



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES

THÈSE

Présentée à :

FACULTE DE TECHNOLOGIE – DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT EN SCIENCES

Par :

M. LAHCENE ABDELKADER

Sur le thème

Investigation numérique et expérimentale du phénomène de transfert thermique dans une cheminée solaire

Soutenue le - 02-2021 à Sidi Bel Abbès devant le jury composé de :

M. Aminallah Miloud	Professeur	Univ.Sidi Bel Abbès	Président
M. Retiel Noureddine	Professeur	Univ. Mostaganem	Examinateur
M. Sebbane Omar	Maître de conférences A	Univ.Tlemecen	Examinateur
M. Benazza Abdel Yllah	Professeur	Univ.Sidi Bel Abbès	Directeur de Thèse
M. Benguediab Mohamed	Professeur	Univ.Sidi Bel Abbès	Invité

Remerciements

La présente thèse de doctorat a été effectuée au sein de laboratoire LMSR, faculté de technologie de l'université de Sidi Bel Abbès.

Elle n'aurait pas été possible sans le bienveillant soutien de plusieurs personnes. Je suis incapable de dire dans les mots qui conviennent, le rôle qu'elles ont joué à mes côtés pour l'aboutissement de ce travail. A cet effet, je voudrais les prier d'accueillir ici tous mes sentiments de gratitude qui viennent du fond de mon cœur, en acceptant mes remerciements.

Mes remerciements s'adressent à mon Directeur de thèse, le Professeur Benazza Abdel Ylleh pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant d'encadrer ce travail de thèse. Il a su m'apporter un soutien constant, une disponibilité, une écoute, une confiance et des conseils précieux et avisés à la hauteur de ses compétences et de ses qualités humaines exceptionnelles.

Je tiens à adresser mes plus vifs remerciements au Professeur Aminallah Miloud pour l'honneur qu'il m'a témoigné en acceptant de présider le jury, ainsi que pour son aide et sa disponibilité.

Mes sincères remerciements s'adressent également à Messieurs les membres du jury, Monsieur Sebban Omar, Maître de conférences à l'université de Tlemcen, et Monsieur Retiel Nouredine, Professeur à l'Université de Mostaganem, qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'examiner le présent travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

Je tiens finalement à remercier vivement le Professeur Benguediab Mohamed pour sa contribution inestimable, ses encouragements et son soutien.

Résumé :

La cheminée solaire est un dispositif solaire conçu pour transformer l'énergie des rayons solaires en énergie cinétique qui à son tour est transformée en énergie mécanique puis électrique. Le fonctionnement est basé sur l'échauffement par effet de serre d'un volume d'air, l'air chaud à masse volumique moins dense soumis à la poussée d'Archimède engendre un mouvement d'ascension créant un vent à la base de la cheminée. L'énergie cinétique du fluide sera exploitée pour faire tourner une turbine à vent. La cheminée solaire est déjà mise en application et a montré des résultats acceptables dans le domaine du développement et d'exploitation des énergies renouvelables. Cependant, l'investissement de départ est très important. De nombreux pays comptent sur l'apport énergétique de cette technologie pour diminuer leur production de gaz effet de serre. On peut aussi intégrer cette technologie de cheminée solaire dans le bâtiment pour créer une aération naturelle grâce à la convection naturelle.

Le présent travail porte sur l'étude numérique et expérimentale des paramètres géométriques de la cheminée solaire sur le comportement aérodynamique et thermique de l'écoulement de l'air. Plusieurs configurations ont été proposées dans le but d'optimiser la configuration géométrique la plus performante. Les équations de conservation de la masse, continuité et de l'énergie sont résolues par la méthode des volumes finis. Un prototype de cheminée solaire est réalisé dans notre laboratoire afin d'effectuer les tests expérimentaux.

Les résultats obtenus montrent que la jonction arrondie (cheminée collecteur) ainsi que l'augmentation du rayon du collecteur et l'angle d'inclinaison du toit du collecteur contribuent favorablement sur la vitesse d'écoulement pour atteindre son maximum au pied de la tour. Ce pendant la hauteur et l'ouverture de la cheminée améliore le tirage à l'intérieur de la tour, d'où des vitesses importantes sont enregistrées. Un bon accord entre l'expérimentation et les résultats de la simulation est observé.

Mots clés : *Cheminée solaire, hauteur, inclinaison, Arduino, volume finis.*

Abstract

The solar chimney is a solar device designed to transform the energy of the sun's rays into kinetic one, which in "turn" will be transformed into mechanical and then electrical energy. The operation is based on the heating by greenhouse effect of a volume of air. The hot air with less dense density generates an ascending movement, and creates a wind at the base of the fireplace. The kinetic energy of the fluid will be used to turn a wind turbine. The solar chimney has already been implemented and has shown acceptable results in the field of development and the usage of renewable energies.

Therefore, many countries rely on this technology and invest in order to reduce their production of greenhouse gases.

This solar chimney technology can also be integrate into the building to create natural ventilation.

The present work concerns the numerical and experimental study of the geometric parameters of the solar chimney on the aerodynamic and thermal behavior of the air flow. Several configurations were propose with the aim of optimizing the most efficient geometric configuration. The conservation equations for mass, continuity and energy are solve by the finite volume method. A prototype solar chimney is made in our laboratory in order to perform the experimental tests.

The results obtained show that the rounded junction (collector chimney), as well as the increase in the radius of the collector and the angle of inclination of the collector roof, favorably contributes to the flow speed to reach the maximum at the bottom of the tower. This

hanging from the height and the opening of the chimney improves draft in the tower, where high speeds are recorded. A good agreement between the experiment and the results of the simulation are observed.

Keywords : Solar chimney, height, inclination, Arduino, finite volume method.

ملخص

المدخنة الشمسية لتوليد الطاقة الشمسية عبارة عن جهاز شمسي مصمم لتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حركية ، والتي بدورها تتحول إلى طاقة ميكانيكية ثم كهربائية. تعتمد العملية على تسخين الدفيئة للحصول على حجم من الهواء، ويخلق الهواء الساخن ذو الكثافة حركة تصاعدية تخلق رياحاً عند قاعدة الموقد. سيتم استخدام الطاقة الحركية لتشغيل توربينات الرياح. تم بالفعل إنشاء المدخنة الشمسية وقد أظهرت نتائج مقبولة في تطوير واستغلال الطاقات المتجددة. تعتمد العديد من الدول على هذه التكنولوجيا من أجل تقليل إنتاجها من غازات المسببة في الاحتباس الحراري. يمكن أيضاً دمج تقنية المدخنة الشمسية هذه في المبني لإنشاء تهوية طبيعية. يتعلق العمل الحالي بالدراسة العددية والتجريبية للخصائص الهندسية للمدخنة الشمسية على السلوك الديناميكي الهوائي والحراري لتدفق الهواء. تم اقتراح العديد من الحلول بهدف تحسين التركيب الهندسي الأكثر كفاءة. يتم حل معادلات الحفظ للكتلة والاستمرارية والطاقة بطريقة الحجم المحدود. تم صنع نموذج أولي لمدخنة شمسية في مختبرنا من أجل إجراء الاختبارات التجريبية. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن الوصلة المستديرة (مدخنة المجمع) وكذلك الزيادة في نصف قطر المجمع وزاوية ميل سقف المجمع تساهم بشكل إيجابي في سرعة التدفق للوصول إلى الحد الأقصى لسرعة عند أسفل البرج. لوحظ اتفاق جيد بين التجربة ونتائج المحاكاة.

الكلمات مفتاحية: مدخنة شمسية , ارتفاع , ميل , أردوينو

Sommaire

<i>Introduction générale</i>	2
<i>CHAPITRE I Généralités sur les cheminées solaires</i>	
I.1 Introduction	5
I.2 Principe de fonctionnement d'une centrale solaire à cheminée	6
I.3 Projets de centrale solaire à cheminée	7
I.3.1 Prototype de Manzanares	8
I.3.2 Le projet de Borunga	9
I.3.2 La centrale solaire à cheminée d'Arizona	10
I.3.5 La centrale solaire à cheminée de Chine	11
I.3.2 Projet Espagnol, Ciudad Real	11
I.4 Montagnes solaires du français Raphaël Menard groupe OTH	12
I.5 Cheminées solaires flottantes du grec Christos Papageorgiou	13
I.6 Tour Energétique	14
I.7 La Tour d'Energie Bidirectionnelle (Concept hybride)	14
I.8 Tornades artificielles, vortex	16
<i>CHAPITRE II Etude bibliographique</i>	
II.1 Introduction	18
II.2 Travaux Théoriques et expérimentaux	18
II.3 Travaux analytiques et de numériques	23
<i>CHAPITRE III Formulation mathématique et approche numérique</i>	
III.1 Introduction	32
III.2 Modélisation mathématique	32
III.2.1 Hypothèses	32
III.2.2 Equation de continuité	33
III.2.3 Equation de quantité de mouvement	33
III.2.4 Equation d'énergie	34
III.3 Approche numérique	34
III.3.1 Equations moyennées	34
III.3.2 Modélisation de la turbulence	35
III.3.2.1 Modèle de fermeture $k - \varepsilon$	35
III.3.2.2 Conditions aux limites	38
III.3.2.3 Procédure de résolution numérique	39
<i>CHAPITRE IV Système d'acquisition et procédure expérimentale</i>	
IV.1 Introduction	41
IV.2 Le DS18B20 et Le LM393	41
IV.3 Arduino IDE version 1.8.1	42
1) La partie Hardwar	42
2) La partie software (Logiciel)	43
IV.4 LabVIEW version 2012	44
IV.5 Montage du Système d'acquisition	44
IV.5.1 Connexion des capteurs DS18B20 avec Arduino	44
IV.5.2 Installation de la bibliothèque pour DS18B20	45
IV.5.3 Recherche d'adresses de DS18B20	45

IV.5.4	Exploitation des données (LabVIEW)	47
IV.6	Description du Prototype confectionné	48
IV.7	Procédure expérimentale	49

CHAPITRE V *Résultats et discussions*

PARTIE EXPERIMENTALE

V.1	Introduction	52
V.2	Effet de la hauteur de cheminée	52
V.3	Effet de de l'angle d'inclinaison du collecteur	56
V.4	Effet de l'angle d'inclinaison sur la vitesse de l'écoulement	59

PARTIE NUMERIQUE

V.1	Introduction	65
V.2	Configuration de base	65
V.2.1	Maillage	66
V.2.2	Conditions aux limites	67
V.2.3	Résultats et discussions	69
	• Contours de vitesses	69
	• Distribution de la température	71
V.3	Simulation paramétrique	72
V.3.1	Maillage	72
V.3.2	Résultats et discussions	73
V.3.2.1	Influence de la hauteur de la cheminée et l'angle β du collecteur	73
	a) Effet de la hauteur de cheminée	73
	b) Effet de l'angle d'inclinaison du toit du collecteur	74
V.3.2.2	Influence de l'angle d'ouverture de la cheminée (α°) et le rayon du collecteur	76
V.3.2.3	Influence de l'angle d'ouverture de la cheminée (α°) et l'angle (β°) du collecteur	80
V.4	Comparaisons entre les travaux Expérimentaux et numériques	82
V.5	Conclusion générale	84

Conclusion générale et perspectives

Annexe

INTRODUCTION GENERALE :

L'énergie est la base de toute activité humaine. L'utilisation des énergies renouvelables est très ancienne dans l'histoire de l'humanité. Cependant, depuis l'avènement de la révolution industrielle les besoins en énergie sont tournés vers les énergies d'origine fossile (charbon, pétrole, gaz, matière nucléaire) au détriment du développement et l'application des énergies renouvelables. Aujourd'hui, une grande partie de la demande mondiale en énergie provient de ressources fossiles, quoique leurs réserves sont limitées et leur usage produit de plus en plus de pollution dans la terre dont l'effet est, actuellement, manifeste (fonte des glaciers, disparition d'espèces animale et végétales) . Certains pays développés se sont orientés vers l'énergie nucléaire qui présente des préjudices catastrophiques en cas d'explosion de centrales nucléaires d'une part et des problèmes de stockage du déchet de combustible radioactif d'autre part.

Si globalement, le monde scientifique est à l'origine de la condamnation des producteurs des gaz à effet de serre, certaines études [1,2] et [3] préconisent l'effet de serre naturel qui permet de maintenir à la surface de la terre une température relativement constante propice à la vie.

La crainte de la détérioration de l'environnement causée par l'usage des énergies fossiles, a incité au développement de systèmes d'exploitation des énergies renouvelables permettant de diminuer voire éviter progressivement l'usage des énergies fossiles. Le développement de tels systèmes demeure, donc, un devoir obligatoire. De part d'être inépuisables, propres, gratuites et respectueuses de l'environnement, Les énergies renouvelables seraient la source de tous les besoins énergétiques du futur [4].

Nous citons par exemple à titre indicatif l'énergie solaire, l'éolienne, géothermique, hydraulique et biomasse qui peuvent être converties en énergie électricité à grande échelle. Cependant, elles présentent un inconvénient commun par leur caractère imprévisible et leur dépendance des conditions météorologiques et climatiques variables dans le temps. Alors, cela exige obligatoirement des systèmes de stockage coûteux et ou d'hybridation. On cite comme exemple, la conversion du rayonnement solaire, par des systèmes photovoltaïques ou des systèmes solaires thermiques.

Le photovoltaïque constitue actuellement le moyen le plus répandu et le plus mature exploitant l'énergie solaire. Il a l'avantage de transformer l'énergie du soleil directement en électricité à petites et grandes échelles, ce qui permet même à des particuliers à produire leurs besoins en énergie en installant des panneaux photovoltaïques sur les toits de leurs maisons.

Les centrales thermiques à vapeur solaires qui convertissent, indirectement, l'énergie solaire en électricité via le changement de phase d'un fluide. Leur rendement dépend de leur taille. Une

production à petite échelle n'est pas envisageable. Dans les régions chaudes où le rayonnement solaire est important, les centrales solaires thermiques ont un meilleur rendement que le photovoltaïque.

Les centrales solaires à cheminée (CSC) partent d'un principe très simple et reposent sur des technologies bien maîtrisées (serre, turbines, cheminée). La taille d'un tel projet, économiquement intéressant est importante, par conséquent, elle peut présenter des risques appréciables pour d'éventuels investisseurs. Ceci nous a incités à essayer d'étudier un type de ces centrales afin de minimiser ces risques.

Le présent travail, numérique et expérimental, portant sur une centrale solaire à cheminée, est constitué de cinq chapitres :

Le premier et le second chapitre présentent, respectivement, des généralités sur les centrales solaires à cheminée et un aperçu sur des travaux antérieurs réalisés dans ce domaine.

Le troisième chapitre consiste à définir la formulation mathématique des équations qui décrivent l'écoulement dans la centrale étudiée ainsi que les procédés numériques pour la résolution de ces équations.

Le dispositif expérimental et le système d'acquisition de données sont représentés dans le quatrième chapitre.

Le cinquième chapitre présente les résultats numériques et expérimentaux et leur interprétation.

I.1 Introduction

Face au défi du réchauffement planétaire, les énergies renouvelables intéressent de plus en plus les décideurs et usagers. Ainsi, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie éolienne, les bioénergies et la géothermie sont vouées, dans un avenir proche, à se développer partout dans le monde. Chaque région a des atouts différents. C'est déjà une réalité qu'il est judicieux d'étendre au plus grand bénéfice de tous : les gestionnaires, les utilisateurs et l'environnement. Leurs développements contribuent à la préservation de l'environnement et au respect du protocole de Kyoto.

Les perspectives de développement de l'énergie solaire sont resplendissantes à long terme puisque c'est une énergie abondante, non polluante, gratuite et quasiment inépuisable.

La "gratuité" de cette source d'énergie est encore bien trop chère par rapport au pétrole, au gaz et au charbon qui restent beaucoup plus accessibles. La révolution industrielle résulte d'ailleurs, en grande partie, de cette énergie bon marché et facilement disponible. En effet, le prix de l'énergie n'est pas seulement le prix de sa matière première, mais c'est le prix de son extraction, de sa mise à disposition. Contrairement aux énergies fossiles, le coût de l'énergie solaire n'est pas proportionnel au flux d'énergie consommée mais il est presque entièrement concentré dans l'investissement initial.

Grâce à diverses techniques, le rayonnement solaire peut être transformé en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment, en chaleur et en électricité. Pour capter directement une partie de cette énergie, des procédés ont été développés et sont constamment améliorés. Notre travail est consacré à l'étude de procédés utilisés pour la production de l'électricité à partir du rayonnement solaire, en particulier, les centrales solaires à cheminée (CSC). La centrale solaire à cheminée est un concept destiné à produire de l'électricité en masse et à faible coût, sans utilisation de combustible fossile et sans la moindre émission de gaz à effet de serre. Le concept combine plusieurs effets et forces naturels (effet de serre, effet cheminée, effet Venturi, force de Coriolis). Validé par plusieurs travaux, l'ensemble fonctionne aussi bien de manière autonome et de manière permanente quel que soit l'ensoleillement et le régime des vents. Il constitue un concept élaboré et performant que tout ce qui a été conçu jusqu'à présent dans le domaine de la production électrique. Il est, en particulier, bien plus efficace et économique que les dispositifs utilisant des éoliennes, des cellules photovoltaïques ou des tours solaires.

L'idée de base est que l'électricité pourrait être produite à partir d'un système hybride solaire éolien composé de trois parties : Un collecteur, des aéro-génératrices, et une cheminée (Fig. I.1). Son principal avantage est qu'elle peut fonctionner sans intermittence en utilisant le

rayonnement solaire direct et diffus le jour et la chaleur de la croûte terrestre la nuit. Même sous un ciel couvert, le rayonnement diffus peut être exploité par les CSC pour la production d'électricité.

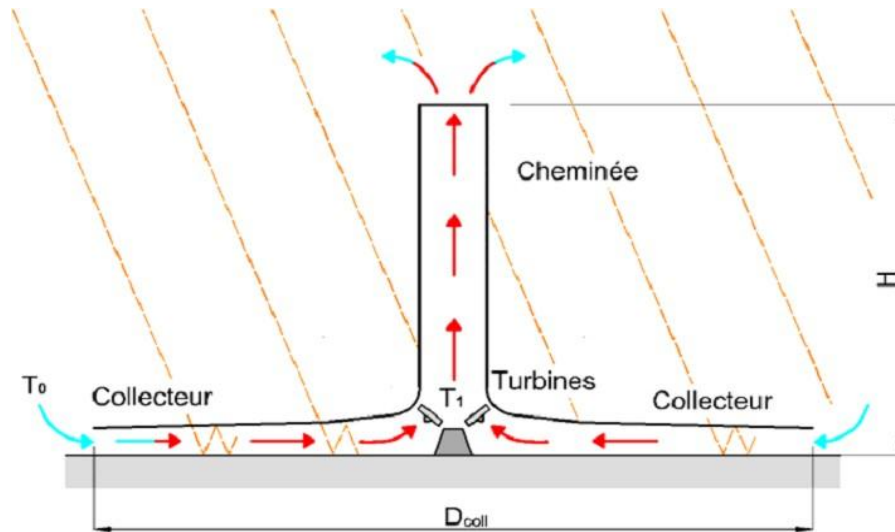


Fig. I.1 Schéma d'une centrale solaire à cheminée

I.2 Principe de fonctionnement d'une centrale solaire à cheminée

La centrale solaire à cheminée est constituée de trois éléments essentiels, à savoir, le collecteur solaire, la cheminée ou tour et la turbine qui nous sont, séparément, familiers. Leur combinaison pour produire de l'électricité a été déjà décrite en 1931 [1].

L'air est chauffé par les rayons solaires, sous la couverture transparente (plastique ou verre) du collecteur, puis s'écoule d'un écoulement ascendant suivant un itinéraire constitué par le capteur et la cheminée. La couverture transparente et le sol en dessous du couvercle constituent le collecteur solaire. Au milieu du collecteur est placée une cheminée verticale avec une ouverture à sa base, d'où s'écoulera l'air sortant du collecteur. La jonction entre la couverture transparente et la base de la cheminée est hermétique. Son principe de fonctionnement se base sur le fait que l'air chaud étant plus léger que l'air froid, s'élève. L'air chaud est produit par l'effet de serre dans le collecteur qui peut s'étaler horizontalement sur plusieurs dizaines de mètres sur la surface du sol. La hauteur du capteur sous la couverture peut augmenter dans la direction de la cheminée dans le but de dévier le mouvement de l'air en mouvement vertical avec une perte minimale due au frottement, comme elle peut diminuer dans le but de diminuer la section de passage du fluide et de ce fait, comme le débit massique reste constant, augmenter la vitesse du fluide au niveau de l'entrée de la cheminée. La tour (cheminée) convertit le flux de chaleur capté par le collecteur en énergie cinétique (courant de convection) et énergie

potentiel (chute de pression dans la turbine). Ainsi la différence de densité de l'air causée par l'élévation de température dans le collecteur joue le rôle d'une force d'entraînement. Le déplacement de l'air permet à des turbines situées à l'embouchure de la cheminée de produire de l'électricité à travers des génératrices qui leurs sont couplées. La centrale reste opérationnelle pendant de longues périodes, du fait que, le sol a la capacité d'emmagasiner la chaleur reçue durant le jour et de la libérer suivant le gradient de température sol -air et les coefficients d'échange thermique. Si on désire augmenter la capacité de stockage, Kreetz [2] propose de fixer des tubes noirs remplis d'eau côte à côte sur la surface du sol au-dessous de la couverture du collecteur (fig. I.2). Les tubes seront remplis une fois et demeurent fermé de sorte que l'évaporation n'ait pas lieu.

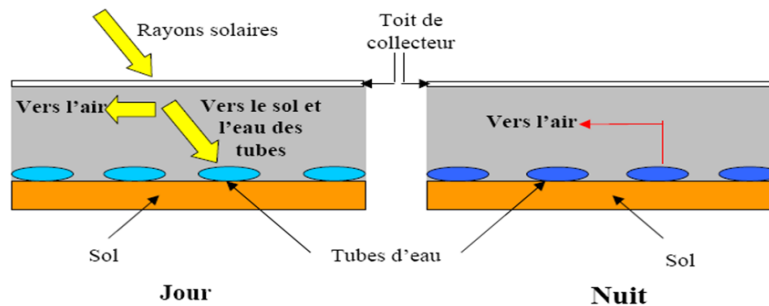


Fig. I.2. Principe de stockage de l'énergie thermique avec des tubes remplis d'eau

I.3 Projets de centrale solaire à cheminée

Depuis le début des années 2000, la prise de conscience générale de la problématique environnementale et climatique, concrétisée par les accords de Kyoto en 1997, ainsi que le flou sur l'étendue des réserves d'énergies fossiles, ont relancé les efforts pour élargir la diversité énergétique avec un regain d'intérêt notoire pour l'énergie solaire, selon une approche révisée et des objectifs ambitieux [3]. Il est aujourd'hui reconnu que la plus grande ressource d'énergie techniquement accessible sur la planète est disponible dans les régions désertiques autour de l'équateur [4]. Cette ressource qui est l'énergie solaire est la seule ressource énergétique (renouvelable ou fossiles compris) capable de pourvoir répondre à la totalité de la demande énergétique mondiale sur le très long terme [5].

Dans le concept DESERTEC EU-MENA des études estiment possible d'ici à 2050, la construction au Moyen-Orient et en Afrique du Nord (MENA: Middle East and North Africa) des centrales solaires suffisantes, non seulement pour satisfaire la demande locale, mais aussi pour exporter 200 GWe à 300 GWe, vers l'Europe via des lignes à courant continu sous haute tension (ou HVDC: High-Voltage-Direct-Current), soit une capacité de 700 TWh/an [6],

autrement dit l'équivalent de la production d'électricité d'origine nucléaire de toute l'Europe en 2012. De nombreux pays se sont engagés dans la construction de centrale solaire à cheminée, tels que la Chine, l'Espagne et les Etats unis.

I.3.1 Prototype de Manzanares

Ce projet pilote à petite échelle est le résultat de la collaboration entre le gouvernement espagnol et les concepteurs allemands Schlaich Bergermann & Partner [7, 8]. L'installation a fonctionné pendant 7 ans de 1982 à 1989 prouvant ainsi que ce concept fonctionnait fournissant ainsi des données utiles pour concevoir des modifications applicables à d'autres échelles, capables de produire des bénéfices.

Les dimensions principales et les données techniques de ce prototype sont données dans le tableau I.1 suivant :

Hauteur de la cheminée	194.6 m
Diamètre de la cheminée	10.16 m
Hauteur moyenne de la couverture	1.85 m
Différence de température dans le collecteur ΔT	20° C
Puissance électrique nominale	50 kW
Surface du collecteur en membrane plastique	40 000 m ²
Surface du collecteur en verre	6 000 m ²

Tab.I.1 Données techniques du prototype de Manzanares



Fig. 1.3 Prototype de Manzanares (Espagne) [9]

I.3.2 Le projet de Borunga [10]

Le projet le plus ambitieux aujourd'hui est celui de Borunga, en Australie (fig. 1.4). Il est développé par la société EnviroMission en collaboration avec le bureau d'ingénierie civile allemand SBP (Schlaich, Bergemannund Partner). La centrale aura une tour de 1000 m de hauteur en béton armé et un diamètre du collecteur de 7000 m. Elle devrait fournir 200 MW de puissance électrique. Les coûts d'investissements sont estimés à 400 millions d'euros. Comme l'électricité produite par la tour solaire est estimée quatre fois plus chère que celle d'une centrale thermique au charbon, les développeurs d'EnviroMission comptent sur les revenus d'autres activités telles que le tourisme, pour rendre le projet attractif et l'énergie produite compétitive. Les dimensions principales et les données techniques du prototype sont données dans le tableau I.2.

Hauteur de la cheminée	1000 m
Diamètre de la cheminée	120 m
Diamètre du collecteur	7000 m
Hauteur moyenne de la couverture	1.85 m
Température de l'airchauffé	70°C
Puissance électrique nominale	200 MW
Puissance nominale des 32 turbines	6.25 MW
Prix de production de l'électricité	0.08 €/kWh
Prix d'investissement	2 €/W

Tab.I.2 Données techniques du projet de Borunga



Fig. 1.4 Centrale solaire à cheminée de Borunga

I.3.3 La centrale solaire à cheminée d'Arizona [11]

Le désert de l'Arizona reçoit en permanence un rayonnement solaire abondant maintenant la température de l'air à 40°C. L'idée est donc de créer un effet de serre à la base d'une tour, de sorte que la température au niveau du sol puisse être augmentée jusqu'à 80 ou 90 degrés. L'air chaud ainsi créé s'engouffre dans la tour et se dirige de bas en haut. Des turbines intégrées au dispositif bénéficient ensuite de l'énergie cinétique de l'air chaud pour fonctionner et produire de l'électricité. La firme australienne Enviro- Mission, spécialisée dans le développement de tours solaires productrices d'énergie, développe actuellement un projet technologique de grande envergure dans le désert de l'Arizona (Fig. 1.5). Faithful & Gould, société nord- américaine de conseil en construction, s'est associée au projet pour ériger cette centrale solaire de 200 MW. Avec la génération de cette puissance électrique, 150 000 foyers américains pourront être alimentés. La SouthernCalifornia Public Power Authority a déjà accepté d'acheter de l'électricité produite par la tour d'EnviroMission pendant les 30 prochaines années. L'avantage majeur d'après les concepteurs repose sur une génération d'énergie en continu pendant 80 ans, sans avoir pratiquement besoin d'entretien.



Fig. I.5 la centrale d'Enviro- Mission en Arizona

I.3.4 La centrale solaire à cheminée de Chine

Il s'agit d'un système de centrale électrique solaire à cheminée dans le Jinshawan, ville de Wuhai en Chine du Nord dans la région autonome de la Mongolie intérieure, où est installée la première usine du pays qui combine l'énergie solaire et l'énergie éolienne pour la production d'électricité [11]. L'unité de production de 200 kW de puissance peut fournir 400.000 kWh d'électricité par an, épargnant ainsi l'équivalent des émissions de 100 tonnes de carbone et économisant 900 tonnes d'eau, par rapport à la production d'énergie au moyen d'une centrale thermique. Soutenu par le Ministère de la Science et de la Technologie du gouvernement régional autonome de Mongolie intérieure, le projet a été Co-conçu et développé par l'Université des sciences et de la technologie de Mongolie intérieure (IMUST) et l'Université Polytechnique de Madrid, en Espagne. La centrale est composée de trois éléments à savoir le capteur solaire, la cheminée et l'aérogénérateur. Sous la couverture en verre, exploitant l'effet de serre, le sable chauffe en absorbant la chaleur du soleil. Le flux d'air chaud transmis à la cheminée assure la production d'électricité en faisant tourner la turbine à l'intérieur de la tour. Le sable est chauffé par le soleil pendant la journée. Une partie de cette énergie est stockée, puis la chaleur est libérée pendant la nuit permettant à la turbine de continuer à fonctionner. La construction a démarré en mai 2009, s'effectuant en trois phases jusqu'à couvrir une superficie totale de 277 hectares et une capacité de production totale de 27,5 MW, après la phase finale dont l'achèvement était prévu en 2013. La puissance générée par l'usine serait ensuite transférée au réseau électrique. D'autres centrales solaires à cheminée de ce genre seront construites, en prenant avantage de 2,6 millions de kilomètres carrés de ressources du désert de Chine.

