

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'automatique et d'électromécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Energies renouvelables

Spécialité : Energies renouvelables en électrotechnique

Par : Douirem Freiha, Haimoud Marwa

Thème

Etude numérique d'une cheminée solaire

Soutenu publiquement le : ../06/2019

Devant le jury :

Akermi Fouzi

Bouaraour Kamel

Chergui Toufik

Ouassi Fares

MCA

MRB

Univ de Ghardaïa

Univ de Ghardaïa

URAER de Ghardaïa

Université

Président

Encadreur

Co-encadreur

examineur

Année universitaire : 2018/2019

Remerciement

Ce n'est pas qu'il est difficile de remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à ce travail, mais il faut avouer que les formules sont nombreuses et que le choix des bons mots a été toujours difficile. Entre vifs, sincères, généreux et profonds

Tout d'abord, Nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir inspiré la force et la volonté d'aller au bout de ce modeste projet, et aussi de nous avoir donné l'amour du savoir.

Nous tenons à présenter nos sincères remerciements et notre profonde reconnaissance à notre promoteur et encadreur Monsieur Bouaraour Kamel pour le sujet qu'il nous a proposé. Merci d'avoir accepté de suivre la réalisation du travail, pour les conseils et l'encouragement. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de notre reconnaissance pour sa patience, sa disponibilité, ses conseils et son aide, qui nous ont permis de réaliser ce travail dans les meilleures conditions.

Nous tenons tout particulièrement à remercier enseignant, Monsieur chergui Toufik, qui sans sa patience, générosité et surtout discipline, ce travail n'aurons vouent le jour.

Nous remercions également les membres du jury qui ont pris le soin d'évaluer notre travail

A l'ensemble des enseignants du département Energie renouvelable.

Nous tenons à présenter tout notre respect à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation du primaire jusqu'au cycle universitaire.

Nous tenons à exprimer nos immenses gratitudees à nos parents, nos frères, nos sœurs et l'ensemble de nos proches, pour leur soutien permanent et leur encouragement tout au long de ces années, sans lesquels nous n'aurons jamais mené à bien ce travail

A tous mes camarades de promotion pour leur soutien et la bonne ambiance qu'ils ont créée tout au long des années de formation

DEDICACE

Nous dédions cet humble travail

À, nos parents qu'ils sont toujours les plus chers

À nos frères et nos sœurs

À tous les membres de nos familles, grands et petits.

À tous nos amis.

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste d'abréviation

Résumé

Introduction générale.....1

Chapitre I : Energie solaire thermique et ses applications

I.1.Introduction3

I.2. Généralité sur l'énergie thermique4

I.2.1. L'énergie solaire thermique4

I.2.2. Les utilisations de l'énergie solaire thermique.....4

I.3. La conversion thermique6

I.3.1. La conversion thermique à basse température.....6

I.3.1.1. Les serres.....6

I.3.1.2.Les capteurs solaires.....7

I.3.1.3. Les maisons solaires.....8

I.3.2.La conversion thermique à haute température9

I.3.2.1. Le four solaire.....9

I.3.2.2. La centrale thermique.....9

I.3.2.3. La cheminée solaire10

I.4. Fonctionnement d'un procédé de stockage d'énergie thermique.....11

I.5. Transfert thermiques12

I.5.1.Modes de transfert thermiques13

I.5.1.1. Conduction13

I.5.1.2.Convection14

I.5.1.3 Rayonnement16

Conclusion.....16

Chapitre II : Etat de l'art sur les centrales cheminées solaires

II.1. Introduction.....	17
II.2. Le principe d'une centrale cheminée solaire	18
II.3. Historique des cheminées solaires pour la production d'électricité.....	18
II.4. Description de la centrale cheminée solaire	20
II.5. La composition de la structure	20
II.5.1. Le Collecteur	20
II.5.2. La Cheminée	21
II.5.3. La Turbine.....	21
II.6. Etude bibliographique sur les centrales cheminées solaires.....	22
II.6.1. Les études expérimentales et théoriques.....	22
II.6.2. Les études numériques.....	27
II.6.3. Les études analytiques.....	29
II.7. Projets de centrale a cheminées solaires	31
II.7.1. Prototype de Manzanares	31
II.7.2. Le projet de Borunga	32
II.7.3. Le projet Chinois	33
II.7.4. Le projet Espagnol	33
II.7.5. Le projet Américain (Arizona)	34
II.8. Cheminées solaires pour la ventilation des locaux.....	34
II.8.1. Type1	35
II.8.2. Type 2	36
II.8.3. Type 3	37
II.9. Les différents phénomènes intervenants dans la cheminée solaire.....	38
II.10. Le stockage d'énergie.....	38
II.10.1. Les différentes méthodes de stockage	38
II.10.1.1. Par chauffage du sable.....	38
II.10.1.2. Par chauffage d'eau.....	39

II.10.1.3. Par chauffage de galets	39
II.11. Les avantages et les inconvénients de la cheminée solaire.....	40
II.11.1. Avantages.....	40
II.12.2. Inconvénients.....	41
Conclusion.....	41

Chapitre III :Etude Numérique

III.1. Introduction.....	42
III.2.Définition du problème.....	42
III.2.1. Hypothèses simplificatrices.....	43
III.3. Modèles Mathématiques	43
III.3.1. Modèle de la turbulence	44
III.3.2. Conditions aux limites - Modèle κ - ϵ standard.....	45
III 4. Modèles numérique	46
III 4.1. Étapes suivre pour résoudre un problème de CFD.....	46
III 4.2. Présentation de Gambit et Fluent.....	46
III 4.2. Gambit.....	46
III 4.2.1. Démarrage de Gambit.....	48
III 4.2.1.2. Construction de la géométrie	48
III 4.2.2. Fluent	52
III 4.2.2.1. Importation de la géométrie.....	53
III 4.2.2.2. Vérification du maillage importé	53
III 4.2.2.3. Affichage de la grille	54
III 4.2.2.4. Choix du solveur	54
III 4.2.2.5. choix du modèle de turbulence	55
III 4.2.2.6. Définition des caractéristiques des matériaux	55
III 4.2.2.7. Conditions d'opération	56
III 4.2.2.8. Conditions aux limites.....	57
III 4.2.2.9. Choix de solution.....	57

III .4.2.2.10. Choix de la méthode de couplage Pression-Vitesse.....	58
III.6.2. Critère de convergence.....	59
Conclusion	60

Chapitre IV : Résultats et Discussion

IV .1. Introduction.....	61
IV .2. Description du problème.....	61
IV .3. Les conditions aux limites.....	62
IV .4. Les propriétés physiques de fluide.....	63
IV.5. L'effet de maillage.....	63
IV.6. Validation et comparaison avec des résultats expérimentaux.....	65
IV.7. Résultats et discussion.....	66
IV.7. 1. Influence du rayon du collecteur sur la structure d'écoulement.....	66
IV.7. 1.1. sur le débit massique.....	66
IV.7. 1.2. sur la distribution des lignes du courant.....	67
IV.7. 1.3. sur le champ de vitesse.....	68
IV.7. 1.4. sur le champ de température.....	70
IV.7. 1.5. Influence du rayon du collecteur sur la température.....	72
IV.7. 1.6. Influence du rayon du collecteur sur la vitesse.....	72
IV.7. 2. Influence du rayon de la tour sur la structure d'écoulement.....	73
IV.7. 2.1. sur le débit massique.....	73
IV.7. 2.2. sur la distribution des lignes de courant.....	73
IV.7. 2.3. sur le champ de vitesse.....	75
IV.7. 2.4. sur le champ de température.....	76
IV.7. 2.5. Influence du rayon de la tour-cheminée sur la vitesse.....	78
IV.7. 3. Influence de la hauteur de la tour-cheminée sur la structure d'écoulement	79
IV.7. 3. 1. Influence de la hauteur de la tour-cheminée sur le débit massique.....	79
IV.7. 3. 2. Influence de la hauteur de la tour-cheminée sur la distribution des lignes de courant.....	79
IV.7. 3. 3. Influence de la hauteur de la tour-cheminée sur le champ de vitesse.....	80
IV.7. 3. 4. Influence de la hauteur de la tour-cheminée sur le champ de température....	81
IV.7. 3. 5. Influence de la hauteur de la tour-cheminée sur la vitesse.....	82

IV.7. 4. Influence de différence de la température entre le sol et le collecteur sur le débit massique.....	83
Conclusion.....	85
Conclusion générale	86

Liste des figures

Figure I.1 : Le spectre électromagnétique	3
Figure I.2 : Système de chauffage	4
Figure I.3 : Le cuiseur boîte	5
Figure I.4 : Le cuiseur à panneaux	5
Figure I.5 : Le système parabolique	5
Figure I.6 : Les serres de la Perrine.....	6
Figure I.7 : Capteur solaire thermique plan	7
Figure I.8 : Capteur solaire thermique cylindro-parabolique	7
Figure I.9 : La maison solair	8
Figure I.10 : le four solaire d'Odeillo	9
Figure I.11 : La centrale thermique Thémis	9
Figure I.12 : Principe de fonctionnement d'une centrale cheminée solaire	10
Figure I.13 : Illustration des configurations étudiées pour la convection naturelle entre deux plans chauffés	10
Figure I.14 : Illustration des différents modes d'utilisation d'une unité de stockage thermique dans une centrale solaire	12
Figure I.15 : Schéma du transfert de chaleur convectif	15
Figure I.16 : Schéma du transfert de chaleur radiatif	16
Figure II.1 : Principe de fonctionnement d'une centrale cheminée solaire	18
Figure II.2 : Le moteur solaire conçu par Cabanyes	19
Figure II.3 : La cheminée solaire présentée par Bernard Dubos	19
Figure II.4 : Collecteur de cheminée solaire	20
Figure II.5 : Différentes technologies de cheminées	21
Figure II.6 : Turbine pour cheminée solaire	22

Figure II.7 : Le prototype d'expérience de Maia et al	23
Figure II.8 : Dimensions du prototype	23
Figure II.9 : Le prototype de l'université d'Adıyaman, Turquie [35].....	24
Figure II.10 : Le prototype étudié	25
Figure II.11 : Prototype de Ghalamachi et al	26
Figure II.12 : Le petit prototype (à gauche). La transition collecteur-cheminée avec un sous- ensemble de paroi de guidage solide blanc (à droite) [39].....	26
Figure II.13 : Schéma de la CCS avec les différents paramètres étudiés	27
Figure II.14 : Les composants de la CCS	28
Figure II.15 : Les différents angles du toit du collecteur	28
Figure II.16 : Le prototype de l'université de Téhéran en Iran	30
Figure II.17 : Prototype de Manzanares en Espagne	31
Figure II.18 : La cheminée d'EnviroMission	32
Figure II.19 : Le projet Américain (Arizona)	34
Figure II.20 : Cheminée solaire au laboratoire EPT	36
Figure II.21 : Type de cheminée Ecole Tanga	37
Figure II.22 : Cheminée solaire standard	37
Figure II.23 : Principe du stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des tubes noirs remplis d'eau	39
Figure II.24 : Principe de stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des galets	40
Figure III.1 : Domaine d'étude et conditions aux limites	45
Figure III.2 : Élément du Logiciel	47
Figure IV.1 : Schéma de la configuration géométrique.....	61

