

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة حسيبة بن بوعلي - الشلف -

Université Hassiba Benbouali de Chlef (U.H.B.C)



Faculté de Technologie

Département d'Electrotechnique

Mémoire de projet de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme

**MASTER**

Domaine : Science & Technologie

Filière : Electromécanique

Option : Electromécanique

**Thème**

**ETUDE EXPERIMENTALE DES PARAMETRES GEOMETRIQUES ET  
METEOROLOGIQUES SUR LES PERFORMANCES D'UNE CHEMINEE  
SOLAIRE**

Présenté par

**ATTATFA ALI & AFGHOUL AHMED**

Soutenu le 06/2025 devant le jury composé de :

Mr.TABANI.H	MCA	UHBC	Président
Mr. DEKKICHE.M	MCA	UHBC	Examineur
Mr.MOSTEFAOUI. M	MCA	UHBC	Examineur
Pr. TAHRI Toufik	professeur	UHBC	Encadreur

Promotion : 2024/2025

### الملخص

يتناول هذا البحث دراسة أداء المدخنة الشمسية كأحد الحلول الطاقوية المتجددة والمستدامة لتوليد الكهرباء، خاصة في المناطق ذات الإشعاع الشمسي المرتفع. تعتمد فكرة المدخنة الشمسية على تسخين الهواء داخل مجمّع شمسي يمتد على مساحة واسعة، مما يؤدي إلى صعود هذا الهواء الساخن عبر مدخنة مركزية، حيث يُستغل تدفقه لتدوير توربينات تقوم بتحويل الطاقة الحركية إلى طاقة كهربائية.

شملت الدراسة ثلاثة محاور رئيسية: جانب نظري تم فيه استعراض المبادئ العامة لعمل المدخنة الشمسية ومكوناتها الأساسية، وجانب وثائقي تضمن مراجعة شاملة لأهم الأعمال العلمية السابقة، ثم جانب تطبيقي تمثّل في تصميم نموذج تجريبي مصغّر تمت عليه سلسلة من التجارب بتغيير أقطار فتحات دخول الهواء (11، 18، و 28 سم)، وذلك لقياس تأثيرها على كل من سرعة الهواء الخارج ودرجة حرارته.

أظهرت النتائج أن سرعة الهواء ودرجة حرارته تتأثران بشكل كبير بقطر فتحة الدخول، حيث سُجّلت أعلى قيمة للسرعة في الحالة التي يكون فيها القطر أكبر، كما لوحظ تطابق مقبول بين النتائج التجريبية ونتائج المحاكاة العددية باستخدام برنامج COMSOL، مع بعض الفروقات الناتجة عن الفرضيات المثالية في النموذج العددي.

تُظهر هذه الدراسة أن المدخنة الشمسية تمثل خيارًا فعالًا ونظيفًا لإنتاج الكهرباء، مع إمكانية تطويرها وتحسين مردودها من خلال تعديل الأبعاد الهندسية واختيار مواد بناء ذات خصائص حرارية أفضل، مما يجعلها حلاً واعدًا لتلبية الحاجيات الطاقوية المستقبلية في المناطق الصحراوية.

الكلمات المفتاحية : مدخنة شمسية، تجريبية، قطر مدخل الهواء، برنامج COMSOL، محاكاة.

## Résumé

Ce travail porte sur l'étude des performances d'une cheminée solaire en tant que solution énergétique renouvelable et durable pour la production d'électricité, particulièrement adaptée aux régions à fort ensoleillement. Le principe de fonctionnement repose sur le chauffage de l'air sous un collecteur solaire de grande surface, ce qui engendre un flux d'air ascendant à travers une cheminée centrale. Ce flux est utilisé pour actionner des turbines qui convertissent l'énergie cinétique en énergie électrique.

L'étude s'articule autour de quatre volets: premier volet ; étude théorique présentant les principes de base et les composants essentiels du système, deuxième volet ; une revue bibliographique des travaux de recherche antérieurs, troisième volet ; une étude expérimentale consistant en la conception d'un prototype réduit et quatrième volet, une simulation numérique pour valider les résultats expérimentaux. Ce dernier a fait l'objet de plusieurs essais en faisant varier le diamètre des ouvertures d'entrée d'air (11, 18 et 28 cm), afin d'analyser leur influence sur la vitesse et la température de l'air à l'entrée de cheminée.

Les résultats ont montré que la vitesse et la température de l'air augmentent avec le diamètre des ouvertures. La vitesse maximale enregistrée a atteint environ 2,6 m/s pour un diamètre de 28cm. Les résultats expérimentaux ont été comparés à une simulation numérique réalisée avec le logiciel COMSOL, montrant une bonne cohérence, malgré certaines divergences dues aux hypothèses idéalisées du modèle.

Cette étude démontre que la cheminée solaire constitue une technologie prometteuse pour la production d'énergie propre. Son rendement peut être optimisé par l'amélioration des dimensions géométriques et le choix de matériaux à meilleures propriétés thermiques, ce qui en fait une alternative sérieuse pour répondre aux besoins énergétiques futurs dans les zones désertiques.

Mots Clés : solar chimney, experimental, air inlet diameter, COMSOL software, simulation.

## Abstract

This study focuses on evaluating the performance of a solar chimney as a renewable and sustainable solution for electricity generation, particularly suitable for regions with high solar radiation. The operating principle is based on heating air beneath a large solar collector, which causes the hot air to rise through a central chimney. This upward airflow drives turbines that convert kinetic energy into electrical power.

The research includes three main components: a theoretical part presenting the fundamental principles and main components of the system, a literature review summarizing previous scientific studies, and an experimental part involving the design of a scaled-down prototype. Several tests were conducted by varying the diameter of the air inlet openings (11 cm, 18 cm, and 28 cm) to assess their effect on the air's exit velocity and temperature.

The results showed that both the air velocity and temperature increase with larger inlet diameters. The maximum recorded velocity reached approximately 2.6 m/s. The experimental data were compared with numerical simulations performed using COMSOL software, demonstrating good overall agreement, despite some differences due to idealized assumptions in the simulation model.

This study concludes that the solar chimney is a promising technology for clean energy production. Its performance can be enhanced through optimized geometric design and the use of materials with better thermal properties, making it a viable alternative for meeting future energy demands in desert and arid regions.

Keywords: solar chimney, experimental, air inlet diameter, COMSOL software, simulation.

# *Dédicace*

Nous dédions ce mémoire à ceux qui nous ont appuyés et encouragés à effectuer ce travail de recherche ainsi qu'à ceux à qui Notre réussite leur tient à cœur.

## Remerciements

Nous tenons d'abord à remercier Allah tout puissant, qui nous à éclairé le bon chemin et que nous à permis de réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos chaleureuses gratitudes à Mr : **TOUFIK TAHRI**, Professeur à l'université de Chlef, Doctorant : **Benettayeb Youcef**, et Mr : **Benbouali Abderrahmane**, pour son aide, son encouragement, sa patience et ses précieux conseils.

Nous remercierons également le président ainsi que les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

L'ensemble des enseignants du département Electrotechnique pour leurs efforts pendant toutes ces années d'étude.

En fin nous adressons notre remerciement les plus profonds et les distinguées à tous ceux qui nous aidons de proche ou de loin pour accomplir ce travail.

## Nomenclature

$g$ : Gravité,

$\beta$ : Coefficient de dilatation thermique,

$\Delta T$ : Différence de température moyenne (K),

$L$ : Hauteur caractéristique (m),

$\mu, \alpha$  : Viscosité dynamique (Pas) et diffusivité thermique ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$G_r, P_r$ : Nombres de Grashof et de Prandtl.

$L$  : La hauteur moyenne du collecteur (m).

$\vec{u}$ : Vecteur vitesse,

$\rho$ : Densité de l'air ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$P$ : Pression (Pa),

$T$ : Température (K),

$C_p$ : Chaleur spécifique à pression constante ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ),

$K$ : Conductivité thermique ( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ),

$Q, Q_{vh}, W_p$ : Sources de chaleur et travail mécanique(W),

$\vec{F}$ : Forces volumiques gravité ( $\text{N}/\text{m}^3$ )

$R_a$ : Le nombre de Rayleigh.

## Liste des figures

### Chapitre I : Généralités sur les centrales a cheminée solaire

Figure I.1. Vue intérieure du Collecteur de cheminée solaire.....	4
Figure I.2. Une vue extérieure du collecteur de cheminée solaire .....	4
Figure I.3. La Cheminée solaire.....	5
Figure I.4. Turbine d'une centrale à cheminée solaire.....	5
Figure I.5. Principe de fonctionnement de la cheminée solaire.....	7
Figure I.6. Effet de la température ambiante et l'éclairement sur la production d'énergie.....	8
Figure I.7. Effet de la hauteur de la cheminée et du diamètre du collecteur sur la production d'électricité pour un éclairement de 600 W/m <sup>2</sup> .....	8
Figure I.8. Principe de stockage de la chaleur dans le collecteur par des tubes remplis d'eau.....	9
Figure I.9. Principe du stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des galets....	10

### Chapitre II : Etude bibliographique sur les centrales à cheminées solaires

Figure II.1. La broche de Léonard de Vinci.....	12
Figure II.2. Projet de moteur solaire proposé par Isidoro Cabanyes.....	13
Figure II.3. Principe de la centrale électrique du professeur Dubos.....	13
Figure II.4. Cheminées solaires dans le désert marocain imaginé par Dubos.....	14
Figure II.5. Proposition de cheminée solaire par ( <i>Günther, 1931</i> ).....	14
Figure II.6. La tour solaire du professeur NAZARE.....	15
Figure II.7. Prototype de cheminée solaire à Manzanares.....	16
Figure II.8. Emplacements des études de faisabilité et expérimentales de la centrale solaire à cheminée (désignées respectivement par des points rouges et des points verts).....	17
Figure II.9. Schéma de la centrale électrique d'environ-mission.....	18
Figure II.10. Projet centrale à Cheminée solaire de Namibien.....	19
Figure II.11. Schéma d'une centrale solaire à cheminée : (a) un seul axe vertical, (b) un axe vertical multiple et (c) un axe horizontal multiple.....	25

### Chapitre III : Etude expérimentale et simulation

Figure III 1. Wilaya de Chlef.....	28
Figure III 2. Avant de placer le couvercle.....	31
Figure III 3. Après de placer le couvercle.....	31
Figure III 4. L'installation de cheminée sur un système de cheminée solaire.....	32
Figure III 5. Une photo du montage "CCS" expérimentale à Chlef.....	33
Figure III 6. Pro anémomètre de HoldPeak HP-866A.....	34

Figure III 7. Arduino.....	35
Figure III 8. Classement des Arduinos dans cheminée.....	35
Figure III 9. Interface de COMSOL Multiphysics 6.1.....	38
Figure III 10. Création un modèle de simulation.....	39
Figure III 11. Choix de la dimension.....	40
Figure III 12. Choix des modules physiques.....	40
Figure III 13. Choix de type d'étude.....	41
Figure III 14. Construction de la géométrie.....	41
Figure III 15. Choix des matériaux.....	42
Figure III 16. Définitions des conditions aux limites.....	42
Figure III 17. Maillage.....	43
Figure III 18. La géométrie de cheminée.....	43

## **Chapitre IV : Résultats et discussions**

Figure IV.1 : Photo des ouvertures d'entrée de l'air dans le collecteur.....	45
Figure IV.2. Variation de la vitesse mesurée à l'entrée de la cheminée en fonction du temps(19/03/2025).....	46
Figure IV.3. Variation de la température mesurée à l'entrée de la cheminée en fonction du temps (19/03/2025).....	47
Figure IV.4. Variation de la température mesurée dans les trois points du collecteur en fonction du temps (19/03/2025).....	48
Figure IV.5 : Photo des ouvertures d'entrée de l'air dans le collecteur.....	49
Figure IV.6. Variation de la vitesse mesurée à l'entrée de la cheminée en fonction du temps (08/04/2025).....	50
Figure IV.7. Variation de la température mesurée à l'entrée de la cheminée en fonction du temps (08/04/2025).....	51
Figure IV.8. Variation de la température mesurée dans les trois points du collecteur en fonction du temps (08/04/2025).....	52
Figure IV.9 : Photo des ouvertures d'entrée de l'air dans le collecteur.....	53
Figure IV.10. Variation de la vitesse mesurée à l'entrée de la cheminée en fonction du temps (09/04/2025).....	53
Figure IV.11. Variation de la température mesurée à l'entrée de la cheminée en fonction du temps (09/04/2025).....	54
Figure IV.12. Variation de la température mesurée dans les trois points du collecteur en fonction du temps (09/04/2025).....	55

Figure IV.13. Évolution de la vitesse de l'air dans la cheminée solaire 2D en fonction du temps .....56

Figure IV.14. Évolution de la vitesse de l'air dans la cheminée solaire 3D en fonction du temps.....57

Figure IV.15. Évolution de la température de l'air dans la cheminée solaire 3D en fonction du temps.....58

## Liste des tableaux

Tableau II 1 : Les dimensions principales et les données techniques du prototype de Manzanares.....	16
Tableau III 1 : Dimension de cheminée solaire.....	29
Tableau III 2 : Les principales conditions aux limites.....	37
Tableau IV 1 : Tableau de comparaison.....	59

## Table des matières

<b>Abstract .....</b>	<b>I</b>
<b>ملخص.....</b>	<b>II</b>
<b>Résumé .....</b>	<b>III</b>
<b>Dédicace .....</b>	<b>IV</b>
<b>Remerciements .....</b>	<b>V</b>
<b>Nomenclature .....</b>	<b>VI</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>VII</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>X</b>
<b>Tableau de matières .....</b>	<b>XI</b>
<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1: Généralités sur les centrales à cheminée Solaire (CCS)</b>	
I.1. Introduction .....	3
I.2. Principaux éléments de la cheminée solaire .....	3
I.2.1. Le Collecteur .....	3
I.2. 2. Cheminée .....	4
I.2. 3. Turbine .....	5
I.3. Principe de fonctionnement de cheminée .....	6
I.4. Amélioration de performance de la cheminée solaire .....	7
I.4.1. l'effet de la température ambiante et l'éclairement solaire .....	7
I.4.2. L'effet du diamètre du collecteur et de la hauteur de la cheminée .....	7
I.5. Stockage d'énergie .....	8
I.5.1. Les différentes méthodes de stockage .....	8
I.5.1.1. Par chauffage d'eau .....	9
I.5.1.2. Par chauffage de sable .....	9
I.5.1.3. Par chauffage de galets .....	10
I.6. Les avantages et les inconvénients de la cheminée solaire .....	10
I.6.1. Les avantages .....	10
I.6.2. les inconvénients .....	11
I.7. Conclusion .....	11

## **Chapitre II: Revue bibliographique sur les centrales de cheminée solaire**

II.1. Introduction .....	12
II.2. La chronologie de la centrale solaire à cheminée .....	12
II.3. Etudes expérimental .....	17
II.4. Etudes analytiques et de numérique .....	23
II.5. Conclusion.....	27

## **Chapitre III: Etude expérimentale et simulation**

III.1. Introduction .....	28
III.2. Région de CHLEF .....	28
III.3. Aspect climatique .....	29
III.4. Etude expérimentale et numérique d'une cheminée solaire .....	29
III.4.1. Etude expérimentale .....	29
III.4.1.1. Raisons du choix des dimensions géométriques .....	30
III.4.1.2. Méthologie d'installation .....	30
III.4.1.3. Le Collecteur .....	30
III.4.1.4. La Cheminée .....	32
III.4.1.5. Prototype de la cheminée solaire .....	32
III.4.1.6. Rôle et importance de la validation expérimentale .....	33
III.4.1.7. les grandeurs à mesurer .....	33
III.4.1.8. Matériel de mesure et outils utilisés .....	34
III.4.2. Etude théorique et simulation numérique .....	35
III.4.2.1. Etude théorique .....	35
III.4.2.1.1. Equations gouvernantes .....	36
III.4.2.1.2. Modélisation mathématique .....	36
III.4.2.1.3. Conditions aux limites .....	37
III.4.2.2. Simulation numérique de la cheminée solaire .....	37
III.4.2.2.1. Présentation de logiciel de simulation .....	38
III.4.2.2.2. Prise en main du logiciel .....	38
III.4.2.2.3. Les étapes de simulation .....	39
A). crée un modèle par assistant de modélisation .....	39
B). Choix de la dimension .....	39
C). Choix des modules physiques .....	40
D). Choix de type d'étude .....	40

E). Construction de la géométrie .....	41
F). Choix des matériaux .....	42
G). Définition des conditions aux limites .....	42
H). Paramétrage et calcul de maillage .....	42
I). Représentation de la géométrie de la cheminée .....	43
III.5. Conclusion .....	44

## **Chapitre IV: Résultats et discussions**

IV.1. Introduction .....	45
IV.2. Résultats expérimentaux .....	45
IV.2.1. Résultats du premier cas (D=28cm) .....	45
IV.2.1.1. Vitesse et température de l'air à l'entrée de la cheminée .....	46
IV.2.1.2. Température mesurée dans les trois points du collecteur .....	48
IV.2.2. Résultats du deuxième cas (D=18cm) .....	49
IV.2.2.1. Vitesse et température de l'air à l'entrée de la cheminée .....	49
IV.2.2.2. Vitesse et température de l'air à l'entrée de la cheminée .....	51
IV.2.3. Résultats du deuxième cas (D=11cm) .....	52
IV.2.3.1. Vitesse et température de l'air à l'entrée de la cheminée .....	53
IV.2.3.2. Vitesse et température de l'air à l'entrée de la cheminée .....	54
IV.3. Comparaison entre les trois cas expérimentaux .....	55
IV.4. Résultats de simulation .....	56
IV.4.1. La variation de la vitesse de l'air dans le CS .....	56
IV.4.2. La variation de la température de l'air dans le CS .....	58
IV.5. Comparaison des résultats de simulation et expérimentaux .....	59
IV.5.1. Tableau de comparions .....	59
IV.6. Conclusion .....	59
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>61</b>
<b>Références Bibliographiques</b> .....	<b>63</b>

# **Introduction générale**

# Introduction générale

---

## Introduction générale

Le monde connaît actuellement de profondes transformations dans le secteur de l'énergie, en raison des défis environnementaux et économiques liés à la surconsommation des sources d'énergie traditionnelles, notamment le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Cette forte dépendance à ces sources a entraîné une augmentation alarmante des émissions de gaz à effet de serre, contribuant à l'aggravation du réchauffement climatique et du changement climatique, sans parler de l'épuisement accéléré des ressources naturelles non renouvelables. Face à cette situation, il est devenu impératif de rechercher des solutions alternatives garantissant la sécurité énergétique tout en préservant l'environnement.

Les énergies renouvelables, et notamment l'énergie solaire, comptent parmi les alternatives les plus prometteuses en raison de leur grande disponibilité et de leur respect de l'environnement. Grâce aux progrès technologiques, de nouveaux systèmes ont vu le jour, capables d'exploiter l'énergie solaire avec un rendement élevé, notamment la cheminée solaire, également appelée centrale solaire à effet de cheminée. Cette technologie repose sur un principe physique simple : le chauffage de l'air à l'intérieur d'un capteur solaire recouvert de verre ou plastique transparent crée une différence de densité qui fait monter l'air chaud dans une cheminée verticale. Ce flux d'air peut ensuite être exploité pour entraîner des turbines et produire de l'électricité.

Cette technologie présente plusieurs avantages, notamment sa conception simple, ses faibles coûts d'exploitation et l'absence d'émissions nocives, ce qui la rend particulièrement adaptée aux zones désertiques à fort ensoleillement, comme le sud algérien. Cependant, la performance de ce système dépend largement de plusieurs facteurs, tels que les dimensions géométriques de la cheminée et du capteur, les propriétés des matériaux utilisés et les conditions climatiques locales (rayonnement, température, vent, etc.).

Dans ce contexte, cette étude vise à évaluer la performance d'un modèle de cheminée solaire à petite échelle construit dans la wilaya de Chlef, en examinant l'effet des dimensions des ouvertures d'aération sur la distribution de la vitesse et de la température au sein du système. Une approche expérimentale a été adoptée, utilisant des microcontrôleurs (Arduino) équipés de capteurs de température (DHT11) et un anémomètre pour mesurer la vitesse et la température de l'air dans des points à l'intérieur du système. Un modèle numérique utilisant COMSOL Multiphysics a été utilisé pour simuler le comportement thermique et dynamique de l'air au sein du système.

# Introduction générale

---

L'importance de cette étude dépasse les considérations académiques et englobe les dimensions environnementales et économiques. Elle représente une réelle contribution à la transition énergétique nationale, notamment dans les régions intérieures et désertiques de l'Algérie. Ces résultats fournissent également une base scientifique pour la conception de cheminées solaires à rendement amélioré, utilisant des matériaux locaux et des technologies simples. Cela ouvre la voie à de multiples applications, notamment la production d'électricité, la ventilation naturelle et même le séchage agricole. Ce mémorandum constitue donc une première étape vers le développement de solutions innovantes, efficaces et peu coûteuses qui contribuent à exploiter l'énorme potentiel solaire de notre pays.

Pour atteindre les objectifs de cette étude, le mémoire a été divisé en quatre chapitres interconnectés :

Le chapitre 1 présente le cadre théorique, passant en revue les concepts généraux liés aux cheminées solaires, leurs composants de base, leur principe de fonctionnement physique, ainsi que leurs principaux avantages et limites.

Le chapitre 2 présente une revue systématique des principaux travaux et études antérieurs, tant expérimentaux que numériques, afin d'identifier les lacunes de recherche que ce travail pourrait combler.

Le chapitre 3 aborde l'aspect pratique, expliquant la conception du modèle expérimental miniature développé à l'Université de Chlef, les outils utilisés pour collecter les données et le développement d'un modèle de simulation utilisant COMSOL Multiphysics.

Le chapitre 4 analyse les résultats obtenus à partir des expériences et des simulations, compare les cas étudiés et tire des conclusions et des recommandations visant à améliorer les performances des cheminées solaires à l'avenir.

Enfin ; nous allons achever notre travail par une conclusion qui va résumer ce que nous avons vu pendant notre recherche.

# Chapitre I

## Généralités sur les centrales à cheminée Solaire

## **I.1. Introduction**

Avec la croissance rapide de la demande énergétique mondiale et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, les sources d'énergie renouvelable occupent une place de plus en plus importante dans les stratégies de production d'électricité. Parmi ces sources, l'énergie solaire constitue une alternative propre et inépuisable. Les centrales à cheminée solaire, encore peu répandues mais prometteuses, représentent une technologie innovante exploitant l'énergie thermique du soleil pour produire l'électricité. La centrale à cheminée solaire fonctionne en utilisant l'effet de serre combiné à une cheminée de grande hauteur qui crée un courant d'air ascendant, activant des turbines situées à sa base.

Cette technologie, bien qu'elle nécessite des structures de grande envergure, présente de nombreux avantages en termes de durabilité, de faible impact environnemental et de coûts d'exploitation réduits à long terme.

Dans ce chapitre nous allons explorer les généralités sur ce type de centrale, en présentant ses composants principaux, son principe de fonctionnement, ainsi que ses avantages et limitations.