I.3.5 Projet Espagnol, Ciudad Real [12]

La tour, la plus haute en Europe, s'élancera dans la localité de Fuente el Fresno au centre d'un collecteur solaire en verre. Elle fournira l'équivalent en énergie de 140 000 barils de pétrole et évitera l'émission dans l'atmosphère de 78 000 tonnes de dioxyde de carbone. Réalisée en collaboration avec la compagnie allemande Schlaich Bergermann, par les sociétés espagnoles IMASA et CAMPO3. Les dimensions principales et les données techniques du projet Espagnol sont les suivantes :

- Une cheminée de 750 m de hauteur.
- Un collecteur de 3 km de diamètre, couvrant 350 hectares, dont 250 hectares pourraient être utilisés pour la culture de légumes sous serre.
- Vitesse de l'air dans la cheminée atteignant 12 m/s (43 km/h).

- Puissance de l'installation 40 mégawatts, soit la demande en électricité d'environ 120 000 personnes.
- Coût du projet est d'environ 240 millions d'euros.
- En complément de la production en électricité, le projet permettrait également l'installation d'équipement de télécommunication et de surveillance contre les incendies, et devrait revêtir un aspect touristique en prévoyant un accès au public.

I.4 Montagnes solaires du français Raphaël Menard groupe OTH [13]

Le projet ELIOTH est un système de tour solaire inclinée épousant la forme des montagnes permettant son intégration dans le paysage naturel. La surface du globe fournit des appuis naturels grâce au relief, dès lors, monter à 1000 ou 3000 mètres d'altitude ne représente plus un exploit technique majeur, dans la mesure où le conduit de la cheminée épouse le relief et prend appui régulièrement sur le sol (Fig. I.6).

La société Elioth vise les 500 MW. C'est à dire l'équivalent d'une centrale nucléaire, pour un coût de construction pouvant être inférieur à 1€ par watt installé. Ce projet vise à utiliser les dénivellations naturelles des montagnes pour canaliser la chaleur du soleil en centrale de production d'électricité écologique.

L'innovation du projet Elioth est aussi sa modestie, car le jour où l'humanité disposera d'une source d'énergie efficace et propre, les montagnes solaires seront démontées très facilement, ne généreront pas de cicatrices sur le paysage grâce à leur mode constructif et se recycleront très facilement.

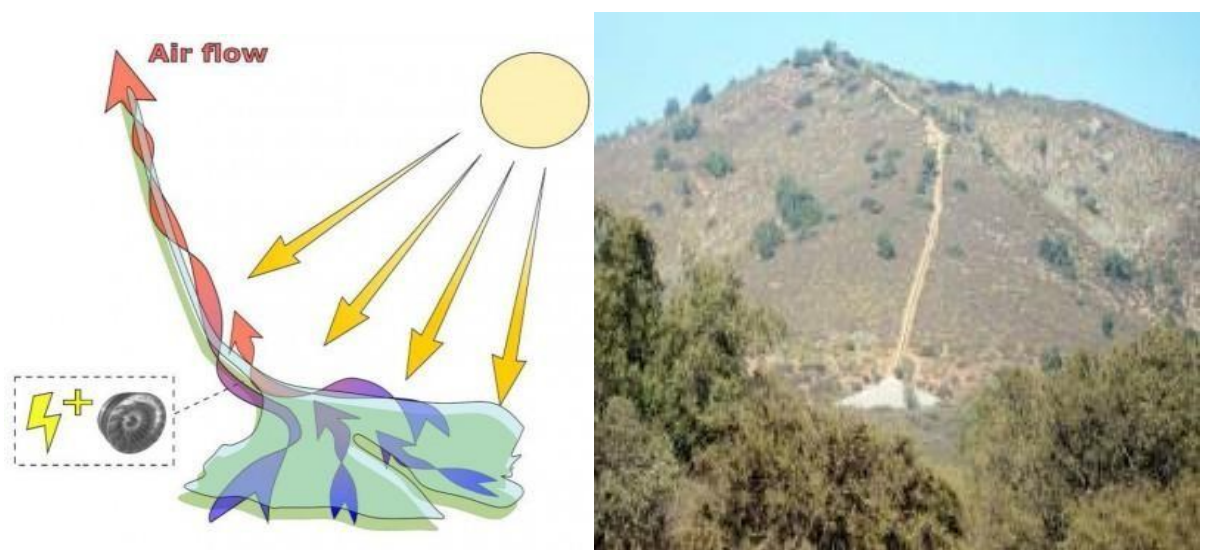


Fig. I.6 Montagnes solaires

I.5 Cheminées solaires flottantes du grec Christos Papageorgiou [14]

L'idée est de diminuer le coût de construction d'une tour solaire classique, à l'aide d'une structure plus légère que l'air, gonflée par exemple à l'hélium. Une partie fixe et lourde au sol permet son inclinaison, la partie montante et légère étant constituée de boudins gonflés. Le projet de tour solaire (fig. 1.7) de cet inventeur Grec est appelée « flottante », mais en fait il s'agit d'une structure souple et flexible fixée au sol dans un désert sec.

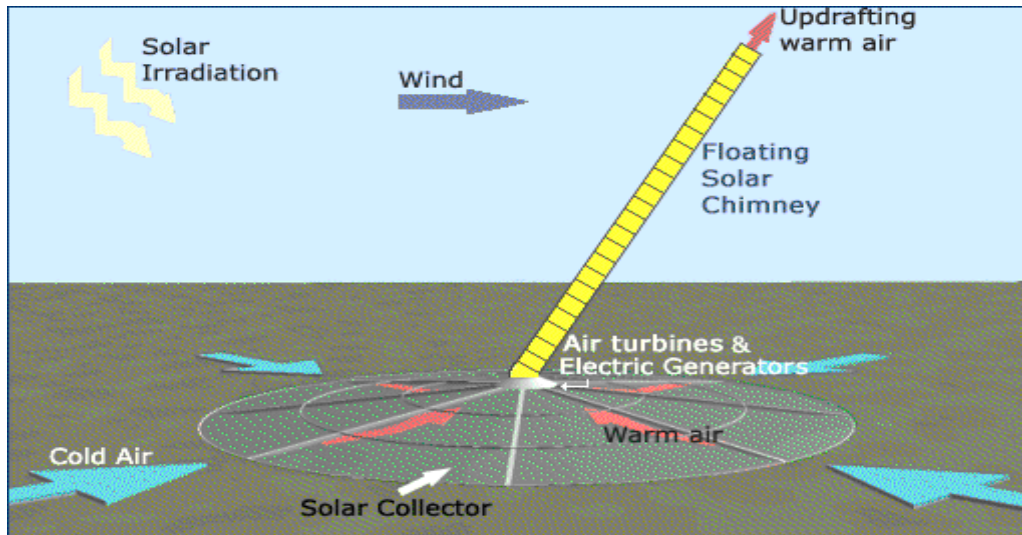


Fig.I.7. Cheminée solaire flottante

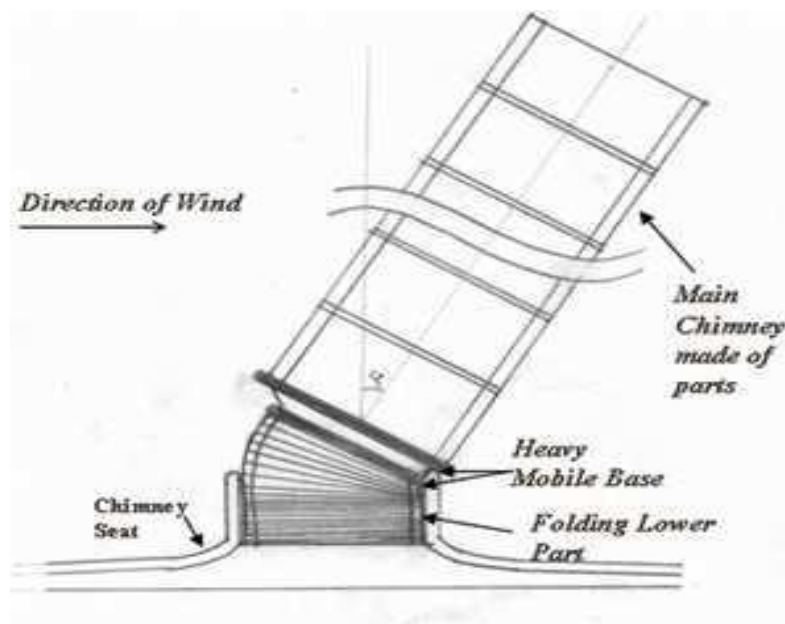


Fig.I.8. Jonction d'une Cheminée solaire flottante

I.6. Tour Energétique :

Un autre concept de cheminée est basé sur le phénomène inverse : l'air froid descend, ce qui fait que cette tour marche à l'envers des autres. Les anglophones l'ont dénommé down raft «Energy Tower » (Fig.I.9).

Une Tour Energétique est une centrale à énergie renouvelable construite de manière à évaporer de l'eau de mer en haut d'une cheminée en la vaporisant l'aide de buses, sprays, micro-nisateurs, asperseurs ou nébulisateurs. Cela va refroidir l'air, qui va devenir plus dense et de ce fait va descendre, afin d'actionner des turbines situées en bas de la tour pour produire de l'électricité, mais aussi de l'humidité cela peut servir pour de l'irrigation. L'un des avantages est qu'il n'y a pas besoin de construire de serre au pied de la tour. Ce concept, inventé par Phillip R. Carlson en 1975.

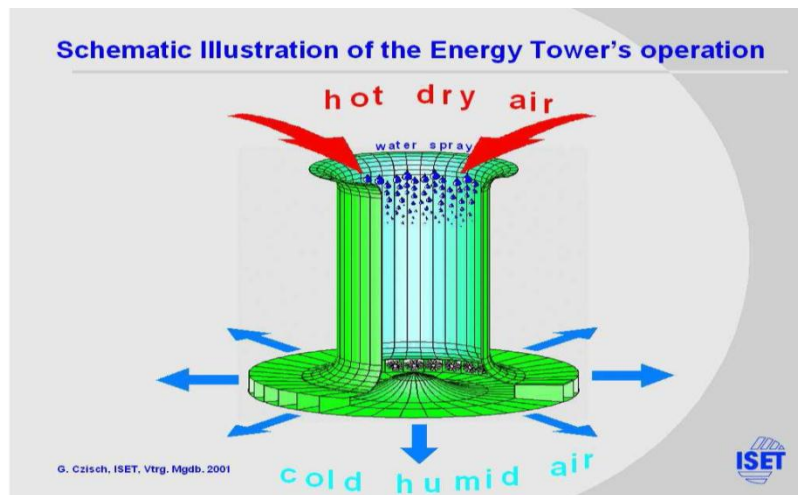


Fig I.9 Schéma illustratif de l'opération effectuée par une Tour Energétique

I.7. La Tour d'Énergie Bidirectionnelle (Concept hybride)

Selon le temps, la température de l'air ambiant est supérieure ou inférieure à celle du sol et la chaleur est transférée de l'air vers le sol ou du sol vers l'air.

Cette chaleur est utilisée pour faire tourner un engin thermique contenant un gaz à faible point d'ébullition. L'air ou le sol sont utilisés en tant que méthode de refroidissement pour l'échangeur dont le changement de température cause la convection dans la tour. L'énergie contenue dans cette convection est aussi récupérée à l'aide de turbines à air (Fig. I.10 et I.11).

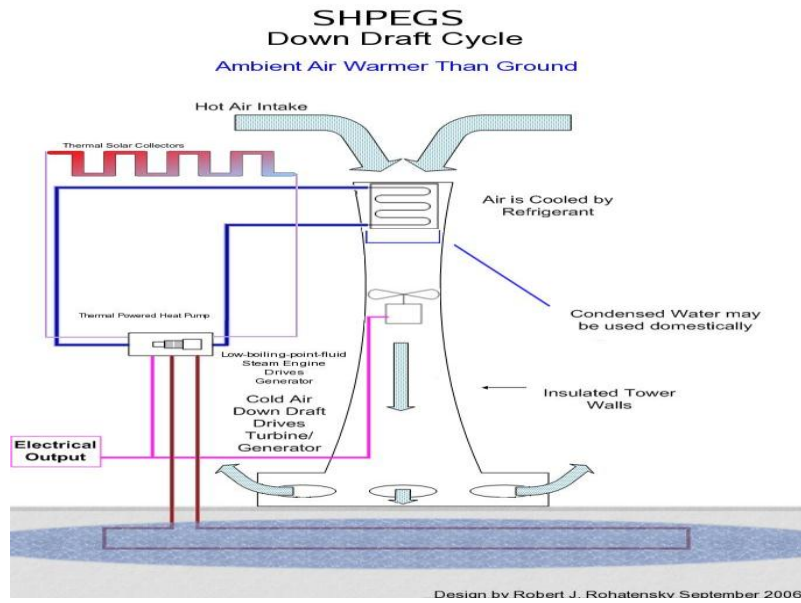


Fig I.10 : Tour d'Énergie Bidirectionnelle Down Draft cycle

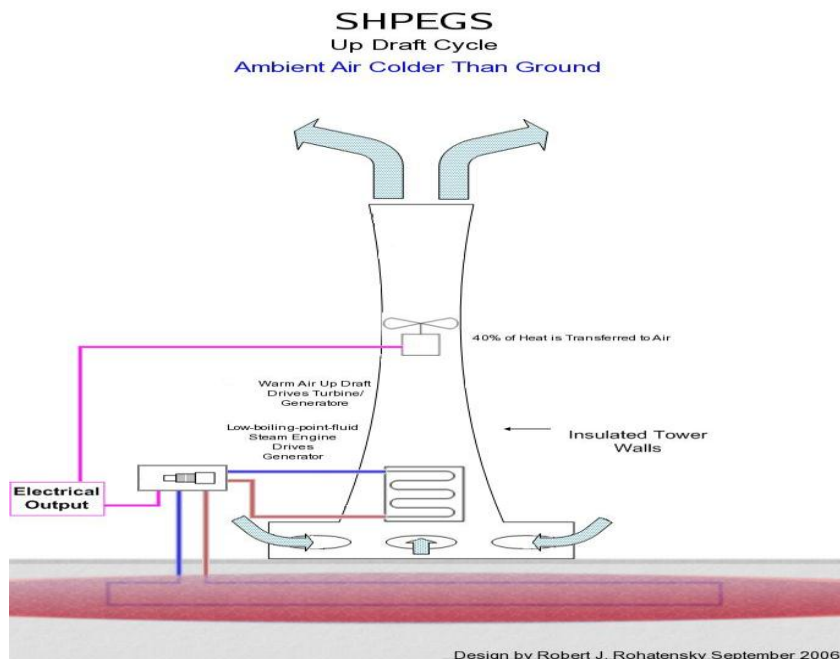


Fig.I.11: Tour d'Énergie Bidirectionnelle UpDraft cycle

I.8 Tornades artificielles, vortex

C'est une tour en forme de tuyère de Laval qui n'est utilisée que pour amorcer un phénomène atmosphérique cyclonique. Il a été construit en 1997 une maquette de 6 m de haut et la prochaine étape serait de passer à 60 m ou plus (Fig I.12).



Fig.I.12 Tour à tornades artificielles, vortex

A hauteur égale, les puissances prévues pour ces deux projets sont très différentes. Pour une tour vortex de 500 m par exemple, SUMATEL annonce plus de 1500 Mw alors que les projets allemands de tours solaires en Australie ou en Espagne avancent le chiffre de 50 MW. Cette différence de performance s'explique par la différence de hauteur du phénomène atmosphérique exploité.

Le procédé Nazare permettrait de générer un tourbillon atmosphérique telle une trombe ou une tornade qui peut atteindre 20km de haut, alors que les projets australien et espagnol exploitent l'effet de tirage d'une simple cheminée. La cheminée virtuelle de 20km de haut aurait un tirage, donc un rendement, beaucoup plus important. Dans les deux cas les lois de Carnot sont respectées. La différence de température entre les couches basses et hautes de l'atmosphère serait beaucoup plus importante dans le projet de Vortex [15].

II.1 Introduction

Le concept de la tour solaire fut formalisé en 1968 par Joorg Schlaich, ingénieur et chercheur de nationalité allemande. En 1981 et 1982, un prototype, financé par le Ministère Allemand de la Recherche et des Technologies (BMFT) et réalisé par la société d'ingénierie Schlaich Bergermann Und Partner (SBP), fut construit à Manzanares (Espagne) et fonctionna jusqu'à son arrêt en 1989. La centrale a pu fournir une puissance de 50kW en pointe. La turbine a fonctionné 3067h de jour et 244h de nuit (grâce au stockage thermique du sol) en 1987, réalisant ainsi une moyenne de plus de 8h45 par jour. A la suite de cette série d'essais, de nombreuses recherches publiques et privées ont été menées jusqu'à aujourd'hui. Le bureau d'ingénierie d'OTH, baptisé Eliotha, a breveté, au début de l'année 2006, le concept de Montagnes Solaires. Fondé sur le même principe, la cheminée est ici remplacée par un conduit qui épouse le relief montagneux.

Dans ce chapitre on passe en revue quelques travaux effectués sur les centrales solaires à cheminée afin de dégager éventuellement des points faisant objet de recherche et cadrant ainsi notre travail.

II.2 Travaux expérimentaux

Le premier prototype de centrale solaire à cheminée, d'une puissance de pointe de 50 kW, a été réalisé par une société allemande d'ingénierie structurelle, Schlaich Bergermann [1] à Manzanares en Espagne en 1981. La tour avait une hauteur de 194.6 m, un diamètre de 5.08 m, une épaisseur de paroi métallique de 0,00125 m et un collecteur de toiture en PVC de rayon de 122 m, ainsi qu'un système de turbine mono rotor, équipé de quatre pales, situé à la base de la cheminée. Ce prototype a fonctionné de 1982 à 1989 et l'électricité produite a été intégrée au réseau électrique local. En 1983, Krisst et al. [2] ont réalisé une cheminée de 10 m de haut, un diamètre de base de collecteur de 6 m et une capacité alimentation de 4 W aux Etats-Unis. Kulunk [3] a fabriqué une micro-centrale électrique de 0,14 W avec une cheminée solaire de 2 m de haut, 7 cm de diamètre et un collecteur de 9 m² à Izmit, Turquie en 1985.

En 1997, un modèle de démonstration de puissance de cheminée solaire a été construit par Pasurmarthi et Sherif [4] en Floride, deux améliorations comprenant l'extension de la base du collecteur et l'introduction d'un absorbeur intermédiaire ont été essayées sur le collecteur pour augmenter la puissance [5]. En 2002, une cheminée solaire pilote d'une puissance de 5 W a été construite sur le toit d'un immeuble par Zhou et al. [6], [7] en Chine. Cette cheminée ayant

8 m de haut et 10 m de diamètre de collecteur, a été reconstruite plusieurs fois à des fins différentes.

Un système pilote de cheminée solaire a été construit par Ketlogetswe et al. [8] au Botswana, en 2005, qui avait une cheminée en polyester renforcé de verre avec un diamètre intérieur de 2 m et une hauteur de 22 m avec une surface de base de collecte d'environ 160 m². Ils ont observé que la température de pointe maximale était enregistrée après la pointe d'irradiation maximale parce que le sol absorbait une partie de l'énergie solaire entrante, qui était ensuite libérée.

Maia et al. [9] ont construit un prototype 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 la cheminée solaire sur écoulement d'air en fonction des dimensions du prototype construit.

Kasaeian & al. [10] ont réalisé une centrale solaire à cheminée pilote avec un collecteur de 10 m de diamètre et une cheminée de 12 m de hauteur. Une différence de température 25 °C a été obtenue entre la sortie du collecteur et l'ambiance. Une zone de recirculation de l'écoulement de l'air au bas de la cheminée a été observée après le lever du soleil, que ce soit pour une journée chaude ou froide, puis l'écoulement y devient régulier à l'intérieur de la cheminée avec une vitesse maximale de 3m/s.

Shadi & al. [11] ont mis au point une installation pilote d'une centrale solaire à cheminée dans le campus sud de l'Université de Damas, en Syrie. Le capteur solaire considéré est incliné à 35° vers le sud avec une superficie approximative de 12,5 m². Le diamètre de la cheminée est de 0,31 m et sa hauteur de 9 m. Bien que les mesures aient été prises au cours de l'hiver, la température de l'air a augmenté pour atteindre une valeur maximale de 19 °C, ce qui génère une vitesse de l'air ascendant dans la cheminée atteignant une valeur maximale de 2,9 m / s.

Zou & al. [12] ont présenté un nouveau concept hybride de CSC, nommé solar enhanced natural draft dry cooling tower (SENDICT), dans le but d'augmenter l'aspiration à travers la tour en utilisant des capteurs solaires.

Bugutekin [13] a construit une CSC dans la région de l'Anatolie au sud-est de la Turquie pour étudier l'effet du diamètre de capteur sur le débit d'air et la température dans la cheminée. Les résultats ont montré que la température du sol avec la surface du collecteur, par conséquent une augmentation rapide de la température et la vitesse de l'air, à la base de la cheminée.

En 2011, une cheminée solaire à petite échelle a été construite par Najmi et al. [14] à Kerman, Iran. Les auteurs ont étudié l'influence de certains paramètres pour optimiser les performances de la cheminée solaire et ont réalisé une analyse économique. Ils ont suggéré l'utilisation d'asphalte ou de caoutchouc au bas du collecteur, de couvercle en verre à double vitrage, une

hauteur du collecteur de 1,3 m et une entrée de la cheminée à forme conique , afin d'augmenter éventuellement la puissance produite.

Dans le but d'améliorer la performance CSC, Gholam ali zadeh et al . [15] ont étudiés les effets du diamètre du collecteur et, du diamètre et de la hauteur de la cheminée sur la puissance générée pour une insolation solaire de 800 W / m^2

Mehran & al. [16] ont fabriqué un prototype de centrale solaire à cheminée (figureI-1) avec un collecteur de 3m de diamètre et une cheminée de 2m de hauteur à l'Université de Téhéran en Iran. La différence de températures entre l'entrée de la cheminée et l'ambiant était de 26.31°C .



Fig.II.1: Cheminée solaire de Téhéran

La distribution de la température et de la vitesse du fluide ont été analysées pour différentes hauteurs d'entrée du collecteur. Les données de sortie du collecteur avec différentes hauteurs d'entrée ont conduit aux résultats présentés dans les figures III-2 et III-3. Les résultats indiquent que plus l'air s'approchait de l'entrée de la cheminée plus sa température et sa vitesse augmentaient (valeurs maximal de températures de l'air de l'ordre de 323,6 k, 321,3 k et 319,6 k respectivement pour les entrées de collecteur de 6, 8 et 12 cm.

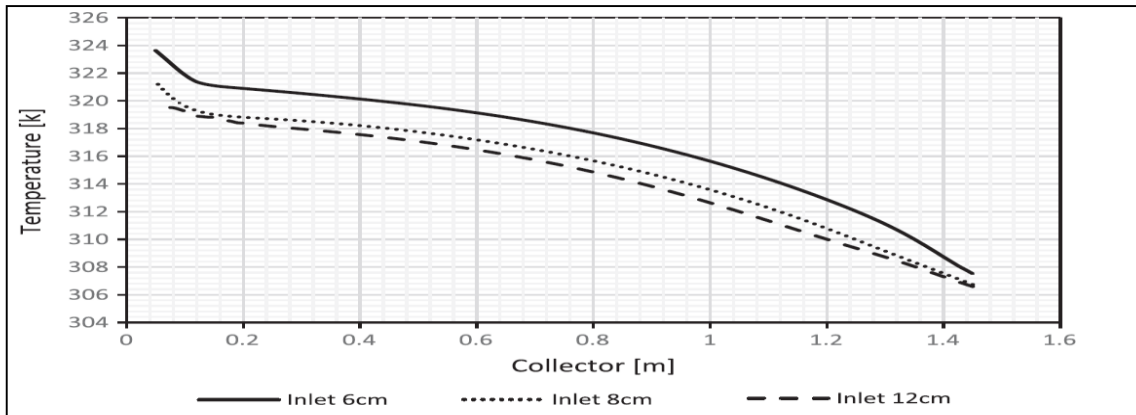


Fig. II.2. variation de température pour les entrées de collecteur de 6, 8 et 12 cm à la hauteur de 2m de la cheminée et de diamètre de la cheminée de 20cm.

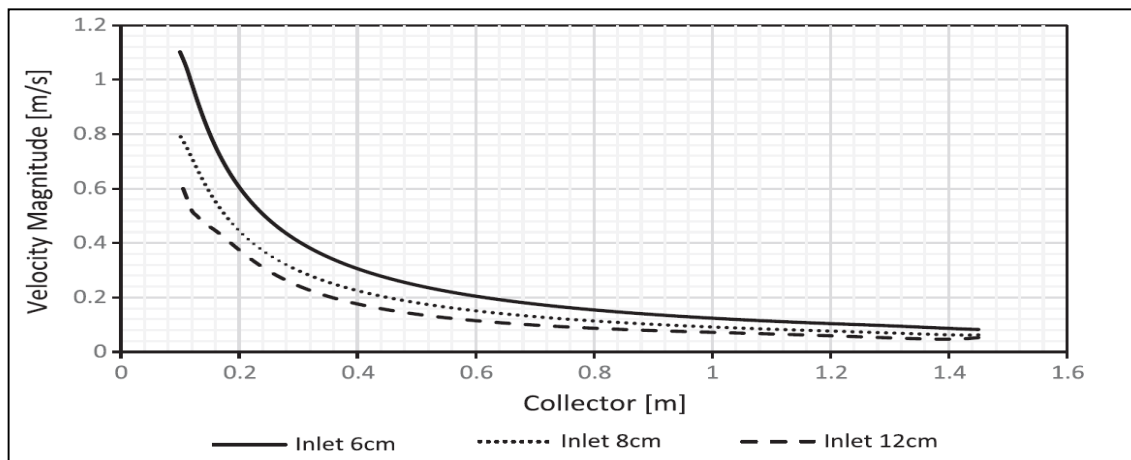


Fig. II.3. Distribution de vitesse numérique pour des hauteurs d'entrée de collecteur de 6, 8 et 12 cm une hauteur de 2 m et un diamètre 20 cm de cheminée .

Mulian et al [17] ont réalisé une nouvelle expérience sur un prototype inspiré du précédent nommé (Lola 3.0) figure II.4

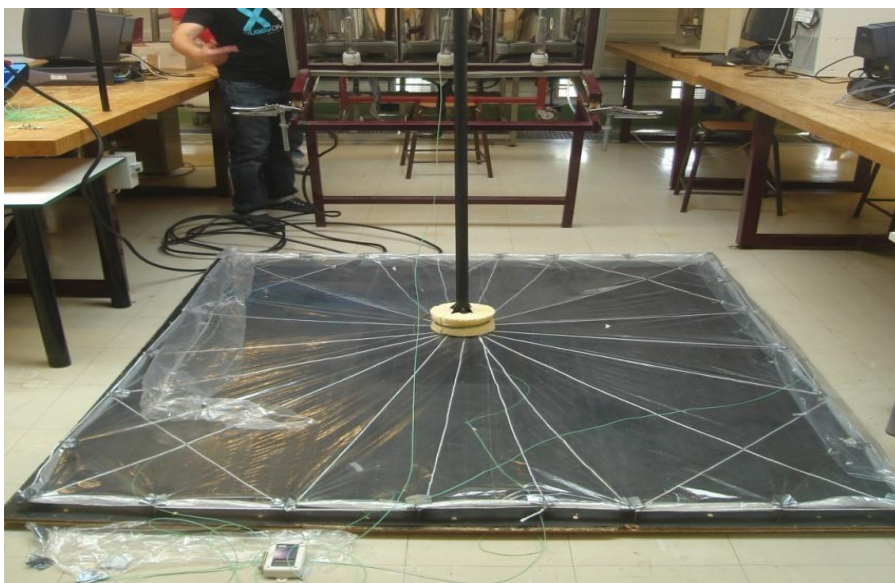


Fig. II.4 Cheminée solaire de Lola 3.0

La cheminée était d'une hauteur de 1,85 m pour un diamètre de 2,7 cm, fabriqué en PVC, le collecteur de section carrée 1,75 x 2,06 m², recouvert d'une bâche maintenue par un réseau de ficelles. Le plancher en bois de 2cm d'épaisseur était peint en noir mat. Le prototype a été installé au niveau d'un hall chauffé, assurant une température ambiante d'environ 20°C le long de l'année. Quant à la puissance de chauffe, elle est fournie par un banc de lumière d'une puissance de 1100W.