Figure IV.2 : Débit massique en fonction de nombre des mailles.....	64
Figure IV.3 : Maillage de la configuration géométrique (80 x 1000 mailles).....	65
Figure IV.4 : Comparaison du profil de la vitesse dans une section transversale de la tour.....	66
Figure IV.5 : Evolution du débit massique en fonction du rayon du collecteur.....	67
Figure IV.6 : La fonction du courant pour différentes valeurs du rayon du collecteur.....	68
Figure IV.7: Distribution de la vitesse pour différentes valeurs du rapport du rayon du collecteur.....	70
Figure IV.8 : Evolution de la température pour différentes valeurs du rayon du collecteur.....	71
Figure IV.9 : Profils de température dans une section dans le collecteur pour différentes valeurs du rayon du collecteur.....	72
Figure VI.10 : Profils de vitesse dans une section dans le collecteur pour différentes valeurs du rayon du collecteur.....	73
Figure IV.11 : Evolution du débit massique en fonction de rayon de la tour.....	74
FigureIV.12 : Fonction du courant pour différentes valeurs du rayon de la tour.....	75
Figure IV.13 : Distribution des iso-vitesses pour différentes valeurs de rayon de la tour-cheminée	77
Figure IV.14 : Evolution des isothermes pour différentes valeurs du rayon de la tour.....	78
Figure IV.15 : Profils de vitesse à $x=6$ dans la tour-cheminée pour différents valeurs du rayon	79
Figure IV.16 : Evolution du débit massique en fonction de la hauteur de la tour-cheminée.....	79

Figure IV.17 :Evolution de la fonction du courant pour les différentes valeurs de la hauteur de la tour-cheminée H.....	80
Figure IV.18 : Distribution de la vitesse pour différentes valeurs de la hauteur de la tour-cheminée H.....	81
Figure IV.19 : distribution de la température pour différentes valeurs du rapport de la hauteur de la tour-cheminée H.....	82
Figure IV.20 : Profil de vitesse dans une section transversale dans la tour pour différentes valeurs de la hauteur de la tour-cheminée Ht.....	83
Figure IV.21 : Evolution du débit massique en fonction différence de la température entre le sol et le collecteur.....	84

Liste des tableaux

Tableau (II.1) : Données du prototype de Manzanares	31
Tableau (II.2) : Données du prototype de Borunga	32
Tableau(II.3) : Données du projet d'Espagnol	33
Tableau (IV.1) : Dimension des géométries étudiées.....	62
Tableau (IV.2) : Condition aux limites.....	62
Tableau (IV.3) : Les types de conditions aux limites utilisées sur GAMBIT.....	62
Tableau (IV.4) : Propriétés physique de l'air à 300 K.....	63
Tableau (IV.5) : Erreur relative du débit massique à l'entrée du collecteur avec le nombre des nœuds.....	63

Liste d'abréviation

CCS	Centrale Cheminée Solaire	
Ht	hauteur de la tour-cheminée	(m)
Hc	hauteur du collecteur	(m)
Rt	rayon de la tour	(m)
Rc	rayon du collecteur	(m)
φ	Flux de chaleur	(w)
K	Conductivité thermique du corps considéré	($w \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
T	Température	(K)
ρ	masse volumique	($kg \cdot m^{-3}$)
h	Coefficient de transfert de chaleur	($w/m^2 \cdot ^\circ C^{-1}$)
T_p	Température de surface du solide	(K)
T_∞	Température du fluide loin de la surface du solide	(K)
S	Aire de la surface	(m^2)
σ	Constante de Stefan	($w/m^2 \cdot K^4$)
ε_p	Facteur d'émission de la surface	
T_p^4	Température de la surface	(K)
T_∞^4	Température du milieu environnant la surface	(K)
w	La distance entre deux ailerons consécutifs	(m)
β	L'angle entre l'axe du panache et la limite	(degré)
h	La distance entre deux panaches consécutifs	(m)
u	Projection de la vitesse sur l'axe x	(m/s)
v	Projection de la vitesse sur l'axe y	(m/s)
ν_t	viscosité cinématique	($m^2 \cdot s^{-2}$)
G_κ	L'énergie cinétique turbulente	($m^2 \cdot s^{-1}$)
σ_κ	le nombre de Prandtl pour κ	
σ_ε	le nombre de Prandtl pour ε .	
u_τ^2	vitesse de frottement	(m/s)

الملخص

هذا العمل مخصص للدراسة العددية لتدفق الهواء المضطرب تحت تأثير الحمل الحراري الطبيعي في المدخنة الشمسية لتوليد الطاقة الكهربائية. يتم تنفيذ هذه الدراسة عن طريق المحاكاة العددية باستخدام برنامج 'فليانت' الذي هو مبني بطريقة الحجم المنتهية, حيث قمنا بدراسة تأثير بعض الخصائص الهندسية على التدفق الكتلي للهواء الذي هو مسؤول بالدرجة الاولى على توليد الطاقة الكهربائية من خلال تأثيره على سرعة الهواء و من بين هذه المعاملات : نصف قطر المجمع, نصف قطر البرج, ارتفاع البرج . من خلال هذه الدراسة وجدنا أنه كلما كانت الزيادة في تغيير احد المعاملات كانت الزيادة في حجم التدفق و بالتالي زيادة في الطاقة المحصل عليها.

الكلمات المفتاحية : المحاكاة العددية , المدخنة الشمسية , الحمل الحراري الطبيعي .

Résumé

Ce travail est consacré à l'étude numérique de l'écoulement turbulent d'air sous l'influence de la convection naturelle dans la cheminée solaire pour la production d'électricité. La simulation numérique est réalisée à l'aide du programme Fluent, basé sur la méthode des volumes finis. Nous avons étudié l'effet de certains paramètres géométriques sur le débit massique d'air, qui est principalement responsable de la génération d'énergie électrique par son effet sur la vitesse de l'air. Parmi ces paramètres : le rayon du collecteur, le rayon de la tour, la hauteur de la tour. Nous avons trouvé que plus le changement des paramètres est importante, plus le débit est important, et par conséquent une énergie résultante importante.

Mots clés: simulation numérique, cheminée solaire, convection naturelle.

Abstract

This work is dedicated to the numerical study of air turbulent flow under the influence of natural convection in the solar chimney for electric power generation. This study is carried out by numerical simulation using the Fluent program, which is based on the finite volume method. We have studied the effect of some geometrical parameters on the air mass flow. It is primarily responsible for the generation of electric power through its effect on the air velocity. Among these parameters: the collector radius, the tower radius and the tower height. We have found that increasing parameters conducted to an increase of air flow and therefore the resulting power is important.

Keywords: numerical simulation, solar chimney, natural convection.

Introduction Générale

Introduction Générale

Après l'accroissement de la demande d'énergie dans tous les pays du monde, crise successive du pétrole en 1973 et la limitation de la quantité de ces réserves. Et tout cela avec une dépendance totale aux combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) ou d'uraniums, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique ont conduit les pays industrialisés à chercher et à développer de nouvelles sources d'approvisionnement.

La filière nucléaire était déjà lancée, mais son choix à grande échelle peut amener des conséquences graves, surtout à l'environnement, à cause de la pollution et aussi à cause des accidents nucléaires, de sorte que cette énergie n'est pas appropriée et qu'une source alternative doit être trouvée pour résoudre ces problèmes. Cette énergie est une énergie renouvelable [1].

L'énergie est donc une base essentielle pour le développement social et économique. Les États doivent garantir aux populations de leur pays une fourniture d'énergie en quantité suffisante tout en assurant la durabilité de cet approvisionnement, c'est-à-dire avec des coûts minimum et des effets réduits sur l'environnement.

Grâce aux énergies renouvelables, nous disposons de sources d'énergie qui peuvent être utilisées sans qu'elles émettent de substances toxiques, et qui se renouvellent constamment par des processus naturels si bien que, mesurée à l'échelle de la vie humaine, elles seront disponibles à l'infini.

Les pays qui entameront cette transition vers les énergies renouvelables de bonne heure devraient y gagner davantage par rapport aux retardataires en matière d'énergie renouvelable. Donc, un jour le recours aux énergies renouvelables sera indispensable et ceci sera dû davantage à des problèmes environnementaux qu'à l'épuisement du pétrole brut.

L'énergie solaire est une forme d'énergie renouvelable issue directement de la captation du rayonnement solaire. On utilise des capteurs spécifiques afin d'absorber l'énergie des rayons du soleil et de la rediffuser selon deux principaux modes de fonctionnement :

- Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques) : l'énergie solaire est captée en vue de la production d'électricité.
- Solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques) : la chaleur des rayons solaire est captée est rediffusée [2].

Parmi les outils les plus fiables pour la captation et la transformation de l'énergie solaire thermique est la cheminée solaire, qui est un générateur naturel de puissance qui utilise la radiation solaire pour créer un gradient de température. Ce dernier engendre une énergie

cinétique de l'air circulant dans le système. Ce mécanisme est connu par la convection naturelle qui est particulièrement important pour les échanges de l'énergie et de la masse, entre l'air circulant dans la cheminée et l'extérieur.

La cheminée solaire permet de transformer le gain utile du collecteur solaire en énergie cinétique d'écoulement qui est ensuite transformée en énergie électrique au moyen d'une turbine placée à l'intérieur de la cheminée. L'étude de l'influence de la géométrie des différentes parties de la cheminée solaire sur les performances de la turbine s'avère donc très intéressante car elle permet de comprendre les mécanismes qui régissent les phénomènes naturels et d'améliorer les performances de la cheminée solaires [3].

Dans ce travail, nous étudions numériquement la cheminée solaire à géométrie simple en utilisant le logiciel Fluent qui est un outil de simulation numérique basé sur la méthode des volumes finis. Nous examinons en particulier l'effet de plusieurs paramètres géométriques sur le transfert de chaleur

Ce travail se divise en quatre chapitres :

Le premier chapitre parle sur l'énergie thermique et de ses différents modes d'utilisation les plus importantes avec les transferts de chaleur et leurs modèles.

Le deuxième chapitre traite les différents types des cheminées solaires: historique, différentes parties, principe de fonctionnement, les méthodes de stockage d'énergie, comparaisons avec d'autres types de centrales et de quelques grands projets actuels de tours solaires.

Dans le troisième chapitre, nous avons généré le maillage de la configuration étudiée avec le logiciel Gambit, et on résout numériquement les équations différentielles aux dérivées partielles qui gouvernent l'écoulement d'air à l'intérieur de la cheminée en utilisant le logiciel Fluent avec leurs conditions aux limites associées.

Le quatrième chapitre, est consacré à l'exposition et à la discussion des résultats numériques obtenus. On a fait varier plusieurs paramètres pour avoir leurs influences sur la structure de l'écoulement à l'intérieur de la cheminée.

Nous terminons ce travail par une conclusion qui synthétise les principaux résultats.

Chapitre I

Energie solaire thermique et ses applications

I.1.Introduction

L'énergie solaire est l'énergie diffusée par le rayonnement du soleil. Des ondes radio aux rayons gamma en passant par la lumière visible, tous ces rayonnements sont constitués de photons, les composants fondamentaux de la lumière et les vecteurs de l'énergie solaire.

L'énergie solaire est à l'origine de toutes les formes de production énergétique aujourd'hui utilisées sur Terre. L'homme utilise l'énergie solaire pour la transformer en d'autres formes d'énergie : énergie chimique (les aliments que notre corps consomme), énergie cinétique, énergie thermique, énergie électrique ou biomasse.