## **I.2. Principaux éléments de la cheminée solaire**

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

### **I.2.1. Le collecteur**

Un grand collecteur d'air se compose de trois éléments principaux:

1. Le sol, qui agit comme un système de stockage de la chaleur ;
2. Un toit transparent en verre (Fig. I.1) ou en plastique (Fig. I.2), situé à quelques mètres au-dessus du sol, permettant le passage du rayonnement solaire ;
3. Enfin, un conduit destiné à la circulation de l'air.

Pour diriger efficacement le flux d'air vers le centre du collecteur tout en minimisant les frottements, le toit doit être installé avec une inclinaison appropriée.

Le sol situé sous le toit du collecteur absorbe la chaleur, puis réchauffe l'air qui circule radialement au-dessus de lui. Cette surface agit comme un réservoir thermique : elle stocke une partie du rayonnement solaire reçu pendant la journée et restitue cette énergie la nuit. Grâce à ce processus, une alimentation électrique continue peut être assurée tout au long de l'année [1].



*Figure I.1. Vue intérieure du collecteur de cheminée solaire [1]*



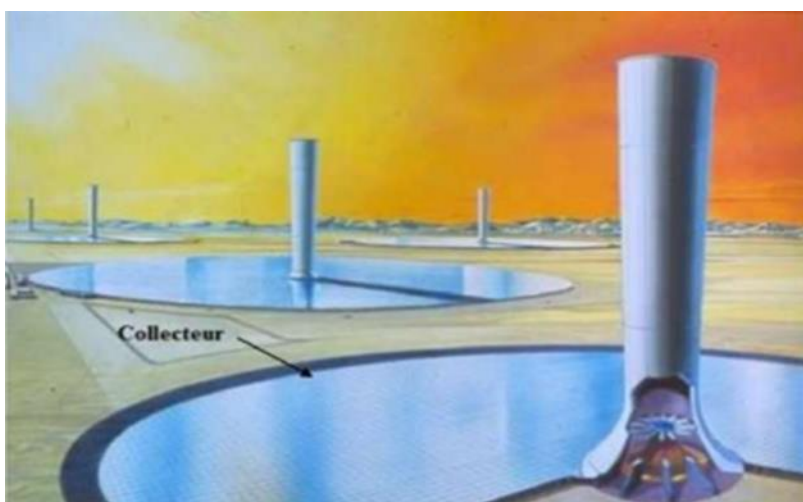
*Figure I.2. Une vue extérieure du collecteur de cheminée solaire [1]*

### **I.2.2. La cheminée**

La cheminée solaire est une structure cylindrique de grande hauteur, placée au centre du collecteur. Un ou plusieurs turbogénérateurs sont installés à sa base dans le but de produire de l'électricité, comme l'illustre la figure I.3. Les cheminées solaires présentent généralement

une inclinaison spécifique, souvent verticale, car cette configuration est plus facile à construire et à exploiter.

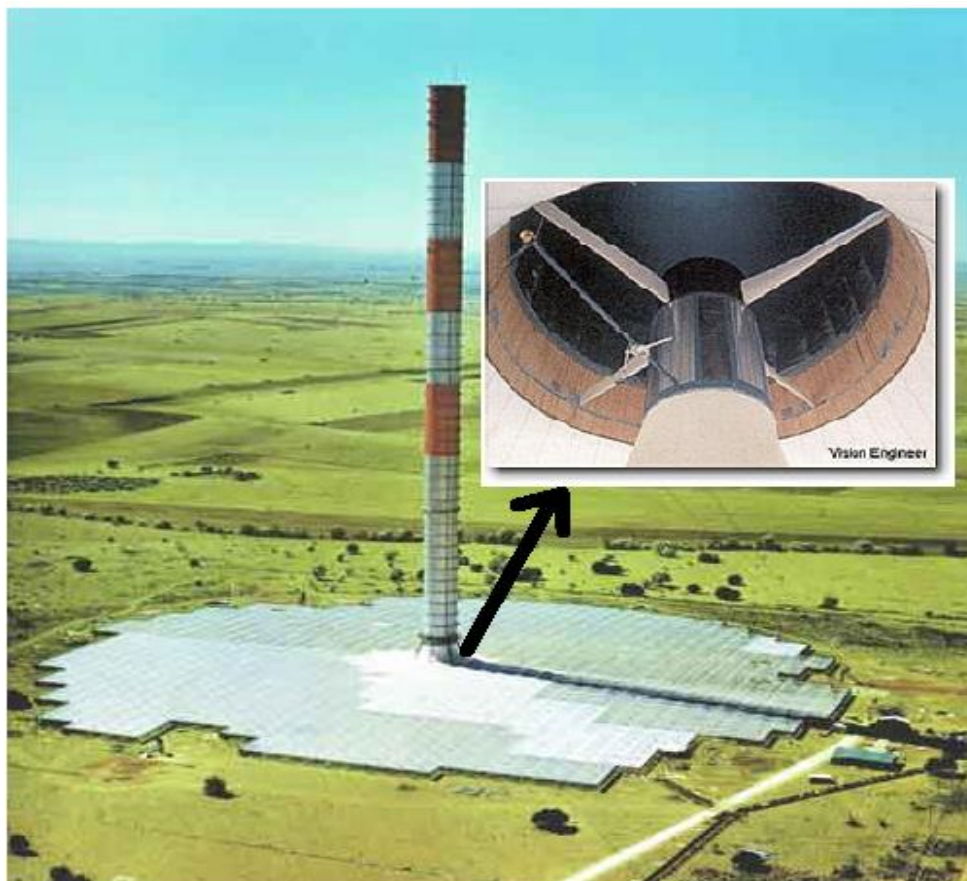
La cheminée constitue le véritable moteur thermique de la centrale solaire. Elle agit comme un conduit de force, caractérisé par de faibles pertes par frottement, grâce à son rapport surface-volume favorable. La vitesse de l'air ascendant, ou le débit massique de celui-ci, est approximativement proportionnel à l'élévation de la température de l'air dans le collecteur ainsi qu'à la hauteur de la cheminée [2].



*Figure I.3. La Cheminée solaire [2]*

### **I.2.3. La turbine**

La turbine est l'un des composants essentiels d'une centrale solaire à cheminée. Son principal rôle est de convertir l'énergie cinétique de l'air chauffé en énergie mécanique, grâce aux rotors. Dans ce type de centrale, la turbine conventionnelle est généralement installée à la base de la cheminée, ce qui facilite son installation et sa maintenance à grande échelle. Il s'agit le plus souvent d'une turbine à flux axial, comme l'illustre la figure I.4 [2].



*Figure I.4. Turbine d'une centrale à cheminée solaire [2]*

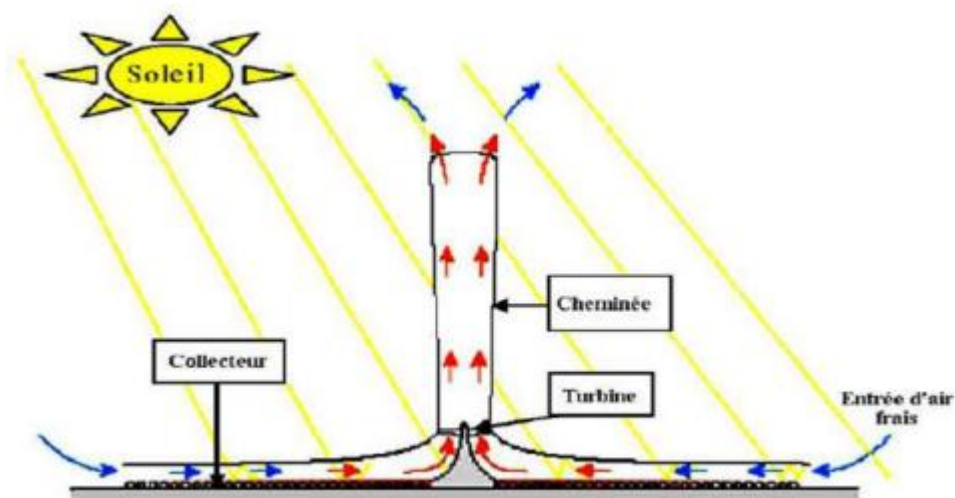
### **I.3. Principe de fonctionnement de la cheminée solaire**

La cheminée solaire est une centrale thermique solaire composée principalement de trois éléments essentiels, comme illustré dans la figure I.5: la cheminée (ou tour), le collecteur solaire et la turbine.

Cette technologie utilise une source d'énergie renouvelable et repose sur deux principes physiques fondamentaux: d'une part, la montée de l'air chaud due à sa faible densité par rapport à l'air ambiant plus froid; d'autre part, le déplacement de l'air provoqué par la différence de pression entre l'entrée du collecteur et la sortie de la cheminée.

Pendant la journée, le rayonnement solaire traverse la couverture transparente du collecteur, surélevée au-dessus du sol, et chauffe l'air contenu entre cette couverture et le sol, créant ainsi un effet de serre. Cet air chauffé devient moins dense et s'élève naturellement à travers la cheminée. Ce mouvement ascendant entraîne une aspiration de l'air ambiant vers l'intérieur du collecteur. L'air en mouvement accélère à l'intérieur de la cheminée, activant

une turbine installée à sa base. L'énergie cinétique de l'air est ensuite convertie en électricité grâce à un générateur couplé à la turbine [3].



*Figure I.5. Principe de fonctionnement de la cheminée solaire [3]*

#### **I.4. Amélioration de la performance de la cheminée solaire**

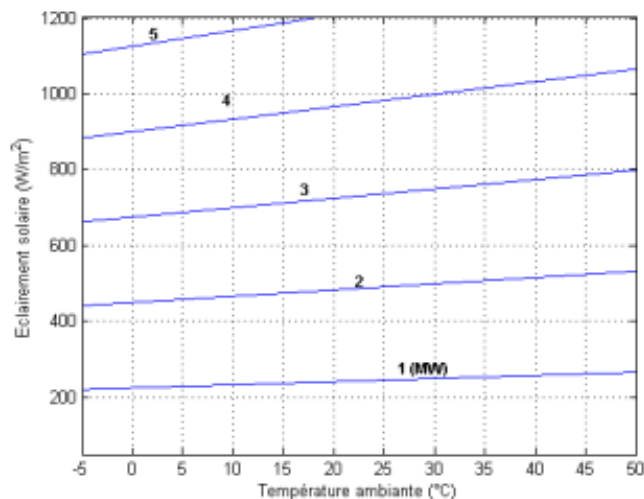
L'étude de la performance de la cheminée a montré que les conditions climatiques et les dimensions de la cheminée (hauteur et diamètre de la cheminée, hauteur et diamètre du collecteur) ont un rôle très important dans la production de l'énergie électrique [4].

##### **I.4.1. L'effet de la température ambiante et de l'éclairement solaire**

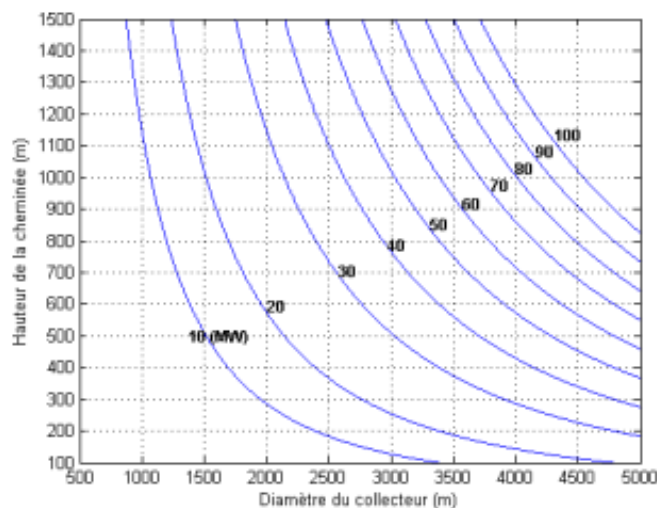
La productivité de l'énergie électrique augmente avec l'augmentation de l'éclairement solaire et de la température ambiante, mais l'effet de l'éclairement solaire a plus d'importance comparant à la température (Fig. I.6) [4].

##### **I.4.2. L'effet du diamètre du collecteur et de la hauteur de la cheminée**

La hauteur de la cheminée et le diamètre du collecteur ont un effet important sur la production de l'énergie électrique. La Figure (I.7) illustre la production de l'énergie électrique en fonction de la hauteur de la cheminée et le diamètre du collecteur pour un éclairement de  $600\text{W/m}^2$ . L'augmentation de la production de l'énergie électrique est directement proportionnelle avec l'augmentation du diamètre du collecteur et de la hauteur de la cheminée, cette augmentation est rapide pour des petites dimensions et lente pour des grandes dimensions [4].



*Figure I.6. Effet de la température ambiante et l'éclairement sur la production d'énergie [4]*



*Figure I.7. Effet de la hauteur de la cheminée et du diamètre du collecteur sur la production d'électricité pour un éclairement de 600 W/m<sup>2</sup> [4]*

## I.5. Stockage d'énergie

La cheminée solaire fonctionne uniquement en présence du rayonnement solaire, c'est-à-dire pendant la journée. En l'absence de ce rayonnement, la nuit, la cheminée cesse de fonctionner. C'est pourquoi on utilise le rayonnement solaire accumulé pendant la journée pour alimenter la cheminée durant la nuit, grâce à une méthode de stockage d'énergie.

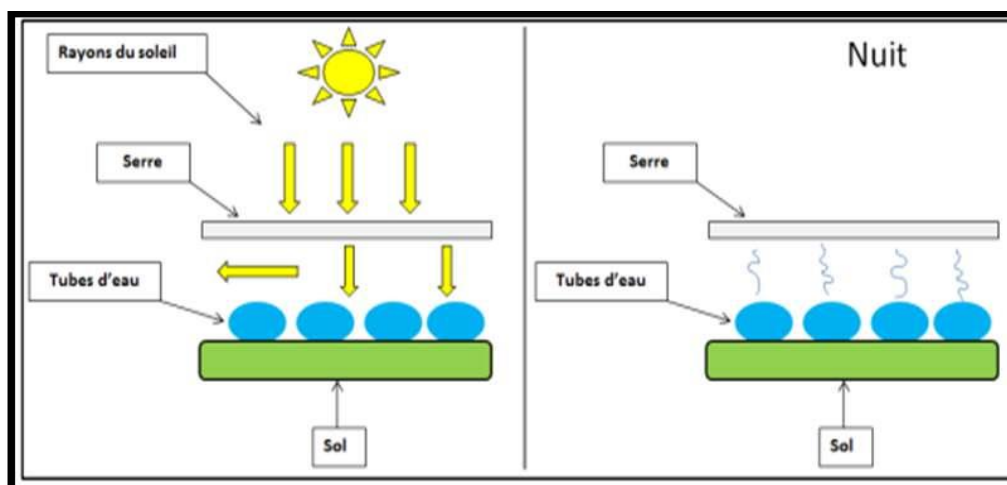
### I.5.1. Les différentes méthodes de stockage

On a plusieurs méthodes de stockage d'énergie pendant la nuit et actuellement on utilise les méthodes suivantes:

### I.5.1.1. Par chauffage d'eau

Comme les collecteurs produisent de l'air chaud par effet de serre, des réservoirs tubulaires noirs remplis d'eau sont placés sous la serre pour permettre la production d'électricité durant la nuit, comme montré dans la figure I.8. Ces poches à eau accumulent la chaleur pendant la journée et la restituent à l'air durant la nuit. Les tubes sont remplis une seule fois et hermétiquement fermés, ce qui évite toute perte d'eau par la suite.

Le volume d'eau contenu dans les tubes est calculé pour correspondre à une hauteur d'eau de 5 à 20 cm, selon la puissance souhaitée pour la production nocturne. Cependant, l'énergie stockée pour la nuit réduit quelque peu la production diurne. Un ajustement de la production peut être effectué aux heures de pointe, lorsque l'électricité se vend de 3 à 10 fois plus cher qu'aux heures creuses, ce qui améliore la rentabilité du système [5].



*Figure I.8. Principe de stockage de la chaleur dans le collecteur par des tubes remplis d'eau [4]*

### I.5.1.2. Par chauffage de sable

Le sable absorbe la chaleur du soleil, puis transmet ce flux d'air chaud à la cheminée, ce qui permet de produire de l'électricité en faisant tourner la turbine située à l'intérieur de la tour. Pendant la journée, le sable emmagasine l'énergie solaire, qui est ensuite libérée sous forme de chaleur pendant la nuit, assurant ainsi le fonctionnement continu de la turbine. Ce mécanisme permet au système de fonctionner même en hiver, lorsque l'ensoleillement est minimal. De cette manière, le système peut fonctionner 24 heures sur 24 et 365 jours par an [5].

### I.5.1.3. Par chauffage de galets

Afin d'optimiser cette production nocturne, nous pouvons placer sous la serre des galets qui possèdent une grande capacité de stockage thermique (Figure I.9). En effet, durant la journée, ces galets sont exposés constamment aux rayons du soleil et donc emmagasinent cette chaleur afin de la restituer durant la nuit [5].

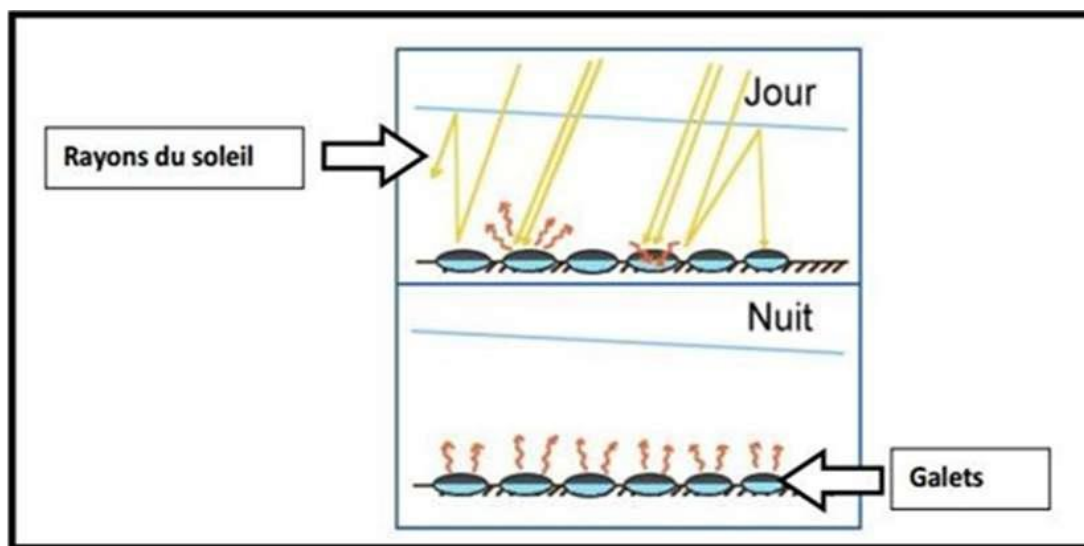


Figure I.9. Principe du stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des galets [5]

## I.6. Les avantages et les inconvénients de la cheminée solaire

### I.6.1. Avantages

Les avantages principaux de cette technologie sont:

- Le système bénéficie des deux composantes du rayonnement solaire, le direct et le diffus, qui est une énergie inépuisable et gratuite.
- Le stockage thermique assure un fonctionnement régulier et continu.
- Pas d'émission des gaz à effet de serre.
- La centrale nécessite peu d'entretien comparativement aux autres centrales de production d'énergie (conventionnelles, à concentration et nucléaire), une mécanique simple, et elle peut être construite avec des compétences et des matériaux locaux.
- Pas de frais complémentaire pour assurer le refroidissement de l'installation puisque la centrale restitue les résidus énergétiques automatiquement à l'ambiance; ce qui permet le refroidissement naturel du système.
- Elles sont particulièrement adaptées à la production d'électricité dans les déserts et les zones arides à peu de valeur commerciale et dotés d'un important gisement solaire.

- Aucun carburant n'est nécessaire.
- Leur construction ne provoque pas de dommages écologiques et peut employer la main d'œuvre locale.
- La centrale a une longue durée de vie (au moins 80 à 100 ans).

### **I.6.2. Inconvénients**

Les inconvénients principaux de cette technologie sont:

- Pour que les centrales solaires à cheminées soient économiquement viables, elles doivent être construites à très grande échelle, en raison de sa taille et dans les zones ensoleillées convenablement pour produire de l'énergie acceptable comme la région désertique. Cependant, un problème majeur peut se poser pour ces zones car la survenue de tempêtes de sable peut entraver le bon fonctionnement de ces installations, d'où la nécessité d'une étude de faisabilité préalable ciblant ce phénomène en particulier.
- Le coût d'investissement initial est élevé.
- La construction des cheminées solaires nécessite d'énormes quantités de matériaux. Ces quantités peuvent entraîner des problèmes logistiques concernant la disponibilité et le transport des matériaux.

### **I.7. Conclusion**

Ce chapitre a été consacré à la présentation générale des centrales à cheminée solaire. Nous avons d'abord décrit les composants principaux de ce type de centrale ainsi que leur principe de fonctionnement. Ensuite, nous avons également présenté les méthodes d'amélioration de la performance de la cheminée solaire, avant de conclure par une analyse des avantages et des inconvénients de cette technologie.

# Chapitre II

## Etude bibliographique sur les Centrales à cheminée solaire

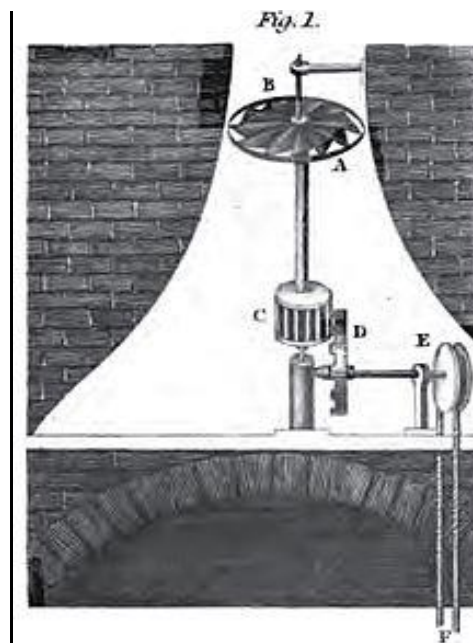
## II.1. Introduction

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

Ce chapitre présente un aperçu complet de la recherche et du développement de la technologie de l'énergie solaire, ainsi que de l'historique des cheminées solaires au cours des dernières décennies. Il expose l'état des études expérimentales, analytiques et numériques menées dans ce domaine.