La vitesse d'écoulement à la sortie de la cheminée et la température dans différents points de la maquette ont été mesurées, en fonction du temps, dans deux cas : cheminée sans et avec insolation.

Les résultats obtenus dans le premier cas avec une température de 39 °C à la base, illustrés par la figure I.5, attestent de l'obtention d'une vitesse maximale de l'ordre de 0.62 m/s.

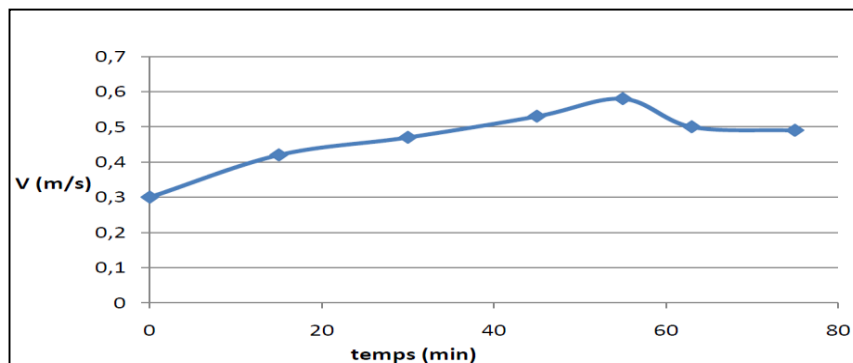


Fig II.5. Variation de la vitesse à la sortie de la cheminée en fonction du temps

Dans le deuxième cas où la température dans le collecteur était de 33,2 °C, une vitesse de 0,58 m/s a été obtenue après 55 minutes (Figure III-6).

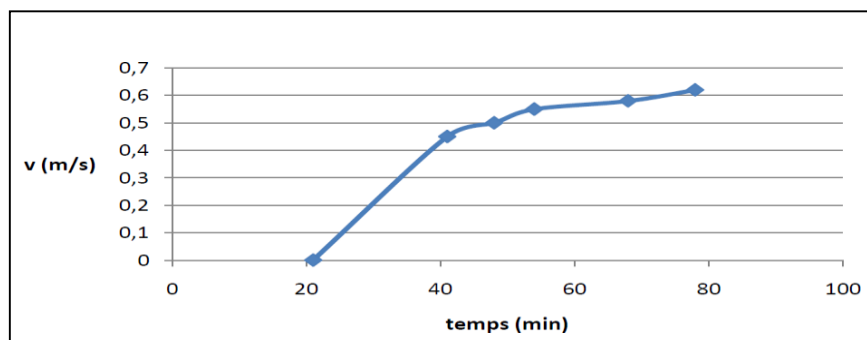


Fig.II.6: Variation de la vitesse à la sortie de la cheminée en fonction du temps avec isolation de la cheminée

En 2014, les paramètres géométriques d'une cheminée solaire ont été analysés analytiquement et numériquement par Kasaeian et al. [18] à l'Université de Téhéran, Iran. Le modèle mathématique adopté a été validé à l'aide des données expérimentales. Ils ont constaté que la configuration d'une hauteur à l'entrée de capteur de 6 cm, une hauteur de cheminée de 3 m et un diamètre de cheminée de 10 cm donnaient la meilleure performance.

Dans la même année une autre étude expérimentale a été réalisée par Khanal et Lei [19] sur une cheminée solaire destinée au refroidissement d'un local. Le flux thermique, sur la paroi active, était uniforme, de l'ordre de 100 W / m^2 à 500 W / m^2 . Il a été constaté que la vitesse du flux d'air à l'intérieur du collecteur dépendait de manière significative de l'angle d'inclinaison de ce dernier.

En 2015, Shahreza et Imani [20] ont conçu et construit une cheminée solaire avec deux intensificateurs pour intensifier l'irradiation du soleil tout autour de la cheminée solaire. Il a été conclu que l'utilisation de ces intensificateurs provoquait une augmentation de la vitesse de l'air et, par conséquent, la production d'électricité.

Dans la même année, Okada et al. [21] ont utilisé une tour de diffuseur au lieu d'une tour cylindrique pour augmenter la vitesse de l'air dans la turbine. Les résultats ont montré que ce modèle augmentait la vitesse de l'air d'environ 1,38 à 1,44 fois et que la puissance de sortie était de 2,6 à 3,0 fois supérieure à celle du type cylindrique à convection.

En 2016, Tan et Wong [22] ont évalué les effets de la vitesse de l'air ambiant et de la charge thermique interne sur le comportement de l'écoulement de l'air dans cheminées solaires.

Puis Nasirivatan et al. [23], en 2017, ont étudié l'influence du vent Corona sur les performances d'une cheminée solaire. Les résultats ont montré que la force électro hydrodynamique augmentait le coefficient de transfert de chaleur de l'absorbeur et par conséquent améliorait la puissance développée par la cheminée solaire.

II.3. Travaux analytiques et de numériques

Weinrebe et Schiel [24] ont étudié une cheminée solaire et une centrale électrique à tirage descendant. Les résultats ont montré qu'une cheminée solaire produisait trois à cinq fois plus d'électricité qu'une tour solaire ayant les mêmes dimensions de cheminée. Mulet [25] a réalisé une étude sur l'efficacité globale d'une SCPP en 1987. Pour décrire la performance d'une cheminée, les équations différentielles ont été dérivées et développées par Padki et Sherifto [26], [27] en 1988, puis une étude de faisabilité a été menée pour la production d'électricité à différentes échelles pour améliorer les conditions de vie pour des villageois, en 1989.

En 1999, Padki et Sherif [28],[29] et [30] ont analysé les performances d'une cheminée solaire en développant un modèle mathématique qui définit la puissance et le rendement de la cheminée solaire. Les équations analytiques développées ont indiqué l'effet de divers paramètres géométriques sur les performances de la cheminée. Le pourcentage d'erreur dans les prévisions du modèle analytique s'est avéré être de l'ordre de 4 à 6%.

Lodhi [31] a présenté, en 1999, une analyse complète de l'effet de cheminée et de l'efficacité. De plus, ils estiment que l'amortissement d'une installation de CSC de 100MW peut atteindre jusqu'à 20 ans.

Un modèle analytique avec des mécanismes thermomécanique a été proposé par Chitsomboon [32], en 2001, pour prédire les performances d'une cheminée solaire. Le modèle était différent, de manière significative, des modèles proposés dans la littérature dans lesquels, il considérait les interactions de l'écoulement dans la serre et l'écoulement dans la cheminée engendrant une différence de pression négligeable.

Atit & Tawit [33],[34] ont réalisé une étude comparative des résultats de cinq modèles théoriques simples sur la performance de centrales solaires à cheminée, proposées dans la littérature. Différents paramètres y étaient examinés géométriques, végétation et insolation.

Penghua & al. [35] ont montré dans leur étude que, dans une centrale solaire à cheminée, seule une fraction de la différence de pression totale disponible peut être utilisée pour faire tourner la turbine et produire de l'énergie électrique. Le rapport optimal de la chute de pression de la turbine à la différence de pression totale disponible dans une telle installation est étudié en utilisant une analyse théorique et des simulations numériques 3D. Les valeurs trouvées dans la littérature pour le rapport optimal varient entre 2/3 et 0,97. Cependant, la proportion optimale varie avec l'intensité du rayonnement solaire et se situe autour de 0,9 pour le prototype espagnol. En outre, les rapports optimaux obtenus à partir de l'approche analytique sont proches de ceux de la simulation numérique et leurs différences sont principalement causées par la négligence de pertes aérodynamiques associées à la friction et l'écoulement de séparation. Cette étude peut être utile pour l'estimation préliminaire de la performance des centrales solaires à cheminée et le choix stratégique de la puissance de régulation de leurs turbines.

Gholam ali zadeh & al. [36] ont présenté une analyse complète, analytique et numérique, pour prédire la performance d'une centrale solaire à cheminée, à Kermanen Iran, dont l'influence de l'altitude du site a été prise en compte.

Bernardes & al. [37] ont mené une étude de comparaison des méthodes utilisées pour calculer les flux de chaleur dans le collecteur et de leurs effets sur la performance de la centrale solaire à cheminée. Une étude numérique de centrales solaires à cheminée en utilisant le code

commercial ANSYS Fluent [38]. L'étude englobe une large gamme d'échelles avec des hauteurs de la tour qui varient entre 1 m (modèle de laboratoire sous-échelle) et 1000 m (la plus grande centrale envisagée).

L'optimisation des composants majeurs de la géométrie de la SCPP pour étudier et améliorer les caractéristiques d'écoulement à l'intérieur de cette dernière est réalisé dans le travail de Sandeep en utilisant un code CFD d'ANSYS CFX [39].

Fei Cao & al. [39] ont conçu un programme, basé sur TRNSYS, pour simuler les performances d'une centrale solaire à cheminée. La constatation faite est que la production d'énergie dans une CSC est plus pertinente à l'irradiation solaire locale qu'à la température ambiante.

Jing-yin Li & al. [40] ont proposé un modèle théorique complet pour l'évaluation de la performance d'une centrale solaire à cheminée (CSC), qui a été vérifié par les données expérimentales du prototype espagnol. Ce modèle tient compte des effets de l'écoulement du fluide et les pertes de chaleur et les chutes de température à l'intérieur et à l'extérieur de la cheminée.

Hurtado & al. [41], dans leur travail, ont analysé le comportement thermodynamique et la puissance que peut générer une centrale solaire à cheminée en tenant compte du sol en tant que système de stockage de chaleur, à travers une modélisation numérique dans des conditions non stationnaires. L'influence de l'inertie thermique du sol permet un gain de 10% de la puissance générée par les turbines.

Hurtado F.J & al. [42] ont effectué des simulations numériques pour étudier la performance de deux systèmes de contrôle de puissance de sortie applicable aux centrales solaires à cheminée. La variable de commande indépendante utilisée est soit le débit volumique ou la chute de pression au niveau de la turbine. Les valeurs trouvées dans la littérature pour le rapport optimal de la perte de charge au niveau de la turbine par rapport au potentiel de pression varient entre $2/3$ et $0,97$. Il est montré que le rapport optimal n'est pas constant pendant toute la journée et qu'il dépende des coefficients de transfert de chaleur appliqués au niveau du collecteur. Leur étude est une contribution à la compréhension des performances et du contrôle de la centrale solaire à cheminée et peut être utile dans la conception de turbines destinées à la centrale solaire à cheminée.

Atit & Tawit [43], dans cette étude, ont modélisé théoriquement le capteur solaire, la cheminée et la turbine. Le modèle est utilisé pour prédire les caractéristiques des performances de grandes centrales solaires à cheminée montrant ainsi la taille de la centrale, le facteur de perte de charge au niveau de la turbine et le flux solaire sont des paramètres importants pour l'amélioration des performances de cette dernière. En outre, l'étude propose, pour répondre à la demande

d'électricité d'un village typique en Thaïlande, une centrale dotée d'un collecteur de 200m de rayon et d'une cheminée de 400m de hauteur. En outre, il est montré que le rapport optimal entre la pression d'aspiration de la turbine et la pression d'entraînement disponible pour l'installation proposée est d'environ 0.84.

Le but de l'étude proposé par Roozbeh & al. [44] est de procéder à une analyse numérique plus détaillée d'une centrale solaire à cheminée. Un modèle mathématique basé sur les équations de Navier-Stokes, les équations de continuité et de l'énergie a été développé pour décrire le mécanisme de la centrale solaire à cheminée en détail. Deux simulations numériques différentes ont été réalisées pour la géométrie du prototype de Manzanares, Espagne. Tout d'abord, les équations régissant l'écoulement ont été résolues numériquement en utilisant une technique itérative. Ensuite, la simulation numérique a été réalisée en utilisant le logiciel Fluent. Les résultats ont été comparés avec les données expérimentales disponibles pour évaluer la validité du modèle. La distribution de température, les champs de vitesse et de pression dans le capteur solaire sont illustrées pour trois radiations solaires différentes. Une concordance quantitative a été obtenue entre les données expérimentales du prototype de Manzanares et les deux résultats numériques.

Gholam ali zadeh & Kim [45] ont étudié un cas tridimensionnel en régime instationnaire avec un modèle de turbulence RNG k- ϵ , élaboré à l'aide d'un code de calcul de dynamique des fluides (CFD). Dans leur étude, pour résoudre l'équation de transfert radiatif, le modèle de rayonnement à ordonnées discrètes (DO) a été mis en œuvre en utilisant un modèle de rayonnement à deux bandes. Des simulations ont été effectuées pour un système avec des paramètres géométriques identiques à ceux de la centrale Manzanares. Sur la base des résultats numériques, le profil de température au niveau de la surface du sol, le rendement du capteur thermique et la puissance ont été validés par comparaison avec des données expérimentales du prototype. L'analyse a montré que la simulation de l'effet de serre a un rôle important pour prédire avec précision les caractéristiques de l'écoulement et le transfert de chaleur dans les systèmes de centrale solaire à cheminée.

Gholamali zadeh & Kim [46] ont conçu un algorithme génétique multi-objectif pour obtenir la meilleure combinaison de paramètres géométriques de la centrale électrique, à savoir, le rayon du collecteur, la hauteur de la cheminée et le diamètre de la cheminée. Deux configurations différentes de centrales solaires à cheminée ont été envisagées à savoir la centrale pilote de Kerman et celle du prototype de Manzanares. Basé sur les solutions optimales, la meilleure configuration pour chaque centrale a été sélectionnée. Leur document fournit une conception et une méthode d'optimisation très utile pour les systèmes de centrale solaire à cheminée.

Pen-huga & al. [47] ont proposé une approche numérique tridimensionnelle intégrant le transfert par rayonnement pour étudier les effets du rayonnement solaire, de la chute de pression au niveau de la turbine et de la température ambiante sur les performances d'une centrale solaire à cheminée. Les résultats de la simulation montrent que le modèle de rayonnement est essentiel dans la prévention de la surestimation de l'énergie absorbée par la centrale solaire à cheminée (SCPP). Les prédictions de la perte de charge maximale au niveau de la turbine avec le modèle de rayonnement adopté sont plus compatibles avec les données expérimentales que celles négligeant le transfert de chaleur par rayonnement à l'intérieur du collecteur. En outre, l'effet de la température ambiante sur la puissance délivrée est négligeable.

Larbi et al. [48], dans leur travail, ont procédé à une analyse des performances d'une centrale solaire à cheminée installée dans le sud-ouest algérien. L'installation peut développer une puissance de 140 à 200 kW sur un site comme Adrar au cours de l'année, selon une estimation faite sur la moyenne mensuelle de l'ensoleillement..

Un modèle théorique détaillé a été développé par Koonsrisuk et Chitsomboon [49] en 2010, pour évaluer les performances du système d'alimentation par cheminée solaire. Ils ont présenté la plage de fonctionnement de la turbine et montré que la taille de l'installation, le facteur de perte de charge à la turbine et le flux de chaleur solaire étaient les paramètres importants pour l'amélioration performances.

Gannon et Backström [50] ont développé une analyse thermodynamique du cycle idéal de l'air pour définir les limites de fonctionnement du système, son efficacité et les relations qui lient les principales variables tout en introduisant les pertes par frottement à travers le système et les pertes cinétiques à la sortie de la cheminée. Ils ont aussi présenté des études expérimentales sur les performances de la turbine. Pastohr & al. [51] ont modélisé le prototype de Manzanares à l'aide d'un code CFD dans le but d'effectuer une analyse plus détaillée dans la description du mode de fonctionnement et la détermination du rendement du système. Ils confirment que la chute de pression dans la turbine et le débit massique, éléments décisifs sur l'efficacité du système, ne peuvent être déterminés qu'avec l'accouplement de toutes les parties d'une centrale solaire à cheminée.

Dehghani & al. [52] dans leur travail rapporte la mise en œuvre d'une méthode d'optimisation multi-objective en utilisant des techniques des algorithmes évolutionnaires afin de déterminer la configuration optimale de la centrale solaire à cheminée. Les deux fonctions objectives qui sont considérés simultanément dans l'analyse sont la puissance générée et le coût de l'installation. Les paramètres de conception de la dite centrale comprennent le diamètre du collecteur, la hauteur de la cheminée et le diamètre de la cheminée. En outre, les effets du

rayonnement solaire et de la température ambiante sur la production d'énergie électrique de l'installation ont été étudiés. Et il a été conclu que la puissance générée par la centrale pourrait être considérablement augmentée avec le rayonnement solaire. Cependant l'augmentation de la température ambiante pourrait réduire légèrement la puissance de sortie.

Bernardes [53] montre, à travers des simulations numériques du modèle mathématique adopté pour étudier l'influence de la diffusivité thermique et de l'effusivité thermique pour certaines propriétés thermiques du sol, que les matériaux avec une effusivité et une diffusivité thermique moins importantes peuvent diminuer sensiblement le pic de la puissance générée pour des périodes où le gain de chaleur est plus élevé.

Chergui & al. [54], dans l'étude des caractéristiques de l'écoulement de l'air dans une centrale solaire à cheminée, ont déterminé le champ de vitesse et la distribution de la température par la résolution des équations conservatrices qui régissent l'écoulement, en utilisant la méthode des volumes finis. Etaient étudiés aussi, l'effet du régime de l'écoulement sur l'analyse des performances des CSC.

Chergui & al. [55] ont étudié les performances d'une centrale solaire à cheminée (CSC) en fonction de quelques paramètres géométriques et physiques à savoir, la hauteur de la cheminée et l'irradiation solaire. Par la suite, ils ont effectué une modélisation bidimensionnelle d'un écoulement en régime transitoire en convection naturelle dans une géométrie semblable à celle d'une cheminée solaire pour la prédiction du comportement thermo-hydrodynamique du mouvement d'air à travers un système axisymétrique avec des conditions aux limites bien définies.

Chergui & al. [56,57] se sont penchés sur l'analyse du comportement hydrodynamique de l'écoulement d'air dans un système axisymétrique tel que les cheminées solaires, avec des conditions aux limites bien posées. La considération particulière est donnée à un exemple d'application du problème laminaire dans une convection naturelle se produisant dans une centrale solaire à cheminée.

Chergui & al. [58] ont développé un code numérique de CFD qui a été validé par les Benchmark de Vahl Davis pour la convection naturelle. L'effet des paramètres géométriques et opérationnels sur les performances d'une CSC a été réalisé. L'influence du rapport de l'élévation du toit du collecteur 'e' à la hauteur de la tour 'H' a été identifiée pour deux cas $e/H = 0.1$ et $e/H = 0.01$ avec $e = d$ diamètre de la tour. La surface du collecteur, la hauteur de la tour et la force d'entraînement de l'écoulement c-à-d. la différence de températures ont été prises en compte à travers la variation du nombre de Rayleigh (Ra). Ainsi le champ de vitesse et la distribution de la température dans le système ont été évalués en fonction du nombre de Ra.

En 2009, Koonsrisuk et Chitsomboon [59] ont établi une similitude dynamique entre un prototype et ses modèles à l'échelle en combinant huit variables primaires en une variable dimensionnel. Trois configurations physiques (entièrement géométriquement similaires, partiellement géométriquement similaires et dissemblables) ont été testées numériquement par eux pour la similitude. Ninic et Nizetic [60] ont proposé l'idée de remplacer la cheminée par une colonne vortex gravitationnelle verticale, en 2009.

Dans la même année, Zhou et al [61] ont réalisé des simulations numériques de cheminées solaires à l'aide du programme CFD avec un modèle de développement comprenant des équations tridimensionnelles (3D) Steady Navier- Stokes dans le système de coordonnées cartésiennes pour évaluer les performances d'un écoulement compressible à travers une cheminée solaire. Les solutions des équations réalisées dans ce travail étaient basées sur l'algorithme SIMPLE proposé par Patankar [62]. Le terme de pression a été discrétisé avec un schéma de second ordre, tandis que les équations de densité, d'impulsion et d'énergie ont été discrétisés avec un schéma de vent ascendant de second ordre par Zhou et al. Ils ont constaté que leur model était plus précis que le modèle Boussinesq et le modèle à pleine flottabilité lors de l'utilisation de certains programmes CFD commerciaux.

Bejan [63] s'est intéressé sur les différentes raisons de la production d'entropie en génie thermique appliquée lorsque la génération de l'entropie détruit le travail disponible (exergétique) d'un système. Par conséquent, il est logique de se concentrer sur l'ingénierie de l'irréversibilité de transfert de chaleur et les processus d'écoulement de fluide et d'essayer de comprendre la fonction des mécanismes de production d'entropie associés. Bejan [64] a également procédé à un examen approfondi sur la minimisation de la production d'entropie. L'examen a retracé le développement et l'adoption de la méthode dans plusieurs secteurs de l'ingénierie thermique traditionnelle et la science. En outre, de nombreux chercheurs ont étudié la génération d'entropie pour les différents écoulements. La deuxième analyse de la loi de transfert de chaleur du flux tourbillonnant à travers un conduit cylindrique a été étudiée par Mahmud et Fraser [65,66] ont également étudié l'analyse de la deuxième loi dans les problèmes de convection fondamentaux de transfert de chaleur et l'analyse thermodynamique des flux et le transfert de chaleur à l'intérieur d'un canal avec deux plaques parallèles.

Patel et coll.[67] a optimisé la géométrie des sections importantes de la cheminée solaire pour améliorer ses performances, à l'aide du logiciel ANSYS-CFX. L'ouverture d'entrée du collecteur, le diamètre de sortie du collecteur, les angles de divergence, l'ouverture d'entrée de la cheminée ont été modifiés, tandis que le diamètre du collecteur et la hauteur de la cheminée ont été fixés.

Gholam ali zadeh et Kim [68] ont étudié l'effet de serre sur les caractéristiques de transfert de chaleur par convection naturelle dans une cheminée solaire. Ils ont utilisé un modèle CFD instable pour analyser SCPP. En outre, ils ont utilisé la méthode des ordonnées discrètes (DO) pour résoudre les équations du transfert de chaleur par rayonnement. Ils ont démontré que la simulation de l'effet de serre avait un rôle important dans l'évaluation des performances des cheminées solaires. Ils ont également travaillé sur un autre projet, comme l'optimisation des dépenses, de l'efficacité totale et de la puissance de sortie d'un SCPP. Ils ont utilisé l'algorithme génétique multi-objectif pour trouver la meilleure hauteur de cheminée, diamètre de cheminée et rayon de collecteur. Ils ont constaté que l'augmentation de la puissance de sortie était supérieure à l'augmentation de la dépense de la configuration optimale [69]. Guo et coll. [70] ont simulé un nouveau modèle pour une centrale solaire à cheminée qui comprenait la charge solaire, les modèles de turbine et le rayonnement. Ensuite, ils ont évalué les influences de la perte de charge de la turbine, de la température ambiante et du rayonnement solaire sur les performances du système. Les résultats ont montré que les effets de la chute de pression de la turbine et du rayonnement solaire sur les performances du SCPP étaient si perceptibles.

L'objectif de ce travail est l'étude de l'effet de certains paramètres qui n'en pas été traités dans les travaux antérieures, tels-que : l'angle d'ouverture de la cheminée, ainsi que l'influence simultanée de paramètres géométrique sur la thermique et la dynamique de l'écoulement à travers le capteur solaire à cheminée.

III.1 Introduction

Notre problème concerne une étude thermo hydrodynamique de l'écoulement stationnaire de l'air à travers une centrale solaire à cheminée, en régime turbulent sous l'effet de la convection naturelle. L'étude de la dynamique des fluides est basée sur trois principes fondamentaux qui sont le principe de conservation de la masse, le principe de conservation de la quantité de mouvement et le principe de conservation de l'énergie. Ceux-ci permettent d'établir des relations entre des variables qui, dans le cas général, sont la masse volumique, la température, les trois composantes de la vitesse et la pression.

III.2 Modélisation mathématique

III.2.1 Hypothèses

Le modèle mathématique élaboré est défini selon les hypothèses suivantes :

- L'écoulement est bidimensionnel et le système admet un axe de symétrie.
- Le fluide qui est de l'air est supposé visqueux, newtonien et obéit à l'approximation de Boussinesq. Cette approximation repose sur l'hypothèse :
 - L'effet de compressibilité est négligé sauf dans l'équation de quantité de mouvement où la variation de la masse volumique du fluide est fonction de la température, l'écart de température dans l'écoulement est relativement faible. Ainsi l'approximation de boussinesq appliquée dans ce cas admet que la masse volumique varie avec la température à travers le coefficient d'expansion thermique, qui est une propriété du fluide et qui est défini par :

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$$

D'où : $\rho = \rho_0[1 - \beta(T - T_0)]$

ρ_0 : la masse volumique à la température de référence T_0

β : le coefficient de dilatation volumique à pression constante

- Les propriétés du fluide sont supposées constantes
- Pas de source de chaleur.
- Dans la convection naturelle, il est nécessaire de prendre en considération la valeur du nombre de Ra qui constitue un paramètre de caractérisation du régime d'écoulement.

$$Ra = \frac{g\beta(T_H - T_C)}{\alpha\nu} L^3$$

T_H : température maximum du fluide.

T_C : température minimum du fluide.

L : dimension caractéristique.

Une analyse simplifiée montre que le nombre de Ra pour une centrale solaire à cheminée est supérieur à la valeur critique de $Ra = 10^9$; ce qui signifie que le régime de l'écoulement est turbulent dans l'ensemble du système excepté à l'entrée du collecteur.

Les équations qui régissent l'écoulement de l'air et le transfert convectif à travers la cheminée solaire s'expriment comme suit :

III.2.2 Equation de continuité

Cette équation exprime le fait que la variation de la masse de fluide par rapport au temps, dans un volume défini de l'espace, est égale à la somme des flux de masse entrant et sortant de ce volume.

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

Cette équation se simplifie dans notre cas :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (V_i) = 0$$

III.2.3 Equation de quantité de mouvement

Les équations qui décrivent le mouvement d'une particule fluide dérivent du principe de conservation de la quantité de mouvement. La forme différentielle de l'équation de conservation des quantités de mouvement peut être obtenue à partir des relations intégrales sur un volume de contrôle et par l'application du théorème de la divergence. Si le fluide considéré est newtonien et la pesanteur est la seule force de volume agissant sur le domaine considéré, les équations régissant l'écoulement peuvent être exprimées ainsi :

$$\rho \left[(\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{V} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \right] = -\vec{\nabla} p + \rho g + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left\{ \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right\} + \delta_{ij} \lambda \text{div} \vec{V} \right]$$

Dans notre cas l'équation devient :

$$V_j \frac{\partial V_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 V_i}{\partial x_j \partial x_i} + g_i$$

Où g_i est la force de volume

III.2.4 Equation d'énergie

L'équation de l'énergie dérive de l'application du premier principe de la thermodynamique. En régime permanent et en absence de terme source elle est donnée par l'expression suivante :

$$V_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

III.3 Approche numérique

Les équations appliquées n'admettent pas de solutions analytiques sauf dans des cas très simplifiés. C'est pourquoi un recours aux méthodes de résolution numériques s'avère nécessaire. Il existe plusieurs méthodes numériques : « méthode des différences finies (MDF), méthode des volumes finis (MVF), méthode des éléments finis (MEF), méthodes spectrale. Pour résoudre le système d'équations présenté dans ce travail, nous avons choisi la méthode des volumes finis développée par Patankar [1] qui a été utilisé avec succès par plusieurs auteurs. La méthode est basée sur une approche de type volume de contrôle qui par sa propriété conservative offre l'avantage de la conservation de la masse et de la quantité de mouvement sur chaque volume de contrôle

III.3.1 Equations moyennées

Devant la grande complexité de la turbulence, on a souvent recours au traitement des problèmes par des méthodes statistiques. C'est pourquoi lorsqu'on s'intéresse aux écoulements réels, une alternative consiste à prendre en considération que les quantités moyennes, pour se faire on applique l'opérateur de moyenne d'ensemble sur les équations instantanées en utilisant la décomposition de Reynolds sur les inconnues du problème étudié, les nouvelles équations obtenues sont appelées « les équations moyennées ». Dans notre cas c'est cette approche RANS de la turbulence qui a été adoptée. On utilise souvent en littérature l'acronyme RANS « *Reynolds Averaged Navier Stokes* ». Les contraintes de Reynolds qui apparaissent dans les équations moyennées sont exprimées en utilisant le modèle de la viscosité turbulente de

Boussineq.

Les équations décrivant l'écoulement moyen sont alors.

a. *Équation de continuité*

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{III. 2})$$

b. *Équation de quantité de mouvement suivant $-x$*

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(v + \nu_t) \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(v + \nu_t) \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (\text{III. 3})$$

c. *Équation de quantité de mouvement suivant $-y$*

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[(v + \nu_t) \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[(v + \nu_t) \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + g\beta(T - T_0) \quad (\text{III. 4})$$

d. *Équation de conservation d'énergie*

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\nu}{\text{Pr}} + \frac{\nu_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\nu}{\text{Pr}} + \frac{\nu_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad (\text{III. 5})$$

III.3.2 Modélisation de la turbulence

La résolution des équations précédentes nécessite la détermination de la viscosité turbulente (ν_t). On distingue différentes modèles de turbulences qui permettent d'exprimer la viscosité turbulente en fonction principalement de l'énergie cinétique de turbulence k .