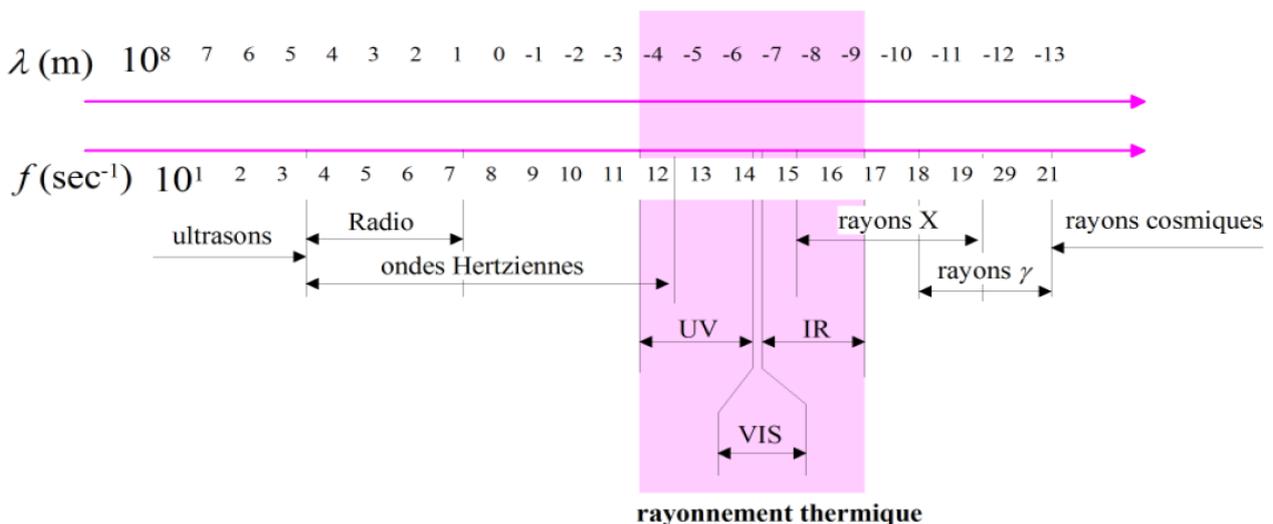


Figure I.1 : Le spectre électromagnétique [4]

Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir de la source énergétique primaire qu'est le rayonnement solaire. Actuellement, il existe deux voies principales d'exploitation de l'énergie solaire :

- Le solaire photovoltaïque qui transforme directement le rayonnement en électricité.
- Le solaire thermique qui transforme directement le rayonnement en chaleur.
- Le solaire dit « thermodynamique » est une variante du solaire thermique. Cette technique se différencie en cela qu'elle utilise l'énergie thermique du soleil afin de la transformer dans un second temps en électricité [5].

Dans ce chapitre nous allons présenter brièvement l'énergie solaire thermique et ses utilisations aussi bien que le concept de transfert thermique et ses modes de transport à savoir: la conduction, la convection et le rayonnement.

I.2. Généralités sur l'énergie thermique

I.2.1. L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique est la transformation instantanée de l'énergie des rayons solaires en énergie thermique. Cette transformation peut être utilisée directement, comme par exemple le chauffage de l'eau sanitaire à l'aide des capteurs solaires, ou indirectement dans le cas de la production de l'électricité dans une centrale thermodynamique solaire. Le solaire thermique est basé sur l'utilisation de la chaleur transmise par rayonnement qui est différente de celle du photovoltaïque où l'électricité est générée par l'énergie des photons. A l'aide des progrès technologiques, les techniques de captation directe, d'une partie de l'énergie solaire sont nettement améliorées afin de rendre les systèmes solaires plus fiables, efficaces et rentables [6].

I.2.2. Les utilisations de l'énergie solaire thermique

Cette énergie couvre en moyenne 50% des besoins en chauffe- eau et autre complément de chauffage en France. L'installation se fait souvent sur la toiture d'une maison indépendante ou d'un bâtiment tout entier. Il s'agit de capteurs vitrés dans lesquels circule un liquide caloporteur réchauffé par le rayonnement du soleil [7].

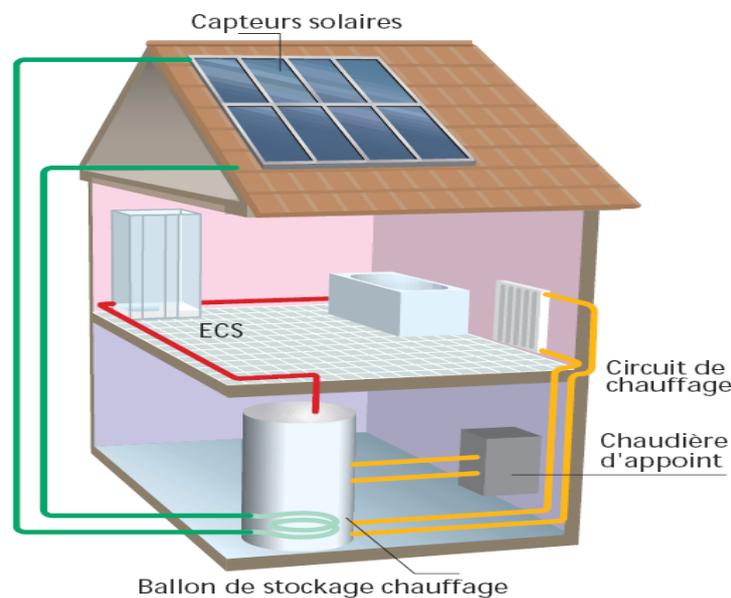


Figure I.2 : Système de chauffage solaire [8]

L'énergie solaire thermique est aussi utilisée par les machines frigorifiques comme le réfrigérateur à absorption de gaz, les camping-cars et les caravanes.

D'autres utilisations de l'énergie thermique telle que les sècheurs solaires et les cuisinières sont en vogue en Chine et en Inde. On distingue plusieurs types de cuiseurs solaires :

- **Le cuiseur boîte** : est composé d'un ou plusieurs panneaux solaires qui concentrent l'énergie sur une boîte vitrée.



Figure I.3 : Le cuiseur boîte [9]

- **Le cuiseur à panneaux** : est doté de plusieurs panneaux qui concentrent la chaleur sur une cloche en verre dans laquelle sont placés les aliments.



Figure I.4 : Le cuiseur à panneaux [10]

- **Le système parabolique** : qui est composé de disques concaves [7], afin de concentrer les rayons lumineux sur un objet qui se situe dans le foyer du système.



Figure I.5 : Le système parabolique [11]

I.3. La conversion thermique

I.3.1. La conversion thermique à basse température

I.3.1.1. Les serres

Le rayonnement solaire, seule forme d'énergie transmissible à grande distance sous forme d'ondes électromagnétiques, est absorbée (inégalement) par les objets qui y sont exposés, et elle est convertie en chaleur. Si de plus on expose des objets au rayonnement solaire à travers une paroi de verre, les fréquences correspondant au rayonnement infrarouge sont arrêtées, « piégées » par le verre : c'est ce que l'on connaît sous le nom d'effet de serre.

Les serres pour cultures florales ou maraîchères sont connues depuis longtemps ; elles assurent des récoltes précoces. L'effet de serre peut être avantageusement complété au moyen d'un réchauffage par ruissellement sur les parois, en faisant appel à la géothermie basse température ou à la récupération des rejets industriels, ceux des centrales électronucléaires par exemple [12].



Figure I.6 : Les serres de la Perrine [13]

I.3.1.2. Les capteurs solaires plans

Les capteurs solaires plans sont constitués d'un caisson fermé par un couvercle en verre, et renfermant une canalisation parcourue par de l'eau (fluide caloporteur). Tout l'intérieur est peint en noir de façon à absorber le maximum de rayonnement ; le rendement d'un capteur bien réalisé dépasse 50 % et permet de produire l'eau chaude sanitaire d'une habitation. La température atteinte ne dépasse pratiquement pas 80 °C.

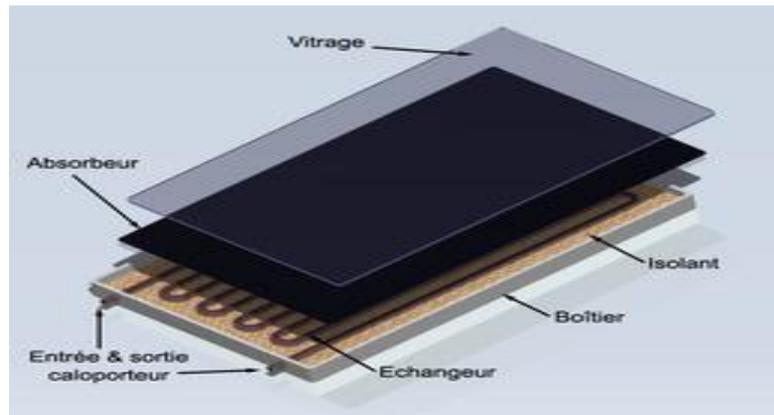


Figure I.7 : Capteur solaire thermique plan [14]

Le couplage de capteurs solaires avec un chauffe-eau électrique assure la fourniture d'eau chaude quelles que soient les conditions d'ensoleillement ; le gain d'un tel chauffe-eau solaire peut être estimé à environ 50 % de la dépense annuelle, avec un amortissement du surcoût d'installation sur une dizaine d'années.

Les capteurs à concentration permettent d'atteindre des températures supérieures à 150 °C ; une surface réfléchissante de forme cylindrique concentre le rayonnement solaire sur un récepteur parcouru par le fluide caloporteur. L'eau chaude produite peut être utilisée directement pour le chauffage de locaux, de serres, de piscines, ou à des fins industrielles. Elle peut aussi être transformée en travail mécanique ou électrique de façon très classique, avec toutefois un faible rendement dû à la température trop basse de la source chaude[12].



Figure I.8 : Capteur solaire thermique cylindro-parabolique [15]

I.3.1.3. Les maisons solaires

Le rayonnement solaire peut aussi servir à chauffer directement des locaux d'habitation ; des maisons solaires ont été expérimentées dans des sites variés, les meilleurs étant ceux qui

correspondent à un ensoleillement annuel maximal. La construction doit être fermée vers le nord, ouverte au sud ; la collecte de l'énergie se fait par les murs, des panneaux solaires, et éventuellement par une serre ; un système de chauffage d'appoint doit être prévu.

Les difficultés proviennent de l'irrégularité du rayonnement, suivant la latitude du lieu, la saison, l'heure de la journée, et l'état de l'atmosphère ; de plus, le soleil manque essentiellement quand on en a le plus besoin, de l'automne au printemps. Un stockage de la chaleur est donc primordial, et de préférence sur une longue période, afin d'utiliser en hiver la chaleur captée et stockée pendant l'été [12]



Figure I.9 : La maison solaire [16]

I.3.2.La conversion thermique à haute température

I.3.2.1. Le four solaire

Le principe mis en œuvre est la concentration du rayonnement, mais avec un facteur multiplicateur beaucoup plus grand que dans le cas précédent. Le meilleur exemple en est le four solaire d'Odeillo, créé en 1968 en Cerdagne, successeur de celui de Lavoisier, après les fours de Meudon (1946) et de Montlouis (1949). À Odeillo, le rayonnement solaire est capté par un « champ » de 63 miroirs plans orientables de 45 m^2 chacun, puis réfléchi sur un miroir parabolique formé de 9 500 miroirs élémentaires de 0,45 m de côté courbés par contrainte mécanique. Le faisceau convergent ainsi obtenu permet d'atteindre une puissance de 1 MW, soit 1 000 fois la puissance reçue au sol ; les matériaux exposés à ce rayonnement peuvent être portés à des températures de 1 500 à 3 800 °C. Les recherches portent sur les réactions à hautes températures, les propriétés mécaniques et électriques des matériaux, la préparation d'oxydes réfractaires de grande pureté [17].