## II.2. La chronologie de la centrale solaire à cheminée

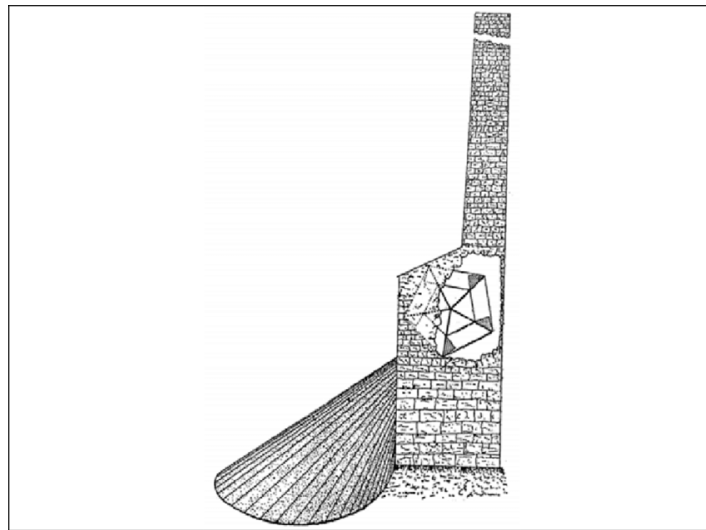
Une centrale solaire à cheminée est une technologie plutôt nouvelle proposée pour être un dispositif qui génère de l'électricité à grande échelle en transformant l'énergie solaire en énergie mécanique. De nombreux chercheurs du monde entier ont introduit divers projets de tour solaire. Vers 1500, Léonard da Vinci réalisa des croquis d'une tour solaire appelée « Smoke-jack » comme le montre la figure II.1 [5].



*Fig. II.1. La broche de Léonard de Vinci*

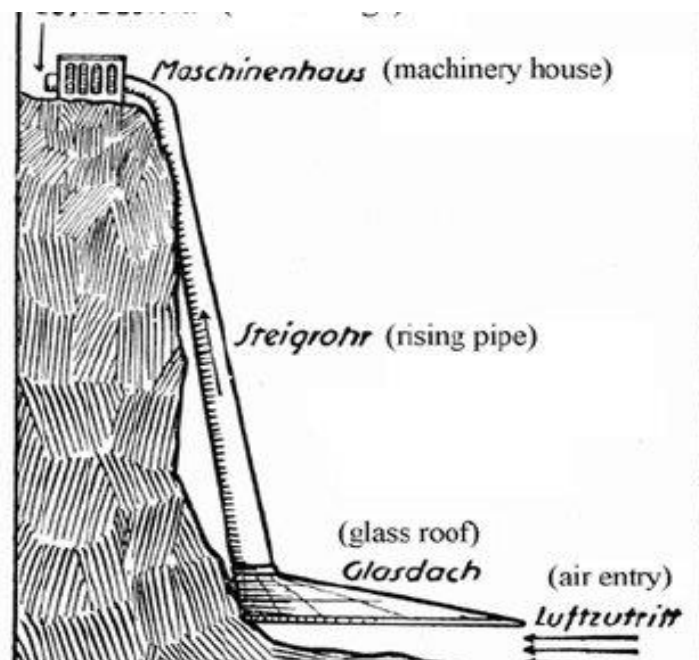
L'une des premières centrales de cheminée solaire a été décrite en 1903 par Isidoro Cabanyes, un colonel d'artillerie espagnol. Il rendit publique la proposition intitulée « *Proyecto de motor solar* » (projet de moteur solaire), présentant un dispositif composé d'un

capteur solaire à air chaud relié à une maison munie d'une cheminée. À l'intérieur de la maison, une sorte d'hélice était installée dans le but de produire de l'électricité, comme le montre la figure II.2 [5-6-7].



*Fig. II.2. Projet de moteur solaire proposé par Isidoro Cabanyes*

En 1926, le Prof Ingénieur Bernard Dubos a proposé à l'Académie française des sciences la construction d'une Centrale Solaire Aéro-Électrique en Afrique du Nord avec sa cheminée solaire sur la pente de la haute montagne (Fig. II.3). L'auteur affirme qu'une vitesse du courant d'air de 50 m/s peut être atteinte dans la cheminée, dont l'énorme quantité d'énergie peut être extraite par des turbines. La Figure II.4 montre un prototype simple proposée par Dubos confirmant son concept.

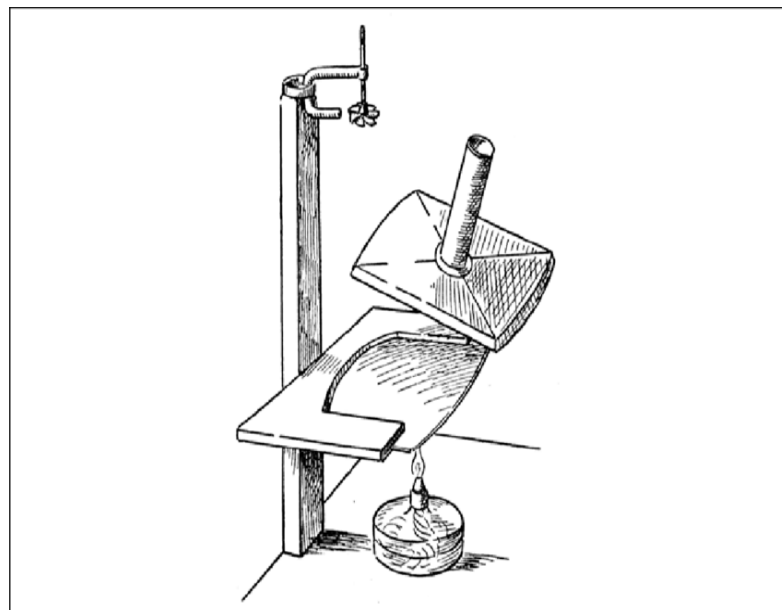


*Fig. II.3. Principe de la centrale électrique du professeur Dubos*



*Fig. II.4. Cheminées solaires dans le désert marocain imaginé par Dubos.*

Figure (II.5) montre une représentation futuriste de cheminée solaire présentée par Günther [5-6]. Selon Günther (1931), la plaque et la lampe à alcool représentent respectivement le désert du Sahara et la chaleur solaire. La petite turbine placée sur le dessus représente les turbines. Si la lampe à alcool est positionnée sous la plaque, de l'air chaud circule concentriquement à travers la plaque pour atteindre le tube. Par conséquent, le flux montant entraîne la turbine.



*Fig. II.5. Proposition de cheminée solaire présentée par Günther, 1931*

En 1956, il dépose son premier brevet en Algérie. La centrale aérothermique expérimentale en forme de venturi que souhaitait construire Nazare a une hauteur et un diamètre de base de 300 m, un diamètre au col du venturi de 30 m et, pour une différence de température ( $\Delta T$ ) de 30 °C entre les couches hautes et basses de l'atmosphère, une puissance électrique de 200 MW (mégawatts). Nazare a reçu un brevet français pour son invention en 1964 (figure II. 6) [6].



*Fig. II.6. La tour solaire du professeur NAZARE*

Depuis 1975, De nombreux brevets ont également été accordés à R. E. LUCIER en Australie, au Canada et aux Etats-Unis [7-8].

Face aux concepts originaux, Le premier prototype de centrale solaire à cheminée (CCS) a été conçu et construit par le bureau d'études Schlaich Bergmann et Partner de Stuttgart sur un site proposé par le distributeur d'électricité espagnol à Manzanares à environ 150 km au sud de Madrid en Espagne, entre 1981 et 1982, à la suite d'une coentreprise entre le gouvernement allemand et un service public espagnol [7-9]. Elle est composée d'une cheminée cylindrique de 195 m de haut et son diamètre de 10 m et la surface du collecteur est de 46 000 m<sup>2</sup> (Fig. II.7). Aucun système de la centrale à cheminée solaire à l'échelle industrielle n'a été construit depuis. En effet, l'investissement initial pour une centrale solaire à cheminée de 200 MW à l'échelle commerciale était trop élevé et de l'ordre de 1,0 milliard de dollars [10].



**Fig. II.7.** Prototype de cheminée solaire à Manzanares

L'objectif de ce projet de recherche est de vérifier, par des mesures sur le terrain, les performances projetées à partir de calculs basés sur la théorie et d'examiner l'influence de composants individuels sur le rendement et l'efficacité de l'usine dans des conditions techniques et météorologiques réalistes. Ces résultats montrent que les composants sont hautement fiables et que l'installation dans son ensemble est capable d'un fonctionnement hautement fiable. Le rayonnement global est exploité et l'inertie thermodynamique est des caractéristiques du système. Un fonctionnement continu tout au long de la journée est possible et même les fluctuations brusques de l'approvisionnement en énergie sont efficacement amorties. L'installation fonctionne en continu même par temps nuageux, bien qu'à une puissance réduite [11]. Les dimensions principales et les données techniques de ce prototype sont données dans le Tableau II.1.

**Tableau II.1.** Les dimensions principales du prototype de Manzanares

Rayon de la cheminée	5.08 m
Rayon du collecteur	122 m
Hauteur de collecteur	1.85 m
Hauteur de la cheminée en acier	194.6 m
Nombre de pales de la turbine	4
Puissance nominale	50 kW
Partie en plastique de la couverture du collecteur	40000 m <sup>2</sup>
Partie en verre de la couverture du collecteur	60000 m <sup>2</sup>

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

### II.3. Etudes expérimentales

Sur la base du prototype de Manzanares, de nombreux travaux de recherche sont en cours et impliquent la construction de différents projets pour étudier le potentiel des cheminées solaires dans le monde entier (Fig. II.8). Entre les années 1982 et 1983, Haaf et al. [12] ont obtenu les résultats et les propriétés structurelles du prototype de l'échantillon expérimental testé à Manzanares, qui ont été évalués et publiés dans des revues réputées. En 1997, Schlaich a mené des recherches sur la même centrale électrique, publié ses résultats et les a comparés aux résultats précédents [13].



*Fig. II.8. Emplacements des études de faisabilité et expérimentales de la centrale solaire à cheminée (désignées respectivement par des points rouges et des points verts)*

Jorg Schlaich [14] a contribué au développement de la cheminée solaire au stade initial et il a présenté un rapport. Il a mené une étude sur la cheminée solaire en Allemagne et a soulevé des arguments en sa faveur et a déclaré que la cheminée solaire est une source d'énergie attrayante et non polluante et inépuisable, et peut résoudre de nombreux problèmes énergétiques actuels. Les idées et les concepts sont expliqués de manière à ce que le profane et l'expert puissent bénéficier des données et des analyses qui y sont présentées. En 1984, Haaf et al. [12] ont mené des expériences préliminaires et de base sur une cheminée solaire fabriquée en Espagne et examiné le bilan énergétique, le taux d'efficacité des collecteurs et la

perte de charge augmentant du frottement et de la conversion et des pertes dans la turbine. À quelques mois de la fin, Haaf est convaincu que l'usine de Manzanares réussira et encourage à poursuivre la recherche et le développement sur les cheminées solaires.

La centrale de Manzanares est également restée opérationnelle pendant de nombreuses années depuis 1981 et avait une puissance de sortie maximale de 51 kW. Les données collectées auprès de la centrale sont encore utilisées pour valider les modèles de calcul de dynamique des fluides de la centrale solaire à cheminée [15]. Depuis, quelques expériences de système de cheminée solaire avaient été tentées.

En 2001, une société appelée Environ-mission a annoncé qu'elle prévoyait de construire une cheminée solaire de 200 mégawatts dans le sud-ouest de l'Australie qui pourrait générer 4 000 fois plus d'électricité que le système de Manzanares. La firme australienne collabore avec les consultants allemands Schlaich Bergmann. Mais pour obtenir ce type d'énergie, Environ-mission doit construire une cheminée solaire (Fig. II. 9) de 130 mètres de diamètre et 1000 mètres de hauteur, soit plus de 11 fois la hauteur de la statue de la liberté et près de deux fois plus haute que La tour CN de Toronto. Environ-mission devrait battre un record du monde pour que sa cheminée solaire devienne une réalité. En outre, pour créer suffisamment d'air chaud pour traverser cette cheminée, il faudra une zone de collecte solaire recouverte de plastique ou de verre pouvant atteindre 35 kilomètres carrés, soit à peu près l'équivalent de 5000 terrains de football de la NFL. Le projet devrait coûter près d'un milliard de dollars [16].



*Fig. II.9. Schéma de la centrale électrique d'environ-mission*

En 2006, un plan de construction d'une centrale solaire à tour ascendante de 750 m de haut, de 3km de diamètre du collecteur et de 40 MW appelée Ciudad Real Torre Solar située en Espagne a été proposé [15].

En 2008, le gouvernement Namibien a décidé de construire une centrale solaire de 400 MW appelée « Green Tower » avec une cheminée solaire (Fig. II.10), d'une hauteur de 1500 m, une cheminée d'un diamètre de 280 m et un collecteur de 37 km<sup>2</sup> de superficie. Le collecteur est aussi envisagé pour être utilisé comme une serre pour des fins agricoles [15, 16, 17].

En 2011, Un prototype de cheminée solaire a été construit par Kasaeian et al. [18,19] sur le campus universitaire de Zanjan en Iran. La cheminée solaire était composée de deux couches de feuilles de polycarbonate, d'un collecteur revêtu de 10 m de diamètre et d'une tour contenant un tuyau en polyéthylène de 12 mm d'épaisseur et d'une hauteur de 13 m. Dans cette étude, la température et la vitesse de l'air ont été mesurées. Accorder aux valeurs de la température de l'air et la vitesse dans différentes situations, la vitesse de l'air maximale et celle de la température maximale de la tour ont été atteintes.



**Fig. II.10.** *Projet centrale à Cheminée solaire de Namibien*

Ghulamchi et al. [20] ont réalisé une étude expérimentale pour trouver de nouveaux résultats afin d'optimiser la centrale électrique à cheminée solaire. Ils ont étudié une petite centrale électrique avec 3 m de hauteur de cheminée et 3 m de diamètre du collecteur. Ils ont constaté que l'aluminium produisait un meilleur transfert de chaleur que le fer. Pour cette raison, ils ont utilisé l'aluminium dans la construction d'une centrale électrique et ont constaté

que la différence de température la plus élevée entre le collecteur et l'environnement a atteint 27 degrés et la vitesse la plus élevée dans la cheminée atteint 1,7 m/s.

En 2002, Zhou et al. [21 ; 22] ont développé un modèle expérimental à petite échelle d'une cheminée solaire, avec un diamètre de collecteur de 10 m et une hauteur de cheminée de 8 m. Ils ont mesuré la distribution de la température dans la cheminée solaire comme objectif principal. De même, ils ont indiqué que la différence de température entre la sortie ambiante et celle du collecteur pouvait atteindre 24,1°C. Ce phénomène suffit à générer la force motrice du débit aérien dans le système. Ils ont également démontré que l'inversion de température s'est produite dans la cheminée postérieure après le lever du soleil sur les deux côtés. Ce prototype a été reconstruit plusieurs fois à des fins différentes.

Koonsrisuk et Chitsomboon [23] ont présenté une étude expérimentale des variables sans dimension de la mousse dans une cheminée solaire à petite échelle. Ils ont choisi l'air et l'eau comme les deux fluides de travail pour leur modélisation. Ils ont conclu que l'eau n'est pas appropriée pour l'essai de la volaille, bien que l'absorption de chaleur solaire par unité de volume de l'eau pour cette similitude soit trop élevée. Enfin, ils ont démontré que les modèles étaient dynamiquement similaires au prototype comme ils l'ont suggéré par les variables sans dimension.

Ahmed et Hussein [24] ont étudié une nouvelle conception de la centrale électrique à cheminée solaire. Ils ont expérimenté deux nouveaux modèles hybrides pour le collecteur solaire dans la centrale électrique. Ils ont examiné un système (système A) avec le collecteur en verre et les panneaux photovoltaïques dans le sol pour absorber la chaleur et un autre système (système B) avec les panneaux photovoltaïques comme toit du collecteur et le contreplaqué dans le sol comme absorbeur. Ils ont montré que le système A avait un meilleur gain thermique que le système B, bien que le système B avait une puissance utile produite que le système A. Ils ont également montré que le système pouvait transformer l'énergie thermique en énergie cinétique.

Un prototype a été construit par Maia et al. [25] pour la validation de leur modèle mathématique et de leur méthodologie numérique au Brésil en 2009. Les auteurs ont évalué les effets des caractéristiques géométriques de base de la cheminée solaire sur la fonction du flux d'air en fonction des dimensions du prototype construit.

En 2014, Khanal et Lei [26] présente dans leur étude, la performance d'une cheminée solaire à deux faces actives destinée à l'extraction thermique de l'air d'une chambre de

conservation de produits agroalimentaires. Ces performances ont été évaluées expérimentalement à travers des mesures de données: températures et vitesses à l'intérieur de la cheminée. Il ressort de cette étude que la température maximale à la sortie de la cheminée atteint 49,4 °C, et une vitesse maximale de l'air à la sortie de la cheminée est de 0,8 m/s.

En 2015, Shahreza et Imani [27] ont conçu et construit une cheminée solaire avec deux intensificateurs pour intensifier l'irradiante du soleil tout autour de la cheminée solaire. Il a été conclu que l'utilisation de ces intensificateurs autour de la cheminée solaire entraînait une augmentation de la vitesse de l'air et, par conséquent, augmentait considérablement la production d'électricité.

Al-Azawie et al. [28] ont étudié le potentiel de six matériaux de sol en Malaisie, de façon expérimentale et numérique. Ces matériaux comprenaient de la céramique, de la sciure, du sable, du bois peint vert foncé, de la pierre noire et des cailloux utilisés pour convertir le rayonnement solaire en énergie cinétique. Les résultats ont montré que la pierre noire et la céramique fonctionnaient mieux que d'autres matériaux. La céramique a une meilleure capacité de stockage de la chaleur, mais en raison de la disponibilité de la pierre noire, il a été suggéré comme matériau absorbant dans les cheminées solaires.

Aja et al. [29] ont étudié l'effet de la vitesse et de la direction du vent sur la performance d'une cheminée solaire inclinée orientée vers le sud. Il a été constaté que la vitesse du vent avait un grand effet sur la perte de chaleur par convection via les murs et le couvercle.

Dans l'étude d'Azizi et al. [30], un prototype à petite échelle de centrale à cheminée solaire a été construit et développé à l'Université de Ouargla, en Algérie. Le modèle numérique de turbulence standard de CFD a été adopté pour simuler le flux d'air dans le prototype de cheminée solaire. On a aperçu que les vitesses d'air mesurées à l'entrée de la cheminée sont en bon accord avec celles prévues par l'utilisation du modèle CFD. Une vitesse d'air maximale de 1,6 m/s a été enregistrée à l'entrée de la cheminée. Ainsi, les résultats ont montré que la technologie de cheminée solaire est très appropriée pour les zones chaudes et arides comme le sud-est de l'Algérie.

Belkhode et al. [31] ont conçu une tour solaire à courant ascendant en tenant compte de la variabilité de tous les paramètres géométriques. Ils ont optimisé les performances de la centrale à l'aide de données expérimentales et une simulation numériques, en élaborant un modèle mathématique approximatif. L'investigation expérimentale a montré que les

températures au sommet du toit du collecteur sont toujours supérieures à la température ambiante tout au long de l'expérimentation, avec un écart maximal de 10,1 °C. Les résultats expérimentaux ont permis de conclure que le verre ordinaire, avec une transmission solaire d'environ 80 %, constitue le matériau le plus performant pour le toit du collecteur, comparé aux feuilles d'acrylique, de polycarbonate et au verre cristallin. Une augmentation de la hauteur de la cheminée de la tour solaire ascendante de 3,6 m à 4,8 m entraîne une hausse de 38,46 % de la puissance développée.

Huang et al. [32] ont développé une cheminée solaire hybride intégrant des panneaux photovoltaïques pour un système de purification de l'air solaire. Un prototype de laboratoire à petite échelle a été conçu, accompagné d'un modèle de simulation numérique 3D validé expérimentalement. Ce modèle a ensuite servi à évaluer les performances d'un système à grande échelle, basé sur la centrale pilote de Manzanares (Espagne). Les résultats expérimentaux montrent qu'en remplaçant 50,60 % du verre acrylique par des modules photovoltaïques, le débit volumétrique ne diminue que de 14 % par rapport à une cheminée solaire conventionnelle. Dans le système à grande échelle, couvrir 40 mètres de large avec des panneaux photovoltaïques à la base et au sommet du collecteur réduit le débit volumétrique thermique de 3 % et 19 % respectivement, tout en augmentant la puissance totale d'un facteur 53 et 57. Les panneaux placés en haut offrent une meilleure dissipation thermique. Ainsi, l'intégration de panneaux photovoltaïques dans le collecteur améliore significativement l'exploitation de l'énergie solaire, augmentant la capacité de purification de l'air.

Dans l'étude de Mehdipour [33], les performances thermiques de cheminées solaires ont été évaluées expérimentalement à partir de deux configurations présentant des géométries de collecteurs différentes. Un collecteur circulaire avec cheminée centrale a été comparé à un collecteur carré dont la cheminée est positionnée sur le côté. Les résultats expérimentaux ont montré que, dans des conditions de fonctionnement identiques, le collecteur carré présente de meilleures performances que le collecteur circulaire. Les modifications proposées à sa géométrie pourraient améliorer le coefficient de transfert thermique (HTC), la vitesse du flux d'air, le nombre de Nusselt et l'efficacité thermique de 603 %, 245 %, 1225 % et 169 % respectivement, par rapport à la cheminée solaire circulaire.

En 2021, Azizi et al. [34], ont construit un prototype de cheminée solaire dans la ville d'Ouargla, située dans le sud-est de l'Algérie pour évaluer l'amélioration des performances d'une cheminée solaire en la couplant à l'eau géothermique albienne. Étant donné l'absence de forage albien près du prototype de cheminée solaire, ils ont utilisé un chauffe-eau pour

produire de l'eau à une température proche de celle de l'eau albiennaise naturelle. Les auteurs ont observé que ce système hybride de production d'énergie fonctionne pendant le jour et la nuit et assure une alimentation électrique ininterrompue. Le système proposé abaisse également la température de l'eau chaude, la rendant ainsi apte à l'irrigation.

#### **II.4. Etudes analytiques et numérique**

En 1987, Mullet [35] a mené une étude sur l'efficacité des centrales à cheminée solaire. En 1998, Pasumarthi et Sherif [36] ont proposé un modèle mathématique conçu pour examiner l'effet de divers paramètres sur la température, la vitesse et la puissance de sortie des cheminées solaires. De nombreux travaux de recherche ont été effectués mathématiquement sur la modélisation de la performance des collecteurs de la centrale solaire à cheminée. Kreetz [37] a présenté un modèle numérique intégrant des tubes avec de l'eau placés sous le toit du collecteur pour le stockage de l'énergie thermique. Les calculs ont démontré la possibilité d'un fonctionnement continu de la cheminée solaire, jour et nuit.

En 1999, Padki et Sherif [38] ont analysé les performances de la cheminée solaire en développant un modèle unique. Les équations de la puissance disponible et du rendement de la cheminée solaire ont été obtenues à partir du modèle analytique. L'équation indiquait l'effet de divers paramètres géométriques et de fonctionnement sur les performances de la cheminée. Le pourcentage d'erreur dans les prédictions du modèle analytique s'est avéré être de l'ordre de 4 à 6%. Lodhi [39] a présenté une analyse complète de l'effet de cheminée et de son efficacité. En outre, le coût d'une centrale solaire à cheminée de 100 MW mis en place dans les pays en développement a été estimé sur la base du taux de production annuelle d'énergie de 876 millions de kWh pendant 20 ans pour les centrales ayant une cheminée de 1 km de haut et une surface de collecteur de 2 km<sup>2</sup>.