III.3.2.1 Modèle de fermeture $k-\varepsilon$:

Le modèle de turbulence adopté pour la fermeture des équations de l'écoulement moyen est le modèle $k-\varepsilon$. Le modèle le plus populaire pour les applications relevant des sciences de l'ingénieur qui inclut deux variables auxiliaires : l'énergie cinétique k et son taux de dissipation ε ; le k -epsilon est un modèle à deux équations qui suppose que le régime de turbulence est pleinement établi dans tous les domaines et que les effets de la viscosité moléculaire sont négligeables par rapport à ceux de la viscosité turbulente.

Ce modèle, a plusieurs versions. Pour nos calculs, le modèle standard de Launder et Spalding [2] avec des fonctions de paroi a été retenu. Dans ce modèle, la viscosité turbulente est évaluée

à partir de l'énergie cinétique turbulente κ et de sa dissipation ε .

$$\nu_t = c_\mu f_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (\text{III. 6})$$

Des équations de transport pour les variables turbulentes supplémentaires sont donc nécessaires pour permettre la détermination de la viscosité turbulente,

e. Équation d'énergie cinétique turbulente (κ):

$$\mathbf{u} \frac{\partial \kappa}{\partial x} + v \frac{\partial \kappa}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial y} \right] + P_\kappa + G_\kappa - \rho \varepsilon + D \quad (\text{III. 7})$$

f. Équation de dissipation de l'énergie cinétique turbulente (ε):

$$\begin{aligned} \mathbf{u} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + (c_{\varepsilon 1} f_1 (P_\kappa + c_{\varepsilon 3} G_\kappa) - \rho c_{\varepsilon 2} f_2 \varepsilon) \frac{\varepsilon}{\kappa} + E \end{aligned} \quad (\text{III. 8})$$

avec

σ_ε : le nombre de Prandtl pour ε .

σ_κ : le nombre de Prandtl pour κ .

P_κ représente le terme source de l'énergie cinétique turbulente, défini par :

$$P_\kappa = \nu_t \left(2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right) \quad (\text{III. 8a})$$

G_κ représente la production d'énergie cinétique turbulente causée par les effets de la poussée d'Archimède, donnée par

$$G_\kappa = -\frac{\nu_t}{\sigma_t} g \beta \frac{\partial T}{\partial y} \quad (\text{III. 8b})$$

Remarquons que plusieurs versions du modèle κ - ε , tels que les modèles à nombre de Reynolds faible, peuvent être obtenues selon les expressions des deux termes D & E.

Modèle κ - ε standard avec la fonction de paroi [3].

$$C_\mu = 0.09, \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92,$$

$$\sigma_T = 1.00, \quad \sigma_\kappa = 1.00, \quad \sigma_\varepsilon = 1.30,$$

$$f_\mu = f_1 = f_2 = 1.0, \quad D = E = 0;$$

La fonction de paroi au premier nœud intérieur :

$$\kappa = u_{\tau}^2 / \sqrt{c_{\mu}}, \quad \varepsilon = \rho u_{\tau}^4 / 0.41 \mu y^+.$$

Les équations de transports moyennées régissant l'écoulement turbulent convectif en utilisant le modèle κ - ε standard de Launder et Spalding [2] peuvent être écrites sous la forme condensée suivante

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r u \phi) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_{\phi} \quad (\text{III. 9})$$

Le tableau 7.1 donne les expressions des variables ϕ , Γ^{ϕ} et S^{ϕ} relatives à chaque équation de bilan de conservation (masse, quantité de mouvement, énergie). Il est à noter que ces équations ont été données sous une forme dimensionnelle dans le but de comparaison des résultats obtenus à ceux issus de la littérature.

Equation	ϕ	Γ^{ϕ}	Terme source S^{ϕ}
continuité	1	0	0
quantité de mouvement suivant - r	u	$\mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{2(\mu + \mu_t)u_1}{r^2}$
quantité de mouvement suivant - y	v	$\mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial y} - \rho_0 g \beta (T - T_0)$
d'énergie	T	$\frac{\lambda + \lambda_t}{C_p}$	0
d'énergie cinétique turbulente	κ	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_t}$	$P_{\kappa} + G_{\kappa} - \rho \varepsilon$
Taux d'énergie de dissipation	ε	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon}}$	$\frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_{\kappa} + C_{\varepsilon 3} G_{\kappa}) - \left(C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \right)$

Tableau III.1 Expressions des variables, ϕ , Γ^{ϕ} et S^{ϕ} .

III.3.2.2 Conditions aux limites

Le problème physique en question ainsi que ses conditions aux limites sont montrées sur la Fig. 7.1. Puisque l'écoulement est produit par les forces de flottabilités alors l'air entre dans le collecteur avec une vitesse axiale nulle, et une vitesse radiale à calculer en utilisant un bilan de masse à chaque itération, jusqu'à la convergence des résultats.

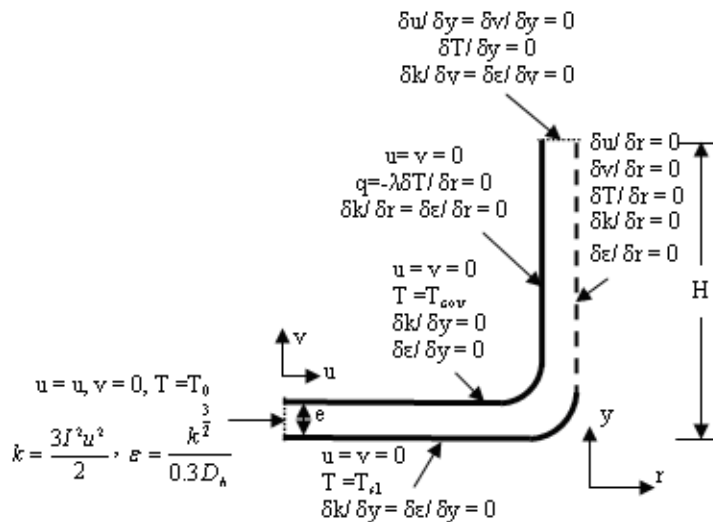


Figure 7.1 Domaine d'étude et conditions aux limites.

À la sortie de la tour, on assume que l'écoulement est entièrement développé. Au centre du dispositif, des conditions d'axi-symétrie ont été adoptées. Au niveau des parois, les conditions de non glissement et de parois imperméables ont été considérées. Ces conditions ont été appliquées à la couverture, à la jonction, aux parois de la tour, et à la surface du sol. D'un point vu thermique les parois de la tour et de la région de la jonction sont supposées adiabatiques. A l'entrée du collecteur la température ambiante est imposée. Sur le sol et la couverture une température constante est adoptée.

Le modèle de turbulence adopté considère que, aux niveaux des parois, les variations des variables turbulentes dans la direction transversale à l'écoulement principal sont nulles. Pour l'admission de dispositif, les valeurs des variables turbulentes sont données en termes d'intensité turbulente (I), les valeurs de l'intensité turbulente dans les écoulements turbulents varient entre 1% et 5%. La valeur de 3.7%, qui représente une estimation assez valide dans le manque de données expérimentales a été adoptée.

III.3. Procédure de résolution numérique

Les équations de Navier-Stokes moyennées pour un fluide incompressible présentent deux difficultés majeures. Premièrement, elles sont quasi-non linéaires et ensuite elles sont couplées. La non-linéarité est contournée par un calcul itératif. La méthode de résolution itérative utilisée est celle de Gauss Seidel. Le problème du couplage se manifeste par l'apparition des variables vitesse et pression dans les équations de quantité de mouvement. Malheureusement, on ne dispose d'aucune équation de transport pour cette variable qu'est la pression. Pour remédier à ce problème l'algorithme le plus universel et le plus utilisé est sans doute l'algorithme SIMPLE de Patankar & Spalding [4]. La marche à suivre consiste à considérer un champ initial de pression qu'on injecte dans les équations de quantité de mouvement. On résout le système pour trouver un champ de vitesse intermédiaire (qui n'est pas juste puisque la pression ne l'est pas). L'équation de continuité est transformée pour devenir une équation de correction de pression. Elle est résolue pour trouver une correction de pression qui permettra de réinjecter une nouvelle pression dans les équations de quantité de mouvement. Le cycle est répété autant de fois que nécessaire jusqu'à l'obtention d'une correction de pression nulle, signe de la convergence de l'algorithme. Le flux convectif dans les différentes équations est approximé par un schéma UPWIND du second ordre alors que le flux diffusif est calculé à l'aide d'un schéma de différence centré. La solution est obtenue lorsque les critères de convergence (les résidus) sont satisfaits. Ces résidus sont fixés à des valeurs appropriées pour chaque équation.

IV.1 Introduction

L'expérimentation dans le domaine des écoulements aérothermiques, a évolué dans ces dernières années grâce aux progrès de la technologie et des procédés numériques. A savoir la new technologie des capteurs de température et d'hygrométrie comme par exemple les capteurs thermique DS18B20 et de vitesse LM393 ; lesquels sont utilisés dans notre travail.

Ces types de capteurs exigent l'utilisation des interfaces électroniques (Arduino) et des logiciels performants (LabVIEW) qui permettent de convertir des signaux analogiques en numérique pour les interpréter.

IV.2 Le DS18B20 et Le LM393

Le DS18B20 et le LM393 (figure IV.1) sont des capteurs analogiques Fabriqués par DALLAS US. Ils peuvent être utilisés pour quantifier la température de l'environnement et la vitesse de l'écoulement.

Les deux capteurs disposent d'une sortie série 9-12 bits de mesures et se connectent avec seulement 3 broches (VDD, DATA et GND). Ils communiquent sur bus 1-Wire qui, par définition, ne nécessite qu'une seule ligne de données ainsi il est possible d'utiliser un seul microprocesseur pour contrôler de nombreux capteurs branchés sur la même ligne de données.

- Le DS18B20 a une plage de température $-55 \sim 125 \text{ }^{\circ}\text{C}$ et une résolution de $\pm 0,05 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [1].

-Le LM393 a une plage de fréquence de $34 \text{ KHZ} \sim 48 \text{ KHZ}$ un temps de réponse de 800 nm à 940 nm [2].



Fig. IV.1 : Les types de DS18B20 et de LM393

IV.3 Arduino IDE version 1.8.1 [2].

Arduino est un *freeware* (matériel libre) qui peut être programmé pour analyser ou produire des signaux électriques et exécuter des commandes. Son interface facile et son langage de programmation simple en font un des microcontrôleurs les plus utilisés dans le monde, que ce soit par les débutants ou par les utilisateurs plus expérimentés.

L'Arduino est une plateforme de contrôle, elle est constituée de deux parties :

- **Le logiciel (Software) :** gratuit et open source, développé en Java, dont la simplicité d'utilisation relève du savoir cliquer sur la souris.
- **Partie Hardware (Le matériel) :** cartes électroniques dont les schémas sont en libre circulation sur internet.

1) La partie Hardware

La carte Arduino, de type Nano, est basée sur un contrôleur ATmega328 cadencé à 16 MHz, avec une mémoire de 32 Kb. Elle contient un boot-loader qui permet de modifier le programme sans passer par un programmeur, ces caractéristiques font de lui un outil idéal pour les systèmes embarqués, pour des applications robotiques nécessitant du multitâches et des systèmes d'acquisitions de différents paramètres au même temps [3].

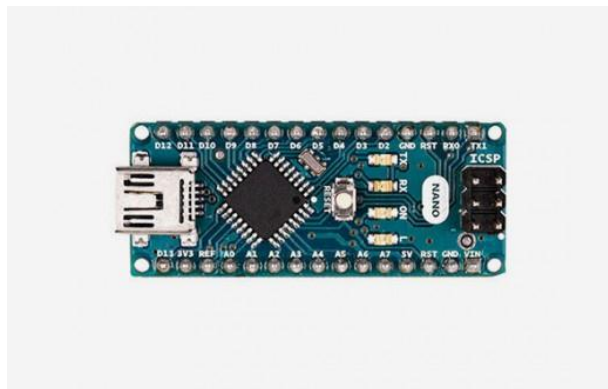


Fig.IV.2 : Arduino type nano

2) La partie software (Logiciel):

Pour commander Arduino-uno sur PC, on installe le logiciel du même nom *Arduino* (version 1.8.5 dans notre cas) qui est une application Java et qui a l'interface montré dans la figure IV.3 ci dessous.

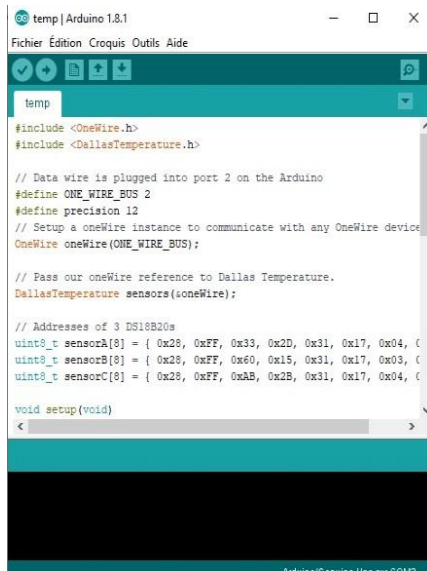


Fig. IV.3 : Vue d'ensemble du logiciel Arduino

Le logiciel Arduino a pour fonctions principales :

- ✓ pouvoir écrire et compiler des programmes pour la carte Arduino,
- ✓ se connecter avec la carte Arduino pour y transférer les programmes,
- ✓ communiquer avec la carte Arduino.

L'interface du logiciel contient aussi une barre d'outils, une barre de boutons pour vérifier et compiler (télé-verser) et un espace de travail.

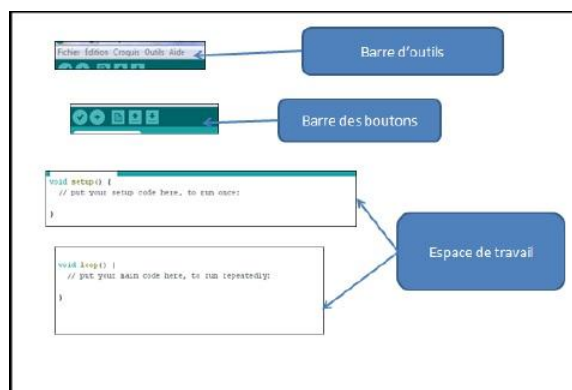


Fig.IV. 4 : Interface du logiciel Arduino

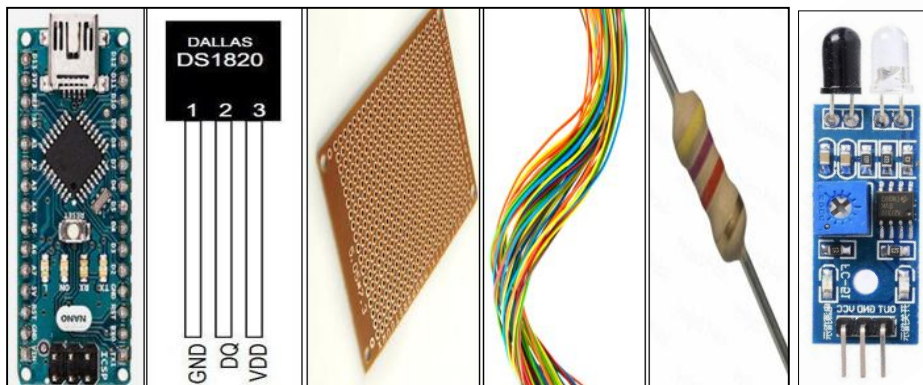
IV.4 LabVIEW version 2012

LabVIEW est un environnement de développement spécialisé en informatique industrielle et scientifique. Sa particularité est de s'appuyer sur le langage G, créé par National Instruments, qui est entièrement graphique. Il permet de créer des logiciels complexes tout en facilitant la programmation et donc de diminuer les délais de développement. Grâce à ses bibliothèques de fonctions dédiées à l'acquisition de données, l'instrumentation, à l'analyse mathématique des mesures, mais également grâce à la création rapide d'interfaces graphiques de qualité et le codage simplifié, l'ingénieur a plus de temps pour se concentrer sur les fonctions métiers de l'instrumentation et du traitement des mesures [4].

IV.5 Montage du Système d'acquisition [5]

Figure **Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.** V.5 montre la carte Arduino, de type Nano, utilisée dans notre étude, avec des accessoires électroniques.

- | | |
|------------------------------------|------------------------------|
| 1. Arduino Nano | 4. Fils de liaison |
| 2. 4* DS18B20 | 5. 4.7 K Ω résistance |
| 3. La breadboard (plaque perforée) | 6. 4*LM393 |



*Figure **Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.** V.5 : Les composants électroniques*

IV.5.1 Connexion des capteurs DS18B20 avec Arduino

L'un des principaux avantages du capteur est que plusieurs DS18B20 peuvent coexister sur le même bus one-wire et chaque DS18B20 ayant son propre code série 64 bits gravé en usine, qui permet de les différencier les uns des autres.

On Commence par connecter tous les DS18B20 en parallèle puis les reliés à l'arduino , c.-à-d. toutes les broches VDD sont branchées à la sortie 5V, toutes les bronches GND à la GND et enfin broche DATA est connectée à la broche numérique 2 de l'Arduino.

Ensuite, nous devons ajouter une résistance de 4.7 kΩ pour l'ensemble du bus entre le signal et la broche d'alimentation 5V pour maintenir la stabilité du transfert de données.

IV.5.2 Installation de la bibliothèque pour DS18B20

Afin de permettre à l'Arduino de lire les signaux de DS18B20, on doit installer le protocole « Dallas Onewire » et « Dallas Temperature » à partir de la bibliothèque fournie avec le logiciel Arduino. (voir annexe)

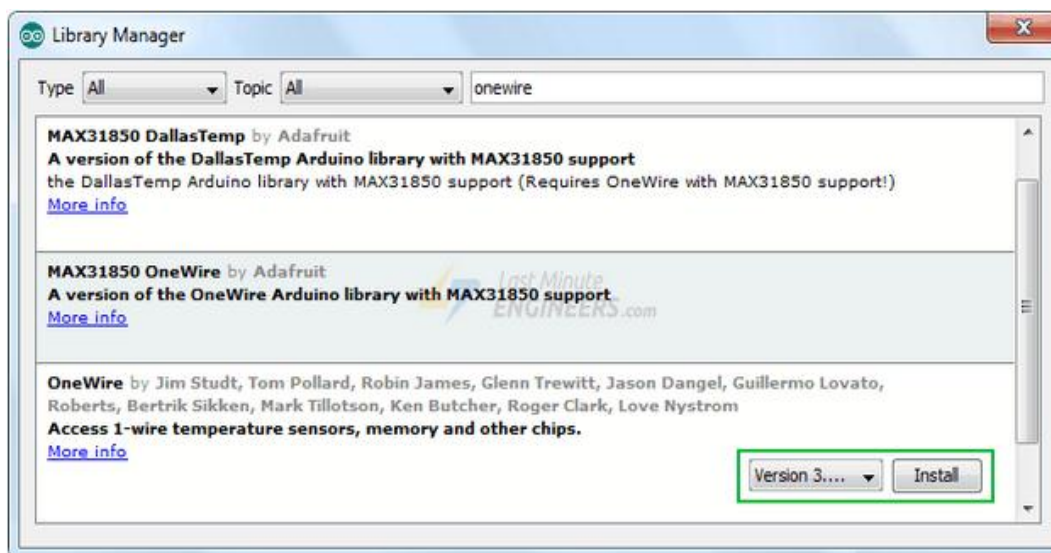


Fig. Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.V.6.

IV.5.3 Recherche d'adresses de DS18B20

Puisque tous les capteurs sont installés sur un seule Arduino, on doit, donc, définir une adresse pour chaque capteurs DS18B20 (on a 4 capteurs) grâce au programmeur Arduino (voir annexe 3)

Les adresses obtenues sont :

Capture A : 0x28, 0x61, 0x64, 0x11, 0x96, 0x7F, 0xD8, 0x91

Capture B: 0x28, 0xFF, 0x33, 0x2D, 0x31, 0x17, 0x04, 0xF9

Capture C: 0x28, 0xFF, 0x60, 0x15, 0x31, 0x17, 0x03, 0xF5

Capture D: 0x28, 0xFF, 0xAB, 0x2B, 0x31,0x17, 0x04,0x79

IV.5.4 Exploitation des données (LabVIEW)

Afin de faciliter l'exploitation des données enregistrées, on utilise Labview (voir annexe 4) pour une meilleur présentation des résultats .

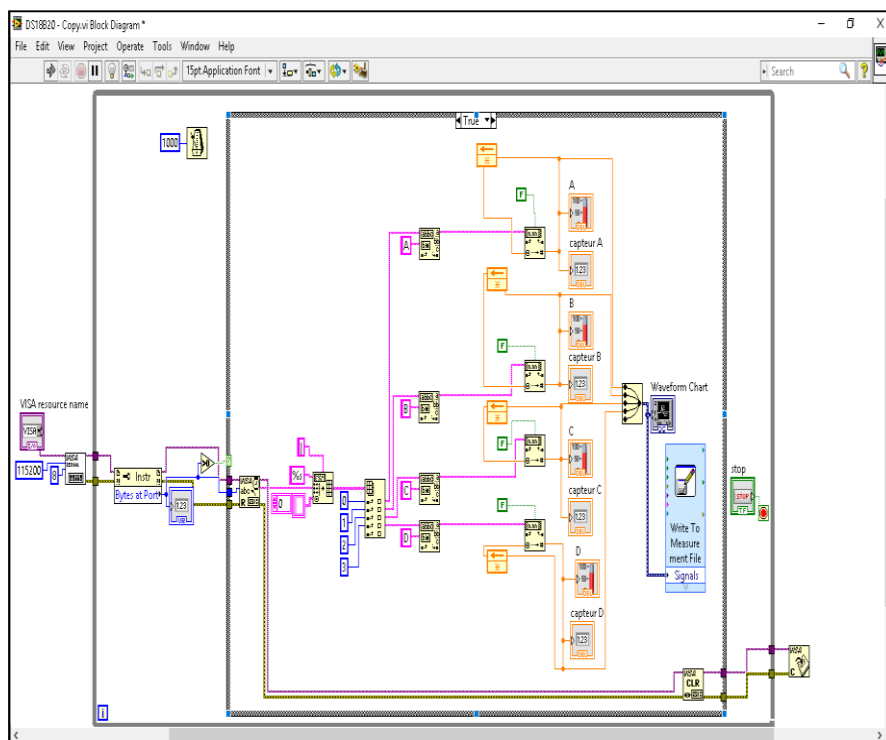


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document V & Block diagramme

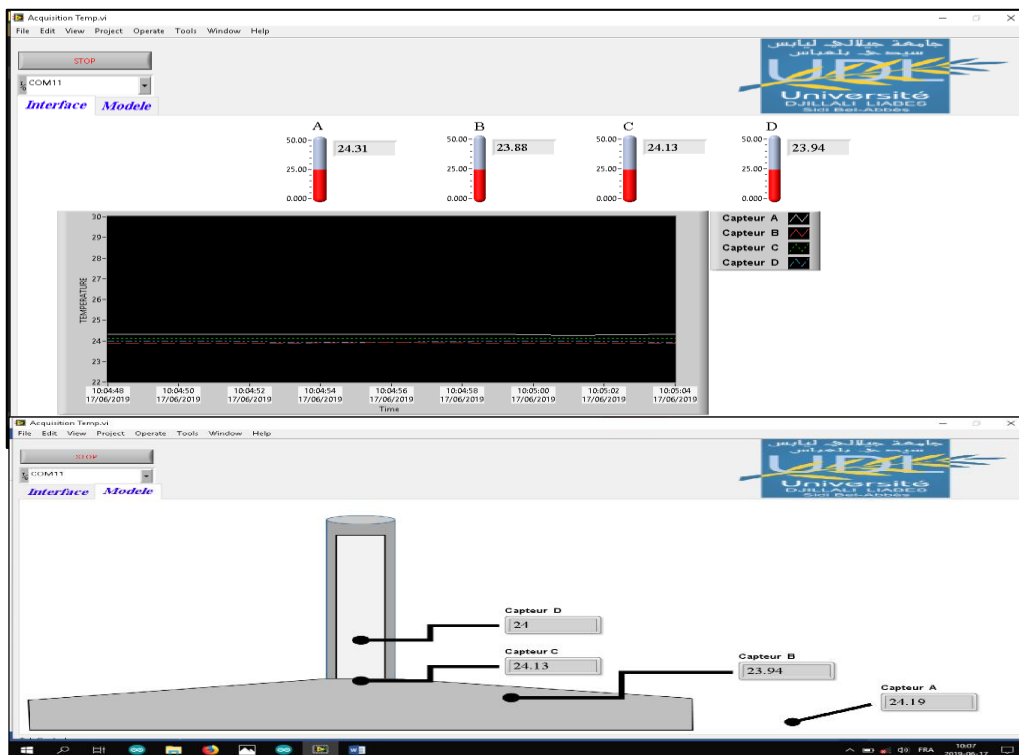


Fig. Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document V 0 Front panel

IV.6 Description du Prototype confectionné

A partir des prototypes de cheminée solaire cités dans le chapitre deux, nous avons imaginé une conception d'un prototype qui est à la fois simple, efficace et rigide. Le prototype est constitué d'une cheminée et un collecteur.

La cheminée est un tube en PVC d'une longueur variable de 0.5 m à 4 m et d'un diamètre de 0.08 m , vu sa solidité et sa maniabilité en cas de modification ainsi que sa bonne résistivité thermique. Le tube est fixé sur un support fabriqué en acier qui est à son tour fixé sur une planche en bois comme le montre la (figure III-7):



Fig. *Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.* **V.9:** *Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à*

Le collecteur, ayant pour rôle de chauffer l'air admis, est composé de plusieurs parties :

- un absorbeur est une plaque en MDF, de surface 4 m² d'épaisseur de 2 cm, recouverte d'une peinture noire mate,
- un cadre en bois, fixé sur l'absorbeur par des tiges filetées pour faciliter la variation de la hauteur d'entrée d'air. Figure
- un couvercle, en plastique transparent de 3mm épaisseur, posé sur un ensemble de fils métalliques dont les extrémités sont attachées au support de la cheminée et le cadre. Le couvercle est aussi fixé à ces deux derniers .



Fig. *Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.* **V.10:** *Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à*



Fig. Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.V.11: Prototypne Cheminée Solaire

IV.7 Procédure expérimentale

Les expériences sont réalisées durant le mois de Mai (Ramadan), et ont été malheureusement sujettes des perturbations atmosphériques essentiellement le vent et le passage de nuages le long de la journée.

Les configurations, suivantes ont été examinées:

Test 1 :

Collecteur horizontal, c'est à dire inclinaison $\beta = 0^\circ$, une hauteur de 250 mm pour deux hauteurs de la cheminée

- a) hauteur de cheminée = 1.5 m
- b) Hauteur de cheminée = 2.8 m

Test 2 :

Une hauteur de cheminée de 2.8 m et deux inclinaisons du collecteur :

- a) inclinaison $\beta = 6^\circ$ qui correspond à une hauteur à l'entrée du collecteur de 155 mm,
- b) Inclinaison $\beta = 9.5^\circ$ qui correspond à une hauteur à l'entrée du collecteur de 130 mm.

Les différentes mesures ont été réalisées, toutes les 15 minutes, de 11h20 à 16h05.

Partie Expérimentale

V.1 Introduction

L'un des intérêts de l'usage d'une cheminée solaire est la conversion de l'énergie cinétique de l'air, produite par effet de serre dans son collecteur, en énergie électrique.

Le plancher du collecteur, en absorbant de l'énergie solaire, s'échauffe et rayonne dans l'infrarouge. Ce rayonnement, ne pouvant traverser le toit transparent du collecteur, y est piégé et produit ce que l'on appelle effet de serre. Ainsi l'énergie solaire, transformée en chaleur dans le collecteur, chauffe l'air qui acquiert une énergie cinétique en s'échappant à travers la tour.

Dans ce chapitre, sont présentés les résultats de l'étude expérimentale effectuée sur le prototype de cheminée solaire, décrit dans le chapitre 4, que nous avons conçu et réalisé. Dans cette étude, nous avons observés les effets de la hauteur H de la tour de la cheminée et de l'angle β d'inclinaison du toit de son collecteur ou de la hauteur h à l'entrée de ce dernier sur la température et la vitesse de l'air le long de son parcours.