Figure I.10 : le four solaire d'Odeillo[17]

I.3.2.2. La centrale thermique

La centrale thermique *Thémis*, construite en 1976, à Targassonne, dans les Pyrénées Orientales a permis d'étudier les problèmes liés à la conversion du rayonnement solaire en électricité. La concentration d'énergie était obtenue par des miroirs plans orientables sur une chaudière placée au sommet d'une tour. Avec comme fluide caloporteur des sels fondus portés à 450 °C et un système de stockage indispensable, la puissance électrique était de 2,5 MW. L'exploitation de *Thémis* a été arrêtée en 1986 (le prix de revient du kWh était alors de 10 F contre 0,23 F pour le kWh nucléaire), mais les installations sont utilisées pour des expériences d'astrophysique. En Californie, huit centrales d'une puissance totale de 275 MW produisent de l'électricité à une période de la journée qui correspond à une forte utilisation des climatiseurs ,et sont relayées par des centrales thermiques au gaz [17].



Figure I.11 : La centrale thermique *Thémis* [17]

I.3.2.3. La cheminée solaire

La cheminée solaire est une installation solaire de production de puissance qui utilise le rayonnement solaire pour accroître l'énergie interne de l'air s'écoulant à travers le système, transformant ainsi l'énergie solaire en énergie cinétique. L'énergie cinétique de l'air est ainsi transformée en électricité en utilisant des groupes turbogénérateurs adéquats [18].

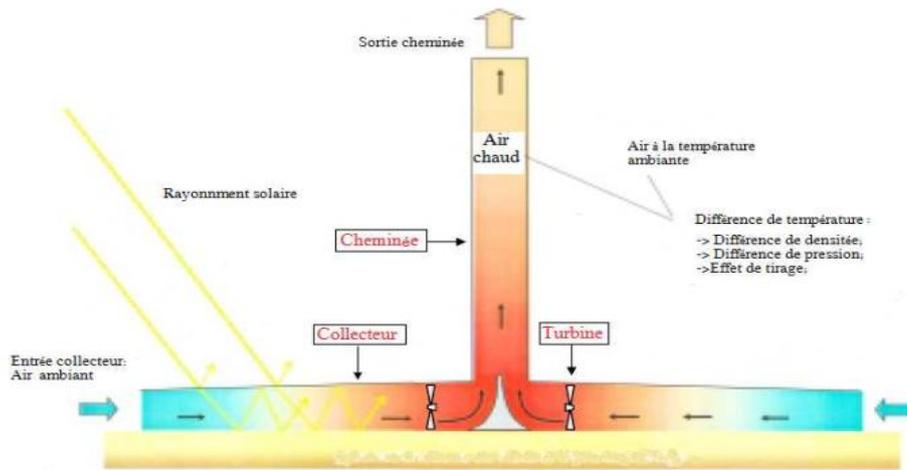


Figure I.12: Principe de fonctionnement d’une centrale cheminée solaire [19]

L’objectif principal du collecteur, constitué d’une couverture transparentes tenue quelques mètres au-dessus du sol, est de rassembler le rayonnement solaire pour réchauffer la masse d’air à l’intérieur. La force gravitationnelle conduit l’air plus chaud à travers la cheminée, située au centre du collecteur. Un aérogénérateur, placé dans le chemin du flux d’air, convertit l’énergie cinétique de l’air en électricité. Le collecteur peut être équipé d’un système de stockage en eau pour assurer la production d’énergie pendant les périodes nocturnes [20].

On peut avoir des cheminées solaires dont l’objectif est de favoriser la ventilation naturelle en été, c’est-à-dire le renouvellement d’air et le rafraîchissement du bâtiment sans assistance mécanique. L’entrée d’air se fait vers l’intérieur, et la sortie vers l’extérieur, c’est un système de type In-Out. En été, en présence d’apports solaires, la chaleur absorbée derrière le vitrage induit un écoulement de l’air intérieur du bâtiment vers l’extérieur, la différence de pression d’air dans le bâtiment est équilibré par une entrée d’air qui se fait en un autre point, le plus souvent en partie basse, et en un point « frais » [21].

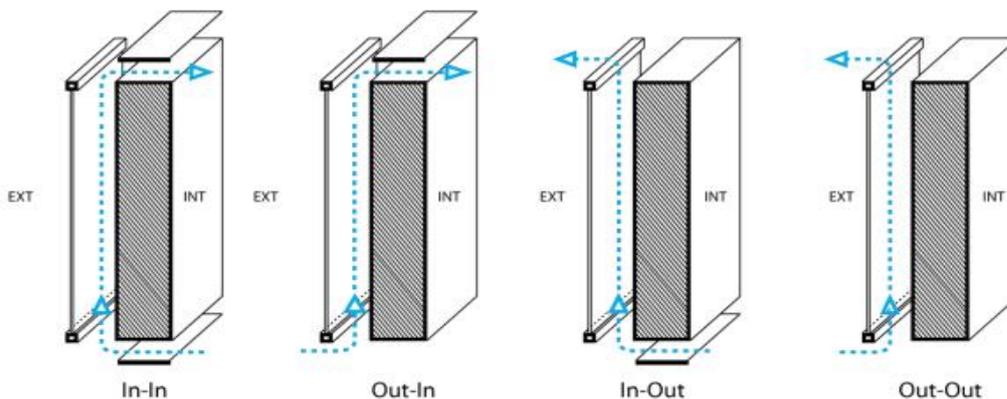


Figure I.13 : Illustration des configurations étudiées pour la convection naturelle entre deux plans chauffés [21]

I.4. Fonctionnement d'un procédé de stockage d'énergie thermique

Le procédé de stockage de l'énergie thermique se déroule en trois étapes :

- La charge durant laquelle l'énergie thermique issue du champ solaire est emmagasinée.
- Le stockage de la chaleur, de durée plus ou moins longue selon les besoins et/ou le procédé de mise en œuvre.
- La décharge qui correspond à la phase de restitution de l'énergie thermique pour produire de l'électricité.

Différentes options de pilotage d'une unité de stockage thermique peuvent être mises en œuvre selon les variations journalières et annuelles de l'ensoleillement et de la demande en électricité.

- Les principaux modes d'utilisation d'un procédé de stockage d'énergie thermique sont répertoriés ci-dessous et représentés sur la Figure 1.
- Le « **lissage des transitoires de la puissance thermique issue du champ solaire dus aux variations de l'ensoleillement (passage de nuage d'au moins 1 h)** » (Figure I.14 (a)). Ce fonctionnement permet de maintenir une efficacité élevée de la machine de conversion électrique en évitant les fonctionnements à charge partielle. Un stockage de petite taille (typiquement 1 h maximum à pleine charge) est nécessaire.
- Le « **déplacement de la période de production électrique** » (Figure I.14 (b)). L'énergie thermique collectée dans le champ solaire durant la journée est envoyée au stockage. La production électrique est décalée dans le temps pour correspondre aux périodes de fortes demandes et de tarifs élevés. Les tailles typiques de stockage associées sont de l'ordre de 3 à 6 h à pleines charges.
- L' « **extension de la période de production électrique** » (Figure I.14 (c)). Ce type de fonctionnement suppose un stockage de grande taille (typiquement de 3 à 12 h à pleine charge) et une petite turbine.
- La « **concentration de la production électrique aux heures de pointe** » (Figure I.14 (d)). La production électrique est exclusivement limitée aux périodes de forte demande et de tarifs élevés.
- Ce type de fonctionnement suppose un très grand stockage et une grosse turbine. Il permet d'obtenir les meilleures conditions de rachat de l'électricité [22].

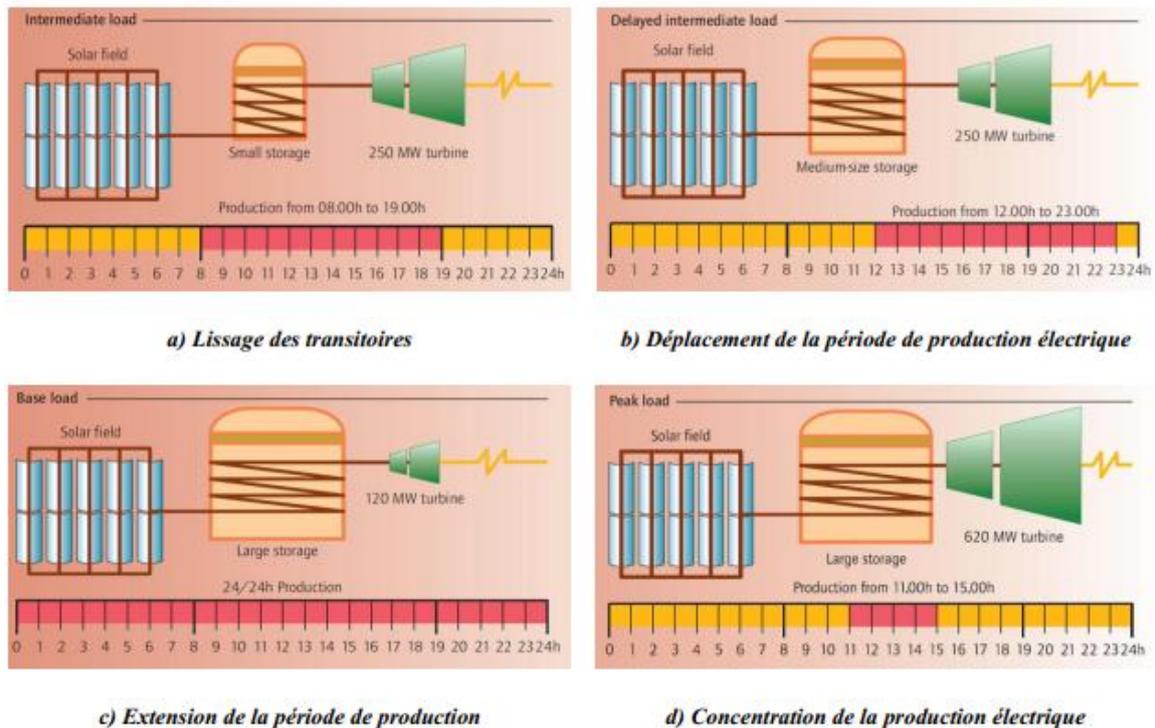


Figure I.14 : Illustration des différents modes d'utilisation d'une unité de stockage thermique dans une centrale solaire [22]

I.5. Transfert thermiques

De tous les temps, les problèmes de transmission d'énergie, et en particulier de la chaleur, ont eu une importance déterminante pour l'étude et le fonctionnement d'appareils tels que les générateurs de vapeur, les fours, les échangeurs, les évaporateurs, les condenseurs, etc..., mais aussi pour des opérations de transformations chimiques. En effet, dans certains systèmes réactionnels, c'est la vitesse des échanges de chaleur et non la vitesse des réactions chimiques qui détermine le coût de l'opération (cas de réactions fortement endothermique ou exothermique). En outre, de nos jours, par suite de l'accroissement relatif du prix de revient de l'énergie, on recherche dans tous les cas à obtenir le rendement maximal d'une installation pour une dépense d'énergie minimale.

Les problèmes de transfert de chaleur sont nombreux, et on peut essayer de les différencier par les buts poursuivis dont les principaux sont:

- L'augmentation de l'énergie transmise ou absorbée par une surface.
- L'obtention du meilleur rendement d'une source de chaleur.
- La réduction ou l'augmentation du passage d'un débit de chaleur d'un milieu à un autre.

Le potentiel qui provoque le transport et le transfert de l'énergie thermique est la température. Si deux points matériels placés dans un milieu thermiquement isolé sont à la même température, on peut affirmer qu'il n'existe aucun échange thermique global entre ces deux points dits en équilibre

thermique (il s'agit bien d'un équilibre thermique car chacun des points matériels émet une énergie thermique nette de même module, mais de signe opposé). Le transfert de chaleur au sein d'une phase où, plus généralement, entre deux phases, se fait suivant 3 modes [23]: par conduction, par rayonnement ou par convection.