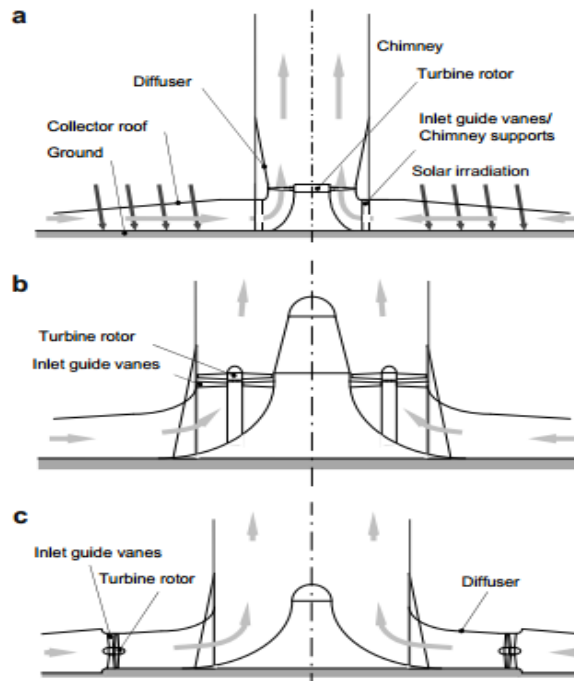
En 2003, Ruprecht et al. [40] ont également publié les résultats obtenus à partir de calculs de dynamique de fluide et de conception de turbine pour une cheminée solaire de 200 MW. La même année, Dos Santos et al. [41] ont effectué l'analyse thermique et technique à partir des résultats des solutions informatiques. Ils ont introduit un modèle analytique et numérique complet pour décrire le fonctionnement d'une cheminée solaire et ont examiné l'impact des conditions environnementales et des dimensions structurelles sur la puissance de sortie. Ils ont démontré que la chute de pression dans la turbine, la hauteur de la cheminée, le diamètre et les propriétés optiques du collecteur sont les facteurs les plus importants pour la conception de la centrale solaire. Dai et al. [42] ont analysé certains paramètres influents,

notamment le diamètre du collecteur solaire, la température ambiante, la hauteur de la cheminée, l'efficacité de la turbine et l'irradiation solaire, et ont démontré qu'une tendance linéaire croissante de la puissance de sortie avec la taille de la centrale. Pour maximiser la puissance électrique pour une condition fixe, la chute de pression à la turbine est un facteur crucial. Le rapport de chute de pression dans les turbines a été signalé pour la première fois comme une valeur de 2/3 par Haaf [43] en 1984. Dans les travaux ultérieurs, des valeurs plus élevées de ce facteur ont été présentées par Schlaich [44] en 1995 et Backstrom et Fluri [45] en 2006.

En 2006, Denantes et Bilgen [46] ont effectué une comparaison pour deux turbines rotatives sans aubes directrices et avec des aubes directrices d'entrée. En 2007, Fluri et Backstrom [47] ont comparé la performance des différentes dispositions du turbo-générateur à l'aide de modèles analytiques. Ces plans comprenaient quatre turbines de configuration sans pale, une turbine de contre-rotation avec aubes directrices et une turbine de contre-rotation sans aubes directrices.

En 2007, Tingzhen et al. [48] ont effectué des simulations numériques sur les systèmes de cheminée équipés d'une turbine à 3 pales. De plus, la conception et la simulation d'un système CS gradué en MW avec une turbine à 5 pales ont été présentées. La Figure II.11 présente trois configurations d'une unité de conversion de puissance d'une cheminée solaire (PCU) : une turbine à axe vertical unique, une à axes verticaux multiples et une à axes horizontaux multiples. Ces configurations ont été comparées par Fluri et Von Backström [49] en 2008, à l'aide d'un programme de simulation développé par Pretorius et Kröger [50] en 2006, pour analyser les performances des différentes unités de conversion.

En 2009, Bernardes et al. [51] ont comparé les méthodes disponibles pour calculer les flux de chaleur dans le collecteur et leurs effets sur la performance de la cheminée solaire. Ils ont discuté en détail des raisons des écarts entre les prévisions des différents modèles. Zheng et al. [52] étudié les effets de divers matériaux de stockage d'énergie sur la production d'énergie à différentes insolation solaires. Hurtado et al. [53] ont élaboré une modélisation numérique dans des conditions transitoires, basée sur la centrale de Manzanares. Pour analyser le comportement thermodynamique et la puissance produite par une centrale solaire à cheminée au cours d'un cycle d'exploitation quotidien en considérant le sol comme un matériau de stockage de la chaleur. Leurs résultats montrent une augmentation significative de la puissance de sortie lorsque la compression du sol a été augmentée.



**Fig. II.11.** Schéma d'une centrale solaire à cheminée : (a) un seul axe vertical, (b) un axe vertical multiple et (c) un axe horizontal multiple [49].

Dans l'étude de Daba [54], deux types de centrales solaires — avec et sans système de stockage thermique — ont été simulés à l'aide du logiciel Fluent, dans le contexte d'une région isolée. L'effet de la position de la turbine a également été analysé. L'analyse a permis de constater que l'efficacité de la centrale serait améliorée par l'utilisation de réservoirs de stockage thermique. Ghonemy [55] a élaboré un modèle mathématique pour estimer la puissance de sortie d'une certaine géométrie de cheminée à des conditions météorologiques particulières. Sur la base de son modèle, il a affirmé que la cheminée solaire avec un diamètre de cheminée de 400 m et une hauteur de 1200 m peut produire une puissance électrique moyenne mensuelle comprise entre 111,8 MW et 137,8 MW pendant toute une année. Nizetic et Klarin [56] ont développé un modèle analytique pour déterminer le potentiel de production d'électricité dans les pays insulaires entourés par la mer Méditerranée à l'aide du système de la tour solaire à courant d'air montant. Dans leur étude, ils ont estimé le prix moyen de l'électricité et la quantité d'énergie produite. Gitan et al. [57] ont élaboré un modèle mathématique exhaustif pour évaluer l'effet de l'inclinaison du collecteur solaire sur la performance de cheminée solaire. Ils ont découvert que la cheminée solaire fonctionnait sous les conditions climatiques méditerranéennes et une pente de  $10^\circ$  du collecteur fournissait la plus grande puissance produite pour toute l'année. Un modèle théorique détaillé a été élaboré par Koonsrisuk et Chitsomboon [58] en 2010 pour évaluer la performance du système de la

cheminée solaire. Ils ont présenté l'intervalle de fonctionnement de la turbine et ont montré que la taille de la centrale, le facteur de chute de pression à la turbine et le flux de chaleur solaire étaient les paramètres importants pour l'amélioration des performances. Nizetic et Klarin [59], avec une approche analytique simplifiée, ont indiqué que les facteurs de chute de pression de la turbine se situaient entre 0,8 et 0,9 pour la centrale solaire à cheminée. Bernardes et al. [60] ont mené une étude théorique d'une cheminée solaire en régime stationnaire, en tenant compte de la convection naturelle. Il a été observé qu'une connexion directe générerait le débit massique d'air le plus faible en raison de la recirculation apparaissant au niveau de la jonction, tandis qu'une jonction courbée permettait d'obtenir le débit le plus élevé [61]. Kirstein [62] et Von Backstrom [63] ont étudié le flux à travers le HTVTS de la cheminée solaire sur la base de l'évaluation dans un modèle à échelle réduit, et ont effectué une simulation CFD avec le logiciel CFX. Comme dans les modèles précédents, l'effet des nombres de Reynolds n'a pas été pris en compte et les valeurs de cette simulation étaient plus petites [64]. Kolb et Helmrich [65] ont suggéré une géométrie avec une entrée encombrante pour les configurations avec turbine à axes horizontaux multiples. Ils ont comparé la turbine à axe vertical unique avec les configurations de turbine à axes horizontaux multiples pour une centrale solaire à cheminée de 200 MW par la méthode CFD.

En 2010, Bernardes et Von Backstrom ont présenté deux modèles de contrôle de puissance de sortie pour la cheminée solaire. Le débit volumique et la chute de pression de la turbine ont été considérés comme des variables ajustables dans les simulations numériques. Ils ont utilisé les données d'entrée climatologiques de Sishen (latitude S26.67), d'Afrique du Sud, qui ont été rapportées par Pretorius [66] en 2007, et les coefficients de transfert de chaleur qui ont été présentés par Pretorius et al. [67] et Bernardes [68] en 2007. Les relations entre le facteur  $x$  (rapport entre la chute de pression de la turbine et la différence de pression du système disponible), la puissance de sortie, le débit volumique et l'augmentation de la température dans le collecteur ont été rapportées [69]. L'effet de l'angle d'inclinaison du collecteur sur la puissance électrique de sortie d'un système de centrale à cheminée solaire a été étudié par Sun et al. [70]. Ils ont étudié une simulation numérique symétrique à deux axes bidimensionnels instable pour une hauteur de cheminée de 1 km et un rayon collecteur de 2,5 km. Ils ont constaté que la diminution de l'angle incliné augmentait le rendement du système et que la vitesse n'augmentait pas clairement avec l'augmentation du flux de chaleur dans la paroi.

Mehrpooya et al. [71] ont mis au point un modèle axisymétrique 2D pour une cheminée solaire sans turbine et ont déterminé la distribution de la température et de la vitesse

de l'air dans toute la cheminée. Ensuite, ils ont utilisé les relations précédemment développées afin de calculer la puissance de turbine disponible pour leur modèle, au cours d'une année. Patel et al. [72] ont étudié les effets de l'ouverture d'entrée, du diamètre de sortie et du diamètre de la cheminée.

En 2019, Al-Kayiem et al. [73] ont évalué expérimentalement et numériquement la performance de la cheminée solaire hybride. Ils ont utilisé ANSYS Fluent pour la simulation de la cheminée solaire hybride. Plus tard, ils ont validé leurs résultats avec les travaux expérimentaux. Ils ont utilisé des canaux de gaz de feu pour fournir de l'air dans le passage collecteur. Ils ont montré que l'utilisation d'un système hybride peut améliorer les performances de la cheminée solaire. Ils ont également observé une amélioration de la vitesse et de la température de 6,87 % et de 6,3 % respectivement à l'entrée de la cheminée.

## **II.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, une revue complète de la littérature est réalisée à partir de plus de 68 études récentes portant sur les systèmes de cheminée solaire. Les résultats de la plupart des travaux sont brièvement présentés afin de dégager une vision générale de chaque étude. Il ressort que près de 30 % des recherches ont été menées de manière expérimentale. L'absence de validation expérimentale fiable demeure un obstacle majeur pour les études théoriques ou basées sur la modélisation. Il a également été observé que la majorité des cheminées solaires construites à ce jour sont de petite taille, ce qui limite leur rentabilité économique. D'où l'importance de développer des systèmes à grande échelle. Compte tenu de la forte dépendance vis-à-vis du secteur privé, il est recommandé de promouvoir des projets progressifs, en chaîne, débutant par des études de faisabilité, suivies de simulations, de prototypes à petite échelle, puis du passage à des cheminées solaires de grande capacité.

# Chapitre III

## Etude expérimentale et simulation

### III.1. Introduction

Le nord-ouest de l'Algérie, notamment la wilaya de Chlef, dispose de nombreuses sources d'énergie renouvelable, telles que l'énergie solaire et éolienne, qui ne sont pas encore exploitées de manière optimale à l'échelle nationale. La wilaya de Chlef bénéficie d'un ensoleillement important ainsi que de zones favorables à l'implantation des parcs éoliens. De plus, les ressources solaires disponibles pourraient grandement contribuer à la production d'électricité verte à travers divers projets innovants. Notre étude vise à explorer l'énergie solaire par une cheminée solaire afin d'améliorer les performances énergétiques locales tout en garantissant un coût de production réduit. C'est ce que nous allons tenter d'expliquer dans ce chapitre.

### III.2. Région de Chlef

La wilaya de Chlef constitue, par sa position géographique (Fig. III.1), une région de passage où se mêlent les influences du centre et de l'ouest du pays, ainsi que celles des montagnards du Tell et des semi-nomades des plaines et des hauts plateaux. Elle est située à environ 200 km à l'ouest de la capitale, Alger, et se trouve à l'intersection de deux axes routiers majeurs: la route nationale n°4 et la route nationale n°19. Grâce à cette position stratégique, elle assure la liaison entre le nord et le sud, ainsi qu'entre l'est et l'ouest du pays.



*Figure .III.1. Wilaya de Chlef.*

Située au nord-ouest de l'Algérie, la wilaya de Chlef couvre une superficie de 4 076,85 km<sup>2</sup>. Elle est délimitée :

- au nord, par la mer Méditerranée ;
- au sud, par la wilaya de Tissemsilt ;
- à l'est, par les wilayas de Tipaza et d'Aïn Defla ;
- à l'ouest, par les wilayas de Mostaganem et de Relizane.

En 2018, la ville comptait environ 289 500 habitants, et près de 500 000 en incluant sa banlieue.

### III.3. Aspect climatique

Le climat de Chlef est de type tempéré chaud, avec une variabilité à la fois annuelle et interannuelle. Il s'agit généralement d'un climat semi-aride, caractérisé par des étés très chauds et des hivers froids et pluvieux. À Chlef, la température moyenne annuelle est de 19,1 °C, et les précipitations annuelles atteignent environ 394 mm.

Les températures les plus basses sont enregistrées en décembre, janvier et février, avec des moyennes ne dépassant pas les 12 °C. En revanche, durant l'été, notamment en juillet et août, les températures peuvent grimper jusqu'à 44 °C.

### III.4. Etude expérimentale et numérique d'une cheminée solaire

Pour but de faire une étude détaillée sur le champ des températures et la vitesse de l'air mesurés dans une centrale à cheminée solaire, nous avons construit un prototype à petite échelle à l'université de Chlef. Dans ce chapitre on va présenter les différentes étapes de la construction de ce prototype, les différents paramètres enregistrés et les équipements utilisés ainsi que une modélisation et simulation de la cheminée solaire.

#### III.4.1. Etude expérimentale

Un prototype expérimental de cheminée solaire a été conçu et réalisé afin d'étudier l'influence de certains paramètres climatiques et géométrique sur ses performances. Les composants de la cheminée solaire sont présentés dans le Tableau III.1.

*Tableau. III.1. Dimension de cheminée solaire*

Paramètres	Valeur (m)
Diamètre du collecteur	6
Hauteur du toit du collecteur	0.6
Diamètre de la cheminée	0.4
Hauteur de la cheminée	6

### III.4.1.1. Raisons du choix des dimensions géométriques

Le choix des dimensions géométriques du modèle expérimental de la cheminée solaire repose sur plusieurs critères essentiels visant à assurer un équilibre optimal entre faisabilité pratique, performance thermique et coût économique. Ces dimensions ont été déterminées à partir d'une étude bibliographique approfondie et d'essais préliminaires.

- Diamètre du collecteur de 6 m: cette dimension permet de capter une quantité suffisante de rayonnement solaire pour chauffer efficacement l'air sous le collecteur, tout en restant adaptée à une installation expérimentale à échelle réduite. Un diamètre plus important aurait nécessité plus de matériaux et d'espace.
- Hauteur du toit du collecteur de 0,6 m: cette hauteur favorise un bon écoulement de l'air chaud tout en limitant les pertes thermiques vers le sol.
- Diamètre de la cheminée de 0,4 m: ce diamètre garantit un flux d'air stable et mesurable. Un diamètre trop petit pourrait engendrer des pertes de charge importantes, tandis qu'un diamètre trop grand diminuerait la vitesse de l'air.
- Hauteur de la cheminée de 6 m: La hauteur joue un rôle crucial dans la création de la dépression nécessaire au tirage thermique. Une cheminée de 6 mètres génère une force suffisante pour assurer un renouvellement continu de l'air à travers le système.

Ces dimensions ont été choisies pour reproduire à échelle réduite le comportement d'une cheminée solaire à grande échelle, tout en assurant la précision et la reproductibilité des mesures.

### III.4.1.2. Méthodologie d'installation

Le montage du système a été réalisé sur un terrain plat, bien exposé au soleil. Après avoir nivelé le sol, la structure circulaire a été mise en place, puis recouverte d'un film plastique tendu. La cheminée a été fixée au centre et solidement ancrée. L'ensemble a été entouré de terre afin d'assurer une bonne étanchéité à la base. Les instruments de mesure ont ensuite été installés à différents points pour relever les températures et la vitesse de l'air.

### III.4.1.3. Le Collecteur

Le collecteur est une surface recouverte d'un matériau plastique transparent conçu pour capter la lumière du soleil (Figure III.2 et III.3). Une base a été aménagée en dessous du

couvercle, capable d'absorber le rayonnement solaire pendant la journée et de retenir la chaleur, afin d'éviter sa dissipation dans le sol (sable).

Nous avons conçu un sol spécifique, équipé d'un système d'absorption et d'isolation. Le choix d'un angle conique pour le capteur permet d'augmenter la réception du rayonnement solaire; la pente doit donc correspondre un angle optimale pour assurer une absorption maximale.



*Figure III.2. Avant de placer le couvercle*



*Figure III.3. Après de placer le couvercle*

Le capteur solaire est de forme circulaire, avec un angle d'inclinaison de 3 degrés et un diamètre de 6 mètres. Le toit du dispositif est surélevé à l'aide d'une charpente en acier jusqu'à une hauteur de 0,6 mètre. Quatre ouvertures de diamètre égal sont disposées sur les bords du collecteur. Ces ouvertures peuvent être modifiées, et leur diamètre est ajusté à chaque expérimentation.

#### III.4.1.4. La cheminée

La cheminée solaire est constituée d'un tuyau en PVC d'un diamètre de 0,4 m et d'une hauteur de 6 m. Le tuyau (cheminée) est fixé verticalement sur un support en acier, qui à son tour est fixé au sol (Fig. III.4).



*Figure III.4. L'installation de cheminée sur un système de cheminée solaire*

#### III.4.1.5. Prototype de la cheminée solaire

La Figure III.5 montre une maquette à échelle réduite d'une centrale à cheminée solaire. Ce prototype permet de simuler les performances d'une CCS à petite échelle dans un climat semi-aride comme celui de Chlef. L'installation expérimentale est adaptée pour des essais pédagogiques ou de recherche, notamment sur la dynamique thermique, la vitesse de l'air ascendant, et le rendement énergétique.

Cette figure met en valeur une réalisation concrète et pédagogique d'une centrale à cheminée solaire à Chlef. Elle illustre bien la simplicité technologique du concept tout en

soulignant son potentiel pour des applications durables dans des régions à fort ensoleillement. Ce type de montage offre un bon support pour la recherche expérimentale sur les énergies renouvelables.



*Figure III.5. Une photo du montage "CCS" expérimentale à Chlef*

#### **III.4.1.6. Rôle et importance de la validation expérimentale**

La validation expérimentale est une étape cruciale pour assurer la fiabilité des modèles théoriques et des simulations numériques dans l'étude de la cheminée solaire. Elle permet de confronter les résultats obtenus par simulation avec les données réelles issues des expériences, ce qui aide à identifier et corriger d'éventuelles erreurs ou approximations. Cette démarche renforce la confiance dans les résultats et oriente l'optimisation des performances du système. Ainsi, la validation expérimentale constitue un lien indispensable entre la théorie et la pratique, garantissant la pertinence et la robustesse des conclusions tirées.

#### **III.4.1.7. Les grandeurs à mesurer**

Au cours des expériences, à un intervalle du temps précis, nous avons mesuré les quantités suivantes:

- La vitesse et la température de l'air à l'entrée de la cheminée.
- La température de l'air dans trois points du collecteur.

### III.4.1.8. Matériel de mesure et outils utilisés

Afin de caractériser le comportement thermodynamique de la centrale à cheminée solaire expérimentale, des outils de mesure précis ont été mis en place. La vitesse de l'air généré par l'effet de serre dans le collecteur est mesurée grâce à un anémomètre professionnel HoldPeak HP-866A (Figure III.6), permettant d'évaluer le débit d'air ascendant vers la cheminée. Parallèlement, un réseau de capteurs de température et d'humidité basé sur la plateforme Arduino UNO R3 a été installé (Figure III.7). Trois modules Arduino, chacun couplé à un capteur DHT11, sont placés à des emplacements clés dans le collecteur: à l'entrée, au centre, et à la base de la cheminée (Figure III.8). Ce système permet une acquisition de données précises et en temps réel pour analyser l'évolution de la température le long du parcours de l'air chauffé, contribuant ainsi à l'étude de l'efficacité énergétique du dispositif.

La Figure III.6 montre l'Anémomètre HoldPeak HP-866A. Cet appareil est un pro anémomètre numérique, utilisé pour mesurer la vitesse de l'air généré à l'intérieur du collecteur solaire lorsqu'il est chauffé par le rayonnement solaire. Son hélice intégrée tourne sous l'effet du flux d'air ascendant, et l'appareil convertit cette rotation en vitesse affichée numériquement. Il peut aussi mesurer d'autres paramètres comme la température ou le débit volumique selon le modèle.

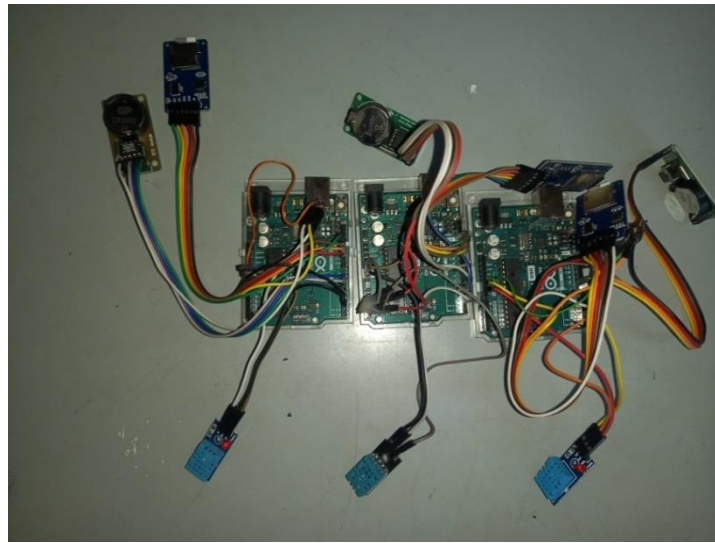


*Figure III.6. Pro anémomètre de HoldPeak HP-866A*

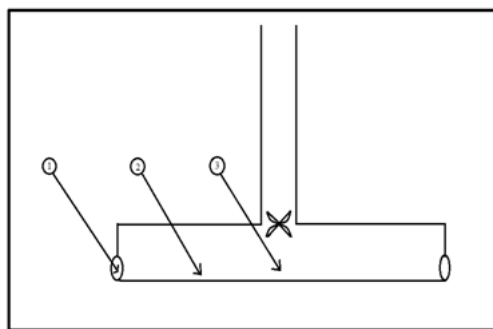
Figure III.7 montre le montage Arduino avec capteurs DHT11. Cette image montre un ensemble de trois cartes Arduino UNO R3, chacune connectée à un capteur DHT11, permettant de mesurer la température et l'humidité. Chaque système est installé à une position stratégique (Figure III.8):

- Arduino 1 à l'entrée du collecteur,
- Arduino 2 au centre du collecteur,
- Arduino 3 à l'entrée de la cheminée.