V.2 Effet de la hauteur de cheminée

Afin de déterminer l'effet de la hauteur de la tour sur la température dans la cheminée, nous avons considéré les configurations suivantes :

	Hauteur de la tour H (m)	Angle d'inclinaison du collecteur β °	Hauteur du collecteur h (m)
Config 1	1.5	0	0.25 m
Config 2	2.8	0	0.25 m

La température est mesurée par quatre capteurs de température placés aux points A, B, C et D tels que montrent la figure V.1

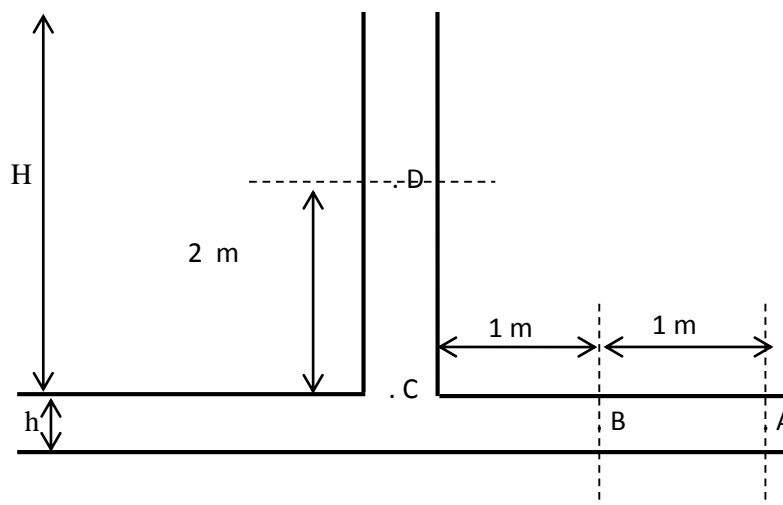


Fig. V.1 : Positionnement des capteurs dans la cheminée

Les différentes mesures ont été réalisées durant le mois de mai 2019, entre 11h20 et 16h 05 avec un pas de temps de 15 minutes.

La figure V.2 et V.3 illustrent les évolutions de température, aux points A, B, C et D, en fonction du temps respectivement pour les hauteurs de tour 1,5 m et 2,8 m.

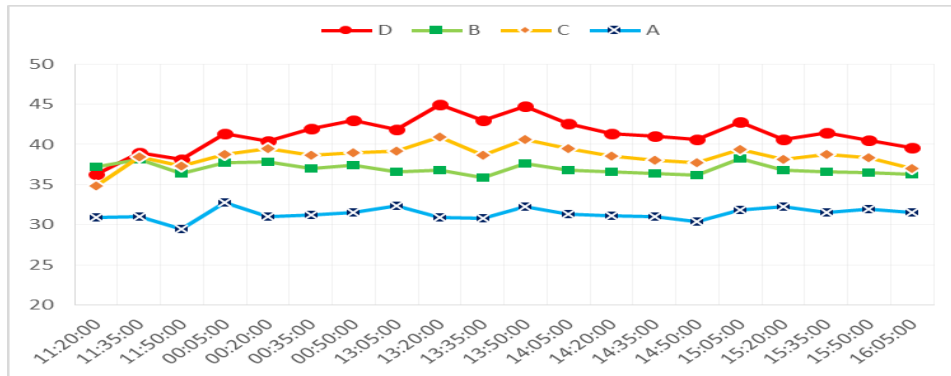


Fig. V.2. variation de la température dans la cheminée pour H= 1.5 m

La figure V.2 montre une variation de température, dans le temps, globalement négligeable aux points A et B et un écart, relativement important, entre les courbes correspondant à ces deux points. Cet écart peut être dû au fait que le point A est situé juste à l'entrée du collecteur.

Aux points C et D, la température augmente avec le temps puis commence à diminuer lentement à partir de 14 h environ. La variation est plus sensible en D qu'en C.

La figure V.3 montre qu'aux points A et B, les températures sont très légèrement différentes et augmentent, en moyenne, avec le temps. La courbe correspondant au point D présente plus de fluctuations ; son allure moyenne, présentant un maximum entre 13 h et 14 h, est semblable à son homologue du cas précédent.

Dans les deux configurations, nous constatons que la température augmente le long de la tour.

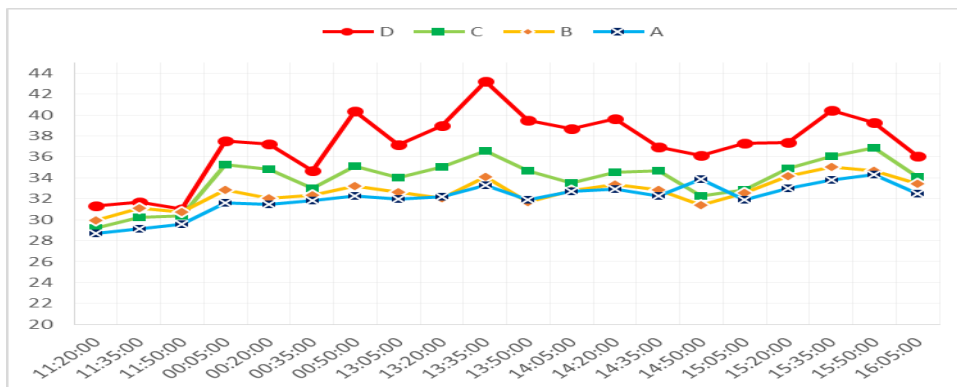


Fig.V.3 Variation de la température dans la cheminée pour H= 2.8 m

Les fluctuations de température observées sont dues au fait que les tests, étant effectués en plein air, ont été perturbés par les courants d'air et éventuellement les nuages.

Ces fluctuations et faute d'une même température ambiante pour tous les essais, rendent difficile l'interprétation des résultats. En effet, nous nous sommes proposé de calculer les moyennes de température, en chaque point, durant deux périodes de 3h. Ces moyennes sont données par les figures V.4 et V.5.

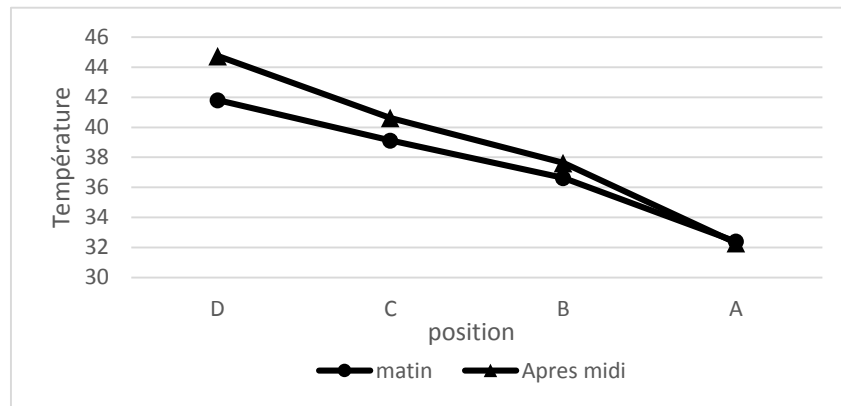


Fig. V.4. Evolution de la température dans la cheminée pour $H= 1.5m$

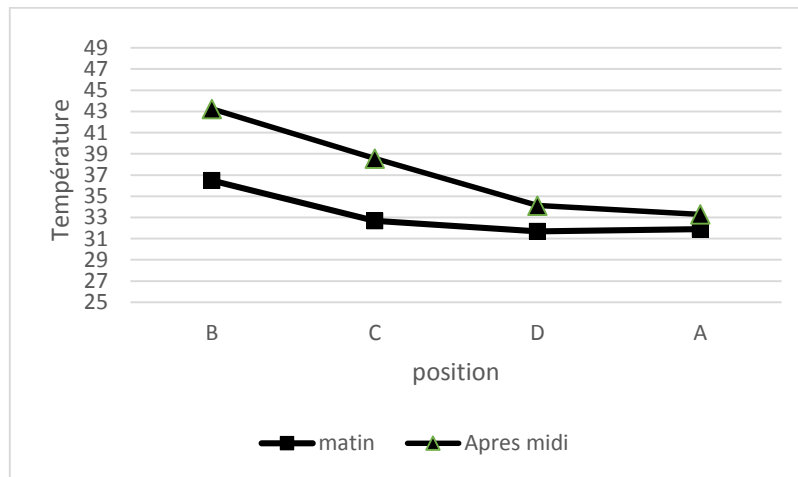


Fig. V.5. Evolution de la température dans la cheminée pour $H= 2.8 m$

On constate que la température de l'air augmente au cours de sa progression dans la cheminée et cette augmentation est relativement plus forte en après-midi qu'en matinée ; cette différence peut être expliquée par l'inertie thermique du collecteur qui emmagasine de la chaleur le matin. La figure V-6 montre clairement que la température dans la cheminée diminue quand la hauteur de la tour augmente. Cela peut être dû au fait de l'augmentation du tirage avec la hauteur de la tour, le tirage a pour effet de diminuer le temps de séjour de l'air dans collecteur, ce qui fait la différence de la pente entre les points A et B dans les deux graphes.

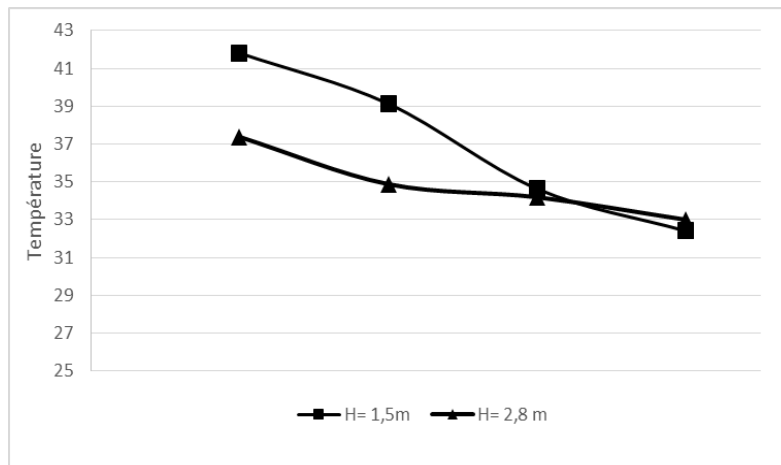


Fig.V.6. Comparaison entre variation de température pour H= 2.8m et H=1.5 m

V.3 Effet de de l'angle d'inclinaison du collecteur

Pour voir l'effet de l'inclinaison du toit de collecteur sur la variation de la température de l'air, on a examiné les configurations suivantes :

	Hauteur de la tour H(m)	Angle d'inclinaison du collecteur β °	Hauteur du collecteur h_{col} (m)
Config 1	2.8	0°	0.25 m
Config 2	2.8	6°	0.16 m
Config 3	2.8	9.5°	0.13 m

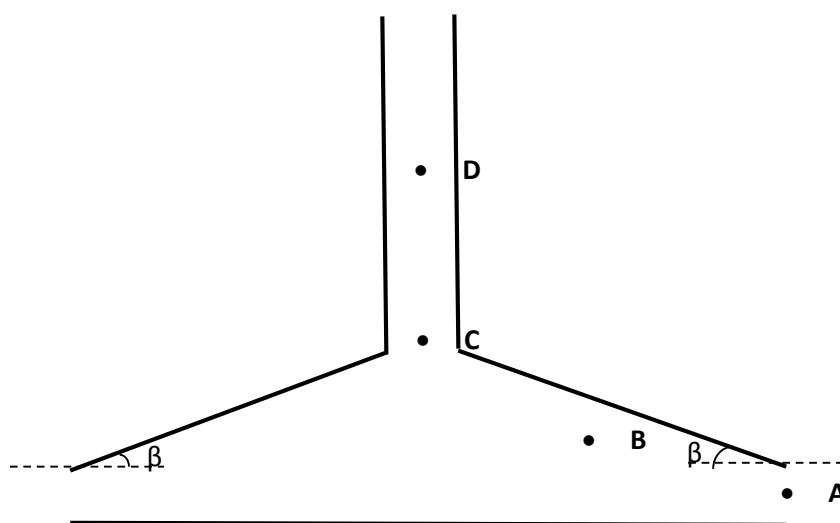


Fig. V.7 : Positionnement des capteurs dans la cheminée et l'angle d'inclinaison

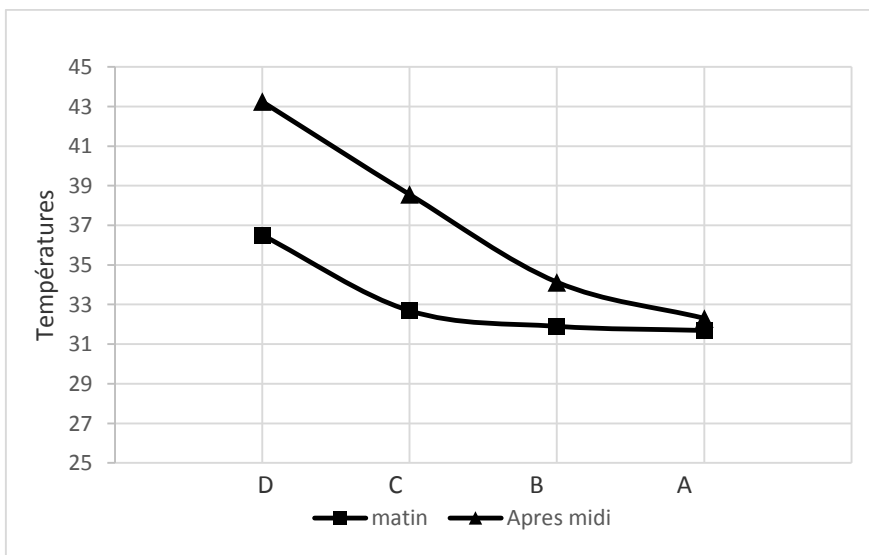


Fig. V.8. Variation de la température pour un angle d'inclinaison de 0°

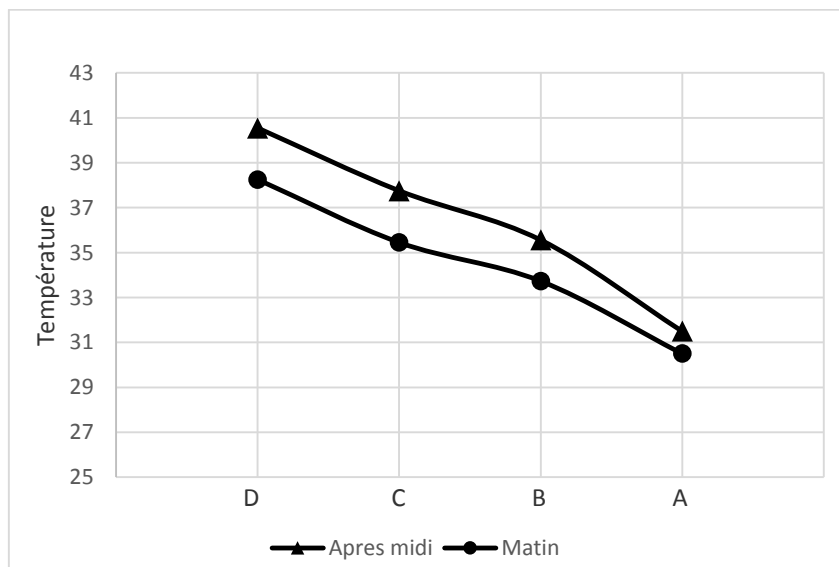


Fig.V.9. Variation de la température pour un angle d'inclinaison de 6°

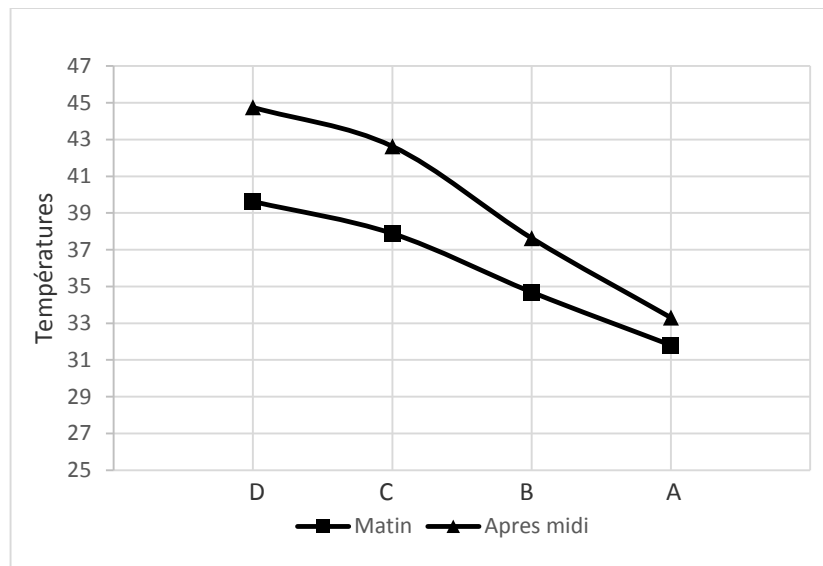


Fig. V.10. Variation de la température pour un angle d'inclinaison de 9.5°

Les figures V-8, V-9 et V-10 illustrent l'effet de l'angle d'inclinaison du collecteur sur l'évolution de la température le long de la cheminée. On constate que la température augmente avec l'angle d'inclinaison. Ceci est en accord avec les travaux de Mehran et al [16].

Les mesures enregistrées montrent que pour presque les mêmes températures d'entrées de cheminée, on obtient la plus grande température de sortie pour le cas $\beta=9.5^\circ$ (figure V-11).

Ceci s'explique par le fait que plus cet angle augmente plus le volume d'air à chauffer ne diminue.

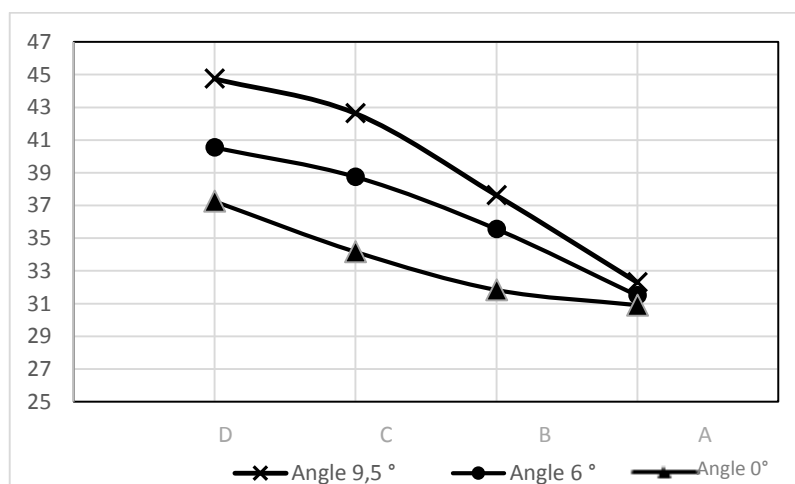


Fig.V.11. Variation de la température pour les 3 angles d'inclinaisons 0°, 6° et 9.5°

V.4 Effet de l'angle d'inclinaison sur la vitesse de l'écoulement

Pour étudier la variation de la vitesse d'air dans la cheminée on a divisé cette dernière en trois zones (A-B), (B-C) et (C-D).

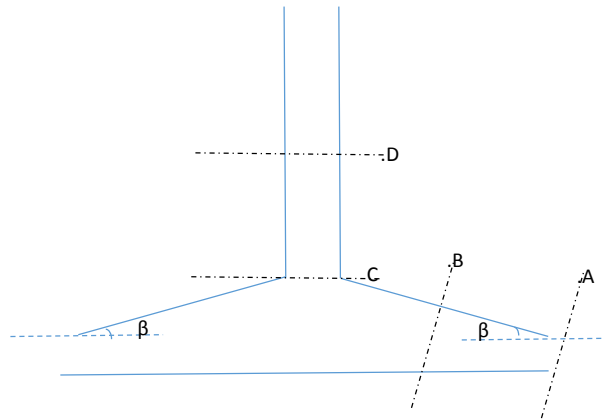


Fig. V.12. Différentes zones dans la cheminée

L'aspect dynamique de l'écoulement est représenté dans cette partie, les figures V-13, V-14 et V-15 donnent les moyennes des vitesses enregistrées dans chaque zone. On remarque que la vitesse augmente d'une zone à l'autre ce qui reflète l'effet de la température (*force de flottabilité*) sur l'écoulement de l'air dans les deux zones (A-B) (B-C) et l'effet de la température et le tirage dans la zone (C-D). On remarque aussi que pour le cas $\beta = 9.5^\circ$, on obtient les meilleures vitesses.

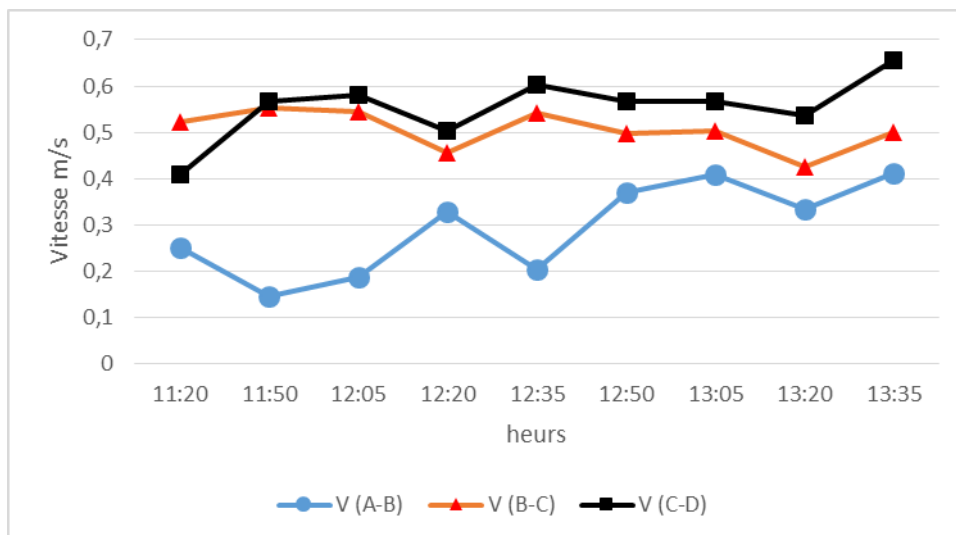


Fig.V.13.l'évolution de la Vitesse pour un angle d'inclinaison $\beta = 0^\circ$

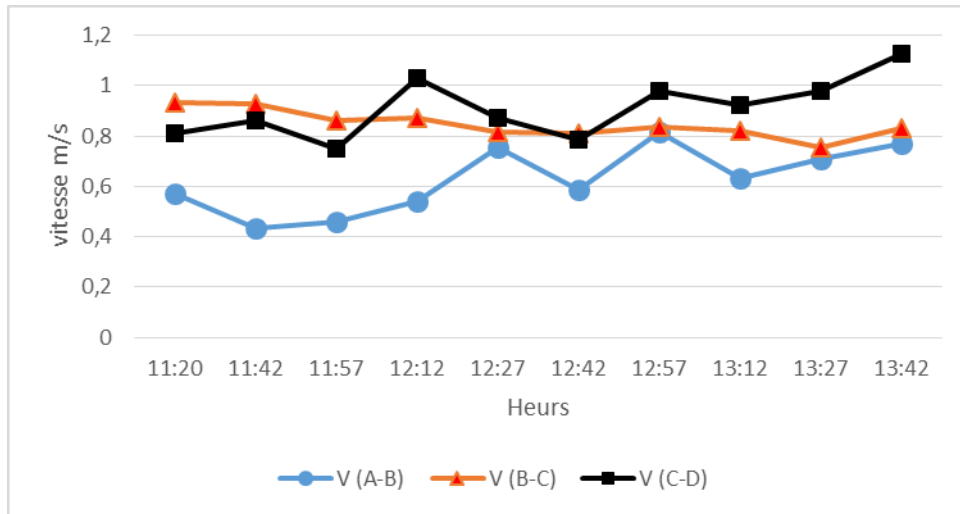


Fig.V.14. l'évolution de la Vitesse pour un angle d'inclinaison $\beta = 6^\circ$

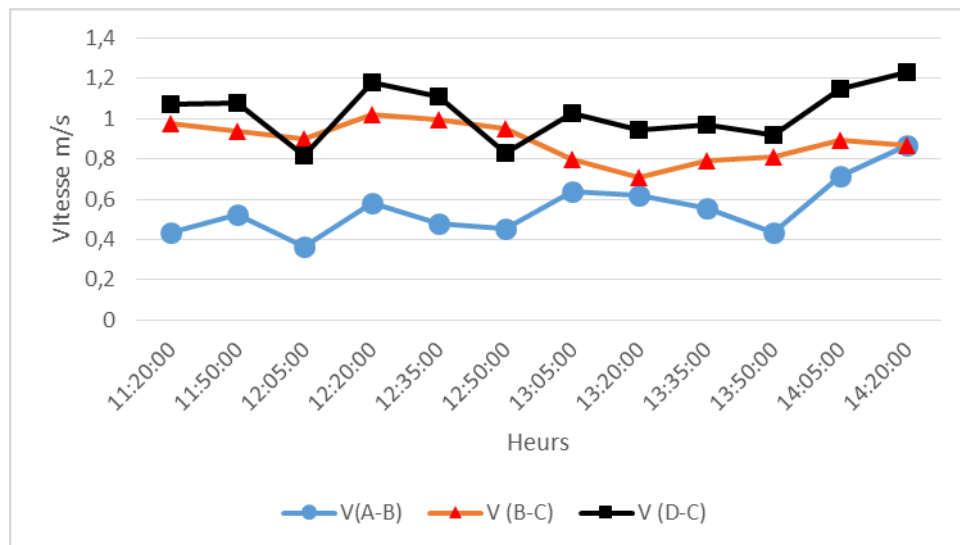


Fig.V.15. L'évolution de la Vitesse pour un angle d'inclinaison $\beta = 9.5^\circ$

Pour mieux décortiquer et analyser nos résultats, nous avons procédé de la même manière que pour les températures (la méthode de la moyenne glissante) pour obtenir la vitesse moyenne, en chaque point, sur les deux périodes considérées. Les résultats obtenus sont donnés par les figures V-16 à V-19.