I.5.1. Modes de transfert thermiques

I.5.1.1. Conduction

La conduction est le mode de transmission de la chaleur provoqué par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide.

La loi fondamentale de la conduction thermique, établie par Fourier, s'exprime mathématiquement par la proportionnalité, en tout point d'un corps isotrope, de la densité de flux au gradient de température :

$$\varphi = -k \text{ grad}(T) \dots \dots \dots (I.1)$$

Cette loi traduit le fait que l'énergie thermique se propage des points les plus chauds vers les plus froids, et que le flux est d'autant plus intense que l'écart de température par unité de longueur est grand.

Le coefficient de proportionnalité k est la conductivité thermique du corps considéré, et s'exprime en $W/(m \cdot ^\circ C)$. Elle peut varier d'un point à l'autre du corps. La connaissance de la conductivité thermique des matériaux reste un problème majeur.

Cette grandeur dépend d'un certain nombre de paramètres :

- Nature chimique du matériau.
- Nature de la phase considérée (solide, liquide, gazeuse).
- Température.

En d'autres termes, la loi de Fourier est non linéaire, en appliquant le premier principe de la thermodynamique à un élément de volume indéformable et au repos (la variation d'énergie interne du système est égale à l'énergie thermique entrant dans le volume au travers de la surface limite, ajoutée de la chaleur dégagée par les sources internes).

On obtient finalement l'équation :

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = \text{div}[k \cdot \text{grad}(T)] + q \dots \dots \dots (I.2)$$

Avec:

ρ : masse volumique du corps

c_p : chaleur massique du corps

q : densité volumique des sources internes

Dans le cas particulier d'un corps homogène et de conductivité indépendante de la température l'équation devient:

$$\frac{\rho \cdot c_p}{K} \cdot \frac{dT}{dt} = \nabla^2 T + \frac{q}{K} \dots \dots \dots (I.3)$$

La quantité $K / (\rho \cdot c_p)$, appelée diffusivité thermique [m^2/s] caractérise la vitesse de diffusion de la chaleur dans le matériau [24].

I.5.1.2. Convection

Dans le mode d'échange par convection, le transfert de la chaleur se fait dans les fluides, (les liquides ou les gaz) en mouvement. Ce cas se rencontre souvent dans l'échange entre une paroi et un fluide. Dans ce cas le phénomène thermique est compliqué par des déplacements de matière et au transfert de chaleur se superpose le transfert de masse. Le transfert de chaleur par convection se produit entre deux phases dont l'une est généralement au repos et l'autre en mouvement en présence d'un gradient de température. Par suite de l'existence du transfert de chaleur d'une phase à l'autre, il existe dans la phase mobile des fractions du fluide (ou agrégats) ayant des températures différentes. Le mouvement du fluide peut résulter de la différence de masse volumique due aux différences de températures (on parle alors de convection libre ou naturelle) ou à des moyens purement mécaniques (on parle alors de convection forcée). Lorsqu'un fluide est en écoulement, une partie du transfert de chaleur dans le fluide se fait également par conduction et, dans le cas d'un fluide transparent, un transfert de chaleur par rayonnement peut accompagner les deux transferts précédents [24].

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton [25] :

$$\varphi = h S (T_p - T_\infty) \dots \dots \dots (I.4)$$

Avec :

φ : Flux de chaleur transmis par convection

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection

T_p : Température de surface du solide

T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide

S : Aire de la surface de contact solide/fluide

Le coefficient h dépend de plusieurs paramètres [24] :

- Du type de convection (naturelle, mixte ou forcée).
- Du type d'écoulement (laminaire ou turbulent).
- De la géométrie de l'écoulement.
- La vitesse de l'écoulement.
- La température.
- Les propriétés thermo-physiques du fluide (viscosité).
- Des conditions adoptées au niveau de la paroi (température constante, ou densité de flux constante).

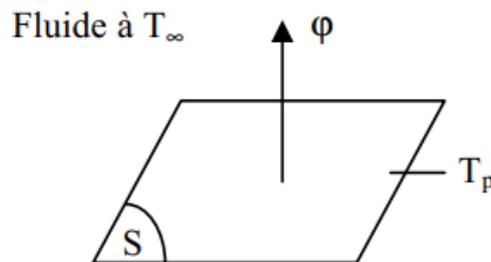


Figure I.15 : Schéma du transfert de chaleur convectif [25].

I.5.1.3. Rayonnement

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas nous avons la relation [25] :

$$\varphi = \sigma \varepsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4) \dots \dots \dots (I.5)$$

Avec :

φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement

σ : Constante de Stefan ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

ε_p : Facteur d'émission de la surface

S : Aire de la surface

T_p^4 : Température de la surface

T_∞^4 : Température du milieu environnant la surface

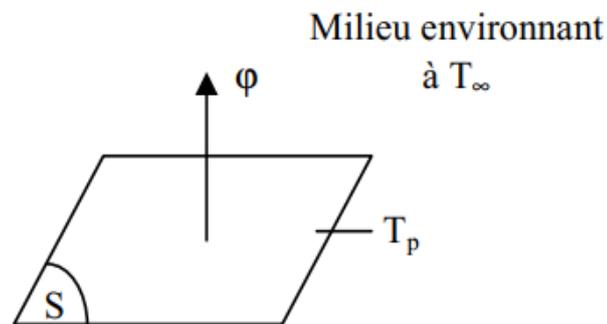


Figure I.16 : Schéma du transfert de chaleur radiatif [25]

Conclusion

L'énergie solaire thermique est de plus en plus utilisée dans les maisons pour obtenir de l'eau chaude ou pour compléter le système de chauffage. Cependant, cette technologie offre aussi un énorme potentiel d'utilisation dans le secteur industriel où elle a été peu employée jusqu'à présent. L'énergie solaire thermique peut fournir, d'une façon naturelle et économique, une grande part de l'énergie calorifique dont l'industrie a besoin.

Un transfert thermique, appelé plus communément chaleur, est l'un des modes d'échange d'énergie entre deux systèmes. C'est une notion fondamentale de la thermodynamique. Contrairement au travail, la chaleur est un transfert d'énergie microscopique désordonné.

Chapitre II

Etat de l'art sur les
centrales cheminées
solaires

II.1.Introduction

Depuis le début du dix-neuvième siècle, soit le début de l'exploitation du charbon et de la révolution industrielle, la demande énergétique mondiale n'a pas cessé d'augmenter depuis. Après la seconde guerre mondiale, une hausse spectaculaire de cette demande est constaté, avec l'évolution des modes de vie des pays « développés » (Europe de l'Ouest, Amérique du Nord) accompagné par l'apparition de nouveaux besoins (modes de déplacement, de production de consommation de biens et de service, *etc*). C'est une conséquence directe de l'utilisation de nouvelles sources d'énergie plus « performantes » et « concentrées » : le pétrole puis le gaz et l'uranium.

Avec l'apparition des nouvelles puissances à forte croissance économique et démographique (le Brésil, l'Afrique du Sud, l'Inde, la Chine et les pays du Moyent-Orient), l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) prévoit que les besoins mondiaux d'énergie continueront d'augmenter au cours des 25 prochaines années malgré les contextes de crises économiques des pays« riches » alors même que les intérêts économiques et énergétiques sont bien souvent opposés. On constate également une accélération du réchauffement climatique de la planète avec comme conséquence de plus en plus visible une augmentation de la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes et des fontes record des calottes glaciaires.

Pour remédier à ce phénomène, la production d'énergie à partir de ressources renouvelables semble pouvoir apporter une partie de la solution à ce problème mondial. La réduction de la consommation d'énergie et l'utilisation plus efficace de cette énergie étant une autre partie de la réponse que l'humanité doit s'apporter dans les plus brefs délais. Parmi les énergies renouvelables (éolienne, hydraulique, géothermique), le recours à l'énergie solaire thermique devrait permettre de combler une partie non négligeable des besoins en électricité [26].

Les centrales cheminées solaires, dites CCS, sont parmi les installations les plus prometteuses pour la production d'électricité par voie thermique. Elles consistent à transformer l'énergie thermique de l'air chauffé en énergie cinétique due à la différence de densité. Cette filière a l'avantage de pouvoir produire et stocker de l'électricité de façon quasi-continue. Les techniques cheminées solaires peuvent être utilisées à une échelle réduite pour la ventilation des locaux pour avoir un meilleur confort thermique.

Dans ce chapitre, nous allons citer les différents types des techniques cheminées solaires et leurs utilisations que ce soit dans la ventilation des locaux ou dans la production de l'électricité solaire. Cependant notre attention a été principalement portée sur les cheminées solaires destinées à la production de l'électricité.

II.2. Le principe d'une centrale cheminée solaire

La centrale cheminée solaire est une installation solaire de production de puissance électrique qui utilise le rayonnement solaire pour accroître l'énergie interne de l'air s'écoulant à travers le système, transformant ainsi l'énergie solaire en énergie cinétique. L'énergie cinétique de l'air est ainsi transformée en électricité en utilisant des groupes turbogénérateurs adéquats [27].

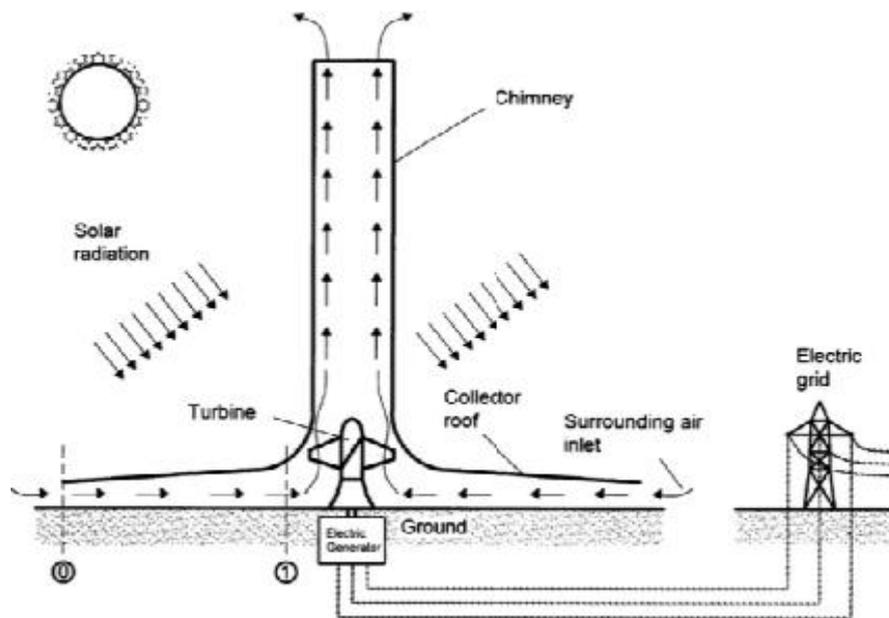


Figure II.1: Principe de fonctionnement d'une centrale cheminée solaire [28]

II.3. Historique des cheminées solaires pour la production d'électricité

De nombreux chercheurs dans le monde ont présenté différentes idées ou projets concrets de cheminée solaire :

A commencer par le colonel d'artillerie espagnole **Isidoro Cabanyes** qui a présenté en 1903 une conception constituée d'une grande structure en brique avec une tour-cheminée contenant une hélice. En 1926, à l'académie des sciences de France, **Dubos** proposa la création d'une structure à grande échelle d'une cheminée solaire qui pourrait être apposée sur le flan d'une montagne afin d'éviter le problème structurels complexes associés à la construction d'une tour-cheminée mince mais très haute.