Ce montage permet une surveillance thermique distribuée pour mieux comprendre la répartition et la dynamique de la chaleur dans la centrale.



*Figure III.7. Arduino*



*Figure III.8. Emplacement des mesures de température dans le collecteur*

### III.4.2. Etude théorique et Simulation numérique

#### III.4.2.1. Etude théorique

L'étude théorique du comportement de l'écoulement d'air dans une cheminée solaire à colonne d'air (SCPP) est essentielle pour comprendre les phénomènes physiques avant toute

simulation numérique. L'écoulement d'air est principalement induit par les effets combinés de l'effet de serre et de la flottabilité, ce qui génère un mouvement de convection naturelle à l'intérieur du système.

### III.4.2.1.1. Equations gouvernantes

Le fluide qui s'écoule dans la cheminée solaire est modélisé par les équations fondamentales de la mécanique des fluides, à savoir:

- **Équation de conservation de la masse (continuité):**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (\text{III.1})$$

- **Équation de la quantité de mouvement:**

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

- **Équation de l'énergie:**

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (K \nabla T) + Q + Q_{vh} + W_P \quad (\text{III.3})$$

Où :

$\vec{u}$ : Vecteur vitesse,

$\rho$ : Densité de l'air,

$P$ : Pression,

$T$ : Température,

$C_p$ : Chaleur spécifique à pression constante,

$K$ : Conductivité thermique,

$Q, Q_{vh}, W_P$ : Sources de chaleur et travail mécanique,

$\vec{F}$ : Forces volumiques (gravité).

### III.4.2.1.2. Modélisation mathématique

Dans le cas de la cheminée solaire étudiée, le nombre de Rayleigh  $R_a$  ne dépasse pas  $10^9$ , ce qui justifie l'hypothèse d'un écoulement laminaire. Ainsi, les effets de turbulence sont négligeables et les équations (III.1) à (III.3) sont suffisantes pour modéliser l'écoulement et le transfert thermique.

Le nombre de Rayleigh, qui caractérise l'intensité de la convection thermique naturelle, est défini par :

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T L^3 \rho}{\mu\alpha} = Gr_r \cdot Pr_r \quad (\text{III.4})$$

Où

$g$ : Gravité,

$\beta$ : Coefficient de dilatation thermique,

$\Delta T$ : Différence de température moyenne,

$L$ : Hauteur caractéristique,

$\mu, \alpha$  : Viscosité dynamique et diffusivité thermique,

$Gr_r, Pr_r$ : Nombres de Grashof et de Prandtl.

$L$  : La hauteur moyenne du collecteur.

#### III.4.2.1.3. Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont définies à partir des données climatiques locales de la région de Chlef, notamment l'irradiation solaire et la température ambiante pour un jour type. Les principales conditions limites du domaine de calcul sont résumées dans le Tableau (III.1).

*Tableau.III.2. les principales Conditions aux limites*

Surface	Type	Valeur
Entrée du Collecteur	Pression, Température	$P = 101kPa, T_a=302 K,$
Sortie de la cheminée	Pression, Température	$P = 101kPa, T_a=302 K,$
Collecteur	Semi-transparent	$h = 10 W m^{-2}$
Paroi de la cheminée	Adiabatique	$q = 0 W m^{-2}$
Absorbeur	Mur opaque	$q = 0 W m^{-2}$

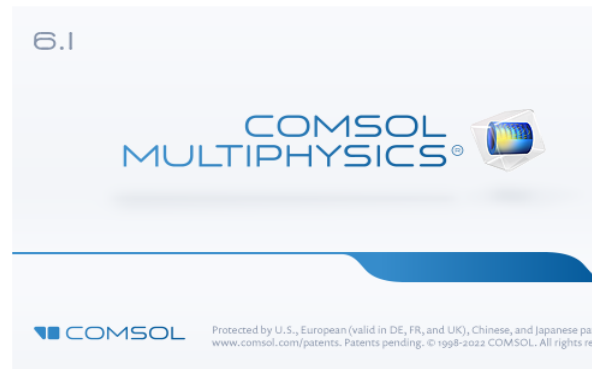
#### III.4.2.2. Simulation numérique de la cheminée solaire

La simulation numérique est devenue un outil incontournable dans les domaines des sciences et de l'ingénierie. Elle permet de modéliser et de comprendre le fonctionnement de systèmes réels à travers l'application de modèles théoriques, souvent basés sur des méthodes mathématiques avancées, telles que la technique des éléments finis. Aujourd'hui, une large gamme de logiciels de simulation est disponible, offrant des possibilités étendues d'analyse

et de prédiction du comportement des systèmes étudiés. Dans cette partie du travail, nous nous consacrons à la simulation des échanges thermiques au sein d'une cheminée solaire. Cette étude repose sur un modèle CFD (Computational Fluid Dynamics) mis en œuvre à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics 6.1.

#### III.4.2.2.1. Présentation de logiciel de simulation

Il est très intéressant d'avoir un environnement de simulation qui inclut la possibilité d'ajouter différents phénomènes physiques au modèle étudié. C'est dans cette philosophie là COMSOL Multiphysics 6.1 a été développé (Fig. III.9). C'est un logiciel de calcul numérique par éléments finis modulaire permettant de modéliser une grande variété de phénomènes physiques caractérisant un problème réel. Il sera également un outil de conception grâce à son aptitude à gérer les géométries 3D complexes.



*Figure. III.9. Interface de COMSOL Multiphysics 6.1*

#### III.4.2.2.2. Prise en main du logiciel

Le processus de modélisation et de simulation numérique sous COMSOL Multiphysics 6.1 implique plusieurs étapes:

- La définition globale des paramètres et des variables liées au modèle.
- La définition de la géométrie.
- La prise en compte des différents phénomènes physiques qui peuvent exister dans le problème considéré.
- La résolution du problème à l'aide d'un des différents solveurs.
- La visualisation des résultats.

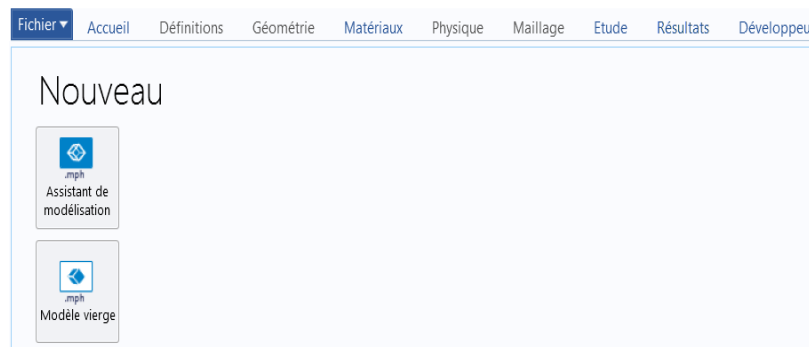
Lors du lancement de COMSOL, l'assistant Modèle permet de définir toutes les étapes de la modélisation brièvement évoquées ci-dessus. Ces étapes sont les suivantes:

- Exécutez l'Assistant Modèle ce qui implique de choisir le système de coordonnées pour le modèle, la physique pertinente au problème, et le type d'études que l'on souhaite effectuer (stationnaire ou en fonction du temps).
- Définir les paramètres, les équations et les variables pertinentes pour le modèle (dans le répertoire Définitions Globales).
- Définir la géométrie du modèle (géométrie).
- Sélectionnez-le ou les matériaux adéquats du modèle dans le répertoire (matériel). Choisir les conditions initiales et aux limites pour chaque physique utilisée.
- Choisir la taille des éléments à utiliser pour le maillage ainsi que les différents types de maillage qui existent.
- Régler les paramètres du solveur et lancer les calculs dans le répertoire études (étude).
- Afficher les résultats souhaités de la manière la plus significative dans le répertoire résultat (Résultats).

### III. 4.2.2.3 Les étapes de simulation par COMSOL

#### A). Créé un modèle par assistant de modélisation

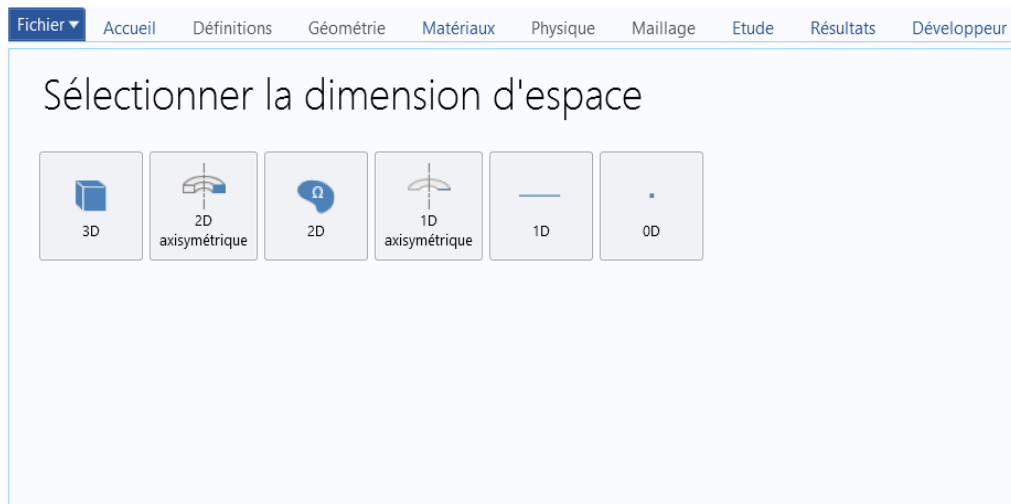
On a créé le modèle de simulation (Figure.III.10).



*Figure.III.10. Création un modèle de simulation*

#### B) Choix de la dimension

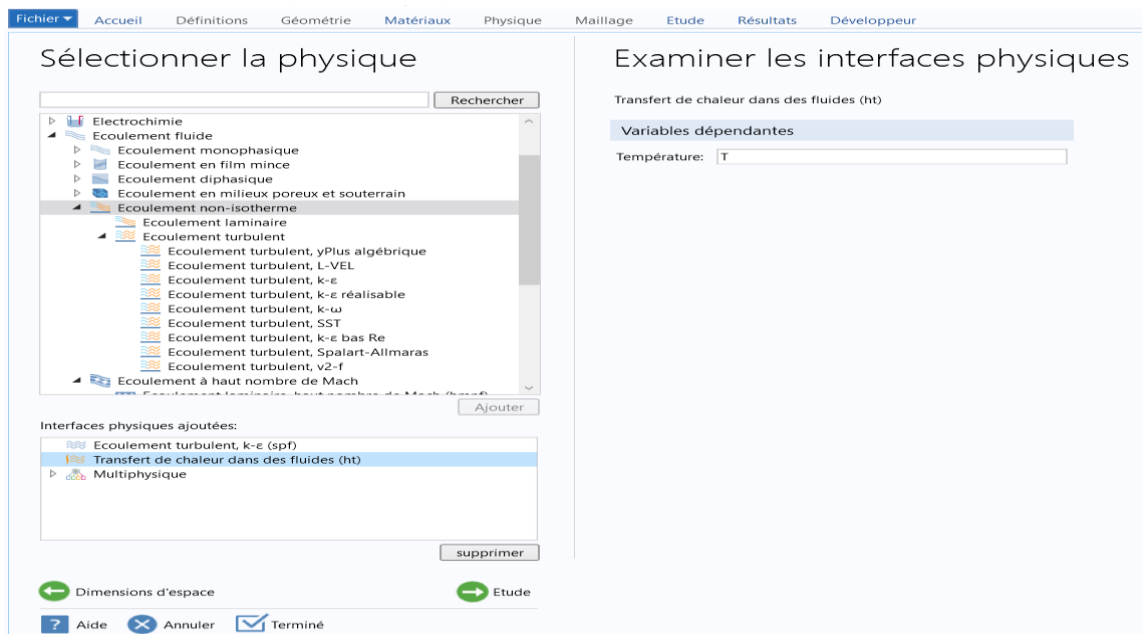
Due à la complexité de la géométrie du modèle, nous avons choisi la géométrie 2D axisymétrique, pour simplifier la simulation (Fig. III.11).



*Figure. III.11. choix de la dimension*

### C) Choix des modèles physiques

Notre étude thermodynamique est basée sur deux modèles du CFD, le transfert de chaleur et l'écoulement de fluide (Fig. III.12).



*Figure. III.12. choix des modules physiques*

### D) Choix de type d'étude

Sélectionnez le type d'étude qui représente le solveur de l'ensemble des solveurs qui sera utilisé pour le calcul (Fig. III.13).

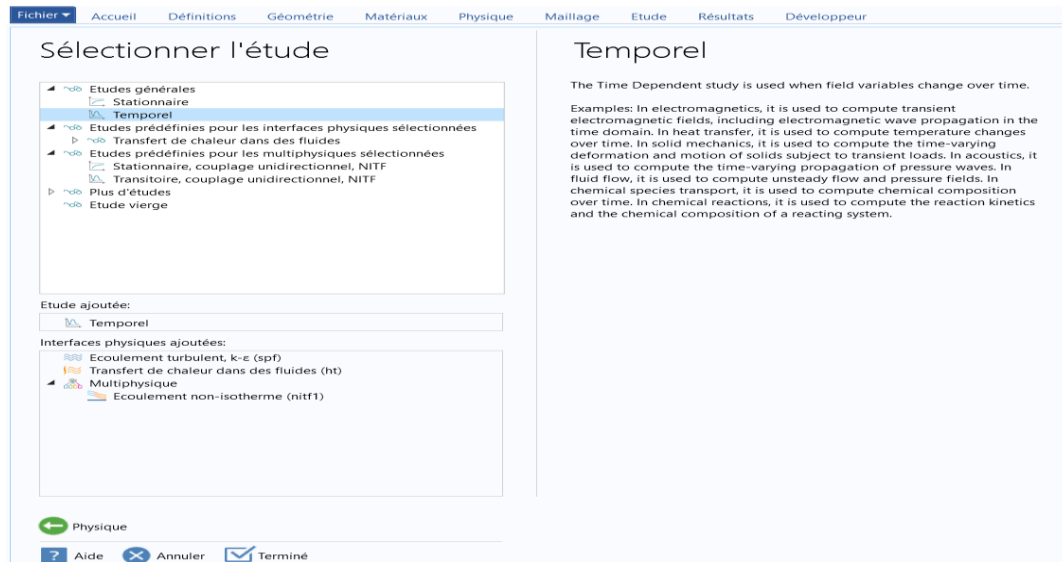


Figure.III.13. choix de type d'étude

Enfin, on clique sur Terminé. Le bureau affiche avec l'arborescence le modèle configurée en fonction des choix que nous avons faits dans l'assistant de modèle. Après ; on suit les étapes ci-dessous.

**E) Construction de la géométrie**

À partir des outils de dessin intégré dans la bibliothèque de Logiciel COMSOL 6.1, on construit notre géométrie de cheminée (Fig. III.14).

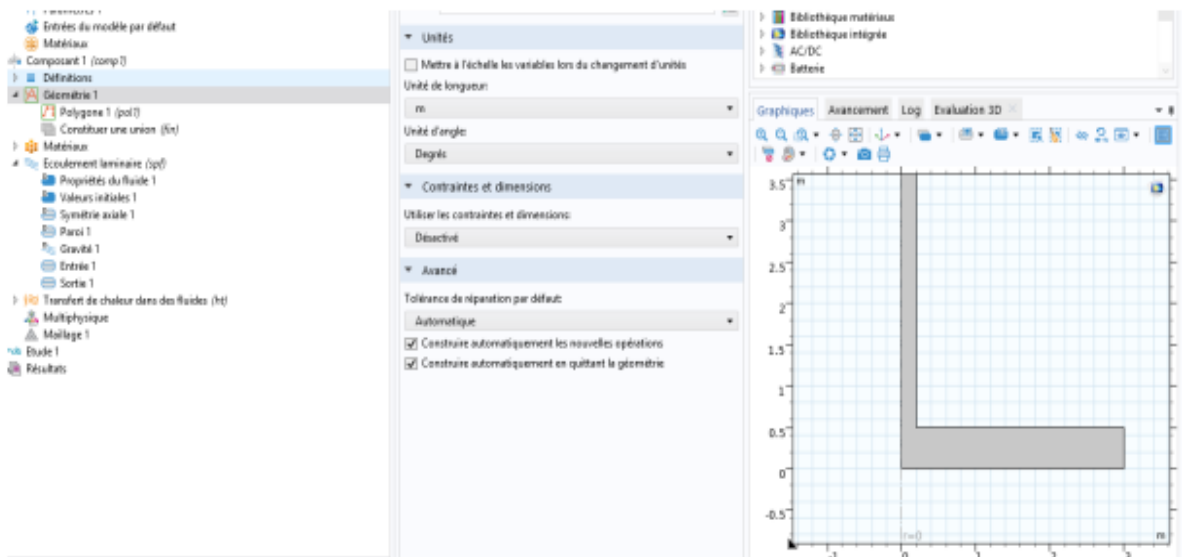


Figure. III.14. Construction de la géométrie

### F). Choix des matériaux

À la fin de la construction de chaque partie de dessin on choisit le type de matériaux, et introduire les caractéristiques physiques de chaque partie (Fig. III.15).

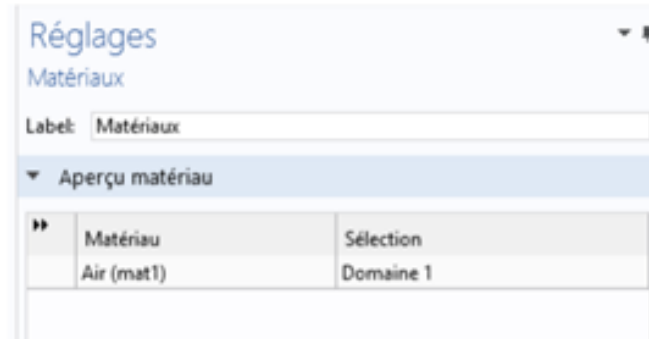


Figure.III.15. choix des matériaux.

### G) Définitions des conditions aux limites

On définit et on introduit les entrées et les sorties du système (Fig. III.16).

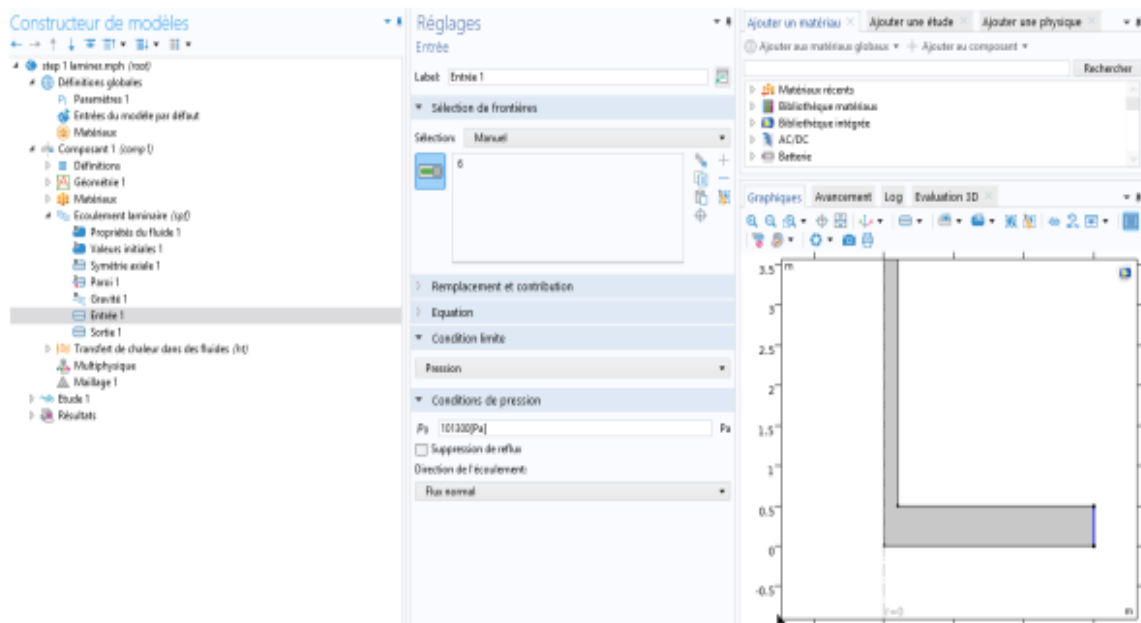
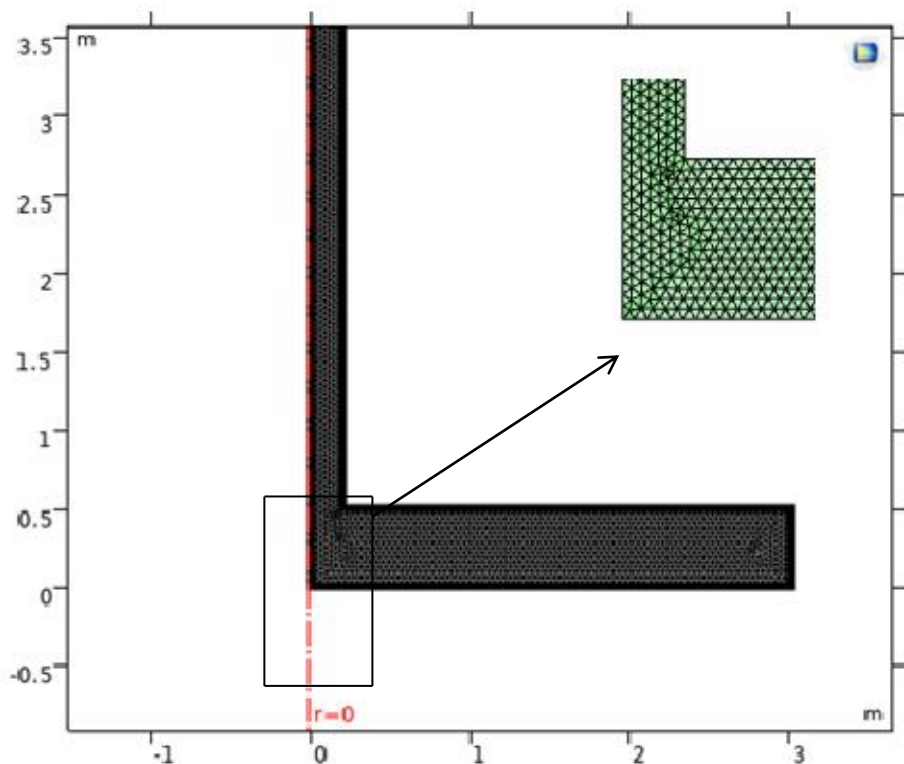


Figure.III.16. Définitions des conditions aux limites.