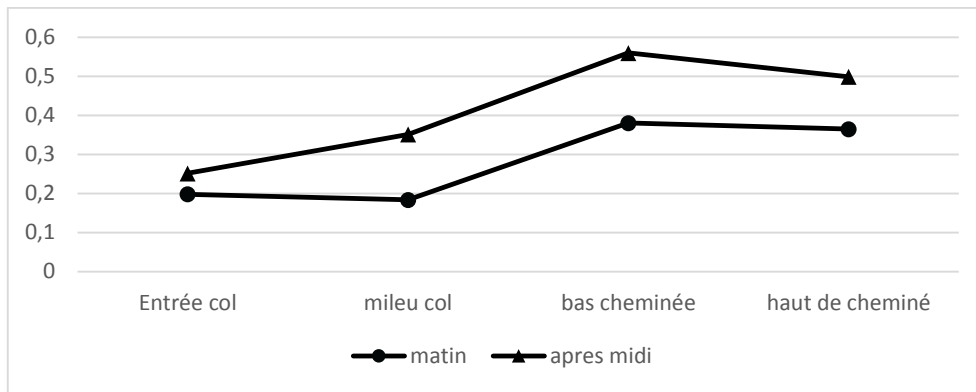


Fig.V.16. Variation de la Vitesse pour un angle d'inclinaison $\beta = 0^\circ$

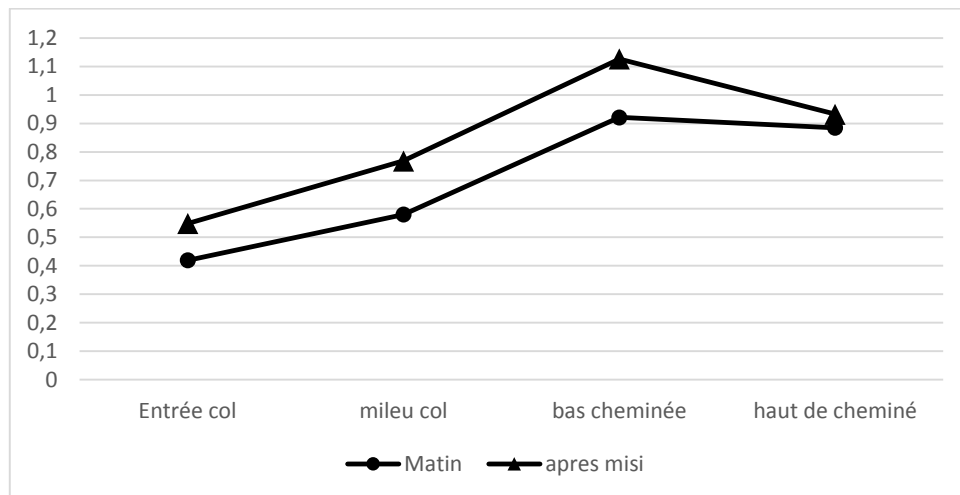


Fig.V.17. Variation de la Vitesse pour un angle d'inclinaison $\beta = 6^\circ$

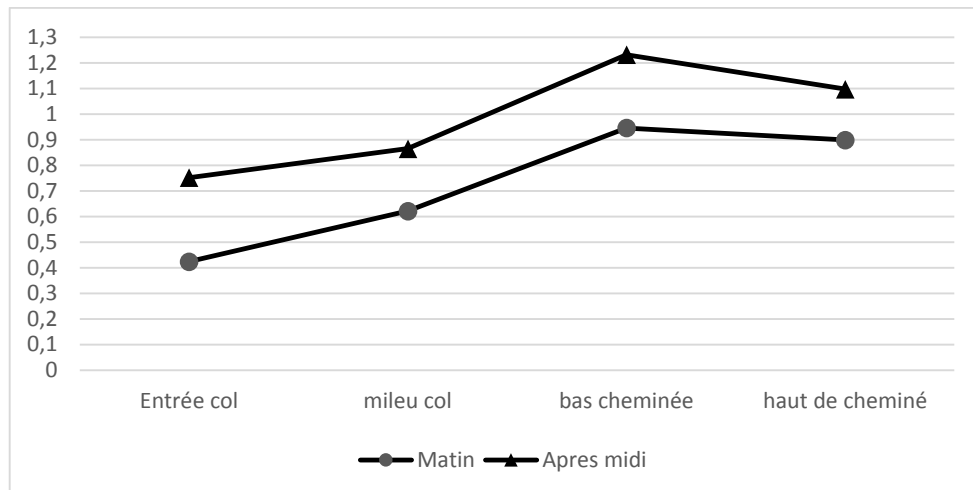


Fig.V.18. Variation de la Vitesse pour un angle d'inclinaison $\beta = 9.5^\circ$

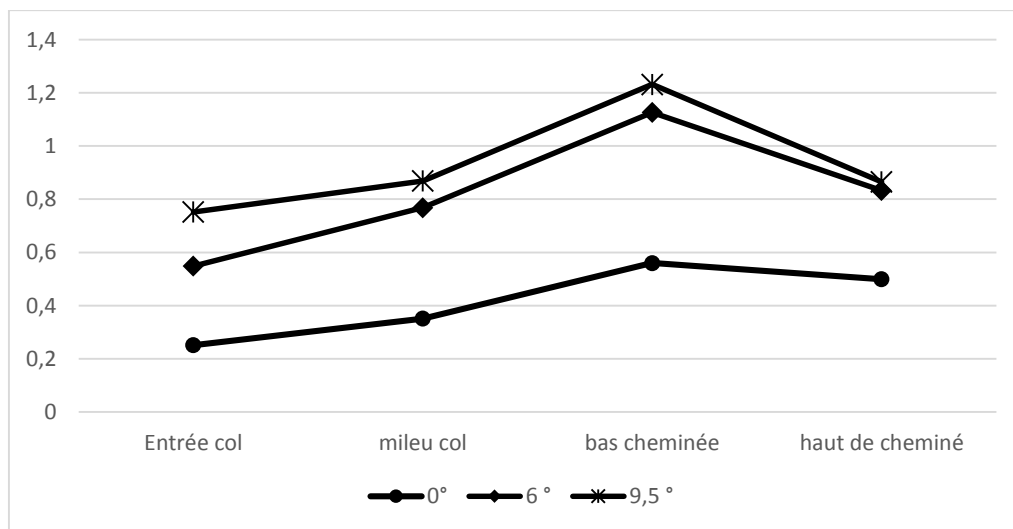


Fig.V.19. Variation de la Vitesse maximales pour les trois angles

Dans ces figures sont représentées les évolutions de la vitesse d'écoulement de l'air le long de la cheminée pour les valeurs d'angle β : 0° , 6° et 9.5° . Il y est montré que, pour tous les angles β la vitesse de l'air augmente progressivement dans le collecteur pour atteindre une valeur maximale à l'entrée de la tour puis diminue le long de celle-ci. Cette vitesse a tendance à augmenter avec l'angle β (figure V.19).

Ceci peut être expliqué comme suit : Le plancher, étant chaud, chauffe les particules d'air adjacentes qui se meuvent verticalement sous l'effet de la force de flottabilité, laquelle au voisinage de la paroi du toit peut être décomposée en une composante tangentielle à la paroi et une composante normale. La composante normale est compensée par la réaction du toit et la composante tangentielle entraîne la particule vers l'entrée de la tour. En outre la colonne d'air située au-dessous de l'entrée de la tour est connectée sans obstacle vers la tour en créant une dépression qui permet le déplacement de l'air, dans le reste du collecteur, vers la tour. Plus l'angle β est grand plus la composante tangentielle l'est et par conséquent la vitesse de l'air l'est aussi.

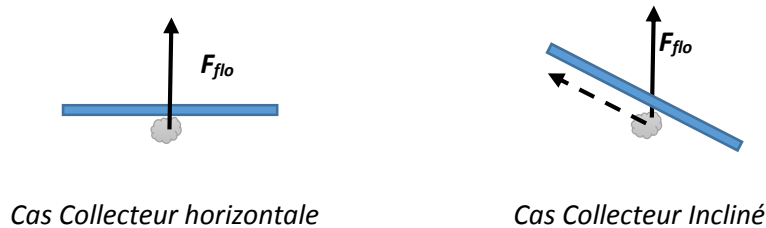


Fig. V.20 : Différentes Positions du collecteur

Partie Numérique

V.1. Introduction :

Cette partie présente une investigation numérique de la dynamique de l'écoulement et du transfert de chaleur dans une cheminée solaire, essentiellement l'étude de l'effet d'autres variantes des paramètres géométriques non testées en expérimental, sur le comportement thermo-hydrodynamique de l'air à l'intérieur de ce capteur solaire.

La simulation de l'écoulement de l'air à travers le CCS est réalisée à l'aide du code de calcul FLUENT en considérant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'écoulement est axisymétrique.
- L'écoulement est stationnaire.
- L'écoulement est incompressible en régime turbulent.
- Le fluide considéré est supposé visqueux et newtonien et obéit à l'approximation de Boussinesq.

V.2. Configuration de base :

On a étudié, préalablement, deux configurations géométriques de cheminée solaire, la première avec une jonction tour – collecteur droite, et la seconde avec une jonction arrondie dans le but d'adopter la meilleure configuration géométrique pour notre simulation paramétrique.

Les caractéristiques géométriques utilisées sont identiques à celles du prototype de Manzares [7.8] qui sont : hauteur et rayon de cheminée $H_{ch}=180$ m, $R_{ch}=05$ m, et un collecteur de rayon et de hauteur respectivement $R_{coll}=120$ m, $h_{coll}=2$ m . Un angle d'ouverture de cheminée $\alpha = 0^\circ$ et l'angle d'inclinaison du collecteur $\beta = 0^\circ$.

La figure V.1 illustre le domaine d'étude du CS représenté en 2D moitié en raison de l'axisymétrie du problème.

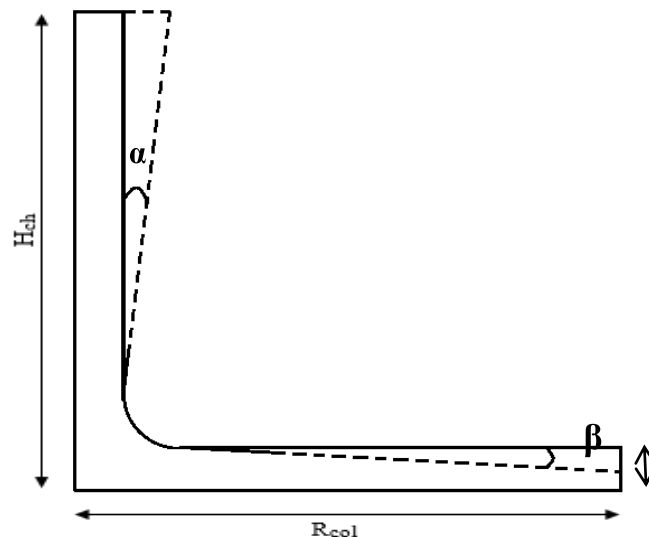


Fig.V.21 : Géométrie de la cheminée solaire étudiée.

V.2.1 Maillage

Le maillage en 2D adopté est structuré, monobloc et curvilignes de type Body-Fitted [15,16]. La dépendance de maillage a été étudiée en utilisant différents nombres de mailles avant de se fixer sur un maillage de 11300 cellules pour la configuration droite et 76340 cellules pour le cas de la cheminée avec jonction coude.

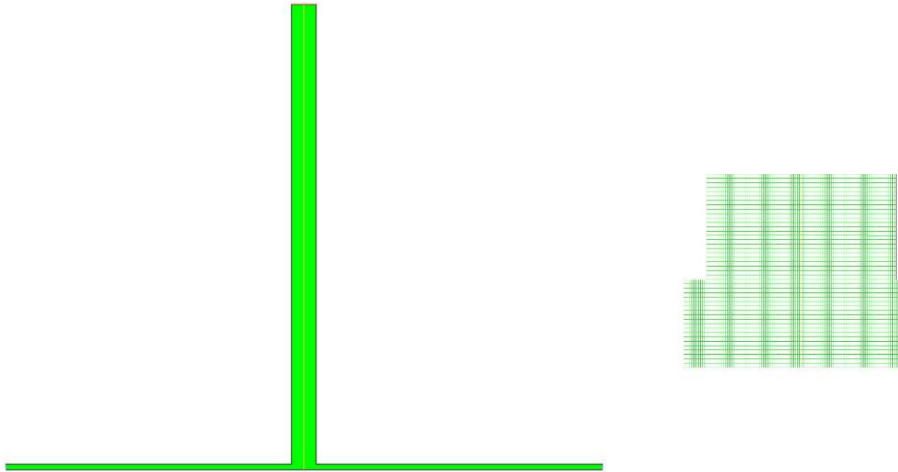


Fig.V.22. Le maillage d'une cheminée solaire droite : vue globale et vue agrandie

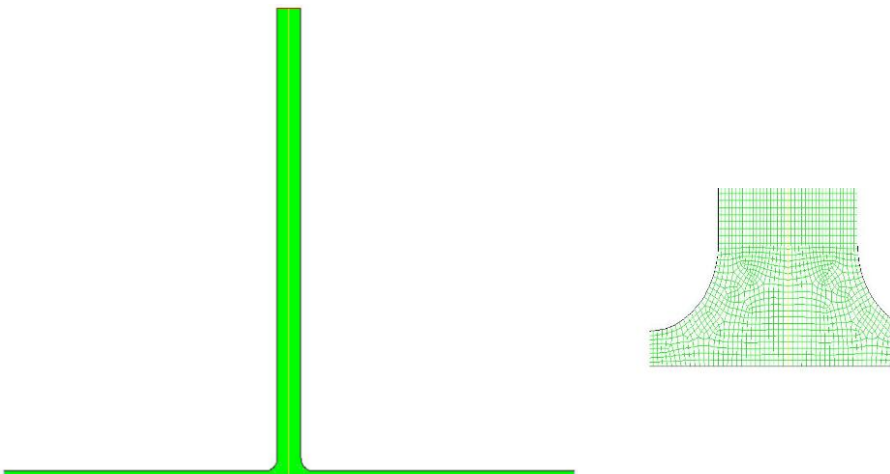


Fig.V.23. Le maillage d'une cheminée solaire avec coude : vue globale et vue agrandie

Remarque

Pour la fermeture ainsi que la résolution des équations gouvernantes ce type d'écoulement nous avons utilisé le modèle k-ε décrit dans le chapitre III.

V.2.2 Conditions aux limites

Les conditions aux limites utilisées pour les simulations sont comme suit :

• Entrée collecteur :

L'air à l'entrée du collecteur est supposé être à la température ambiante de 293°K et vitesse d'entrée imposée, avec une différence de pression nulle à l'entrée.

• Absorbeur :

Cette surface absorbe le rayonnement solaire et elle le fait transmettre du côté de l'air par convection naturelle et par conduction. On a imposée sur cette surface une température constante de 310°K et une vitesse nulle (adhérence).

• Paroi du Collecteur :

C'est une paroi mince transparente, avec un flux imposé égal à 50W/ m². La vitesse imposée à la paroi est égale à zéro (adhérence).

• Parois de la jonction et de la cheminée :

Les vitesses imposées sont nulles(adhérence). D'un point de vue thermique les parois ont été considérées adiabatiques.

• Sortie cheminée :

On assume que l'écoulement est entièrement développé. Donc les gradients normaux de toutes les variables sont nuls. C'est la condition pressure outlet dans le code Fluent.

• Axe:

Puisqu'on est en présence d'un écoulement axisymétrique donc l'axe de la structure doit être spécifié comme AXIS sur fluent. C'est à dire le gradient radial de chaque variable est considéré nul.

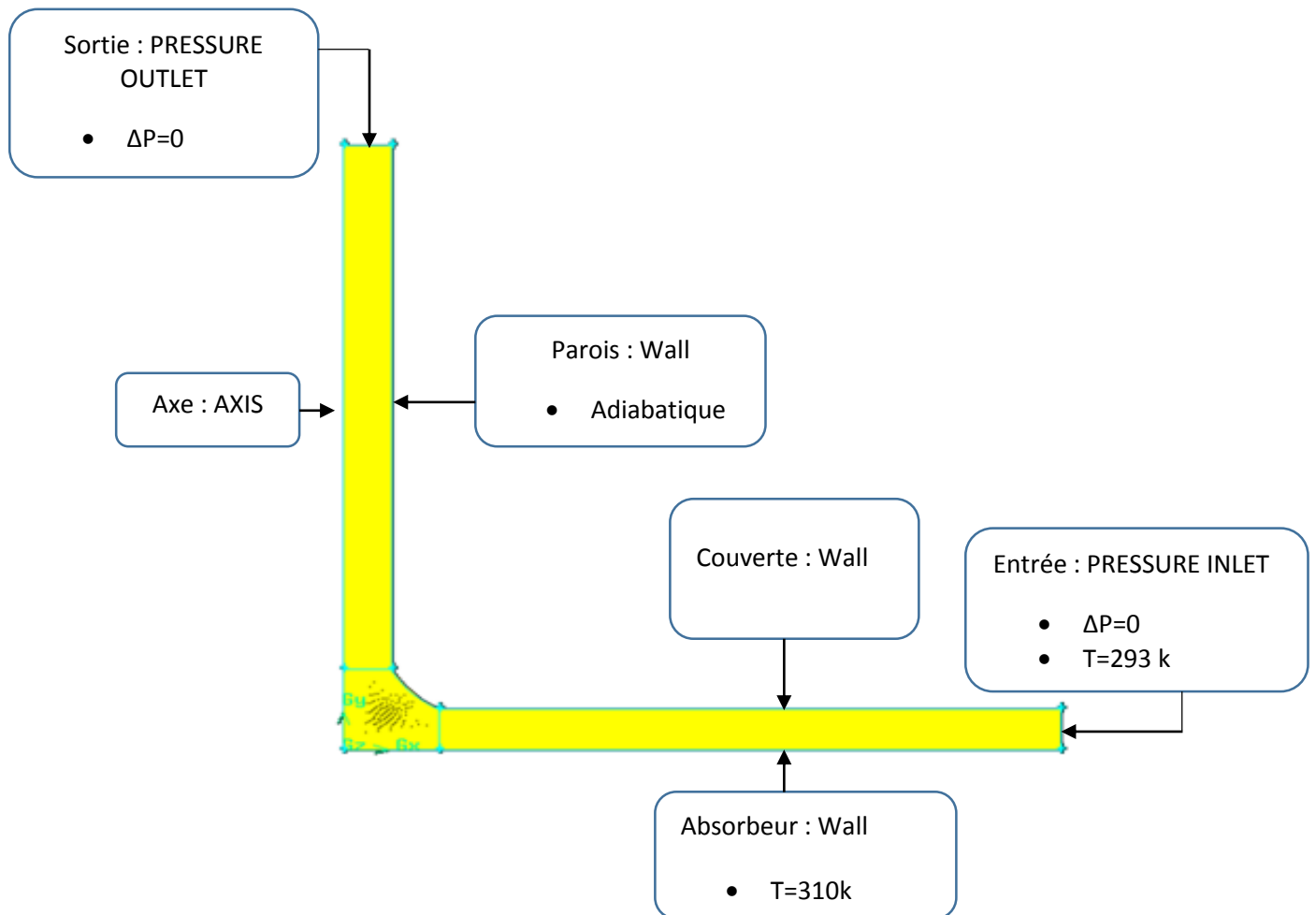


Fig.V.24. Les conditions aux limites.

V.2.3 Résultats et discussions :

- **Contours de vitesses**

Les figures (V.25) et(V.26) présentent respectivement les contours de vitesse pour les configurations à jonction droite et à jonction arrondie. On constate que la vitesse de l'air augmente faiblement dans le collecteur puis s'accroît de manière assez significative surtout dans la partie inférieure de la tour. Dans le cas de la configuration avec jonction coudée cette vitesse atteint une valeur maximale de l'ordre de 9.76m/s. Par contre pour la configuration avec une jonction droite la vitesse augmente uniformément dans la tour, tout en étant moins importante que le premier cas. La vitesse maximale atteint la valeur de 4,10 m/s, elle représente donc moins de la moitié de la valeur du cas configuration à jonction coudée.

La structure de l'écoulement dans le cas de la configuration droite fait apparaître une zone de recirculation à faible vitesse dans la partie basse de la tour provoquée par l'angle (ou l'arête) vif induisant des pertes d'énergie et par conséquent une diminution du débit comparée au cas de la configuration coudée.

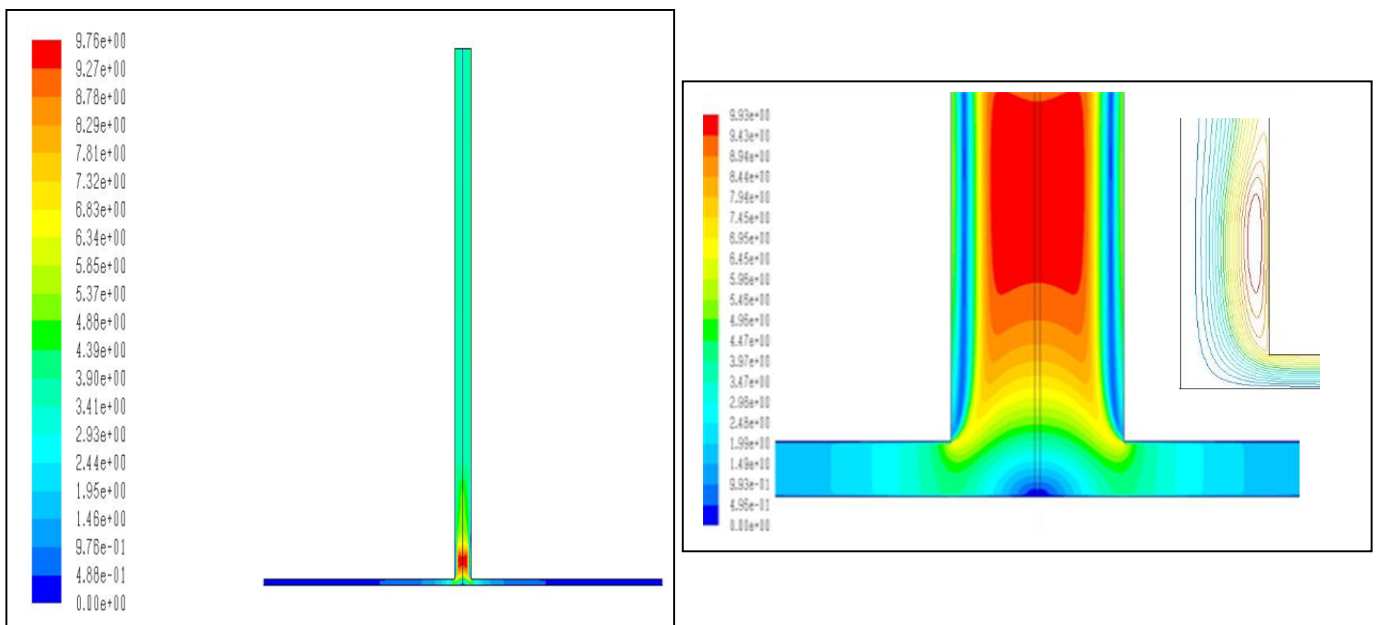


Fig.V.25. contours de vitesse pour la configuration droite

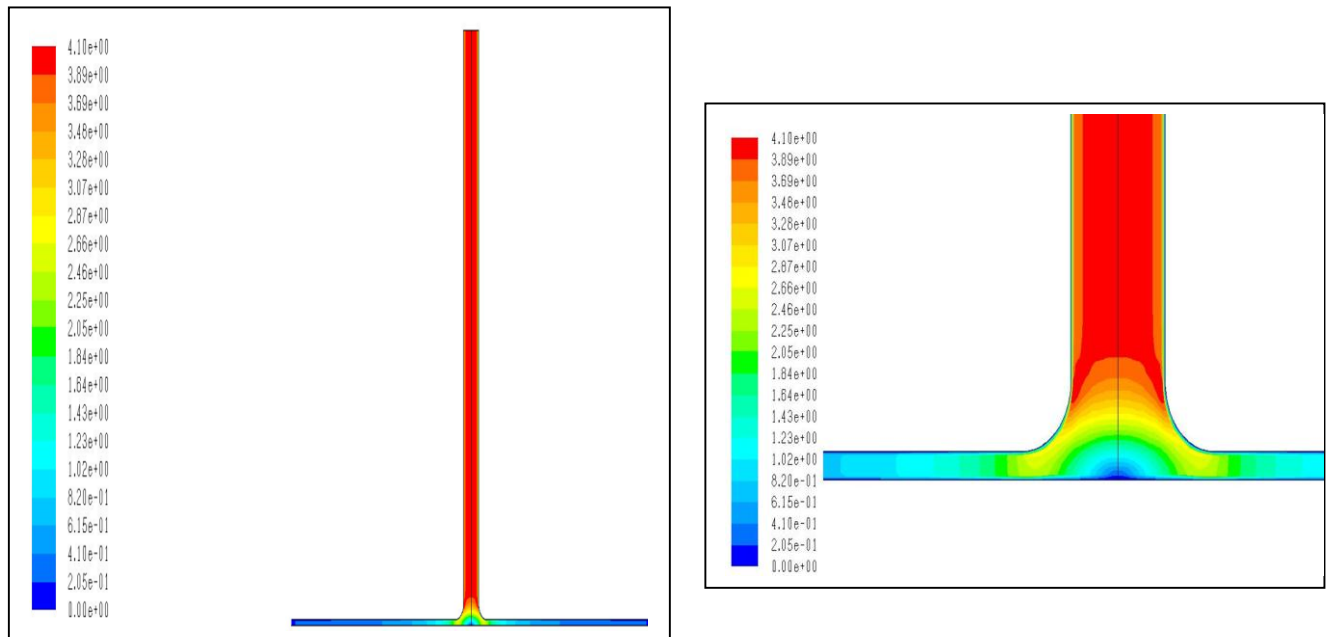


Fig.V.26. contours de vitesse pour la configuration avec coude

- **Distribution de la température :**

Les figures (V.27 et V.28) sont présentés les répartitions de température suivant le rayon du collecteur pour les configurations cheminée droite et coudée respectivement. On constate que la température augmente de façon non linéaire avec la distance radiale à partir de l'entrée pour atteindre une valeur maximale asymptotique vers le centre de la cheminée solaire. Le taux d'accroissement de la température diminue au fur et mesure qu'on s'approche de l'axe de la cheminée solaire. Ceci est dû au fait que l'air en s'échauffant absorbe de moins au moins la chaleur, la couche limite thermique s'épaississe lorsque le fluide avance vers le centre du collecteur.

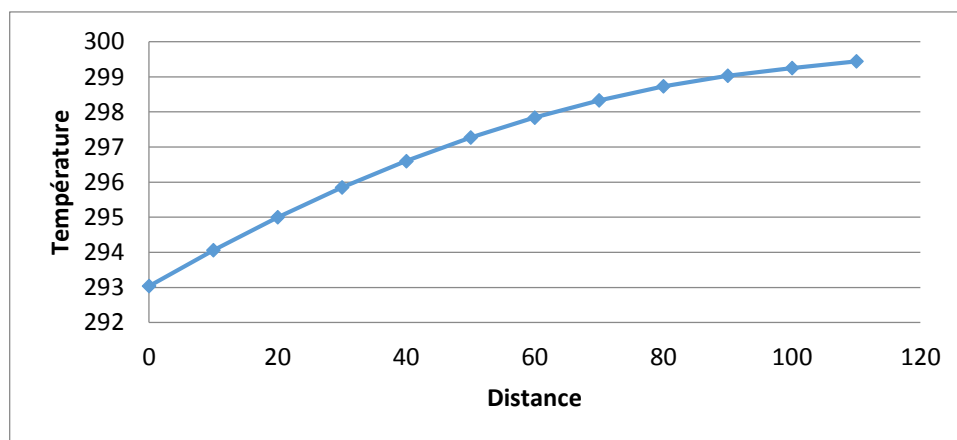


Fig.V.27. variation de la T° en fonction de la distance radiale cas de la cheminée droite.

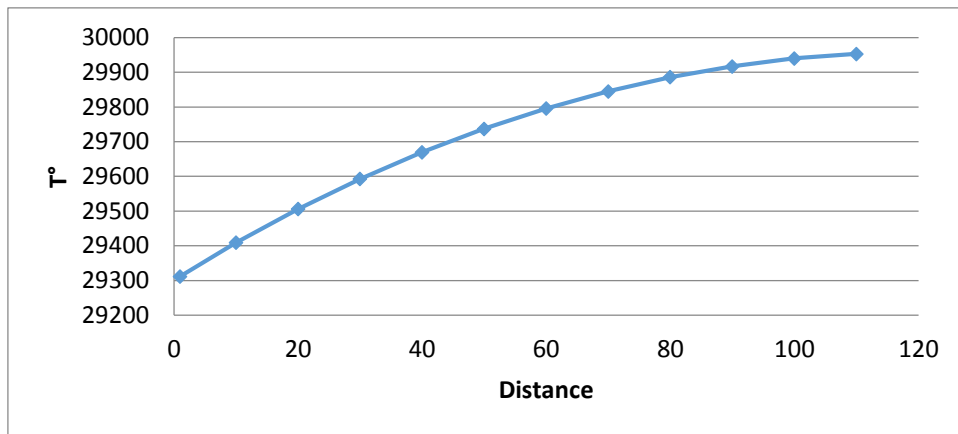


Fig.V.28. Variation de la T° en fonction de la distance radiale cas de la cheminée coude.

Conclusion

La configuration cheminée avec jonction arrondie donne de meilleurs résultats en termes de vitesses maximales que la configuration avec jonction droite.

V.3 Simulation paramétrique :

L'étude préliminaire nous a permis de choisir une configuration à jonction arrondie pour notre étude paramétrique, où nous allons examiner les effets de : la hauteur de cheminée H_{ch} , le rayon du collecteur R_{coll} , l'angle d'ouverture de la cheminée α et l'angle d'inclinaison β du toit de collecteur dont la hauteur à l'entrée dépend (voir figure V.29).

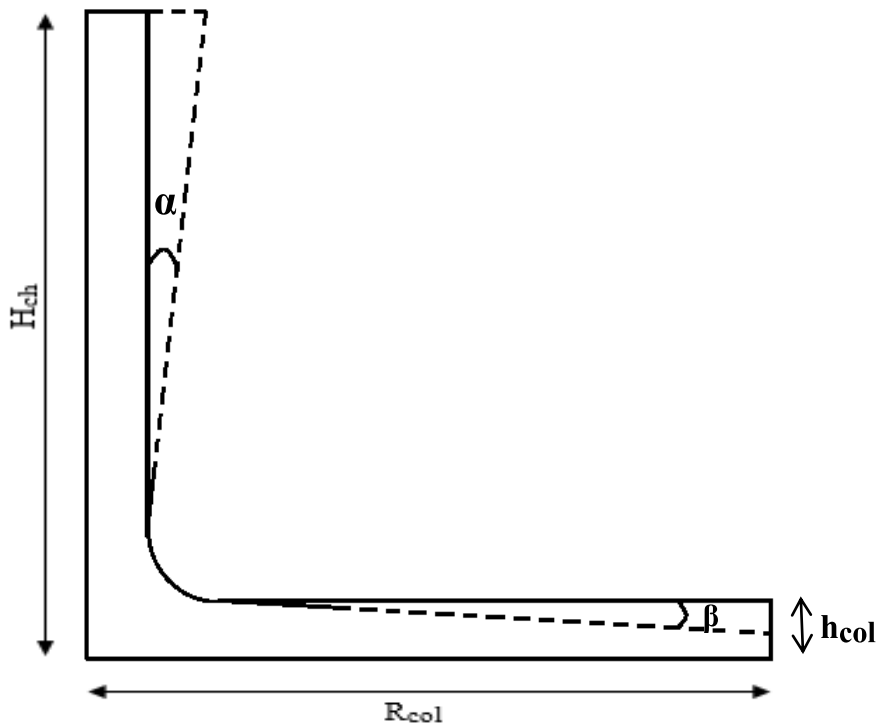


Fig.V.29. Géométrie de la cheminée solaire étudiée.