En 1931, **Günther** a présenté une amélioration de ce même concept dans une publication futuriste. Entre 1940 et 1960, l'ingénieur français **Edgard Nazare**, après avoir observé plusieurs tourbillons de sable (dust devil) dans le sud saharien, et en avoir mesuré les caractéristiques grâce à son déclinomètre-alidade de poche, a pu imaginer la cheminée à dépression, aujourd'hui

appelée cheminée à vortex. C'est en 1956 qu'il déposa son premier brevet à Alger. Ce brevet fut redéposé à Paris le 3 août 1964. Il s'agissait de générer artificiellement une ascendance atmosphérique tourbillonnaire dans une sorte de cheminée à vortex en forme de tuyère de Laval et d'en récupérer une partie de cette énergie cinétique moyennant des turbines.

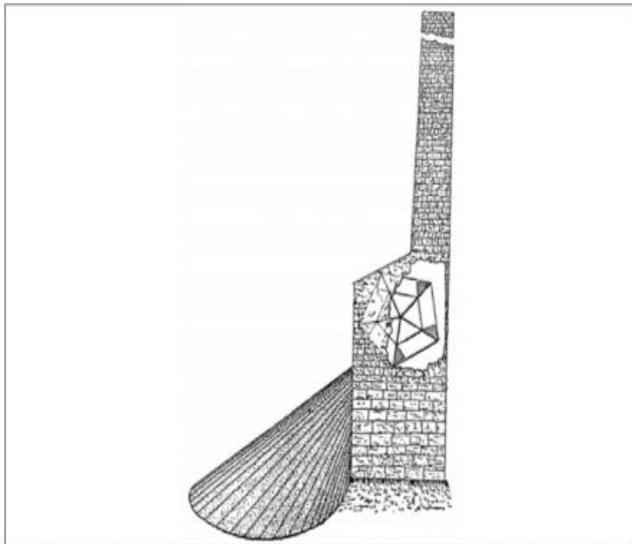


Figure II.2: Le moteur solaire conçu par Cabanyes [30]

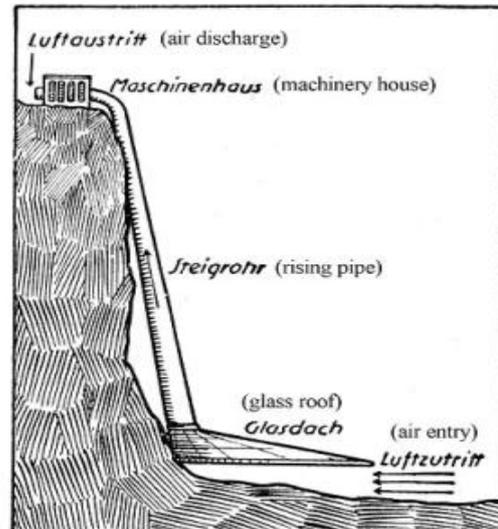


Figure II.3 :La cheminée solaire présentée par Bernard Dubos [30]

En 1975 l'ingénieur canadien **Louis M. Michaud** publia son projet Vortex Power Station dans le bulletin de la société américaine de météorologie. Il s'agissait également de générer une ascendance atmosphérique tourbillonnaire, mais dans une cheminée de forme cylindrique.

Cependant, c'est uniquement dans les années 80 qu'un grand intérêt scientifique a été réellement consacré à la technologie CCS, à la suite de la construction et de l'exploitation d'un prototype d'une CCS de 200m de hauteur dans la province de Manzanares en Espagne. Ce prototype est le fruit des études de l'ingénieur allemande **Jorg Schlaich et ses associés**.

Le 8 octobre 1985, le russe **George Mamulashvili** déposa son brevet pour un projet comparable à la cheminée à vortex de Nazare appelé centrale électrique aéro-thermale verticale. Le 14 mai 2009, **Neven Ninic** et **Sandro Nizetic** déposent leur brevet de cheminée solaire avec diffuseur appelé solar power plant with short diffuser. Ce diffuseur aurait pour but de former une colonne gravitationnelle tourbillonnaire [31].

II.4. Description de la centrale cheminée solaire

Une CCS est une installation de production d'énergie électrique à base d'une technique rudimentaire de création et de stabilisation de l'effet thermosiphon. L'air à l'intérieur du collecteur, chauffé par effet-serre, remonte sous l'effet du gradient de densité, à travers la tour de la CCS. L'énergie cinétique de l'air est alors transformée en énergie électrique au moyen d'une turbine appropriée dite aérogénérateur. Une centrale cheminée solaire type, se compose essentiellement : d'un capteur solaire appelée Greenhouse, d'une tour de cheminée et d'un aérogénérateur [20].

L'objectif principal du collecteur, constitué d'une couverture transparente soutenue quelques mètres au-dessus du sol, est de rassembler le rayonnement solaire pour réchauffer la masse d'air à l'intérieur. La force gravitationnelle conduit l'air plus chaud à travers la tour-cheminée, située au centre du collecteur. Un aérogénérateur, placé dans le chemin du flux d'air, convertit l'énergie cinétique de l'air en électricité. Le collecteur peut être équipé d'un système de stockage en eau pour assurer la production de l'énergie électrique durant les périodes nocturnes [20].

II.5. La composition de la structure

II.5.1. Le Collecteur

Un simple collecteur d'air constitué d'un film de verre ou de plastique suspendu horizontalement de deux à six mètres du sol. La hauteur de la toiture du collecteur s'élève en hauteur à proximité de la base de la tour-cheminée, de sorte que l'air est relégué vers un mouvement vertical avec une perte en frottement minimale. Par effet de serre, le toit transparent autorise les rayons, à courtes ondes, réfléchies par le sol chauffé et retient les rayons à ondes longues. Ainsi, le sol sous le toit se réchauffe et transfère sa chaleur à l'air circulant radialement le long du collecteur [32].

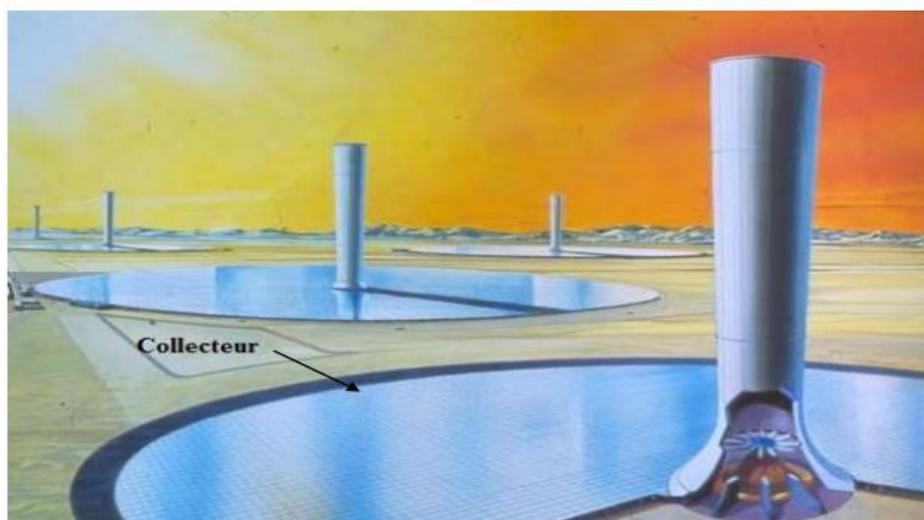


Figure II.4 : Collecteur de cheminée solaire [31]

Le plus efficace semble être le collecteur en verre, puisque son rendement de conversion de l'énergie solaire en chaleur peut aller jusqu'à 70%. La moyenne annuelle typique est de l'ordre de 50%. En outre, avec un entretien et une maintenance appropriée, sa durée de vie peut facilement être de 60 ans ou plus [31].

II.5.2.La Cheminée

La cheminée elle-même est le moteur réel de l'équipement. Pour créer un écoulement d'air ou tout simplement un vent industriel, il faut créer une différence de pression. Plus haute est la cheminée, plus importante est la quantité d'énergie produite par la tour solaire puisque la différence de pression statique est proportionnelle à la hauteur entre la base de la tour et son sommet qui représente la sortie de l'air. Donc la pression de l'air à la sortie de la cheminée est inférieure à celle d'entrée, ce qui augmente la vitesse d'élévation verticale de l'air chaud dans la cheminée [32].

Il existe de nombreuses façons de construire une tour cheminée mais on distingue principalement deux types à savoir : celles autoportées (construites en dur i.e : béton armé ou acier) et les cheminées haubanées (structures plus légères constituées de tubes). il est à noter que la durée de vie des cheminées en béton est bien supérieure à celle des cheminées en membranes, une centaine d'années contre quelques années à peine.

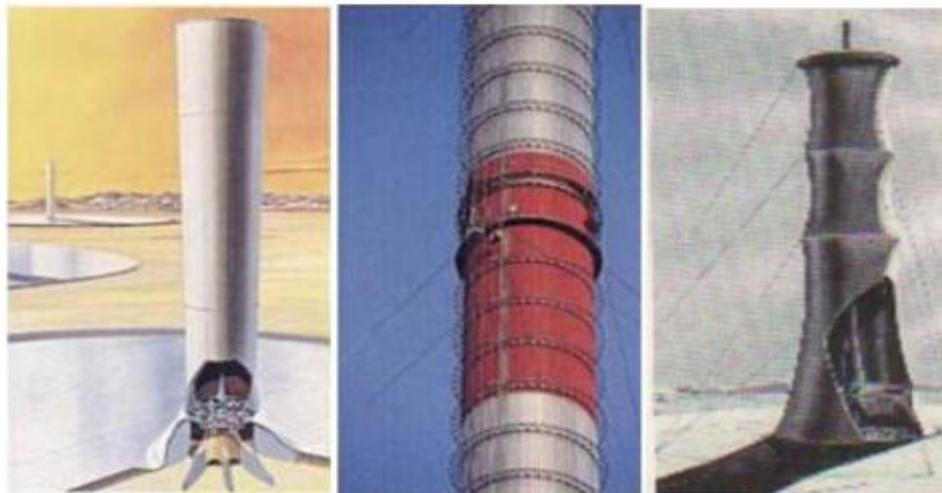


Figure II.5 : Différentes technologies de cheminées [32]

II.5.3. La Turbine

La turbine sert à convertir l'énergie cinétique de l'air ascendant en énergie mécanique de rotation. Généralement la turbine est liée directement à une génératrice pour donner ce qu'on appelle un aérogénérateur son rôle est d'avoir directement de l'énergie électrique.

le choix de ces turbines influence considérablement le rendement de la centrale cheminée solaire. Les spécifications pour les turbines des cheminées solaires ressemblent, sur plusieurs aspects, à celles des grandes éoliennes [31].



Figure II.6 : Turbines-génératrices pour cheminée solaire [33]

II.6. Etude bibliographique sur les centrales cheminées solaires

Dans le domaine de la recherche d'une technologie renouvelable pour la production d'électricité, la cheminée solaire suscite un grand intérêt et un grand développement chez les chercheurs, mais l'augmentation de l'efficacité de la production de cheminée solaire fait encore l'objet de nombreuses études (expérimentales, numériques et analytiques).

Parmi les paramètres affectant l'efficacité de la cheminée solaire on trouve : les conditions météorologiques et les dimensions géométriques, à savoir, la hauteur et le diamètre de la cheminée, le rayon du collecteur et la hauteur du toit du collecteur. Il est donc intéressant et utile de présenter une revue bibliographique et d'autre part, de mettre en évidence l'évolution de la recherche dans ce domaine.