### H) Paramétrage et calcul de maillage

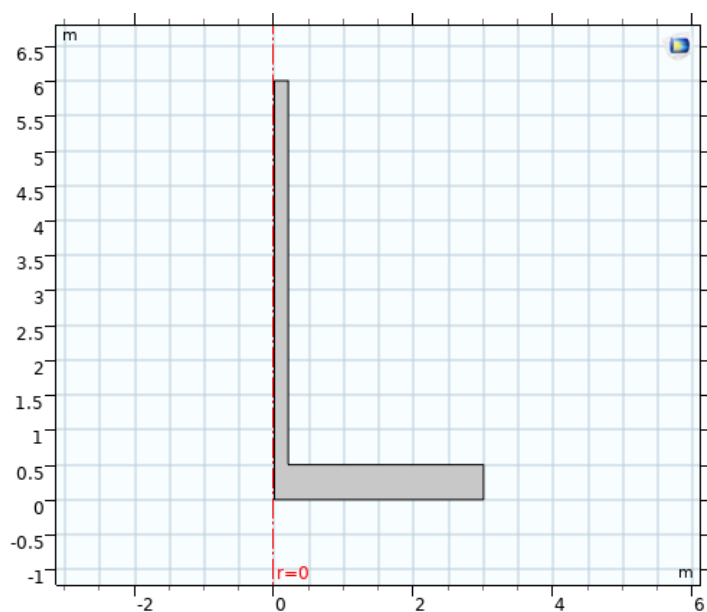
On a choisi le type de maillage sous la forme triangulaire fine (Fig. III.17).



*Figure. III.17. Maillage.*

### I) Représentation de la géométrie de la cheminée

Le logiciel de simulation COMSOL Multiphysics prend par défaut l'axe des x comme axe de symétrie donc, il faut réaliser notre géométrie comme montré sur la Figure III.18 suivante.



*Figure. III.18. la géométrie de cheminée.*

Enfin, le logiciel COMSOL a été lancé afin d'effectuer les calculs nécessaires et d'obtenir les résultats correspondant à la simulation.

### **III.5. Conclusion**

En conclusion de ce chapitre, nous avons élaboré un modèle expérimental rigoureux de la cheminée solaire implantée dans la wilaya de Chlef, en tenant compte des conditions climatiques réelles du site. Les instruments et méthodes de mesure utilisés ont été présentés en détail, permettant la collecte de données essentielles au suivi des principaux paramètres de fonctionnement du système. Par ailleurs, les différentes étapes de la simulation numérique ont complété l'analyse expérimentale en apportant une compréhension approfondie du comportement thermique et dynamique de la cheminée. Cette approche intégrée, combinant expérimentation et modélisation numérique, constitue une base solide pour l'optimisation future du design et de la performance des cheminées solaires dans la région.

# Chapitre IV

## Résultats et Discussions

### IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter et analyser les résultats obtenus à partir des expérimentations réalisées sur le prototype de la cheminée solaire installé à l'université de Chlef à El Bocca, ainsi que ceux issus de la simulation numérique effectuée avec logiciel COMSOL Multiphysics. Trois essais expérimentaux ont été conduits en changeant le diamètre des quatre ouvertures à l'entrée du collecteur. Les températures et les vitesses d'air mesurées sont comparées entre les cas étudiés, puis confrontées aux résultats numériques afin d'évaluer la fiabilité du modèle de simulation.

### IV.2. Résultats expérimentaux

Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus lors des essais expérimentaux réalisés sur le prototype de cheminée solaire. Trois configurations différentes ont été testées, en faisant varier le diamètre des ouvertures d'entrée d'air: 28 cm, 18 cm et 11 cm. Chaque configuration a fait l'objet de mesures de la vitesse de l'air à l'entrée de la cheminée ainsi que de la température de l'air à différents points du système. Ces essais ont été effectués dans des conditions météorologiques printanières avec un ciel clair et des températures ambiantes modérées. Les résultats expérimentaux permettent d'évaluer l'influence du diamètre des ouvertures sur la performance thermique et aérodynamique de la cheminée solaire.

#### IV.2.1. Résultats du premier cas (D=28cm)

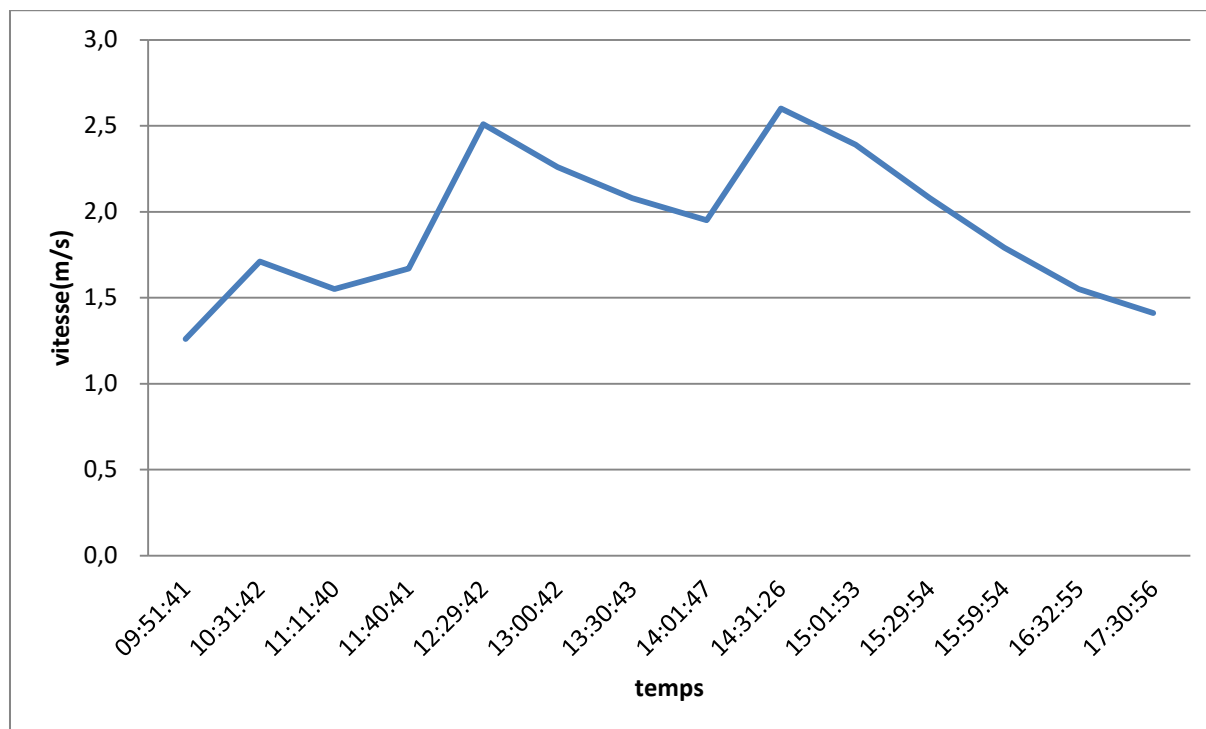
Pour ce premier cas, on utilise quatre ouverture de diamètre  $D=28\text{cm}$  sur le collecteur de la cheminée solaire (Fig. IV.1) durant la journée de 19/03/2025. On mesure la température sur trois points dans le collecteur et on mesure la vitesse et la température de l'air à l'entrée de la cheminée solaire.



*Figure IV.1. Photo des ouvertures d'entrée de l'air dans le collecteur*

### IV.2.1.1. Vitesse et température de l'air à l'entrée de la cheminée

La figure IV.2 illustre l'évolution de la vitesse de l'air à l'entrée de la cheminée solaire au cours de la journée du 19 Mars 2025, pour la configuration avec des ouvertures de 28 cm de diamètre.



*Figure IV.2. Variation de la vitesse mesurée à l'entrée de la cheminée en fonction du temps (19/03/2025)*

Ce graphique met en évidence le comportement typique d'un système basé sur la convection thermique, fortement dépendant de l'irradiation solaire.

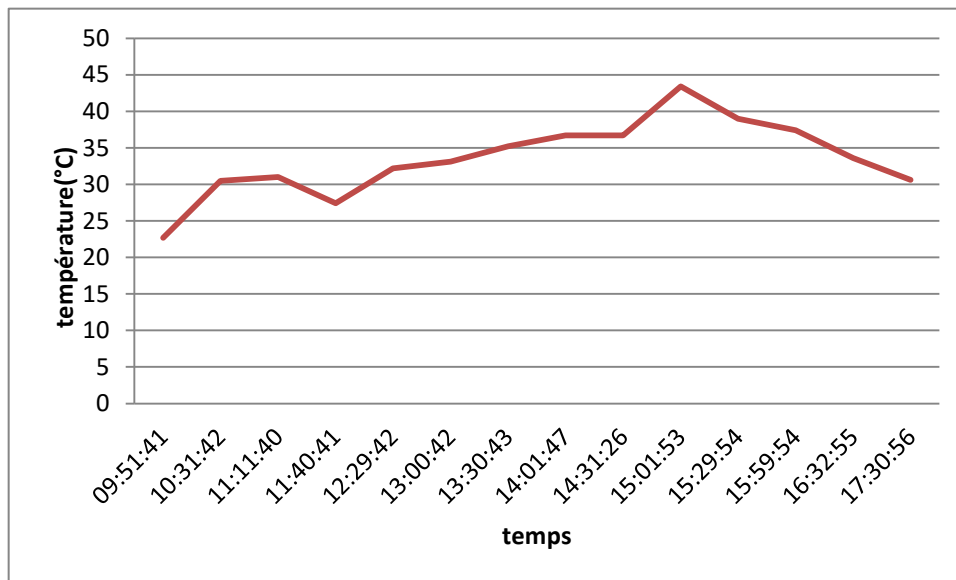
On observe une augmentation progressive de la vitesse de l'air entre le début de matinée (09h51), où elle est relativement faible (~1,3 m/s), et le milieu de journée, où elle atteint un pic d'environ 2,6 m/s. Cette croissance est directement liée à l'augmentation du rayonnement solaire, qui chauffe l'air contenu dans le collecteur. L'air chauffé devient moins dense et s'élève naturellement à travers la cheminée, générant un flux ascendant plus intense.

Après le maximum atteint vers les heures les plus ensoleillées, la vitesse diminue progressivement à mesure que l'intensité solaire décroît. En fin d'après-midi (vers 17h30), la vitesse redescend à environ 1,4 m/s. Cette diminution s'explique par la baisse de la

température dans le collecteur, réduisant le différentiel thermique nécessaire à l'effet de cheminée.

Cette évolution journalière de la vitesse confirme le bon fonctionnement du système: la vitesse du flux d'air est bien corrélée à l'intensité du rayonnement solaire. Elle valide également l'influence directe du chauffage solaire sur le déclenchement et la régulation du flux d'air à l'intérieur de la cheminée solaire.

La figure IV.3 représente l'évolution de la température de l'air à l'entrée de la cheminée solaire au cours de la journée du 19 mars 2025, pour le cas où les ouvertures d'air du collecteur mesurent 28 cm de diamètre. Les données sont enregistrées entre 09h51 et 17h30.



**Figure IV.3.** Variation de la température mesurée à l'entrée de la cheminée en fonction du temps (19/03/2025)

On observe une courbe typique influencée par le rayonnement solaire naturel. En début de matinée, la température est modérée, autour de 23 à 25 °C. Elle augmente progressivement en suivant l'intensification de l'ensoleillement, atteignant un pic de température d'environ 44 °C vers 15h00, moment correspondant généralement au maximum d'irradiation solaire.

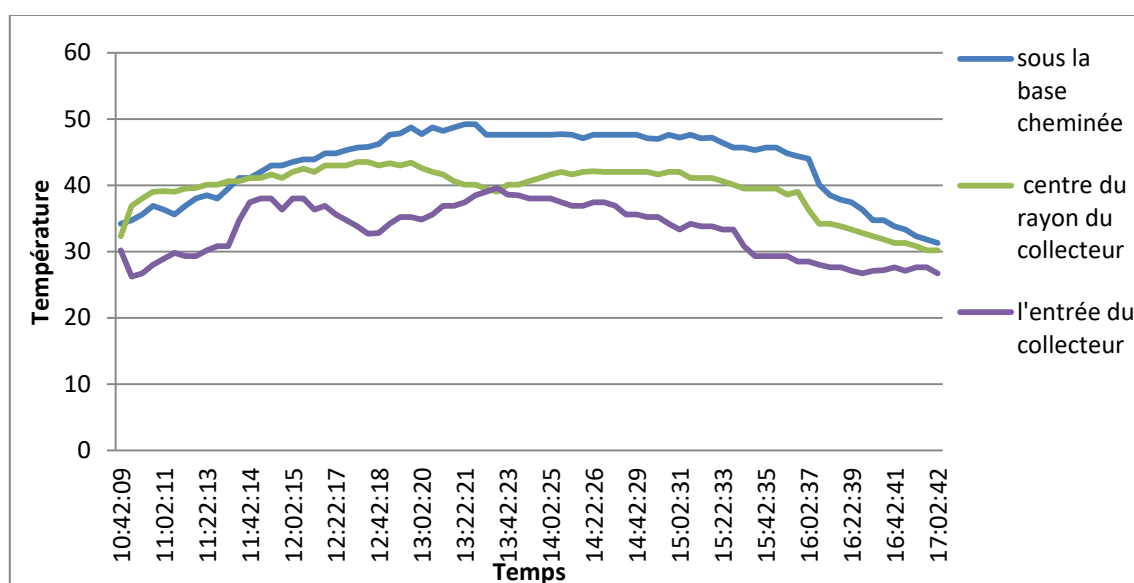
Cette élévation thermique résulte de l'effet du rayonnement sur l'air contenu dans le collecteur: celui-ci absorbe l'énergie solaire, se réchauffe, et transmet cette chaleur à l'air environnant, contribuant au déclenchement du phénomène de convection naturelle.

En fin d'après-midi, à mesure que le soleil décline, la température baisse progressivement jusqu'à environ 31 °C à 17h30. Cette baisse est en phase avec la diminution de l'énergie solaire incidente.

Cette évolution thermique met en évidence l'efficacité du système de captation solaire du prototype. Elle souligne aussi le lien direct entre l'ensoleillement et la performance thermique du système: plus le rayonnement est intense, plus la température interne du collecteur augmente, favorisant ainsi le flux d'air ascendant dans la cheminée.

#### IV.2.1.2. Température mesurée dans les trois points du collecteur

La Figure IV.4 présente l'évolution de la température mesurée en trois points stratégiques du système de cheminée solaire: à l'entrée du collecteur, au centre du rayon du collecteur, et sous la base de la cheminée. Ces mesures ont été enregistrées au cours de la journée du 19 Mars 2025 dans le but d'analyser la répartition thermique au sein du système.



**Figure IV.4.** Variation de la température mesurée dans les trois points du collecteur en fonction du temps (19/03/2025)

On observe que la température augmente progressivement dès le début de la matinée, passant d'environ 30°C à l'entrée, 33°C au centre du rayon, et 35°C sous l'entrée de cheminée. Avec l'augmentation du rayonnement solaire, les températures continuent de croître jusqu'à atteindre un pic entre 13h00 et 14h00: environ 53°C à la cheminée, 47°C au centre du rayon du collecteur, et 40°C à l'entrée. Ce gradient thermique montre une répartition efficace de la chaleur à l'intérieur du système, avec une élévation notable vers la cheminée, ce qui favorise le phénomène de convection naturelle et le mouvement ascendant de l'air. Après le pic, les températures diminuent progressivement jusqu'à la fin de la journée, atteignant entre 28°C et 37°C selon les emplacements. L'écart maximal de température, qui atteint environ 13°C entre la cheminée et l'entrée, reflète l'efficacité du système dans le

chauffage de l'air et la production d'un flux ascendant, démontrant ainsi la bonne performance du collecteur solaire durant toute la journée.

L'ensemble de ces résultats confirme la formation d'un gradient thermique favorable à la convection naturelle: l'air chauffé au centre du collecteur s'élève vers la cheminée, créant un flux ascendant. La différence de température entre l'entrée et la sortie du système constitue le moteur de ce flux, caractéristique du fonctionnement d'une cheminée solaire.

#### IV.2.2. Résultats du deuxième cas (D=18cm)

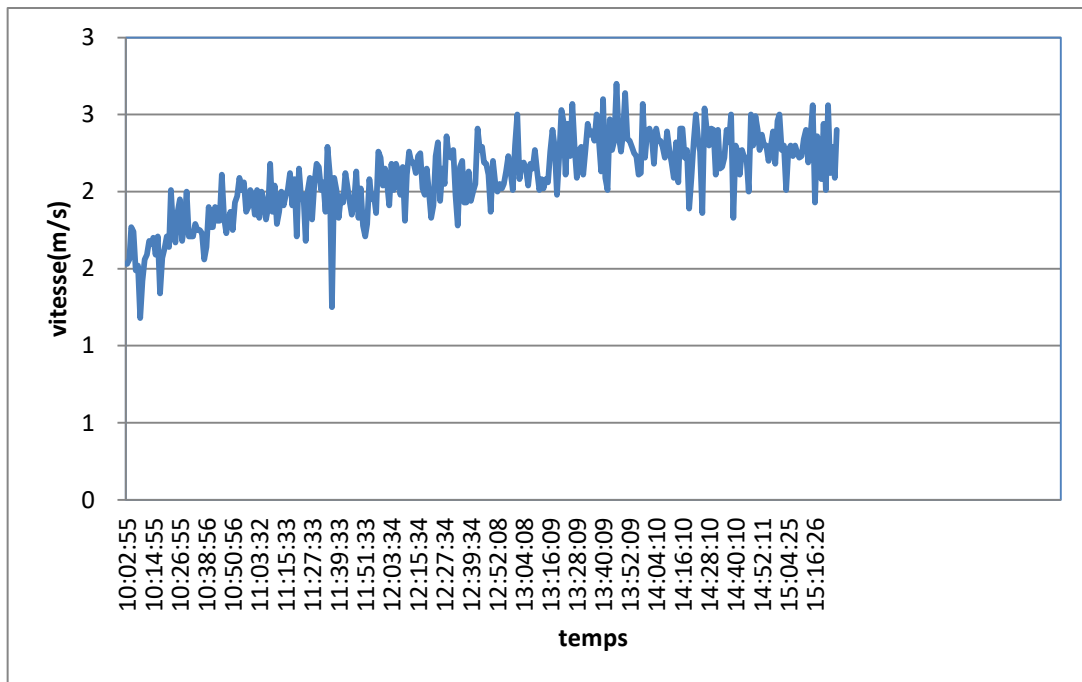
Pour ce deuxième cas, on utilise quatre ouvertures de diamètre  $D=18\text{cm}$  sur le collecteur de la cheminée solaire (Figure IV.5) durant la journée de 08/04/2025. On mesure la température sur trois points dans le collecteur et on mesure la vitesse et la température de l'air à l'entrée de la cheminée.



*FigureIV.5. Photo des ouvertures d'entrée de l'air dans le collecteur*

##### IV.2.2.1. Vitesse et température de l'air à l'entrée de la cheminée

La Figure IV.6 montre la variation de la vitesse de l'air mesurée à l'entrée de la cheminée solaire durant la journée. L'axe horizontal représente le temps, tandis que l'axe vertical indique la vitesse en (m/s).



**Figure IV.6.** Variation de la vitesse mesurée à l'entrée de la cheminée en fonction du temps (08/04/2025)

On observe une augmentation progressive de la vitesse de 1,4 m/s à environ 2,1 m/s. Cette croissance est cohérente avec l'élévation de la température du capteur solaire sous l'influence du rayonnement solaire matinal. Le système commence alors à générer un effet de dissipateur thermique de plus en plus efficace.

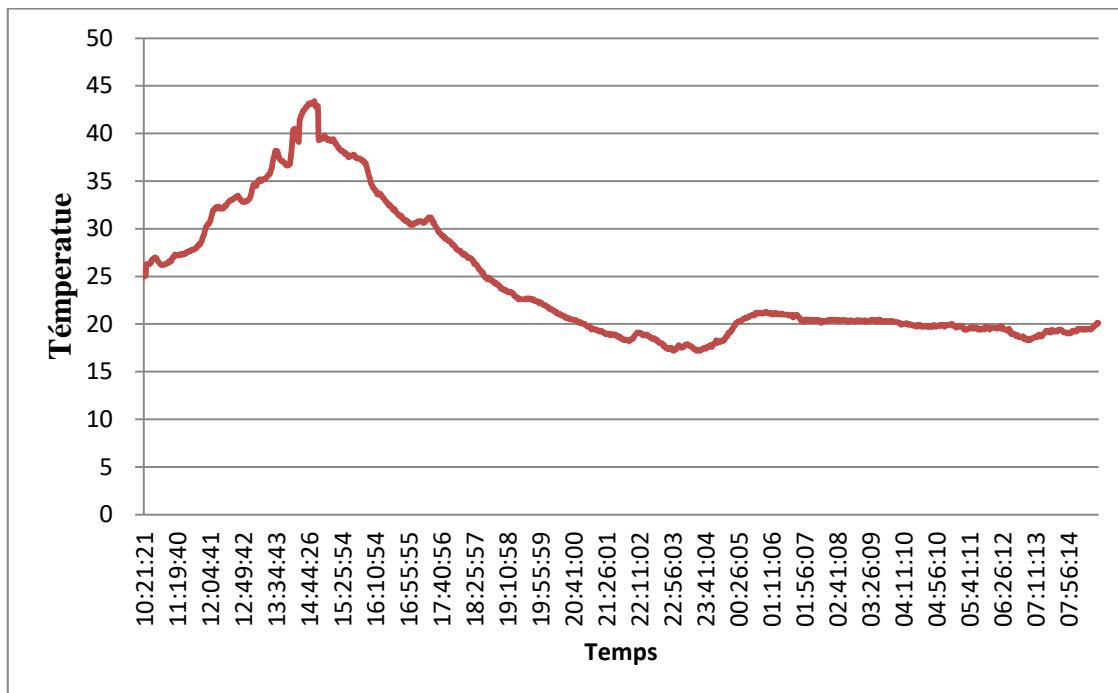
La vitesse continue d'augmenter jusqu'à atteindre son pic vers 13h30, soit environ 2,6 m/s. Durant cette phase, le rayonnement solaire est à son maximum, favorisant une extraction thermique optimale dans la cheminée.

Entre 13h30 et 15h30, la vitesse se stabilise autour de 2,3 à 2,5 m/s. Le système fonctionne très efficacement avec quelques variations mineures dues aux fluctuations météorologiques possibles telles que la couverture nuageuse.

En fin d'après-midi, la vitesse commence à diminuer progressivement. Elle chute à environ 1,8 m/s à 17h, indiquant une baisse de performance liée à une diminution de l'intensité de l'énergie solaire.

La Figure IV.7 illustre la variation de la température à l'entrée de la cheminée solaire au cours de la journée du 08 avril 2025.