V.3.1 Maillage :

Pour ce deuxième cas on a utilisé un maillage dont le nombre de cellules varie de 76300 à 1470000 cellules (fonction du type paramètre étudié).

Afin de mieux visualiser le maillage, on a prévu des agrandissements sur les parties les plus importantes de la structure (figure V.30). Les échanges thermiques au niveau du collecteur imposent l'utilisation d'un maillage raffiné au niveau des deux côtés. Pour ne pas perdre l'information sur le gradient de température au niveau de l'entrée et la sortie de collecteur, on a utilisé l'option « double sided » avec un pas initial de 1.025 dans les deux côtés.

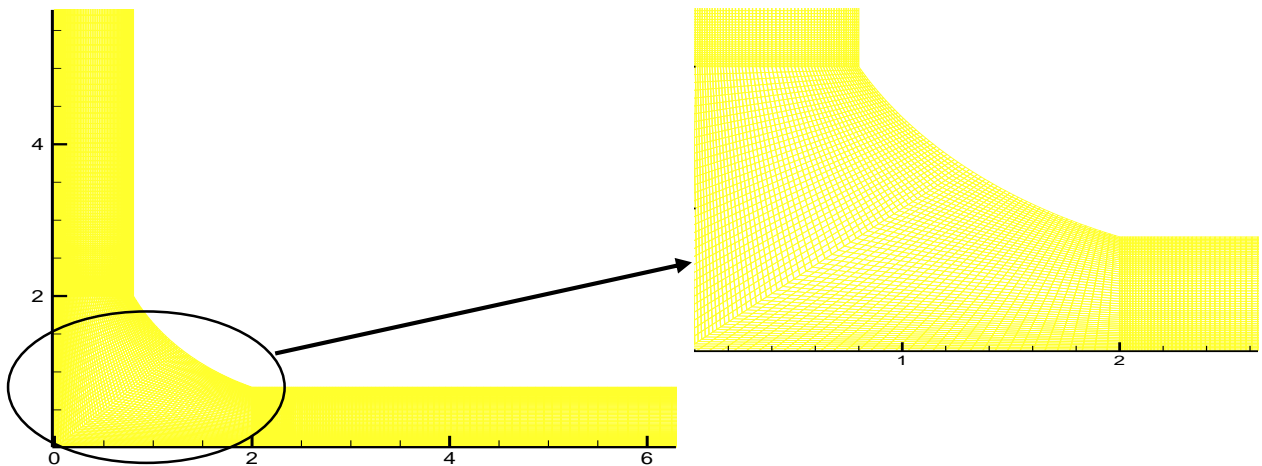


Fig.V.30. Maillage de la cheminée.

V.3.2 Résultats et discussions :

Les effets des paramètres géométriques, considérés, sur la vitesse de l'écoulement sont illustrés par les contours et les courbes ci-dessous.

V.3.2.1. Influence de la hauteur de la cheminée et l'angle β du collecteur :

a) Effet de la hauteur de cheminée

La hauteur de la cheminée influe d'une manière sensible sur la vitesse de l'écoulement.

Pour $\beta = 0^\circ$, les contours (Figure V.31) montrent que :

- Pour une hauteur de tour donnée, dans le collecteur, l'écoulement est lent et uniforme puis s'accélère et devient non uniforme en s'approchant de l'entrée de la tour de sorte que les particules fluides proches du toit se déplacent moins vite que celles qui en sont plus loin en raison de l'absence de composante horizontale de force de flottabilité sous le toit du collecteur où le déplacement de l'air est engendré par aspiration par la cheminée.
- la vitesse maximale est atteinte à la sortie de jonction,
- la vitesse max s'accroît avec l'augmentation de la hauteur de la cheminée de manière linéaire (Figure V.32), le taux d'accroissement est de l'ordre de 10 %.
- la vitesse diminue le long du rayon de la tour et ne semble pas varier sensiblement le long de celle-ci.

➤ Angle $\beta = 0^\circ$:

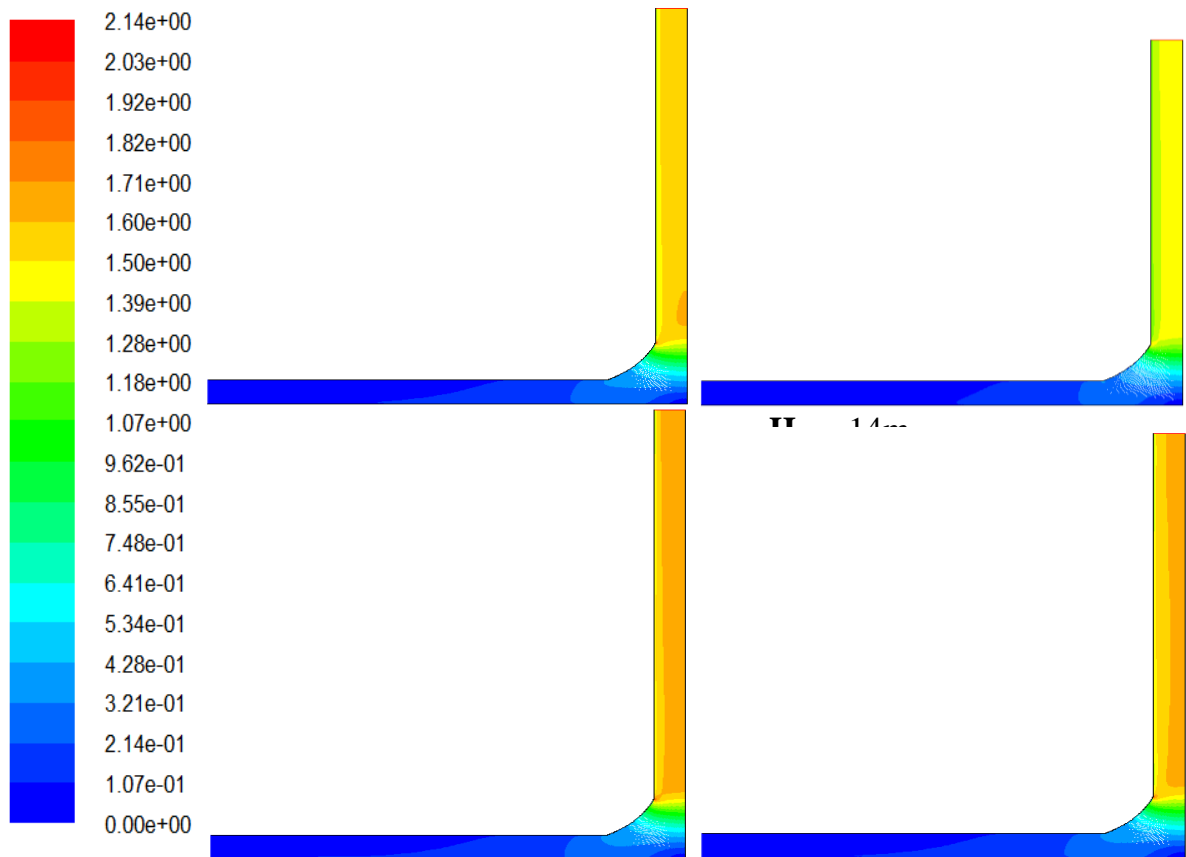


Fig.V.31. Contours de vitesses pour différents de la hauteur de la cheminée ($\beta = 0^\circ$).

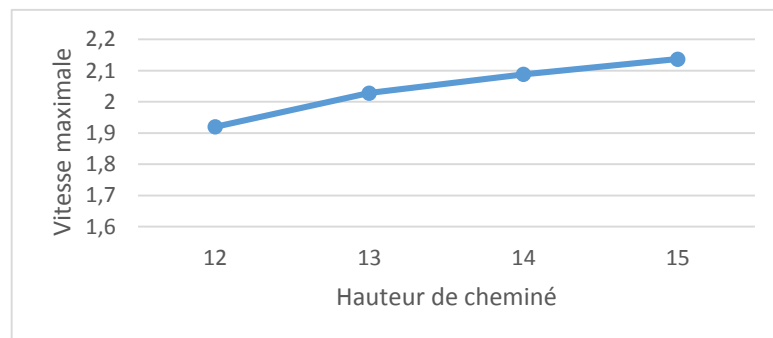


Fig.V.32. Variation de la vitesse max en fonction de la hauteur de la cheminée ($\beta = 0^\circ$).

b) Effet de l'angle d'inclinaison du toit du collecteur

L'effet de l'angle d'inclinaison β du toit du collecteur est montré par l'ensemble des figures V.31 et V.33 respectivement pour β égal à 0 et 3° .

La comparaison des figures V.31 et V.33 montre que les effets de la hauteur de cheminée sur la vitesse sont similaires pour β égal à 0 et 3°, mais avec des amplitudes plus importantes pour $\beta = 3^\circ$ que pour $\beta = 0^\circ$ en raison de l'apparition de composante tangentielle de force de flottabilité dans le cas $\beta = 3^\circ$. Ceci est clairement mis en évidence par la figure V.34 où sont montées les évolutions des valeurs maximales de vitesses en fonction de la hauteur de cheminée pour des deux valeurs de β .

➤ Angle $\beta = 3^\circ$

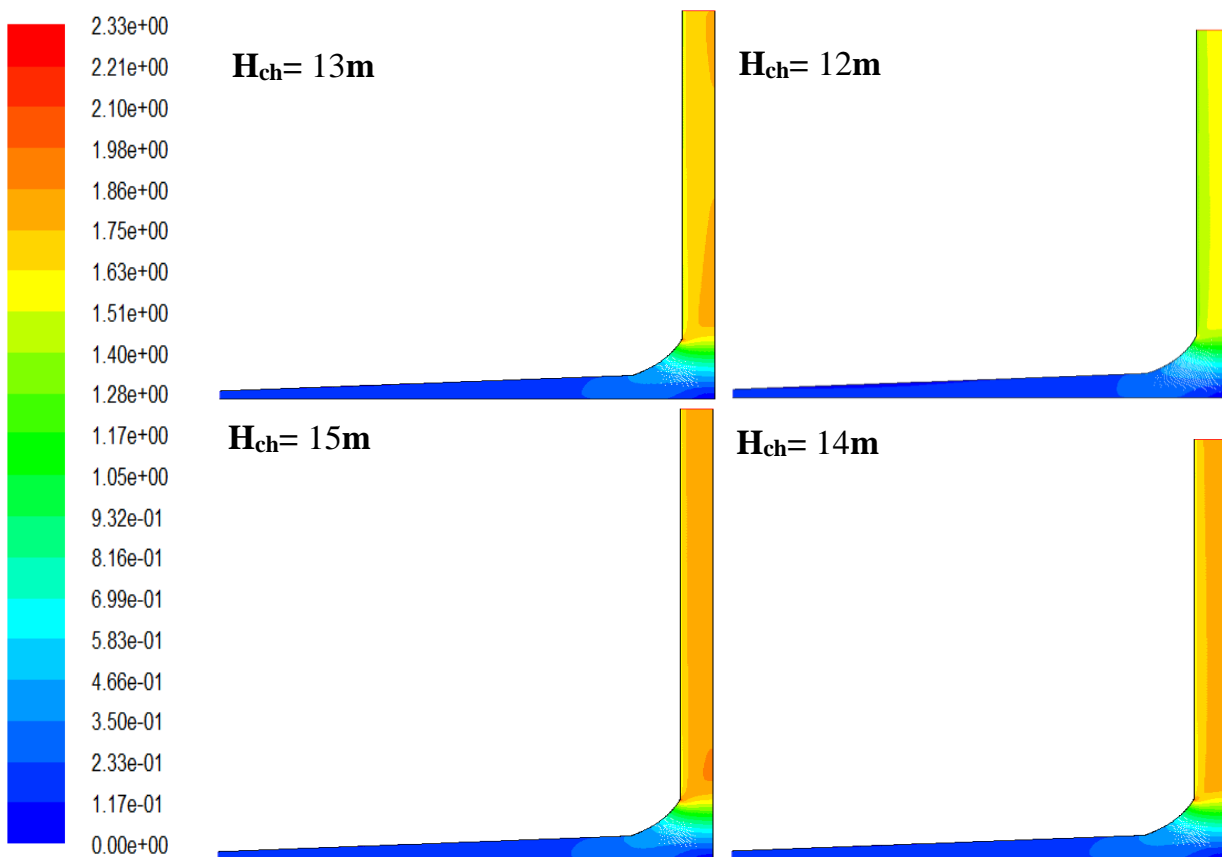


Fig. V.33. Contours de vitesses pour différents de la hauteur de la cheminée ($\beta = 3^\circ$)

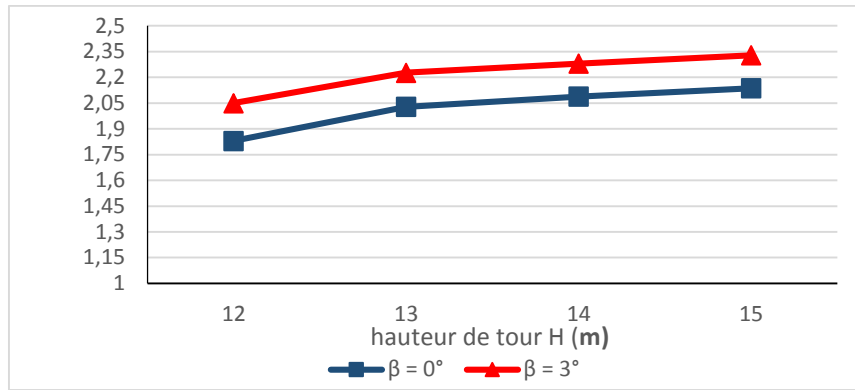


Fig.V.34. Evolutions de la vitesse en fonction de Hch

V.3.2.2. Influence de l'angle d'ouverture de la cheminée (α°) et le rayon du collecteur :

Figure V.35 illustre les contours de vitesse pour différentes valeurs d'angle d'ouverture α de cheminée, un collecteur de rayon 120 m et $\beta = 0$.

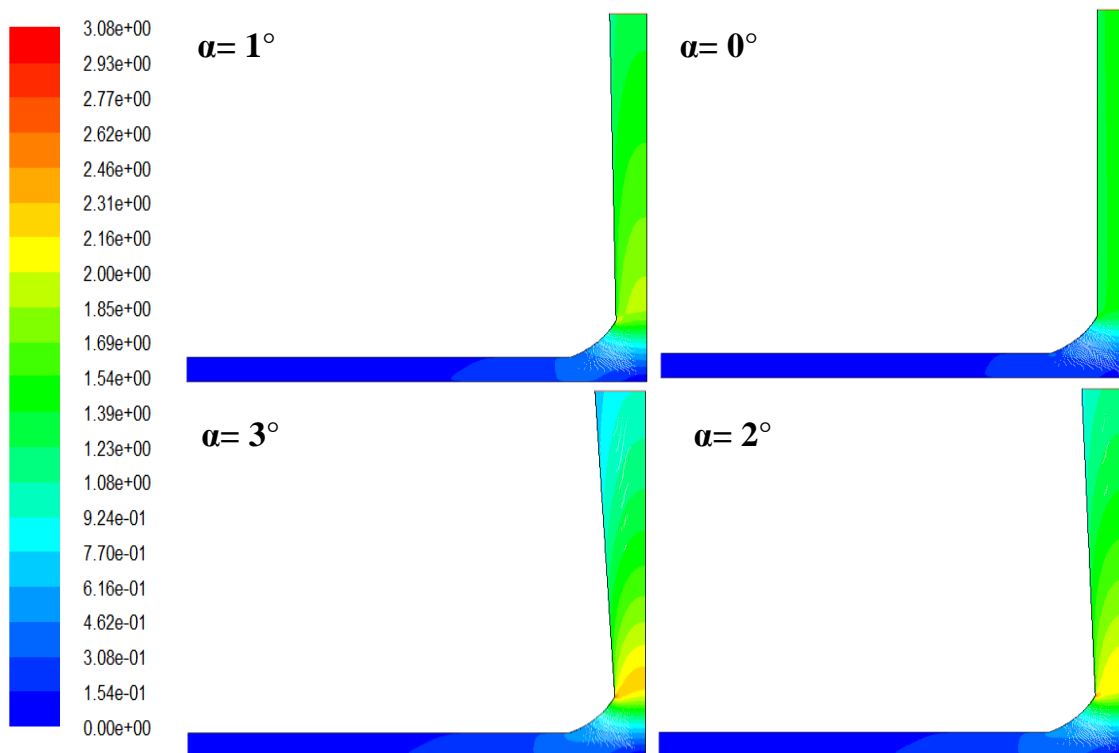


Fig.V.35. Contours de vitesses pour différents angles d'ouverture α , rayon de collecteur $R_{\text{coll}} = 120$ m et $\beta = 0^\circ$

On y observe que l'angle d'ouverture de cheminée α influe très sensiblement sur la distribution de la vitesse. Quand α augmente, la vitesse croît dans la partie inférieure de la cheminée et diminue dans sa partie supérieure en raison de l'augmentation de la section de sortie la tour avec α . Elle est plus faible au voisinage de la paroi qu'au cœur de l'écoulement et est maximale à la sortie de la jonction. Cela peut être expliqué par le fait que l'angle d'ouverture α induit une augmentation en douceur et progressive du diamètre le long de la cheminée et comme les pertes de charge sont inversement proportionnelles au diamètre ceci produit une baisse de ces pertes par rapport principalement au cas sans angle d'ouverture ($\alpha=0$), et donc une augmentation de débit et par conséquent un accroissement de vitesse au niveau de la section inférieure, qui est identique pour les quatre valeurs de α .

Les figures V.36, V.37 et V.38, illustrant l'effet de α sur le champ de vitesse respectivement pour les valeurs du rayon de collecteur 150, 180 et 200 m, montrent la même tendance que celle pour le rayon 120 m et un effet positif du diamètre du collecteur sur la vitesse. Ceci est bien illustré à la figure V.39 montrant l'effet de l'angle d'ouverture α et le rayon du collecteur sur la vitesse maximale. On voit clairement que cette grandeur augmente avec l'angle α et un accroissement presque linéaire avec le rayon du collecteur R_{col} , le taux d'accroissement est de l'ordre de 2%. L'effet de R_{col} est évident, il est dû à l'augmentation de la surface d'échange thermique (rayon collecteur grand) induisant l'accroissement de la température de l'air donc une flottabilité importante.

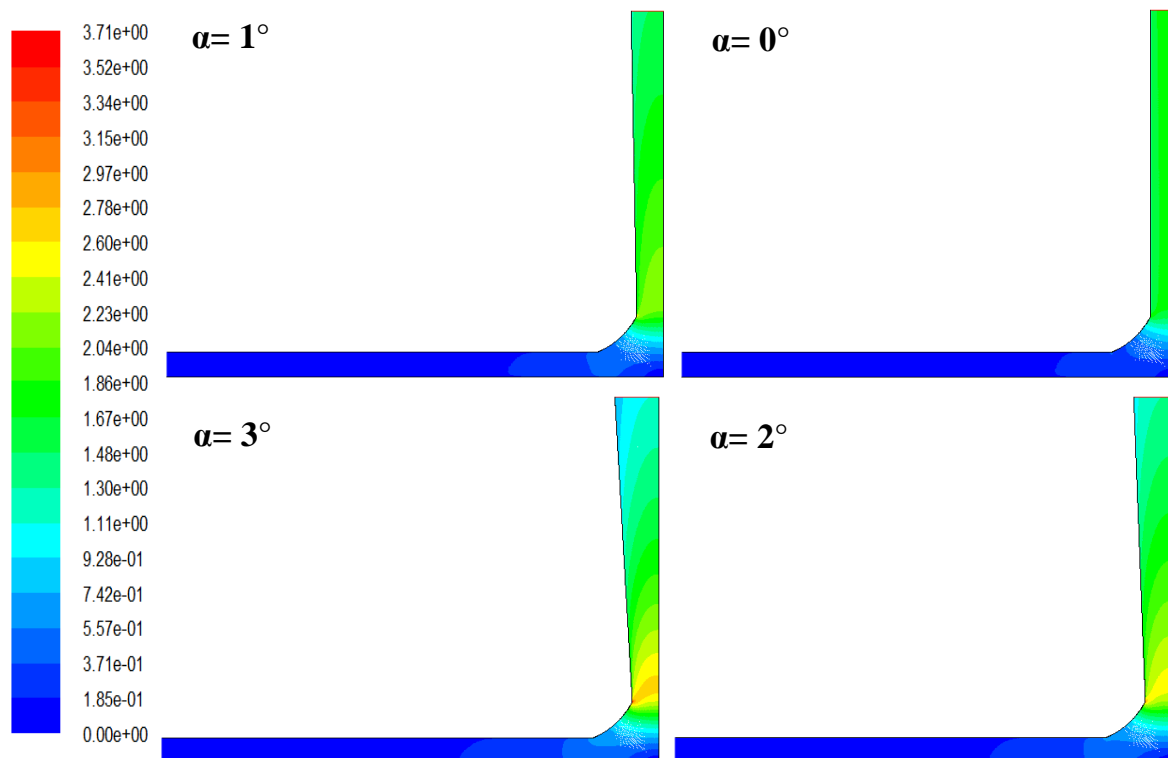


Fig.V.36. Contours de vitesses pour différents angles d'ouverture α
Rayon de collecteur $R_{coll} = 150$ m et $\beta = 0^\circ$.

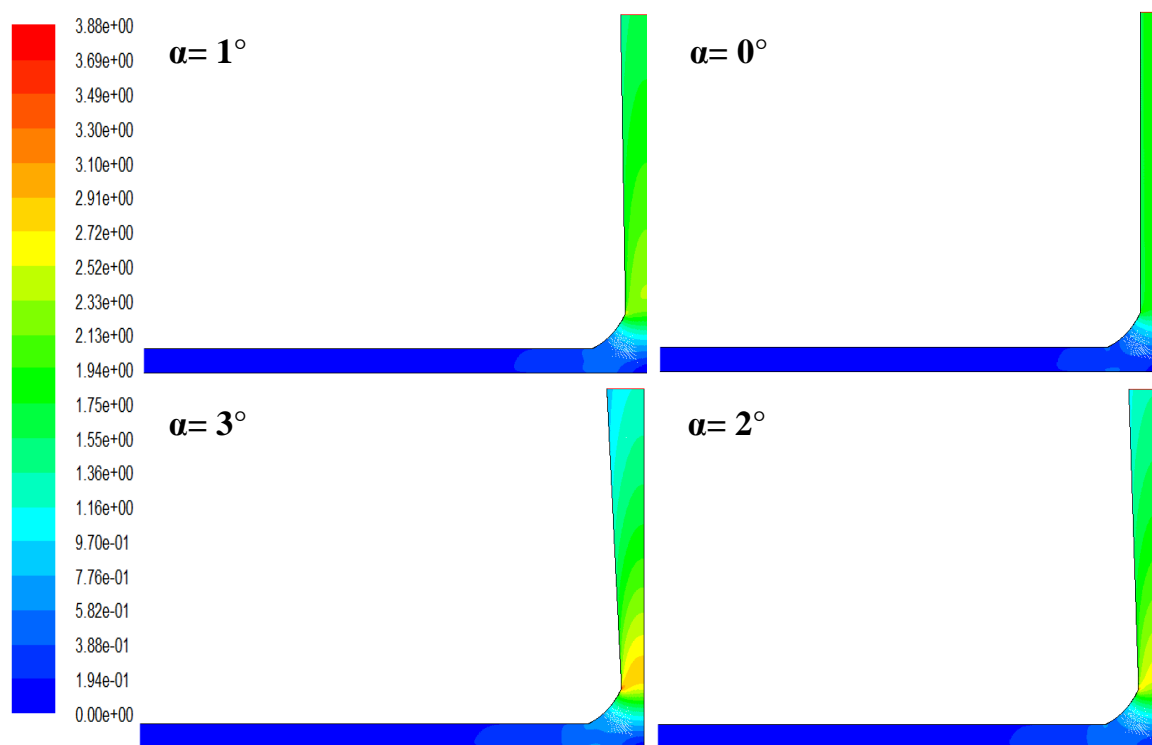


Fig.V.37 : Contours de vitesses pour différents angles d'ouverture α
, rayon de collecteur $R_{coll} = 180$ m et $\beta = 0^\circ$.

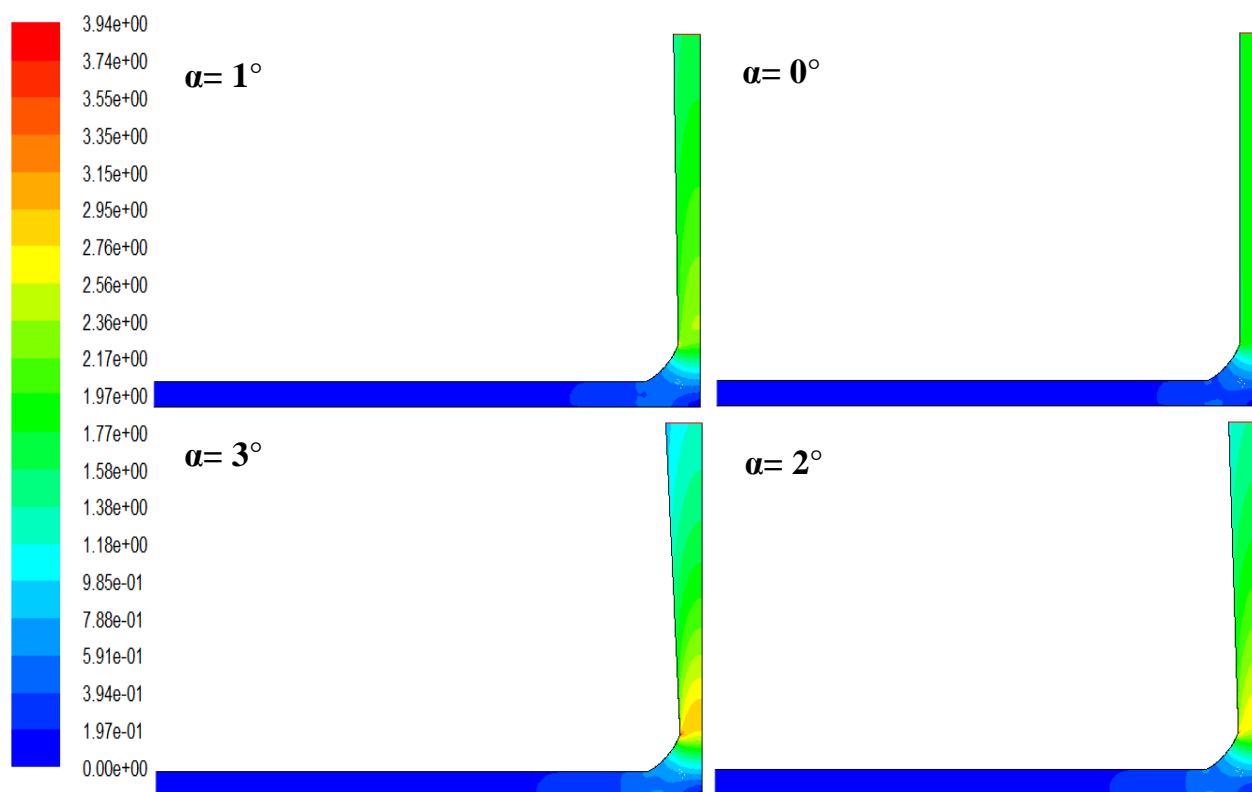


Fig.V.38 Contours de vitesses pour différents angles d'ouverture α
Rayon de collecteur $R_{coll} = 200$ m et $\beta = 0^\circ$.

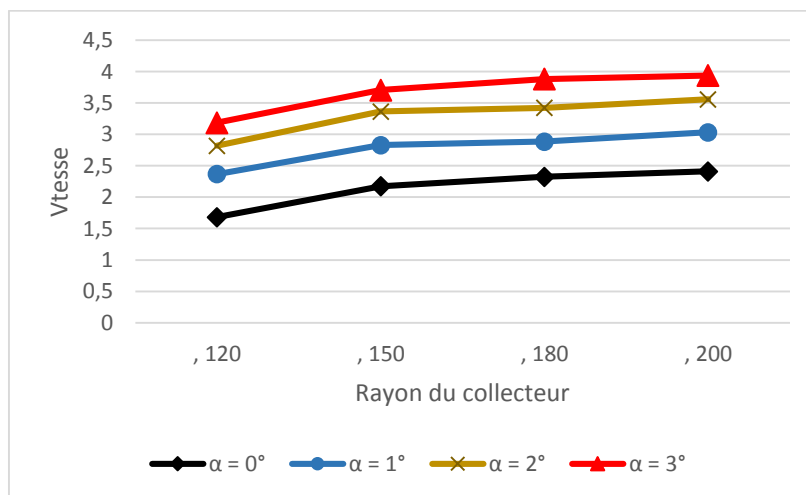


Fig.V.39 Evolutions de la vitesse en fonction de R_{coll} Pour différents angles α

IV.3.2.3. Influence de l'angle d'ouverture de la cheminée (α°) et l'angle (β°) du collecteur :

Sur les figures IV.24 et IV.25 sont présentés les contours de vitesse en fonction de l'angle d'ouverture α (0° , 1° , 2° , 3°) et en imposant deux valeurs à l'angle β (0° , 3°). On constate le même effet de α sur le champ de vitesse que l'étude précédente, et ceci pour les deux valeurs de l'angle du collecteur β . Pour examiner l'aspect quantitatif on a représenté sur la figure IV.26 la variation de la vitesse max en fonction de l'angle d'ouverture α pour deux valeurs de l'angle β (0° , 3°). On remarque que la vitesse max s'accroît de manière presque linéairement proportionnelle avec l'augmentation de l'angle d'ouverture α . On constate aussi que la vitesse max s'accroît lorsque β augmente et que le taux d'accroissement de la vitesse max lorsqu'on passe de $\beta=0^\circ$ à $\beta=3^\circ$ reste identique quand l'angle α prend des valeurs supérieures à zéro.