II.6.1. Les études expérimentales et théoriques

En 2008, **Maia & al.** [34] ont mené une étude analytique et numérique de l'écoulement turbulent et transitoire de l'air à travers une CCS en utilisant la méthode des volumes finis dans des coordonnées généralisées pour résoudre les équations de conservations et de transports afin

d'évaluer l'influence des paramètres géométriques (**Figure II.8**) et les matériaux utilisés sur les performances d'une CCS. Cette étude a été référée au prototype construit et expérimenté.

En montrant que le débit massique croit avec l'augmentation de la hauteur et le diamètre de la tour, ils ont montré que ces deux grandeurs représentent les paramètres physiques les plus importants dans la conception d'une CCS. Les résultats numériques ont été validés par comparaison avec les données expérimentales.



Figure II.7 : Le prototype d'expérience de Maia et al. [34]

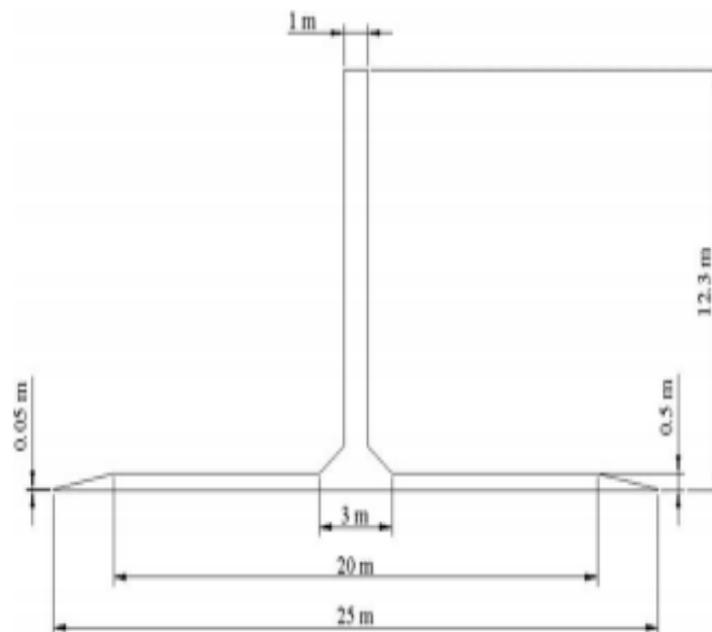


Figure II.8 : Dimensions du prototype de Maia et al. [34]

En 2011, afin d'étudier l'effet de la hauteur de la cheminée solaire, le rayon du collecteur et la température du sol sur les performances d'une CCS, une étude expérimentale est menée par **Abdulcelil** [35]. Les effets du changement de la température ambiante et du vent brassant extérieurement le système sur les performances du système ont été analysés. Le prototype de cheminée solaire conçu et construit à l'université d'Adiyaman, Turquie.



Figure II.9 :Le prototype de l'université d'Adiyaman, Turquie [35]

Les résultats montrent que la température ambiante est un facteur important affectant la performance du système de cheminée solaire. La vitesse de l'air dans l'environnement n'a pas eu d'effet sur la cheminée solaire. Ils ont trouvé aussi que la répartition de la température dans la partie sud de la cheminée est un peu plus que la partie nord.

En 2015, une étude à la fois numérique et expérimentale est menée par **Shaherza et Imani** [36]. Dans cette étude, un nouveau modèle à petite échelle a été étudié. Le débit d'air, le flux de transfert de chaleur et les caractéristiques de l'écoulement ont été calculés numériquement et comparés avec les résultats expérimentaux. Dans cette étude, deux miroirs réflecteurs ont été utilisés pour concentrer le rayonnement émis par le soleil autour de la cheminée solaire dans le cas expérimental. Le modèle de RNGK- ϵ a été choisi pour simuler la turbulence et l'algorithme connu (SIMPLE) a été utilisé pour résoudre les problèmes associées au couplage vitesse-pression. Les résultats ont montré que l'utilisation de miroirs-réflecteurs entraînait une augmentation de la vitesse dans la cheminée et qu'il produisait donc plus d'énergie. La vitesse maximale de 5,12 m/s a été atteinte, une valeur assez importante vue la petite taille de cette CCS.

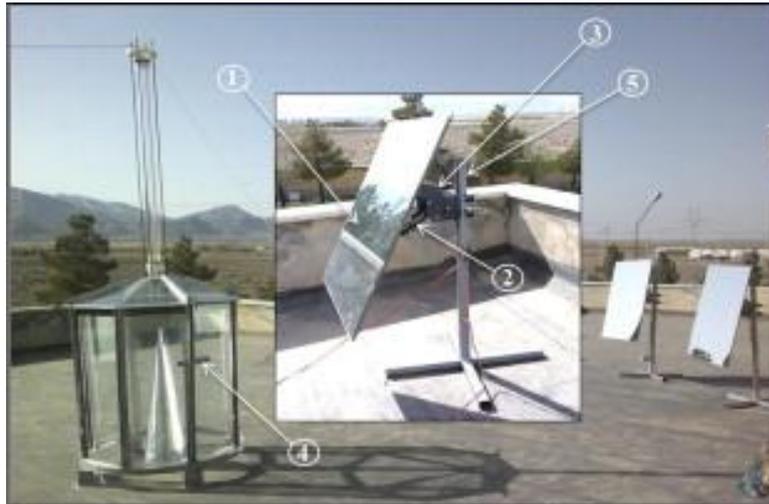


Figure II.10 : Le prototype étudié[36] (1) miroir plat, (2) assemblage mécanique, (3) moteur à courant continu, (4) capteurs internes et externes, (5) support de miroir.

En 2016, (AESL), **Guo et al.** [37] ont réalisé et expérimenté un prototype à petite échelle d'une cheminée solaire. Le diamètre du collecteur et la hauteur de la cheminée de ce prototype sont, respectivement, de 1,22 m et 1 m. La température de l'air en écoulement et la vitesse du courant ascendant ont été mesurées pour des intensités de rayonnement et des hauteurs de cheminée variables. Les données mesurées ont été utilisées pour valider un modèle analytique pour le collecteur.

Les limites supérieures du rayon du collecteur et de la hauteur de la cheminée ont été discutées sur la base des résultats expérimentaux. Les travaux expérimentaux sur les performances de base de l'installation d'une cheminée solaire ont permis de comprendre les caractéristiques thermodynamiques de la centrale cheminée solaire, servant ainsi de base à la conception des CCS commerciales à grande échelle.

En 2017, pour améliorer le transfert de chaleur dans une installation CCS, les performances électro hydrodynamique d'une cheminée solaire avec le système pour les dispositions parallèles, radiales et symétriques, **Ghulamachi et al.** [38] ont implémenté un système Electrohydrodynamique (EHD) dans le collecteur de 3m de diamètre d'une installation pilote comprenant une cheminée de 3 m de hauteur. Les résultats montrent que la disposition en parallèle avec six électrodes et un espacement de 3 cm entre les électrodes offre les meilleures performances. En outre, différentes heures de la journée sont étudiées et le meilleur moment pour allumer le système Electro hydrodynamique été le 13h00.

Le système électro hydrodynamique augmente la vitesse du fluide de 1,7 à 2,3 m/s, ce qui améliore les performances d'environ 28%.

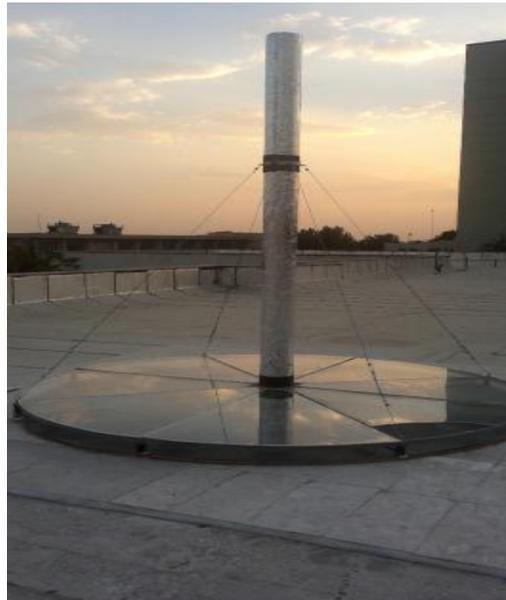


Figure II.11 :Prototype de Ghalamachi et al. [38]

En 2017, une étude expérimentale est menée par **Siyang Hu et al.** [39] dont l'objectif principal été d'examiner l'impact de la géométrie de la paroi de guidage (PG) sur la puissance de sortie d'une centrale à cheminée solaire. Une réduction du débit massique après l'ajout d'un PG dans le système a été observée dans un prototype expérimental à petite échelle. Des simulations numériques sur une centrale à cheminée solaire à grande échelle ont en outre révélé que le débit massique était linéairement et inversement proportionnel à l'augmentation de la hauteur en PG. La force motrice, cependant, a augmenté de façon non linéaire avec l'augmentation de la hauteur en PG. Par la suite, la puissance de sortie maximale potentielle, qui était principalement régie par la force motrice, augmentait avec l'augmentation de la hauteur en PG. De plus, un système à cheminée divergente pouvant améliorer les performances des centrales à cheminée solaire a eu des réactions différentes avec la géométrie des PG par rapport à un système à cheminée cylindrique.



Figure II.12 :Le petit prototype (à gauche). La transition collecteur-cheminée avec un sous-ensemble de paroi de guidage solide blanc (à droite) [39]

Sous la configuration PG optimale, la puissance de sortie de la centrale à cheminée solaire a augmenté de 40% dans un système de cheminée cylindrique et de 9,0% dans un système de cheminée divergente par rapport au système sans paroi de guidage.

II.6.2. Les études numériques

En 2014, **Sandeep et al.** [40] ont étudié numériquement les caractéristiques de flux à l'intérieur de la centrale à cheminée solaire en utilisant un logiciel de dynamique des fluides numériques ANSYS-CFX. La hauteur totale de la cheminée et le diamètre du collecteur ont été maintenus constants à 10 et 8 m respectivement. L'ouverture du collecteur variait de 0,05 m à 0,2 m. Le diamètre de sortie du collecteur variait également de 0,6 m à 1 m. Ces collecteurs modifiés ont été testés avec des cheminées d'angles de divergence différents (0° à 3°) et avec différents orifices d'entrée de cheminée de 0,6 m à 1 m. Le diamètre de la cheminée variait également de 0,25 m à 0,3 m.

La meilleure configuration a été obtenue avec une cheminée avec un angle de divergence de 2° et un diamètre de cheminée de 0,25 m ainsi que l'ouverture du collecteur de 0,05 m et un diamètre de sortie du collecteur de 1 m. La température à l'intérieur du capteur est plus élevée pour l'ouverture inférieure, ce qui entraîne un débit et une puissance plus élevés.

