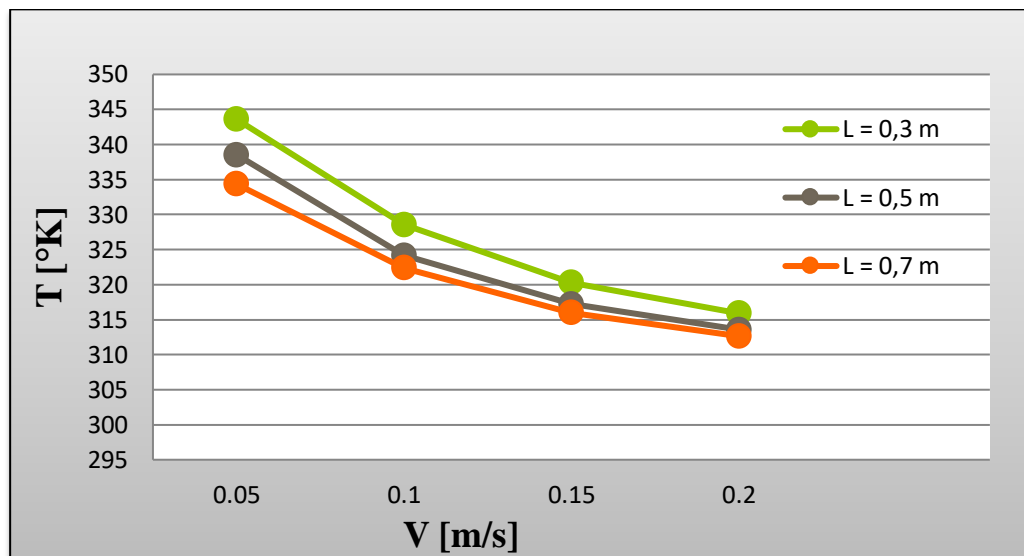
Les figures IV.13 et IV.14 montrent l'évolution de la température moyenne à la sortie pour différentes vitesses à l'entrée pour les six modèles étudiés.

##### IV.6.1 Pour les trois différentes formes



**Figure IV. 13 :** Evolution de la température moyenne à la sortie en fonction de la vitesse d'entrée pour les trois différentes formes étudiée.

## IV.6.2 Pour les trois différentes longueurs de base



**Figure IV. 14 :** Evolution de la température moyenne à la sortie en fonction de la vitesse d'entrée pour les trois différentes longueurs de base.

Les figures ci-dessus montrent qu'il existe un rapport inverse entre la vitesse et la température, où à chaque fois que la vitesse d'air entrant à la cheminée augmente, plus la température moyenne à la sortie de cheminée est diminuée.

## IV.7 Le temps de renouvellement d'air

Le changement d'air par heure en ventilation naturelle peut être calculé à partir de l'équation suivante :

$$t = \frac{V}{Q_v} \quad \text{IV. 1}$$

Avec :

$V$  : est le volume de la salle en  $m^3$ .