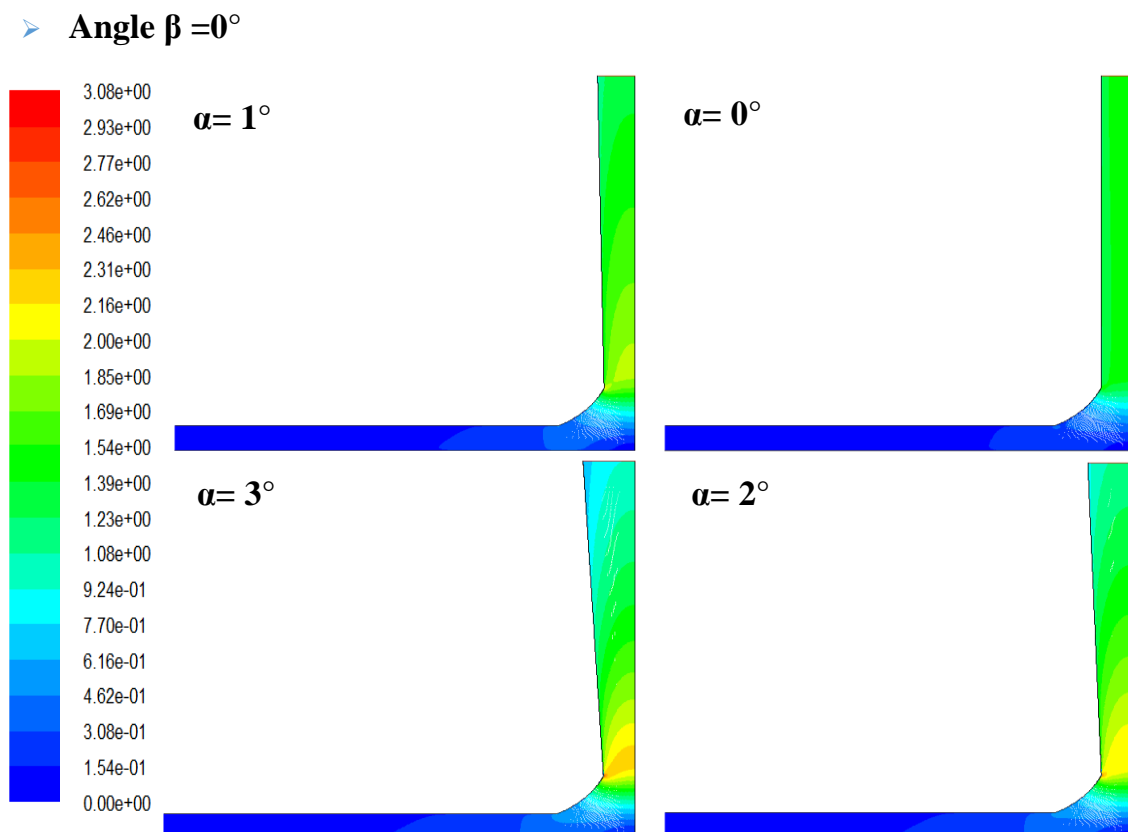


Figure IV.1: Contours de vitesses pour différents angles d'ouverture α ($\beta = 0^\circ$)

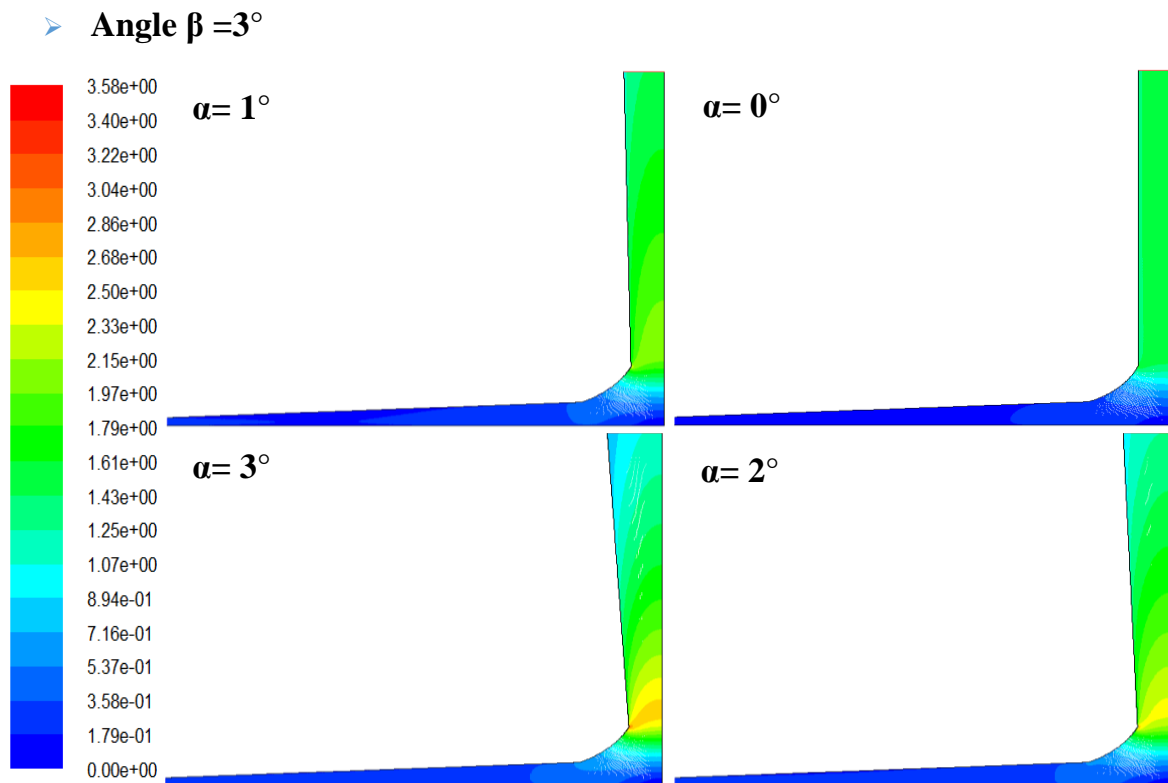


Fig.V.41. Contours de vitesses pour différents angles d'ouverture α ($\beta = 3^\circ$).

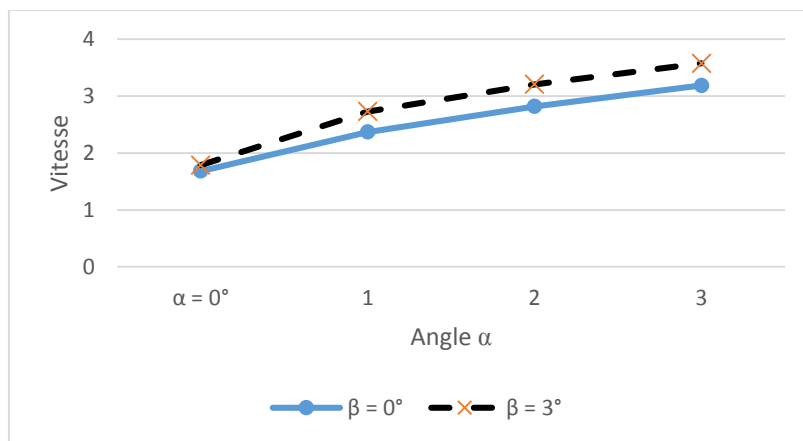


Fig.V.42. variation de vitesse max pour différents α et les deux angles de β .

V.3.3 Comparaisons entre les travaux Expérimentaux et numériques

Les figures V.43 et V.44 sont présentés respectivement les variations de vitesses et de températures en le long de l'écoulement de l'air dans le collecteur pour nos travaux numériques et expérimentales et d'autre travaux numériques [16].

On constate que l'allure de variation de la courbe de la vitesse est similaire pour les résultats des trois cas présentés. La comparaison quantitative ne peut être effectuée étant donné que les conditions d'étude sont différentes d'un cas à l'autre. La même constatations est relevée pour les variations de température.

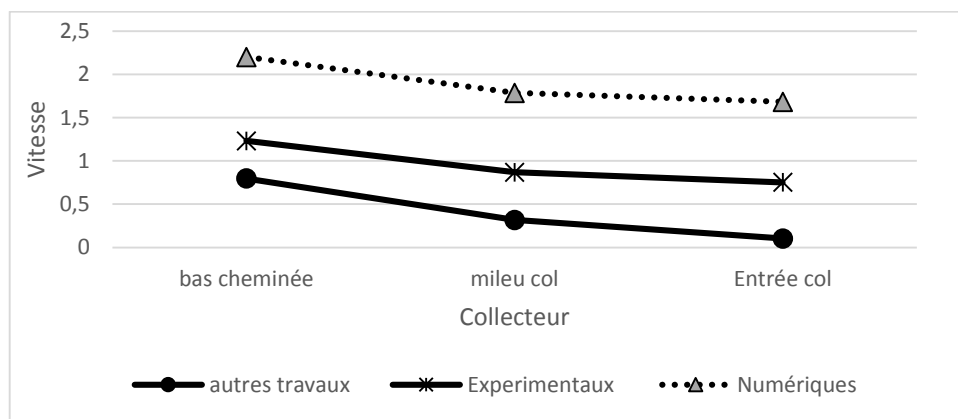


Fig.V.43. variation de vitesse le long du collecteur

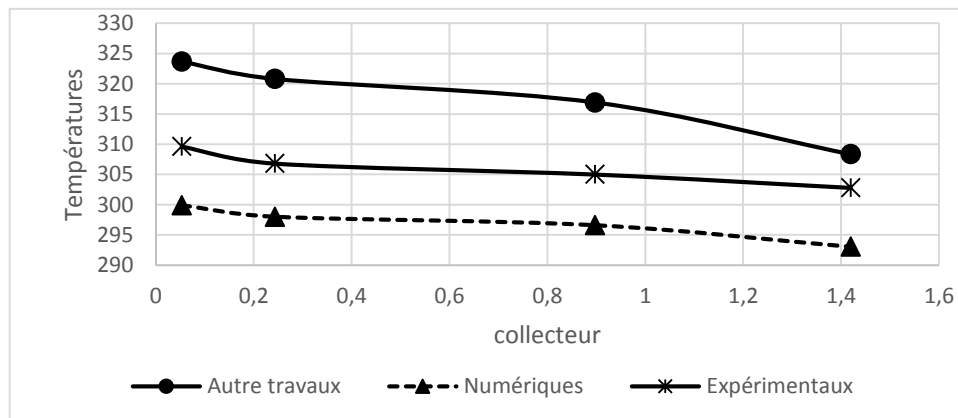


Fig.V.44 variation de Température le long du collecteur

CONCLUSION GENERALE

Dans cette thèse on a mené une étude expérimentale et numérique de l'écoulement et du transfert de chaleur induit par la convection naturelle à travers une cheminée solaire. Pour cela on a conçu un prototype de « cheminée solaire » qui est installé au niveau de la faculté de technologie.

Les tests expérimentaux ont porté sur l'influence des deux paramètres géométriques : (hauteur de la cheminée et l'angle d'inclinaison du collecteur) sur la thermique et la dynamique de l'écoulement. L'investigation numérique a été réalisée sur deux configurations géométriques du capteur solaire ayant des jonctions différentes et comporte principalement une étude de l'effet d'autres paramètres géométriques (rayon de collecteur, angles d'ouverture et d'inclinaison) sur la dynamique de l'écoulement et la distribution de la température. L'étude numérique a été menée en utilisant le code de calcul Fluent.

Il ressort des résultats obtenus dans ce travail de thèse les conclusions suivantes :

- La modification de la géométrie de la jonction cheminée collecteur a une influence sur la dynamique de l'écoulement : en effet la jonction arrondie produit des vitesses plus intéressantes que la jonction droite.
- Les vitesses maximales de l'air sont obtenues à l'entrée de la tour, l'endroit idéal pour l'emplacement de la turbine.
- La vitesse maximale s'accroît de façon linéaire avec l'augmentation la hauteur de la cheminée ou celle du rayon du collecteur.
- L'angle d'inclinaison a influence importante sur la dynamique de l'écoulement de sorte que la vitesse s'accroît quand l'angle augmente.
- L'influence de l'angle d'ouverture de la cheminée sur la dynamique de l'écoulement est positive. En effet il y'a un accroissement linéaire de la vitesse lorsque l'angle augmente.

En perspective des travaux futurs on propose :

- De réaliser une simulation numérique prenant en compte le couplage convection naturelle rayonnement.
- Des investigations numériques en instationnaire car le rayonnement varie durant la journée.
- Réaliser une simulation d'une centrale solaire à cheminée comportant la turbine à air.

Devant l'importance de ce sujet d'avenir, on espère que notre étude servira de base pour d'autres travaux plus détaillés et mènera à la construction d'un prototype dans le Sahara Algérien.

Références bibliographiques

Introduction générale

- [1] Le 5ème rapport du GIEC du 15 septembre 2016 décrypté, <http://www.leclimatchange.fr>.
- [2] IRN, Institut Royal Météorologique, Vigilance climatique, 2015.
- [3] Energie durable: Exigence et mise en œuvre M. Huart - [www. apere.org](http://www.apere.org) (octobre 2016).
- [4] Torcellini. P, Pless. S, 'Trombe walls in low-energy buildings: practical experiences', Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy , 2004.

Chapitre I

- [1] Jörg Schlaich, Rudolf Bergermann, Wolfgang Schiel, Gerhard Weinrebe Schlaich, Bergermann und Partner (sbgmbh), Hohenzollernstr. Stuttgart, Germany. Design of Commercial Solar up draft tower systems –Utilization of Solar Induced convective Flows for Power generation, 2003.
- [2] Services for Professionals in Solar Energy and Radiation (SoDa). [http://www.soda- is.com](http://www.soda-is.com).
- [3] Fondation DESERTECH. www.desertec.org.
- [4] M. FEIDT. Energétique : concepts et applications. Dunod. ISBN 2100490664. 2006.
- [5] Desertec Foundation. Clean Power from Deserts. The DESERTEC Concept for Energy, Water and Climate Security White Book - 4th Edition. ProtextVerlag / TREC. ISBN 3929118674. 2009.
- [6] Schlaich, J., Tension structures for solar electricity generation. Engineering Structures, Vol. 21, pp. 658–668, 1999.
- [7] Schlaich, J, Solar thermal electricity generation Engineering Structures Int., Vol. 4, pp.76-81, 1994.
- [8] www.structurae.de.
- [9] Enviromission. Website address: <http://www.enviromission.com.au>.
- [10] http://www.gov.cn/english/2010-12/28/content_1773883.htm.
- [11] <http://www.ingenieriacampo.com>
- [12] <http://www.elioth.com>
- [13] <http://www.floatingsolarchimney.com>

Chapitre II

- [1] Schlaich J. The solar chimney: electricity from the sun: Edition Axel Menges; 1995
- [2] Krisst R. Energy transfer system. Alternative sources of energy. 1983;63:8-10.
- [3] Kulunk H. A prototype solar convection chimney operated under Izmit conditions. Proceedings of the seventh MICAS. 1985;162.

- [4] Pasumarthi N, Sherif S. Performance of a demonstration solar chimney model for power generation. California state UNIV, SACRAMENTO, CA,(USA). 1997:203-40.
- [5] Pasumarthi N, Sherif S. Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney model—Part II: experimental and theoretical results and economic analysis. *International Journal of Energy Research*. 1998;22:443-61.
- [6] Zhou X, Yang J. Temperature field of solar collector and application potential of solar chimney power systems in China. *Journal of the Energy Institute*. 2008;81:25-30.
- [7] Zhou X, Yang J, Xiao B, Hou G. Experimental study of temperature field in a solar chimney power setup. *Applied Thermal Engineering*. 2007;27:2044-50.
- [8] Ketlogetswe C, Fiszdon JK, Seabe OO. RETRACTED: Solar chimney power generation project The case for Botswana. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008;12:2005-12.
- [9] Maia CB, Ferreira AG, Valle RM, Cortez MFB. Theoretical evaluation of the influence of geometric parameters and materials on the behavior of the airflow in a solar chimney. *Computers & Fluids*. 2009;38:625-36.
- [10] Kasaeian AB, Heidari E, Vatan SN. Experimental investigation of climatic effects on the efficiency of a solar chimney pilot power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011 .15:5202-6.
- [11] Shadi Kalash, Wajih Naimeh, Salman Ajib. Experimental investigation of the solar collector temperature field of a sloped solar updraft power plant prototype. *Solar Energy* 98: 70–77. 2013
- [12] Zheng Zou, Zhiqiang Guan, Hal Gurgenci, Yuanshen Lu. Solar enhanced natural draft dry cooling tower for geothermal power applications. *Solar Energy* 86: 2686–2694. 2012.
- [13] Bugutekin A. Effect of the collector diameter on solar chimney power plants. *Energy education science and technology part A-energy science and research*. 2011 27:155-68.
- [14] Najmi M, Nazari A, Mansouri H, Zahedi G. Feasibility study on optimization of a typical solar chimney power plant. *Heat and Mass Transfer*. 2011 48:475-85
- [15] Gholamalizadeh E, Mansouri SH. A comprehensive approach to design and improve a solar chimney power plant: A special case – Kerman project. *Applied Energy*. 2013 102:975-82.
- [16] Mehran Ghalamchia, Alibakhsh Kasaeian, Mehrdad Ghalamchi. Experimental study of geometrical and climate effects on the performance of a small solar chimney. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43: 425–431. 2015.
- [17] M.Ulian, M. Ricard, B.Lasmarrigue, M Mathias, “ Cheminée tour solaire“, Université de Pau et des Pays de l’Adour, 2010/2011.
- [18] Kasaeian A, Heidari E, Nasiri Vatan S. Modeling of the temperature changes in a solar chimney. *The Conference on Energy Management and Optimization*. Tehran, Iran 2010.
- [19] Khanal , R., Lei, C. Une enquête expérimentale sur un mur solaire passif incliné pour la ventilation naturelle. *Énergie solaire*. 2014 107, 461-474.
- [20] Shahreza, AR., Imani, H. Experimental and numerical investigation on an innovative solar chimney.

Energy Conversion and Management. 2015 95, 446-452.

[21] Okada, S., Uchida, T., Karasudani, T., Ohya, Y. Improvement in Solar Chimney Power Generation by Using a Diffuser Tower. *Journal of Solar Energy Engineering*. 2015; 137(3), 031009.

[22] Tan, AYK., Wong, NH. Influences of ambient air speed and internal heat load on the performance of solar chimney in the tropics. *Solar Energy*. 2014; 102, 116-125.

[23] Nasirivatan , S., Kasaeian , A., Ghalamchi , M., & Ghalamchi , M. Optimisation des performances de la centrale solaire à cheminée utilisant le vent électrique / corona. *Journal of Electrostatics*. 2015; 78, 22-30.

[24] Weinrebe G, Schiel W. ‘Up-Draught Solar Tower and Down-Draught Energy Tower—A Comparison. *Proceedings of the ISES Solar World Congress 2001*2001.

[25] Mullett L. La cheminée solaire - efficacité globale, conception et performance. *International Journal of Ambient Energy*. 1987 ; 8: 35 -40 .

[26] Pasumarthi N, Sherif SA. Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney model-Part I: Mathematical model development. *Int. J. Energy Res*. 22:277-88, 1998.

[27] Pasumarthi N, Sherif SA. Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney model-Part II: Experimental and theoretical results and economic analysis. *Int. J. Energy Res*. 22:443-61, 1998.

[28] Padki M, Sherif S, Chan A. Solar chimney for power generation in rural areas. *Seminar on energy conservation and generation through renewable resources, Ranchi, India*1989. p. 91-6.

[29] Padki M, Sherif S. Solar chimney for medium-to-large scale power generation. *Proceedings of the manila international symposium on the development and management of energy resources*1989. p. 423-37.

[30] Padki M, Sherif S. On a simple analytical model for solar chimneys. *International journal of energy research*. 1999 23:345-9.

[31] Lodhi M. Application of helio-aero-gravity concept in producing energy and suppressing pollution. *Energy conversion and management*. 1999 40:407-21.

[32] Chitsomboon T. A validated analytical model for flow in solar chimney. *International Journal of Renewable Energy Engineering*. 2001 3:339-46.

[33] Atit Koonsrisuk. Mathematical modeling of sloped solar chimney power plants. *Energy* 47: 582-589. 2012.

[34] Atit Koonsrisuk, Tawit Chitsomboon. A single dimensionless variable for solar chimney power plant modeling. *Solar Energy* 83: 2136–2143. 2009.

[35] Penghua Guo, Jingyin Li, Yuan Wang, Yingwen Liu. Numerical analysis of the optimal turbine pressure drop ratio in a solar chimney power plant. *Solar Energy* 98: 42–48. 2013.

[36] Gholamalizadeh E, Mansouri SH. A comprehensive approach to design and improve a solar chimney power plant: A special case – Kerman project. *Applied Energy*. 2013;102:975-82.

- [37] Bernardes M. Technische, ökonomische und ökologische Analyse von Aufwindkraftwerken (Technical, Economical and Ecological Analysis of Solar Chimney Power Plants): Ph. D. thesis, Universität Stuttgart.(in German); 2004.
- [38] Patel, S. K., Prasad, D., Ahmed, M. R. Computational studies on the effect of geometric parameters on the performance of a solar chimney power plant. *Energy Conversion and Management*. 2014; 77, 424-431.
- [39] Sandeep K. Patel, Deepak Prasad, M. Rafiuddin Ahmed. Computational studies on the effect of geometric parameters on the performance of a solar chimney power plant. *Energy Conversion and Management* 77: 424–431. 2014.
- [40] Fei C, Liang Z, Huashan L, Liejin G. Performance analysis of conventional and sloped solar chimney power plants in China. *Applied Thermal Engineering* 50 : 582-592. 2013.
- [41] Jing-yin Peng-hua G, L, Yuan W. Numerical simulations of solar chimney power plant with radiation model. *Renewable Energy* 62 : 24-30. 2014.
- [42] 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.
- [43] Atit Koonsrisuk, Tawit Chitsomboon. Mathematical modeling of solar chimney power plants. *Energy* 51: 314-322. 2013.
- [44] RoozbehSangi, Majid Amidpour, Behzad Hosseinizadeh. Modeling and numerical simulation of solar chimney power plants. *Solar Energy* 85: 829–838. 2011.
- [45] Ehsan Gholamalizadeh, Man-Hoe Kim. Three-dimensional CFD analysis for simulating the greenhouse effect in solar chimney power plants using a two-band radiation model. *Renewable Energy* 63: 498-506. 2014.
- [46] Ehsan Gholamalizadeh, Man-Hoe Kim. Thermo-economic triple-objective optimization of a solar chimney power plant using genetic algorithms. *Energy* 70 : 204-211. 2014.
- [47] Peng-hua G, Jing-yin L, Yuan W. Numerical simulations of solar chimney power plant with radiation model. *Renewable Energy* 62 : 24-30. 2014.
- [48] Larbi S., Bouhdjar A., Chergui T. Performance analysis of a solar chimney power plant in the southwestern region of Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 470–477. 2010.
- [49] 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
- [50] Gannon AJ, Backström TW. Solar chimney cycle analysis with system loss and solar collector performance. *J. Sol Energy Eng.* 122:133-7, 2000.
- [51] Pastohr H, Kornadt O, Gürlebeck K. Numerical and analytical calculations of the temperature and flow field in the upwind power plant. *Int. J. Energy Research*. Vol. 28, pp. 495–510. 2004.
- [52] Dehghani S., Mohammadi A. H. Optimum dimension of geometric parameters of solar chimney

- power plants—A multi-objective optimization approach. *Solar Energy* 2014; 105, 603- 612.
- [53] Bernardes, M. A. S., Theodor W. Von Backstrom, and Detlev G. Kroger. 2009. Analysis of some available heat transfer coefficients applicable to solar chimney power plant collectors. *Solar Energy* 83:264–75.
- [54] Chergui, T., Larbi, S., Bouhdjar, A. and Gahgah, M. Performances analysis of a solar chimney power plant in South of Algeria. In: *Proceedings of the World Renewable Energy Congress, Glasgow, 2008*.
- [55] Chergui, T, Larbi, S., Bouhdjar, A. Analysis of flows modelling and energy performances in solar chimneys. *International Review on Modelling and Simulation, Vol. 1*, pp. 214–220, 2008.
- [56] Chergui T., Larbi, S., Bouhdjar, A. and Gahgah, M. Heat and Fluid Flows Analysis in Solar Chimney Power Plants. *Tenth World Renewable Energy Congress (WREC XI 2010)*. Abu Dhabi, United Arab Emirates, 25- 30 September 2010.
- [57] Chergui, T., Larbi, S., Bouhdjar, A. and Gahgah, M. Heat transfer modelling analysis of flows in solar chimneys. In: *Proceedings of the fourth international conference on computational heat and mass transfer, Guangzhou, 2009*.
- [58] Chergui T., Larbi S., Bouhdjar A. Thermo-hydrodynamic aspect analysis of flows in solar chimney power plants—a case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 : 1410–1418. 2010.
- [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] Patankar VSV. *Numerical heat transfer and fluid flow*. New York: McGraw Hill Book Company; 1980.
- [62] Zhou X, Yang J, Xiao B, Hou G, Xing F. Analysis of chimney height for solar chimney power plant. *Applied Thermal Engineering*. 2012;29:178-85.
- [63] Bejan, A. *Entropy Generation Minimization: The Method of Thermodynamic Optimization of Finite-Time Systems and Finite-Time Processes*. CRC Press, Boca Raton, Fl., 2012.
- [64] Mahmud S, Fraser RA. The second law analysis in fundamental convective heat transfer problems. *Int. J. Thermal Sci.* 42:177–86. 2013.
- [65] Mahmud S, Fraser RA. Thermodynamic analysis of flow and heat transfer inside channel with two parallel plates. *Exergy, Int. J.*; 2:140–6. 2013.
- [66] Patel, S. K., Prasad, D., Ahmed, M. R. Computational studies on the effect of geometric parameters on the performance of a solar chimney power plant. *Energy Conversion and Management*. 2014; 77, 424-431.
- [67] Lebbi, M., Chergui, T., Boualit, H., Boutina, I. Influence of geometric parameters on the hydrodynamics control of solar chimney. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014; 39(27),

15246-15255.

[66] Al-Kayiem, H. H., Sreejaya, K. V., Gilani, S. I. U. H. Mathematical analysis of the influence of the chimney height and collector area on the performance of a roof top solar chimney. *Energy and Buildings*. 2014; 68, 305-311.

[67] Gholamalizadeh E, Mansouri SH. A comprehensive approach to design and improve a solar chimney power plant: A special case – Kerman project. *Applied Energy*. 2015;102:975-82.

[68] Guo P-h, Li J-y, Wang Y. Numerical simulations of solar chimney power plant with radiation model. *Renewable Energy*. 2016;62:24-30.

Chapitre III

[1] Suhas Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, Washington D.C, (1980).

[2] Launder. B. E, Spalding. D. B, 'Mathematical Models of Turbulence', Academic Press.

[3] Ciofalo. M, Collins, M.W., Stasiek, J.A, 'Flow and heat transfer prédictions in flow passages of air preheaters: assessment of alternative modeling approaches, in *Computer simulations in Compact Heat Exchangers*', Computational Mechanics Publications, London, UK, 1998.

[4] Patankar, S.V, 'Numerical Heat Transfer and Fluid Flow', Hémisphère Inc., McGraw-Hill, Washington, États-Unis, 197 p, 1980.

Chapitre IV

[1] http://wiki.labaixbidouille.com/index.php/Mesure_de_température_DS18B20.

[2] http://wiki.labaixbidouille.com/index.php/Mesure_de_Vitesse_LM393.

[3] https://www.gotronic.fr/art_module_arduino_nano.htm

[4] https://fr.wikibooks.org/wiki/Initiation_Labview

[5] <https://www.instructables.com>

[6] <https://www.arduino.cc/en/Main/Software.com>