On observe une hausse progressive de la température dès la fin de la matinée, atteignant un pic d'environ 43 °C vers 14h30. Cette augmentation est due à l'intensification de l'ensoleillement, qui chauffe l'air à l'entrée de la cheminée solaire, phénomène essentiel pour favoriser le tirage thermique. Après ce maximum, la température diminue régulièrement en fin d'après-midi et durant la nuit, atteignant un minimum autour de 17 °C entre 2h et 6h du matin. Une légère remontée en fin de nuit peut s'expliquer par les premiers effets du rayonnement solaire au lever du jour.



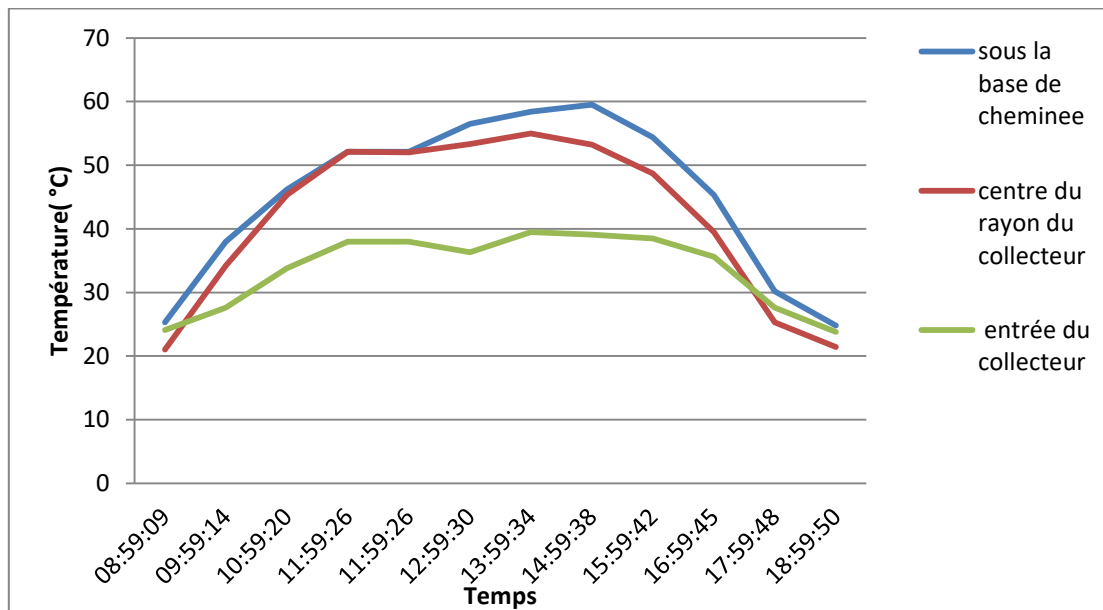
*Figure IV.7. Variation de la température mesurée à l'entrée de la cheminée en fonction du temps (08/04/2025)*

Cette évolution met en évidence le fonctionnement thermique typique d'une cheminée solaire, fortement dépendant du rayonnement solaire : le rendement thermique est maximal en début d'après-midi, ce qui correspond au moment optimal pour la production d'énergie ou la ventilation naturelle. La baisse nocturne montre l'arrêt quasi total du fonctionnement en l'absence de rayonnement. Ces données sont cruciales pour optimiser la conception et l'exploitation des systèmes solaires passifs.

#### IV.2.2.2. Température mesurée dans les trois points du collecteur

La Figure IV.8 présente l'évolution de la température mesurée en trois points stratégiques du système de cheminée solaire: à l'entrée du collecteur, au centre du rayon du collecteur, et sous la base de la cheminée. Ces mesures ont été enregistrées au cours de la

journée du 08/04/2025 dans le but d'analyser la répartition thermique au sein du système.



**Figure IV.8.** Variation de la température mesurée dans les trois points du collecteur en fonction du temps (08/04/2025)

On constate une hausse progressive des températures à partir de 9h, atteignant un maximum entre 14h et 15h, suivie d'une diminution en fin d'après-midi, reflétant directement le cycle du rayonnement solaire. La température est la plus élevée au niveau de la cheminée, atteignant environ 60 °C, ce qui s'explique par l'accumulation de chaleur au fur et à mesure que l'air circule dans le collecteur. Au centre, la température atteint environ 55 °C, tandis qu'à l'entrée, elle reste toujours plus basse, entre 25 °C et 39 °C. Cette distribution montre un gradient thermique net, signe d'un bon transfert de chaleur le long du collecteur. L'air se réchauffe progressivement en se déplaçant, ce qui favorise le mouvement ascendant vers la cheminée par effet de tirage thermique. Ce comportement est caractéristique d'un système solaire passif bien conçu, et indique que la période de rendement thermique optimal se situe en début d'après-midi, moment idéal pour exploiter la chaleur produite, notamment pour la ventilation naturelle ou la production d'énergie.

### IV.2.3. Résultats du troisième cas (D=11cm)

Pour ce troisième cas, on utilise quatre ouverture de diamètre  $D=11\text{cm}$  sur le collecteur de la cheminée solaire (Figure IV.9) durant la journée de 09/04/2025. On mesure la température sur trois points dans le collecteur et on mesure la vitesse et la température de l'air à l'entrée de la cheminée.



Figure IV.9. Photo des ouvertures d'entrée de l'air dans le collecteur

#### IV.2.3.1. Vitesse et température de l'air à l'entrée de la cheminée

La Figure IV.10 montre la variation de la vitesse de l'air mesurée à l'entrée de la cheminée solaire au cours de la journée du 09 avril 2025.

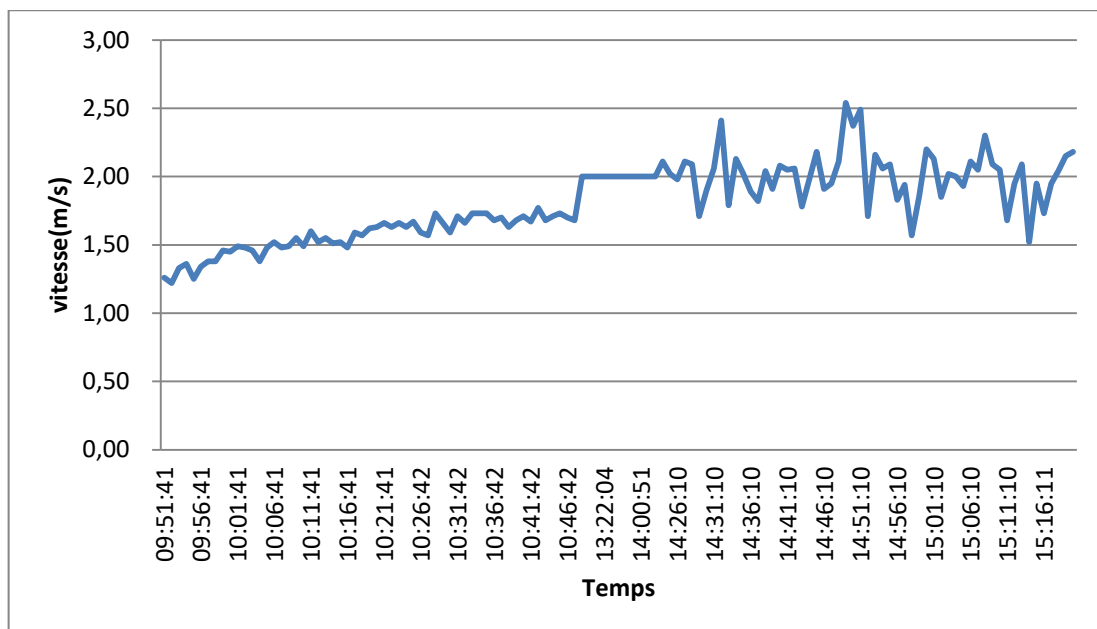
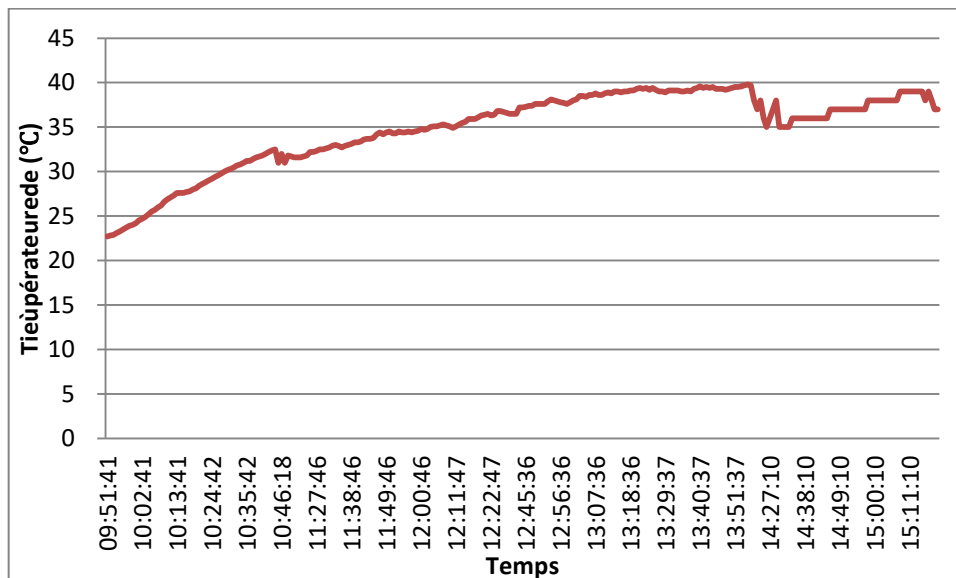


Figure IV.10. Variation de la vitesse mesurée à l'entrée de la cheminée en fonction du temps (09/04/2025).

On observe une augmentation progressive de la vitesse entre 9h et 13h, passant d'environ 1,3 m/s à 2,0 m/s, ce qui correspond à la montée en température de l'air dans le collecteur sous l'effet du rayonnement solaire. À partir de 13h, la vitesse reste globalement plus élevée, oscillant entre 2,0 et 2,5 m/s avec des fluctuations notables, notamment vers 14h30 où un pic de vitesse est atteint. Ces variations traduisent une instabilité temporaire du flux d'air, probablement liée à des changements rapides de température ou de rayonnement solaire. Globalement, la courbe reflète le bon fonctionnement du système, où l'augmentation de la température dans le collecteur provoque un effet de tirage thermique dans la cheminée, accélérant ainsi le mouvement de l'air en cours de journée.

La figure IV.11 représente l'évolution de la température mesurée de l'air à l'entrée de la cheminée solaire au cours de la journée du 09/04/2025, pour le cas où les ouvertures d'air du collecteur mesurent 11 cm de diamètre. Les données sont enregistrées entre 09h51 et 15h11.



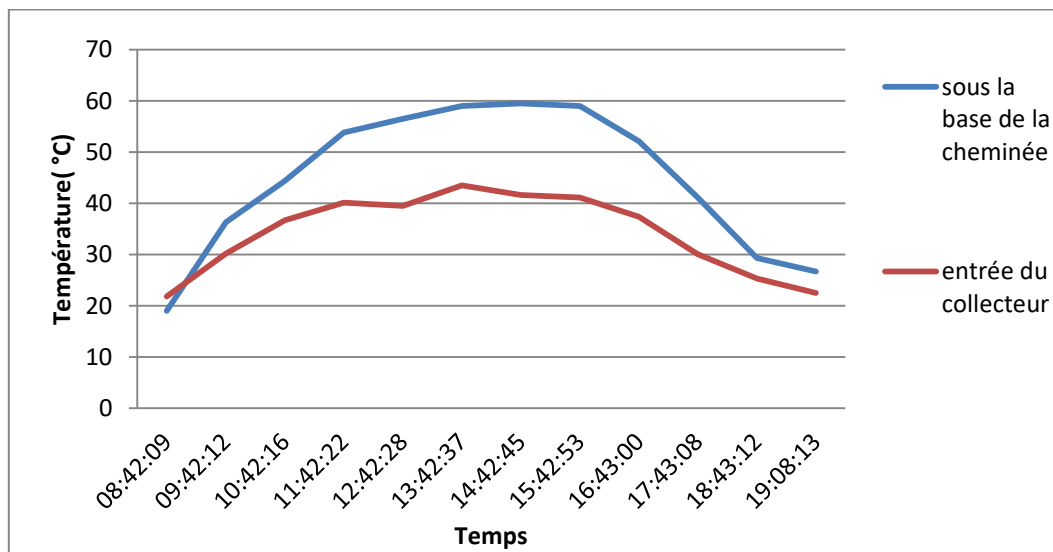
*Figure IV.11. Variation de la température mesurée à l'entrée de la cheminée en fonction du temps (09/04/2025)*

On observe d'abord une augmentation progressive de la température, d'environ 23 °C à 33 °C entre 9 h 51 et 10 h 45, puis une remontée progressive jusqu'à environ 36 °C. Les températures se stabilisent ensuite autour de 40 à 38 °C avec de légères fluctuations, indiquant que le système atteint ses températures maximales jusqu'à 15 h avant de diminuer au coucher du soleil.

#### IV.2.3.2. Température mesurée dans les trois points du collecteur

La Figure IV.12 présente l'évolution de la température mesurée en trois points stratégiques du système de cheminée solaire: à l'entrée du collecteur, au centre du rayon du

collecteur, et sous la base de la cheminée. Ces mesures ont été enregistrées au cours de la journée du 09/04/2025 dans le but d'analyser la répartition thermique au sein du système.



*Figure IV.12. Variation de la température mesurée dans les trois points du collecteur en fonction du temps (09/04/2025)*

On observe une augmentation progressive des températures jusqu'à atteindre un maximum vers 14h45, avec environ 60 °C à la cheminée et 44 °C à l'entrée. Cette phase indique une montée en charge thermique sous l'effet de l'ensoleillement ou du fonctionnement d'un dispositif de chauffage. Par la suite, les températures diminuent progressivement, reflétant une baisse de l'apport thermique (fin de journée, chute d'irradiation solaire). La température à la cheminée reste constamment supérieure à celle mesurée à l'entrée, ce qui montre une perte thermique le long du circuit ou une dissipation naturelle, typique d'un fonctionnement en régime thermique contrôlé mais non isolé parfaitement.

### IV.3. Comparaison entre les trois cas expérimentaux

Cette section présente une analyse comparative des performances de la cheminée solaire en fonction des trois diamètres d'ouverture d'entrée d'air: 28 cm, 18 cm et 11 cm.

- **Vitesse de l'air:** La vitesse maximale de l'air à l'entrée de la cheminée diminue légèrement avec la réduction du diamètre des ouvertures. Le cas 28 cm présente une vitesse maximale d'environ 2,6 m/s, suivi de 2,5 m/s pour 18 cm et 2,0 m/s pour 11 cm. Cela montre que des ouvertures plus grandes favorisent un meilleur flux d'air ascendant.
- **Température de l'air:** La température maximale mesurée dans la cheminée varie également selon la taille des ouvertures. Le cas avec ouverture de 11 cm atteint une

température plus élevée (jusqu'à 49 °C), tandis que les ouvertures plus grandes présentent des températures légèrement plus basses (43–47 °C). Cette différence s'explique par un meilleur confinement de l'air chaud dans les petites ouvertures, mais avec un débit d'air réduit.

- **Performance globale:** Le compromis entre débit d'air et température montre que les ouvertures intermédiaires (18 cm) offrent un bon équilibre entre vitesse et chauffage de l'air. Les grandes ouvertures maximisent le flux d'air mais réduisent légèrement la température, alors que les petites ouvertures favorisent la montée en température mais limitent le débit.

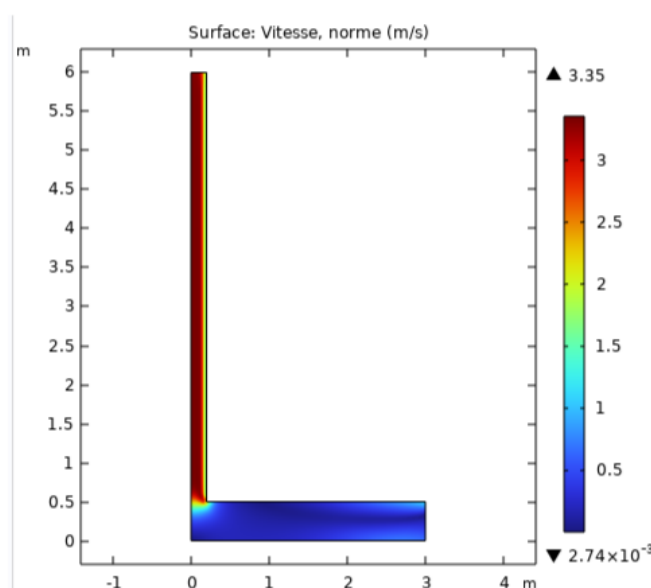
Cette comparaison met en évidence l'importance de choisir le bon diamètre d'entrée d'air pour optimiser la performance de la cheminée solaire selon les objectifs spécifiques, que ce soit pour maximiser le débit d'air ou la température.

#### IV.4. Résultats de simulation

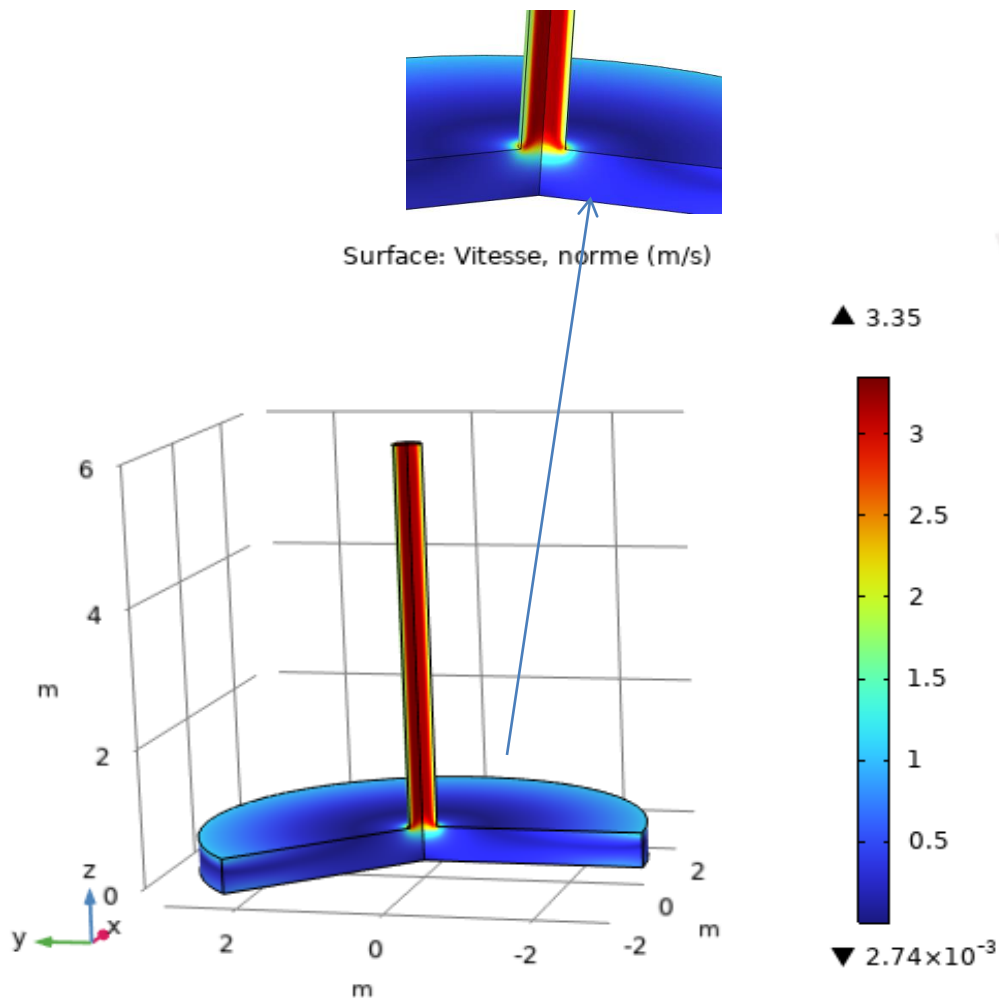
Afin de compléter et valider les résultats expérimentaux, une simulation numérique a été effectuée avec le logiciel COMSOL Multiphysics. Cette simulation permet de modéliser le comportement thermique et l'écoulement de l'air dans la cheminée solaire selon les dimensions et les conditions du prototype. Elle offre une meilleure compréhension des phénomènes physiques et sert d'outil pour optimiser le système.

##### IV.4.1. La variation de la vitesse de l'air dans le CS

Après la simulation du modèle avec les dimensions de prototype, on a obtenu les résultats suivants:



*Figure IV.13. Évolution de la vitesse de l'air dans la cheminée solaire 2D en fonction du temps*

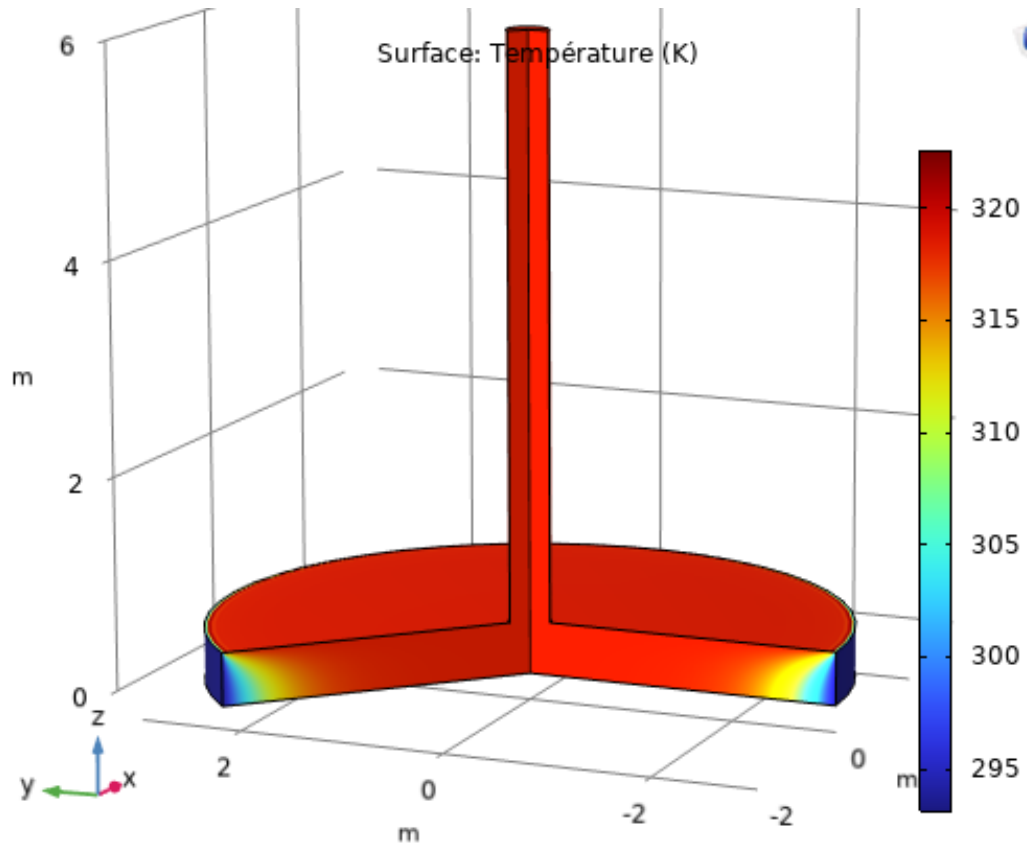


**Figure IV.14.** Évolution de la vitesse de l'air dans la cheminée solaire 3D en fonction du temps

La figure IV.13 présente une visualisation 2D de la distribution de la vitesse de l'air dans une cheminée solaire obtenue par simulation tandis que La figure IV.14 présente une visualisation 3D. On observe une forte accélération de l'air au centre du collecteur, particulièrement dans la zone de la cheminée verticale, où la vitesse atteint un maximum d'environ 2,6 m/s, représenté par la couleur rouge. À l'inverse, les vitesses les plus faibles (proches de zéro) sont localisées en périphérie du collecteur, indiquées par les teintes bleues. Cette distribution est caractéristique du phénomène de tirage thermique, où l'air chauffé au centre s'élève rapidement par effet de convection naturelle, créant ainsi une circulation verticale intense dans la cheminée. Cette simulation confirme le bon fonctionnement du principe de la cheminée solaire, avec une extraction efficace de l'air chaud et une accélération nette du flux au centre du dispositif.