$Q_v$  : est le débit volumique à la sortie de cheminée en  $m^3/h$

**t** : est le temps de renouvellement d'air en h.

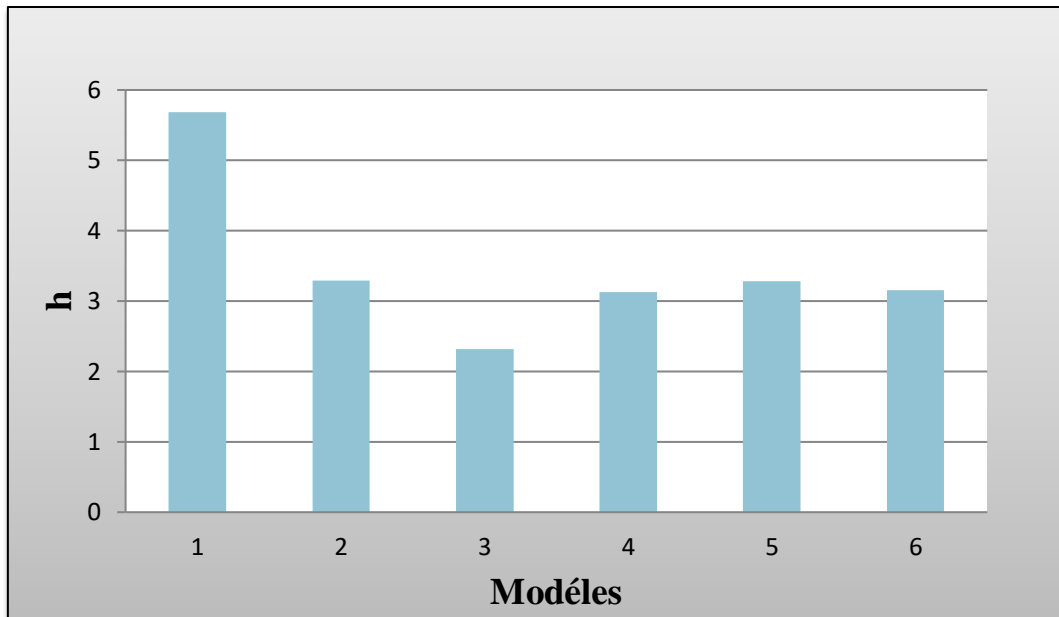
A titre d'exemple, nous proposons ce qui suit :

- Une salle de 3 m de longueur et de largeur avec une hauteur de 2,5 m
- Une intensité solaire de 800 W/m<sup>2</sup>
- Une vitesse d'entrée de 0,2 m/s avec une température ambiante de 302 K.

Et on calcule le temps de renouvellement d'air pour les six modèles étudiées.

Modèles	1	2	3	4	5	6
<b>Volume de salle (m<sup>3</sup>)</b>	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5
<b>Section à la sortie de cheminée (m<sup>2</sup>)</b>	0,0007	0,0007	0,0007	0,01	0,0007	0,0004
<b>Vitesse à la sortie de cheminée (m/s)</b>	1,69	2,83	3,99	0,201	2,83	4,96
<b>Débit volumique à la sortie (m<sup>3</sup>/s)</b>	0,0011	0,0019	0,0027	0,0020	0,0019	0,00198
<b>Temps de renouvellement d'air (s)</b>	20454,5	11842,1	8333,3	11250	11842,1	11363,6
<b>Temps de renouvellement d'air (h)</b>	5,68	3,289	2,314	3,125	3,28	3,156
<b>Nombre de renouvellement d'air par jour</b>	Plus de 4 fois	Plus de 7 fois	Plus de 10 fois	Presque 8 fois	Plus de 7 fois	Presque 8 fois

**Tableau IV. 5** : Temps de renouvellement d'air pour les 6 modèles étudiées.



**Figure IV. 15 :** Temps de renouvellement d’air pour les six modèles étudiés.

Le tableau IV.5 et la figure IV.15 montrent l’évolution de temps de renouvellement d’air d’une salle de 22.5 m<sup>3</sup>.

En analysant le temps de renouvellement d’air pour les six modèles étudiés, il est à noter que le cas le plus performant en terme de ventilation naturelle est celui du modèle 3, car ce dernier peut assurer une évacuation efficace de l’air pollué pour le remplacer de l’air neuf plus de 10 fois par jour.

En plus il est révélé aussi d’après cette étude que l’effet de dimension joue un rôle important dans la variation des performances de la cheminée solaire comparé avec l’impact de la forme , cela est bien lisible dans la différence du temps de renouvellement d’air trouvée entre les modèles 1,2 et 3 comparé à ceux obtenus entre 4,5 et 6 ( pas de grande différences ).

#### IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre une étude numérique de l’écoulement tridimensionnel de l’air dans une cheminée solaire de section variable a été présentée. Les résultats numériques, obtenus par la méthode des volumes finis, sont validés et présentés pour analyser le comportement dynamique d’un écoulement turbulent. Trois dimensions de longueurs de base et trois formes de la cheminée ont été analysés et comparés pour différents valeurs de vitesse d’entrée et pour différente intensité du rayonnement solaire.

# **Conclusion Générale**

### Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est d'améliorer les performances de la cheminée solaire pour la ventilation naturelle à l'intérieur de l'habitat. Ce mémoire consiste à faire une étude numérique du comportement thermique et dynamique de l'air dans une cheminée solaire. Par conséquent, afin d'atteindre l'objectif souhaité, le code ANSYS FLUENT a été utilisé pour effectuer une simulation numérique de l'écoulement convectif et visualiser les différents phénomènes affectant l'écoulement.

Pour la réussite de ce mémoire, les résultats de ce travail ont été vérifiés en les comparant avec les résultats expérimentaux. Et un bon accord a été trouvé entre eux.

Dans cette étude, nous avons proposé six modèles de cheminées solaires de différentes formes et dimensions, et avec différentes valeurs de radiation solaire et différentes valeurs de vitesse d'air d'entrée. Et cela nous a permis de tirer de multiples conclusions.

- L'augmentation de la longueur de base joue un rôle très important, elle augmente significativement le débit volumique et la vitesse de l'air à la sortie de cheminée.
- Le rétrécissement progressif pour les formes trapézoïdale et triangulaire conduit à l'emmagasinement de la chaleur au centre de la cheminée.
- L'augmentation de la température à la sortie de la cheminée dépend de la surface d'échange « la section de captage de flux radiatif » et donc une proportionnalité directe à la forme de la cheminée.
- La température de l'air à travers la cheminée diminue avec l'augmentation de la vitesse d'air d'entrée de la cheminée.
- L'augmentation de la température de vitrage et de l'absorbeur et le gradient de température entre eux est proportionnelle avec l'augmentation de rayonnement solaire.
- L'effet de dimension de la longueur de base de la cheminée joue un rôle important qu'il soit bien lisible dans la différence du temps de renouvellement d'air.



## Conclusion Générale

---

- Une augmentation très importante de la vitesse de l'air à la sortie de la cheminée pour un rétrécissement progressif élevé.

En général, pour les besoins domestiques (chauffage par exemple), le meilleur modèle est la cheminée de forme plane (meilleure température de sortie), Pour la ventilation, la cheminée avec un rétrécissement progressif présente la cheminée optimale.