#### IV.4.2. La variation de la température de l'air dans le CS

Pour illustrer l'effet des variations thermiques à l'intérieur du système, la figure IV.15 suivante présente la distribution de la température à la sortie de la cheminée :



*Figure IV.15. Évolution de la température de l'air dans la cheminée solaire 3D en fonction du temps*

La simulation met en évidence une élévation progressive de la température de l'air à l'intérieur du système, atteignant un maximum de 65 °C à la base de la cheminée. La température varie selon les zones du dispositif : elle se situe entre 22 °C et 30 °C à l'entrée du collecteur, peut atteindre jusqu'à 50 °C au centre du collecteur, et oscille entre 60 °C et 65 °C à la sortie de la cheminée. Ce gradient thermique joue un rôle crucial dans la génération du flux d'air par effet de cheminée: plus l'écart de température est important, plus la vitesse de l'air n'est élevée.

## IV.5. Comparaison des résultats de simulation et expérimentaux

### IV.5.1. Tableau de comparaison

Critter	Simulation (COMSOL)	Etude experimental
Vitesse maximal de l'air	2,5–2.8 m/s (heures de pointe : 12h00–14h00)	- 2,6 m/s (ouvertures 28 cm - hiver) - 2,6 m/s (ouvertures 18 cm - printemps) - 2,5 m/s (ouvertures 11 cm - printemps)
Température maximale	~50°C (à l'entrée de la cheminée)	- 47°C (ouvertures 28 cm) - 43°C (ouvertures 18 cm) - 49°C (ouvertures 11 cm)
Facteurs étudiés	- Diamètre des ouvertures - Matériaux idéaux (verre/plastique)	- Impact de la taille des ouvertures - Conditions climatiques (hiver, printemps) - Type de matériaux (plastique)
Défies	- Ignorance des fluctuations nocturnes - Non-prise en compte des facteurs météorologiques externes	- Fluctuations nocturnes de la vitesse (dû au vent) - Faible isolation thermique des matériaux utilisés
Recommandations	- Intégrer des facteurs météorologiques dans le modèle - Tester différents matériaux isolants	- Utiliser des matériaux plus performants (verre) - Augmenter la hauteur de la cheminée pour améliorer le flux

## IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé les performances de la cheminée solaire à travers trois essais expérimentaux en variant le diamètre des ouvertures d'entrée d'air (28 cm, 18 cm et 11 cm), ainsi qu'à l'aide d'une simulation numérique en 2D et 3D.

Les résultats ont montré que le cas de 28 cm diamètre présente une vitesse maximale d'environ 2,6 m/s, suivi de 2,5 m/s pour 18 cm et 2,0 m/s pour 11 cm et que la vitesse de l'air augmente progressivement au cours de la journée, atteignant un maximum entre 13h00 et 14h30, avec une valeur maximale d'environ 2,6 m/s. Cette évolution coïncide avec l'intensité

du rayonnement solaire, confirmant le rôle clé de la chaleur dans la génération du flux d'air ascendant.

La température a également connu une hausse significative, notamment dans la zone de la cheminée, avec un écart thermique marqué entre l'entrée et la sortie du système. La simulation numérique a permis de visualiser ces phénomènes avec précision, tout en montrant une légère surestimation des températures due à l'absence de pertes thermiques dans le modèle.

La comparaison entre les données expérimentales et la simulation a révélé une bonne cohérence globale, notamment en ce qui concerne la dynamique de l'air et les pics de performance.

En conclusion, la cheminée solaire présente un fonctionnement efficace en conditions d'ensoleillement élevé. L'utilisation de la simulation s'avère être un outil pertinent pour optimiser le système. Il est recommandé de poursuivre les recherches en testant d'autres variables telles que :

- La hauteur et le diamètre de la cheminée.
- Les matériaux utilisés.
- L'intégration de système de stockage thermique pour un fonctionnement prolongé.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

La production d'électricité à l'aide d'une cheminée solaire n'est pas un nouveau sujet de recherche dans le monde. De nombreux projets ont été réalisés dans le but d'étudier les possibilités d'installation du système de cheminée solaire. Ce travail présente une étude expérimentale de prototype de petite échelle de cheminée solaire et une étude théorique utilisant un modèle numérique de CFD. Ce prototype a été installé à l'Université de Chlef, Algérie. Les mesures des paramètres qui ont un effet direct sur la vitesse du flux de l'air et la température ont été effectuées.

Nous avons d'abord décrit les composants principaux de ce type de centrale ainsi que leur principe de fonctionnement. Ensuite, nous avons également présenté les méthodes d'amélioration de la performance de la cheminée solaire, avant de conclure par une analyse des avantages et des inconvénients de cette technologie. Une revue complète de la littérature a été réalisée à partir de plus de 68 études récentes portant sur les systèmes de cheminée solaire. Les résultats de la plupart des travaux sont brièvement présentés afin de dégager une vision générale de chaque étude. Il ressort que près de 30 % des recherches ont été menées de manière expérimentale. L'absence de validation expérimentale fiable demeure un obstacle majeur pour les études théoriques ou basées sur la modélisation. Il a également été observé que la majorité des cheminées solaires construites à ce jour sont de petite taille, ce qui limite leur rentabilité économique. Il est recommandé de promouvoir des projets progressifs, en chaîne, débutant par des études de faisabilité, suivies de simulations, de prototypes à petite échelle, puis du passage à des cheminées solaires de grande capacité. Nous avons élaboré un modèle expérimental rigoureux de la cheminée solaire implantée dans la wilaya de Chlef, en tenant compte des conditions climatiques réelles du site. Les instruments et méthodes de mesure utilisés ont été présentés en détail, permettant la collecte de données essentielles au suivi des principaux paramètres de fonctionnement du système. Par ailleurs, les différentes étapes de la simulation numérique ont complété l'analyse expérimentale en apportant une compréhension approfondie du comportement thermique et dynamique de la cheminée. Cette approche intégrée, combinant expérimentation et modélisation numérique, constitue une base solide pour l'optimisation future du design et de la performance des cheminées solaires dans la région. Nous avons analysé les performances de la cheminée solaire à travers trois essais expérimentaux en variant le diamètre des ouvertures d'entrée d'air (28 cm, 18 cm et 11 cm), ainsi qu'à l'aide d'une simulation numérique en 2D.

## Conclusion générale

---

Les résultats ont montré que le cas de 28 cm diamètre présente une vitesse maximale d'environ 2,6 m/s, suivi de 2,5 m/s pour 18 cm et 2,0 m/s pour 11 cm et que la vitesse de l'air augmente progressivement au cours de la journée, atteignant un maximum entre 13h00 et 14h30, avec une valeur maximale d'environ 2,6 m/s. Cette évolution coïncide avec l'intensité du rayonnement solaire, confirmant le rôle clé de la chaleur dans la génération du flux d'air ascendant.

La température a également connu une hausse significative, notamment dans la zone de la cheminée, avec un écart thermique marqué entre l'entrée et la sortie du système. La simulation numérique a permis de visualiser ces phénomènes avec précision, tout en montrant une légère surestimation des températures due à l'absence de pertes thermiques dans le modèle.

La comparaison entre les données expérimentales et la simulation a révélé une bonne cohérence globale, notamment en ce qui concerne la dynamique de l'air et les pics de performance.

En conclusion, la cheminée solaire présente un fonctionnement efficace en conditions d'ensoleillement élevé. L'utilisation de la simulation s'avère être un outil pertinent pour optimiser le système. Il est recommandé de poursuivre les recherches en testant d'autres variables telles que :

- La hauteur et le diamètre de la cheminée.
- Les matériaux utilisés.
- L'intégration de système de stockage thermique pour un fonctionnement prolongé.

# Référence

## Références

- [1] Jörg Schlaich. The solar chimney: electricity from the sun. Edition Axel Menges, Book, 1995.
- [2] M Rafiuddin Ahmed and Sandeep K Patel. Computational and experimental studies on solar chimney power plants for power generation in pacific island countries. *Energy Conversion Management*, 2017. (61–78), 149.
- [3] A Dhahri, a Omri, and J Orfi. Theoretical analysis of the performance of a solar chimney coupled with a geothermal heat exchanger. *CFD techniques Energy applications*, pages 1–27, 2018.
- [4] M. LAKHDARI O.B.E.K. MOKRANI. Etude expérimentale d'une cheminée solaire à la Sud Algérienne région d'Ouargla. Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017.
- [5] CHELOUFI Djassem. Réalisation et expérimentation d'une cheminée solaire. Thèse doctorat, Université de Kasdi Merbah Ouargla, 2014.
- [6] Amel Dhahri, Ahmed Omri, A Review of solar Chimney Power Generation Technology, *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2013.
- [7] Marco Aurélio dos Santos Bernardes, Solar Chimney Power Plants – Developments and Advancements, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG Brazil, 2010.
- [8] A.B. Kasaeian, Sh. Molana, K. Rahmani, D. Wen, a Review on Solar Chimney Systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017.
- [9] Wende Pouire Germain OUEDRAOGO, Sié KAM, Boukaré OUEDRAOGO et D. Joseph BATHIEBO Étude expérimentale de l'écoulement de l'air en convection naturelle dans une tour solaire, 2016.
- [10] Lu Zuo, Zihan Liu, Ling Ding, Ning Qu, Pengzhan Dai, Bofeng Xu, Yue Yuan, Performance analysis of a wind supercharging solar chimney power plant combined with thermal plant for power and freshwater generation, 2019.
- [11] Wu, Y., Ming, T., de Richter, R., Höffer, R., & Niemann, H. J. (2020). Large-scale freshwater generation from the humid air using the modified solar chimney. *Renewable Energy*, 146, 1325-1336.
- [12] P. J. Bansod, Solar Chimney Power Plant-A Review, 2014.
- [13] Haaf, W., Friedrich, K., Mayr, G., & Schlaich, J. (1983). Solar chimneys part I: principle and construction of the pilot plant in Manzanares. *International Journal of Solar Energy*, 2(1), 3-20.

- [14] Arzpeyma, M., Mekhilef, S., Newaz, K. M. S., Horan, B., Seyedmahmoudian, M., Akram, N., & Stojcevski, A. (2020). Solar chimney power plant and its correlation with ambient wind effect. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *141*(2), 649-668.
- [15] Schlaich J. The solar chimney: electricity from the sun. Di 1 ban. ed. 1997, Stuttgart: Edition Axel Menges.
- [16] Arzpeyma, M., Mekhilef, S., Newaz, K. M. S., Horan, B., Seyedmahmoudian, M., Akram, N., & Stojcevski, A. (2020). Solar chimney power plant and its correlation with ambient wind effect. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *141*(2), 649-668.
- [17] Nasraoui, H., Bsis, M., and Driss, Z. Solar Chimney Power Plants: Numerical Investigations and Experimental Validation (Vol. 4). Bentham Science Publishers, 2020.
- [18] Azizi A. Contribution à l'étude et l'optimisation d'une cheminée solaire cas du Sahara Algérien. Thèse de Doctorat. Université de Chlef, 2019.
- [19] Kasaeian, A. B., Heidari, E., & Vatan, S. N. (2011). Experimental investigation of climatic effects on the efficiency of a solar chimney pilot power plant. *Renewable and Sustainable energy reviews*, *15*(9), 5202-5206.
- [20] Kasaeian, A., Ghalamchi, M., & Ghalamchi, M. (2014). Simulation and optimization of geometric parameters of a solar chimney in Tehran. *Energy conversion and management*, *83*, 28-34.
- [21] Ghalamchi, M., Kasaeian, A., Ghalamchi, M., & Mirzahosseini, A. H. (2016). An experimental study on the thermal performance of a solar chimney with different dimensional parameters. *Renewable Energy*, *91*, 477-483.
- [22] Zhou, X., Yang, J., Xiao, B., & Hou, G. (2007). Experimental study of temperature field in a solar chimney power setup. *Applied Thermal Engineering*, *27*(11-12), 2044-2050.
- [23] Zhou, X., Yang, J., Xiao, B., & Hou, G. (2007). Simulation of a pilot solar chimney thermal power generating equipment. *Renewable Energy*, *32*(10), 1637-1644.
- [24] Koonsrisuk, A., & Chitsomboon, T. (2007). Dynamic similarity in solar chimney modeling. *Solar Energy*, *81*(12), 1439-1446.
- [25] Ahmed, O. K., & Hussein, A. S. (2018). New design of solar chimney (case study). *Case studies in thermal engineering*, *11*, 105-112.
- [26] Maia, C. B., Ferreira, A. G., Valle, R. M., & Cortez, M. F. (2009). Theoretical evaluation of the influence of geometric parameters and materials on the behavior of the airflow in a solar chimney. *Computers & Fluids*, *38*(3), 625-636.

- [27] Khanal, R., & Lei, C. (2014). An experimental investigation of an inclined passive wall solar chimney for natural ventilation. *Solar Energy*, 107, 461-474.
- [28] Shahreza, A. R., & Imani, H. (2015). Experimental and numerical investigation on an innovative solar chimney. *Energy Conversion and Management*, 95, 446-452.
- [29] Al-Azawie, S. S., Hassan, S., & Zammeri, M. F. (2014). Experimental and numerical study on ground material absorptivity for solar chimney power applications. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 186, 219-230.
- [30] Aja, O. C., Al-Kayiem, H. H., & Karim, Z. A. (2013). Experimental investigation of the effect of wind speed and wind direction on a solar chimney power plant. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 179, 945-955.
- [31] A. Azizi, T. Tahri, M.H. Sellami, L. Segni, R. Belakroum and K. Loudiyi, Experimental and CFD investigation of small-scale solar chimney for power generation. Case study: southeast of Algeria, *Desalination and Water Treatment*., 160 (2019) 1-8.
- [32] Belkhode P., Sakhale C., and Bejalwar A. Evaluation of the experimental data to determine the performance of a solar chimney power plant. *Materials Today: Proceedings*., 27, 102-106, 2020
- [33] Huang, M. H., Chen, L., Lei, L., He, P., Cao, J. J., He, Y. L., & Tao, W. Q. (2020). Experimental and numerical studies for applying hybrid solar chimney and photovoltaic system to the solar-assisted air cleaning system. *Applied Energy*, 269, 115150.
- [34] Mehdipour, R., Baniamerian, Z., Golzardi, S., & Murshed, S. S. (2020). Geometry modification of solar collector to improve performance of solar chimneys. *Renewable Energy*, 162, 160-170.
- [35] A. Azizi, T. Tahri, R. Belakroum, M.H. L. Segni, K. Loudiyie, Sellami. Evaluation of solar chimney performance enhancement using energy produced by Albian geothermal water in southeastern Algeria., *Desalination and Water Treatment*., 210 (2021)152-163.
- [36] Mullett L. The solar chimney—overall efficiency, design and performance. *International Journal of Ambient Energy*. 1987;8:35-40.
- [37] Pasumarthi, N., and S. A. Sherif.1998. Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney model-part I: Mathematical model development. *International Journal of Energy Research*22 (3):277–88.

- [38] Kreetz H. Theoretische Untersuchungen und Auslegung eines temporären Wasserspeichers für das Aufwindkraftwerk. Berlin: Energie und Verfahrenstechnik der TU Berlin; 1997.
- [39] Padki M, Sherif S. On a simple analytical model for solar chimneys. *International journal of energy research*. 1999;23:345-9.
- [40] Lodhi M. Application of helio-aero-gravity concept in producing energy and suppressing pollution. *Energy conversion and management*. 1999;40:407-21.
- [41] Ruprecht A. Stromung Stechnische Gestaltung eines Aufwindkraftwerks (fluid dynamic design of a solar updraft power plant). In: *Proceedings of the international symposium über Anwendungen der Informatik und Mathematik in Architektur und Bauwesen*, June 10–12, Bauhaus- University Weimar, Germany; 2003.
- [42] dos Bernardes MAS, Voß A, Weinrebe G. Thermal and technical analyses of solar chimneys. *Solar Energy*. 2003;75(6):511–24.
- [43] Dai Y, Huang H, Wang R. Case study of solar chimney power plant in Northwestern regions of China. *Renewable energy*. 2003;28:1295-304
- [44] Haaf W. Solar chimneys: part ii: preliminary test results from the Manzanares pilot plant. *International Journal of Sustainable Energy*. 1984;2:141-61.
- [45] Schlaich J. *The solar chimney: electricity from the sun*: Edition Axel Menges; 1995.
- [46] Von Backström T.W, Fluri T.P. Maximum fluid power condition in solar chimney power plants –An analytical approach. *Solar Energy*. 2006;80:1417-23.
- [47] Denantes F, Bilgen E. Counter-rotating turbines for solar chimney power plants. *Renewable energy*. 2006;31:1873-91.
- [48] Fluri T.P, von Backström T.W. Comparison of modeling approaches and layouts for solar chimney turbines. *Solar Energy*. 2008;82:239-46.
- [49] Tingzhen M et al. Numerical simulation of the solar chimney power plant systems coupled with turbine. *Renewable Energy*. 2008;33:897-905.
- [50] Fluri TP, Von Backström TW. Performance analysis of the power conversion unit of a solar chimney power plant. *Solar Energy*. 2008;82:999-1008.
- [51] Pretorius JP, Kroeger DG. Solar chimney power plant performance. *Journal of solar energy engineering*. 2006;128:302-11.

- [52] M.A. dos S. Bernardes, T.W. Von Backstrom, D.G. Kroger, Analysis of some available heat transfer coefficients applicable to solar chimney power plant collectors, *Sol. Energy* 83 (2009) 264e275.
- [53] Zheng Y, et al. Unsteady numerical simulation of solar chimney power plant system with energy storage layer. *Journal of the Energy Institute*. 2010;83:86-92.
- [54] Hurtado F.J, Kaiser A.S, Zamora B. Evaluation of the influence of soil thermal inertia on the performance of a solar chimney power plant. *Energy*. 2012;47:213-24.
- [55] Daba R. Modeling and Simulation of Solar Chimney Power Plant with and without the Effect of Thermal Energy Storage Systems: Addis Ababa Institute of Technology; 2011.
- [56] A.M.K. El-Ghonemy, Solar chimney power plant without collector, *IOSR J. Electron. Commun. Eng.* 11 (2016) 67e76.
- [57] Nizetic, S., N. Ninic, and B. Klarin. 2008. Analysis and feasibility of implementing solar chimney power plants in the Mediterranean region. *Energy* 33 (11):1680–90. doi:10.1016/j.energy.2008.05.012.
- [58] Gitan, A.A., Abdulmalek S.H., and. Dihrab S.S. 2015. Tracking collector consideration of tilted collector solar updraft tower power plant under Malaysia climate conditions. *Energy* 93:1467–77. doi:10.1016/j.energy.2015.09.009
- [59] Koonsrisuk A, Chitsomboon T. Theoretical turbine power yield in solar chimney power plants. *Thermal Issues in Emerging Technologies Theory and Applications (ThETA)*, 2010 3rd International Conference on: IEEE; 2010. p. 339-46.
- [60] Nizetic S, Klarin B. A simplified analytical approach for evaluation of the optimal ratio of pressure drop across the turbine in solar chimney power plants. *Applied Energy*. 2010;87:587-91.
- [61] dos Santos Bernardes M.A, Molina Valle R, Cortez MF-B. Numerical analysis of natural laminar convection in a radial solar heater. *International journal of thermal sciences*. 1999;38:42-50.
- [62] Yan M.Q, Sherif S.A, Kridli G.T, Lee SS, Padki M.M. Thermo-fluids analysis of solar chimneys. *Industrial Application Fluid Mechanic ASME FED-2*. 1991:125-30.
- [63] Kirstein C.F, von Backström T.W. Flow through a solar chimney power plant collector-tochimney transition section. *Journal of solar energy engineering*. 2006;128:312-7.

- [64] Von Backström T.W, Bernhardt A, Gannon A.J. Pressure drop in solar power plant chimneys. *Journal of solar energy engineering*. 2003;125:165-9.
- [65] S Pretorius J.P, Kröger D.G. Critical evaluation of solar chimney power plant performance. *Solar Energy*. 2006;80:535-44.
- [66] Kolb S, Helmrich T. Strömungstechnische Auslegung eines Aufwindkraftwerks mit 200 MW Leistung (Aerodynamic design of a 200 MW solar chimney power plant): Diploma Thesis, FInstitut für Strömungsmechanik und hydraulische Strömungsmaschinen, Universität Stuttgart. (in German). (Cited on page 54.); 1996.
- [67] Pretorius J.P. Optimization and control of a large-scale solar chimney power plant. University of Stellenbosch., PhD Thesis, 2007.
- [68] Pretorius JP, Kroger DG, Buys JD, von Backstrom TW. Solar tower power plant performance characteristics. In: *Proceedings of the ISES EuroSun2004 International Sonnenforum*. Freiburg, Germany; 2004. p. 870–9.
- [69] Bernardes MdS, von Backström TW, Kröger D. Critical evaluation of heat transfer coefficients applicable to solar chimney power plant collectors. *Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol I–Vol V)*: Springer; 2009. p. 1706-13.
- [70] Bernardes MdS, Von Backström TW. Evaluation of operational control strategies applicable to solar chimney power plants. *Solar Energy*. 2010;84:277-88.
- [71] Sun J, Yang M, Shan Y. The Effect of the Inclined Angel on the Output in a Solar Chimney Power Plant System. *Challenges of Power Engineering and Environment*: Springer; 2007. p. 1192-5.
- [72] Mehrpooya M, Shahsavan M, Sharifzadeh MMM. Modeling, energy and exergy analysis of solar chimney power plant-Tehran climate data case study. *Energy* 2016;115:257–73. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.006>.
- [73] Patel SK, Prasad D, Ahmed MR. Computational studies on the effect of geometric parameters on the performance of a solar chimney power plant. *Energy Convers Manage* 2014;77:424–31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.056>.
- [74] Al-Kayiem HH, et al. Performance evaluation of hybrid solar chimney for uninterrupted power generation. *Energy*. 2019;166:490–505.