# **Références Bibliographiques**

### Références bibliographiques

- [1] M. Mustapha Bordjane, Modes de transfert thermique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran «Mohamed Boudiaf» (2017)
- [2] Traore Massitan, Gestion du système Photovoltaïque d'une alimentation privée connecte au réseau, Faculté : Sciences de l'Ingéniorat Département : Électrotechnique, Université Badji Mokhtar Annaba, 2017.
- [3] Mlle Khaldi Sabrina, Etude numérique de la ventilation naturelle par la cheminé solaire, Mémoire de magister en mécanique énergétique, Université Abou BekrBelkaid - Tlemcen Faculté de technologie Département de génie mécanique. 2013.
- [4] Mr : Kabouche Azouz, Architecture et efficacité énergétique des panneaux solaires, Mémoire de magister en Architecture Bioclimatique, Université Mentouri Faculté des sciences de la terre, de géographie et l'aménagement du territoire. 2012.
- [6] H. M'Sellem et D. Alkama, Le confort thermique entre perception et évaluation par les techniques d'analyse bioclimatique - Cas des lieux de travail dans les milieux arides à climat chaud et sec, Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°3, pp. 471 – 488 (2009).
- [7] Akchiche Zineb, etude de comportement d'une cheminée solaire en vue de l'isolation thermique, mémoire de magister, Université KasdiMerbah Ouargla (2011).
- [10] J. Koffi, Analyse Multicritère Des Stratégies De Ventilation En Maisons Individuelles", Thèse De Doctorat, université de la rochelle, France, (2009).
- [11] Sahraoui Abdelkader, Etude de l'amélioration des performances d'une cheminée solaire en vue de la possibilité de chauffage domestique, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, Institut de Technologie, Département de Génie Mécanique. (2019).
- [12] Alexandra Tallet, Contrôle des écoulements par modèles d'ordre réduit, en vue de l'application à la ventilation naturelle des bâtiments, Université de LA Rochelle Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Énergétique et Aéronautique (SI-MMEA), (2013)
- [13] Etude et Evaluation De Ventilation Naturelle Dans les Climats Humides, Référence Particulière à la Conception Hôtelière : Cas de la ville d'Alger, Mr Aogab Adnane, Mr Merzougui Rami, Université l'Aarbi Ben Mhidi de Oum El Bouaghi Faculté de la science de terre et d'architecture Département d'Architecture, (2016).
- [14] Guohui Gan. Simulation of buoyancy-induced flow in open cavities for natural ventilation. *Energy and Buildings* 38 (2006) pp 410–420.
- [15] Nadia Saifi, Contribution à la conception des bâtiments à faible consommation d'énergie dans les zones arides, Thèse de doctorat en génie des procédés. Université Kasdimerbahouargla. 2016.
- [16] E.P. Sakonidou , T.D. Karapantsios . Modeling of the optimum tilt of a solar chimney for maximum air flow. *Solar Energy* 82 (2008) 80–94.

## Références Bibliographiques

---

- [17] Mukundjee Pandey, Biranchi Narayana Padhi, Ipsita Mishra, Performance analysis of a waste heat recovery solar chimney for nocturnal use, *jestech*, vol. 24, pp. 1–10 (2021)
- [18] K.S. Ong, C.C. Chow, Performance of a solar chimney, *Solar Energy*, vol. 74, pp. 1–17 (2003)
- [19] Alex Yong Kwang Tan, Nyuk Hien Wong, Natural ventilation performance of classroom with solar chimney system, *Energy and Buildings*, vol. 53, pp. 19–27 (2012)
- [20] M.A. Hosien S.M. Selim, Effects of the geometrical and operational parameters and alternative outer cover materials on the performance of solar chimney used for natural ventilation, *Energy and Buildings*, vol. 138, pp. 355–367 (2017)
- [21] Wenting Ding, Yuji Hasemia, Tokiyoshi Yamada, Natural ventilation performance of a double-skin facade with a solar chimney, *Energy and buildings*, vol. 37, pp. 411–418 (2005)
- [22] Jyotirmay Mathur, Sanjay Mathur, Anupma, Summer-performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation, *Energy and Buildings*, vol. 38, pp. 1156–1163 (2006)
- [21] Rakesh Khanal, Chengwang Lei, A numerical investigation of buoyancy induced turbulent air flow in an inclined passive wall solar chimney for natural ventilation, *Energy and Buildings*, vol. 93, pp. 217–226 (2015)
- [22] Rakesh Khanal, Chengwang Lei, An experimental investigation of an inclined passive wall solar chimney for natural ventilation, *Solar Energy*, vol. 107, pp. 461–474
- [23] Omar Belhadj, Hamidou Benzenine, Rachid Saim, Experimental analysis of height to base length effect in trapezoidal prism inclined solar chimney, *periodica polytechnic mechanical engineering*, vol. 65, pp. 47–55 (2021)

### Web bibliographiques :

- [8] <https://www.ecophon.com/fr/a-propos-decophon/proprietes-proprietes-fonctionnelles/confort-thermique>
- [9] <https://conseils-thermiques.org/contenu/pourquoi-ventiler-sa-maison.php>