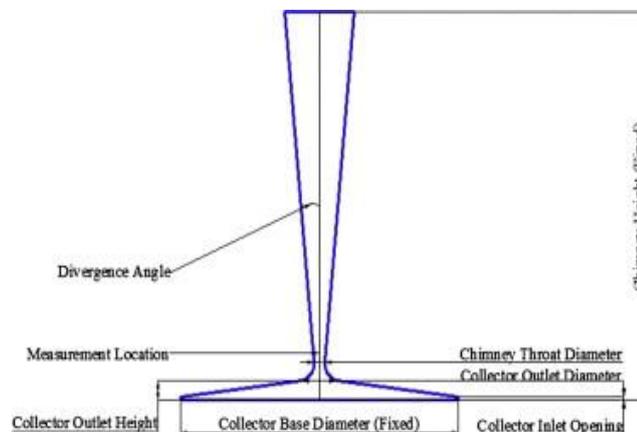


Figure II.13 : Schéma de la CCS avec les différents paramètres étudiés [40]

Lebbi et al. [41] en 2014, ont étudié quantitativement le comportement de l'écoulement d'air à travers une CCS. Les équations de transport qui décrivent l'écoulement avec transfert de chaleur, pour différents paramètres géométriques, ont été présentées et résolues numériquement à l'aide de la méthode des volumes finis. Cette méthodologie nous permet d'avoir une image détaillée des effets de certains paramètres d'ingénierie tels que la hauteur et le rayon de la tour. Il a été démontré dans ce travail que les dimensions de la tour jouent un rôle important dans la conception de tels systèmes

en augmentant ou en diminuant le débit de masse. Ainsi, le champ hydrodynamique est contrôlé directement en modifiant les dimensions de la tour. Cependant, le champ thermique est contrôlé indirectement en réduisant la température moyenne du système.

En 2016, **Sudprasert et al.** [42] ont étudié numériquement l'effet de l'air humide sur la performance d'une cheminée solaire verticale. Des modèles numériques ont été construits pour simuler le transfert de chaleur et le flux d'air sec et d'air humide avec une humidité relative de 30 à 80% dans une cheminée solaire. Les résultats numériques de la vitesse de l'air et de la distribution de la température dans la cheminée solaire avec de l'air sec ont été comparés aux résultats obtenus avec de l'air humide, sous une température de paroi de cheminée constante. Par rapport à une cheminée solaire à air sec, le rendement en débit d'air ventilé est diminué de 15,4 à 26,2% et la température de l'air global était plus élevée pour une cheminée solaire à air humide. Pour maximiser la ventilation et réduire le reflux à l'ouverture, il est recommandé d'utiliser un rapport de forme de 14: 1 et une hauteur d'ouverture limitée pour les cheminées solaires à air humide.

En 2017, **Ayadi et al.** [43], ont étudié numériquement la géométrie optimale d'une installation cheminée solaire nécessaire pour améliorer ses performances. Le système en question est constitué d'un collecteur de 50 mm de hauteur et de 2750 mm de diamètre, et d'une cheminée de 160 mm de diamètre et de 3000 mm d'hauteur. Quatre angles de l'inclinaison du toit du capteur, égaux à $\beta = -1,5^\circ$, $\beta = -1^\circ$, $\beta = 0^\circ$ et $\beta = 1^\circ$, ont été étudiés. Pour chaque angle, la distribution de la vitesse, de la température, de la pression, du rayonnement incident et des caractéristiques de turbulence ont été présentées et discutées.

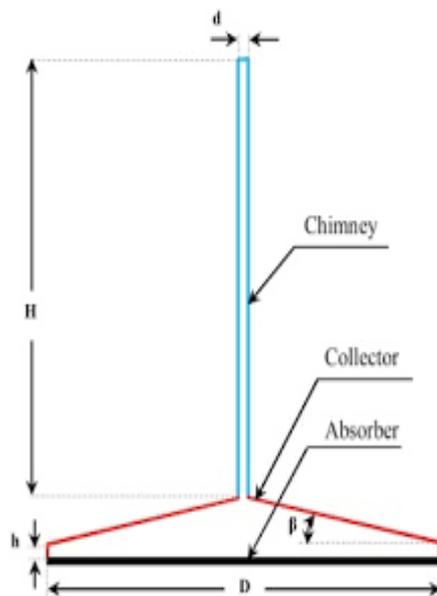


Figure II.14 :Les composants de la CCS [43]

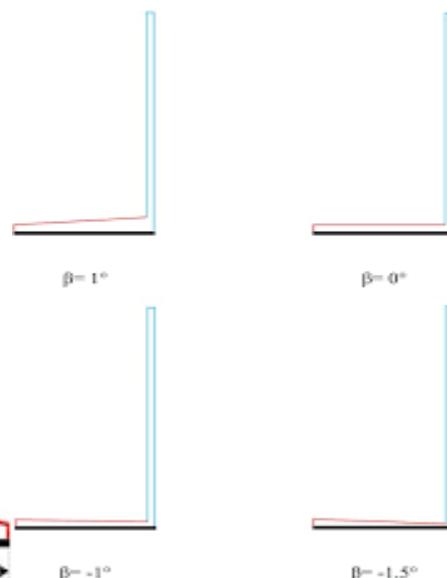


Figure II.15 :Les différents angles du toit du collecteur [43]

Le choix efficace de la géométrie optimale est basé sur le calcul de la valeur maximale de la vitesse de l'air dans la centrale CCS. Les résultats indiquent qu'un toit du collecteur incliné négativement augmente positivement la vitesse de l'air. Les données obtenues peuvent fournir les caractéristiques thermiques de l'écoulement de l'air aux concepteurs et aux ingénieurs pour améliorer l'efficacité globale de l'installation solaire.

Pour obtenir le rendement de puissance maximal d'un prototype de cheminée solaire à Zanjan, en Iran, **Shirvan et al.** [44] en 2017, ont présenté une simulation numérique d'une configuration axisymétrique bidimensionnelle et une analyse de sensibilité.

La méthodologie de surface de réponse est utilisée pour effectuer cette analyse de sensibilité. Les effets des paramètres effectifs, y compris l'espace d'entrée du collecteur ($0,10 \leq a \leq 0,20$), le diamètre de la cheminée ($0,20 \leq b \leq 0,30$), la hauteur de la cheminée ($8 \leq h \leq 16$) et l'inclinaison du toit du collecteur ($0^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$) sur la puissance de sortie maximale potentielle ont été étudiés. Ils ont constaté que la puissance de sortie maximale augmente avec l'augmentation du diamètre et de la hauteur de la cheminée et diminue avec l'augmentation de l'espace d'entrée du collecteur.

II.6.3. Les études analytiques

Un modèle mathématique et un code sur la plate-forme MATLAB ont été développés par **Bilgen et Rheault** [45] en 2005 sur la base des données météorologiques mensuelles moyennes et du cycle thermodynamique. Les performances thermiques d'une centrale de production d'énergie nominale de 5 MW à trois endroits au Canada, à savoir Ottawa, Winnipeg et Edmonton. Les résultats montrent que la performance thermique complète pour des cheminées solaires à haute latitude est environ 0.48 %, qui est légèrement meilleure que celle avec des collecteurs horizontaux aux emplacements du sud avec le climat favorable.

Von Backstrom et Fluri [46] en 2006, ont étudié de manière analytique la validité et l'applicabilité de l'hypothèse selon laquelle, pour une puissance maximale du fluide, le rapport optimal entre la perte de charge de la turbine et le potentiel de pression (différence de pression disponible du système) est de 2/3. Les analyses prédisent que la puissance maximale du fluide est disponible à un débit beaucoup plus bas et à une perte de charge de la turbine beaucoup plus importante que prévu par l'hypothèse d'un potentiel de pression constant avec ce qui a été prédit par d'autres chercheurs.

En 2014, **Kasaerian et al.** [47] présentent une étude analytique et numérique d'optimisation géométrique d'un prototype de cheminée solaire à l'Université de Téhéran en Iran.

Un modèle mathématique fondamental décrivant l'écoulement a été présenté et l'évaluation des performances de la cheminée solaire a été simulée avec des configurations opérationnelles et géométriques. Les prévisions numériques ont été validées par comparaison avec les données expérimentales sur un prototype expérimental d'une cheminée solaire de 2m de hauteur dotée d'un collecteur de 3 m de rayon.

Les résultats montrent que l'entrée du collecteur de 6 cm, la hauteur de la cheminée de 3 m et le diamètre de la cheminée de 10 cm donnent les meilleures performances. On constate que l'amplitude de la vitesse peut être portée à 4-25% dans différents cas, l'analyse a également indiqué que la hauteur et le diamètre de la cheminée sont les variables physiques les plus importantes pour la conception de la cheminée solaire.



FigureII.16 : Le prototype de l'université de Téhéran en Iran [47]

Jae Choi et al. [48] en 2016, ont présenté et développé un modèle analytique à l'aide de données expérimentales provenant d'une usine prototype située à Manzanares, en Espagne. Pour estimer la puissance délivrée et la configuration de la température du collecteur. Un système de stockage d'eau a été mis en place sous le collecteur pour conserver l'énergie thermique pendant la nuit. La puissance d'une cheminée solaire à grande échelle a été évaluée en fonction de paramètres tels que la hauteur de la cheminée, le rayon du collecteur, le diamètre de la cheminée et l'irradiation solaire, entre autres. La puissance de la cheminée solaire à grande échelle avec et sans le système de stockage d'eau a été évaluée. La variation de puissance sur une période de 24 h a été analysée en fonction de la profondeur du système de stockage d'eau.

II.7. Projets de centrale à cheminées solaires

II.7.1. Prototype de Manzanares

Le premier prototype expérimental d'une centrale à cheminée solaire a été conçu par le bureau d'études Schlaich Bergermann et Partner de Stuttgart [49]. Le distributeur d'électricité espagnol « Union Electrica Fenosa » a proposé le site de Manzanares (ville espagnole située à 180 kilomètres au sud de Madrid) et le ministère allemand de recherche (BMFT) a financé le projet. La construction du prototype a été terminée en 1982 et a fonctionné pendant plus de 7 ans. Sur la Figure II.17 on montre des photos du prototype expérimental de Manzanares [50]

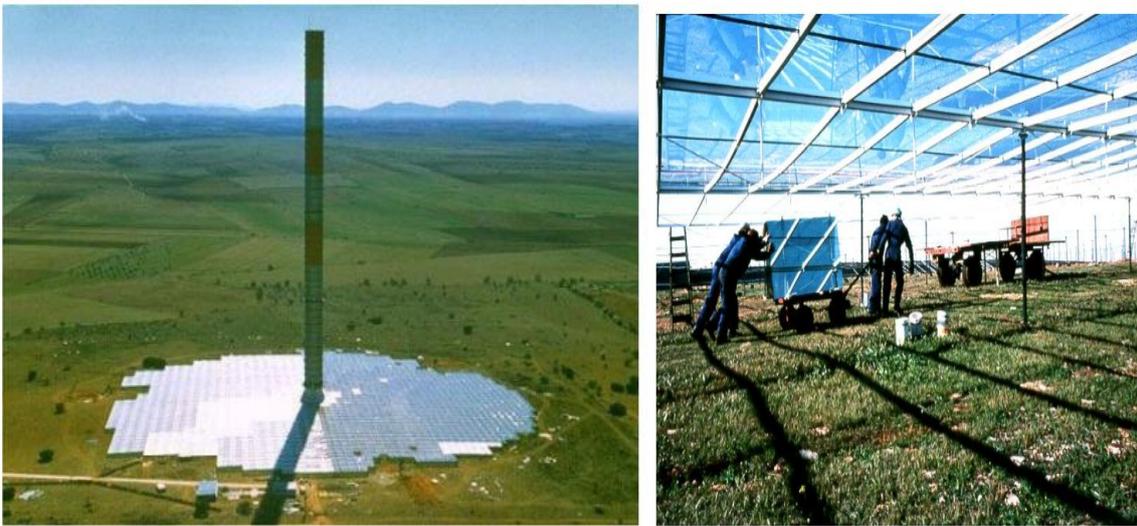


Figure II.17 : Prototype de Manzanares en Espagne [51]

Tableau II.1 : Données du prototype de Manzanares [52]

Hauteur de la tour	194.6 m
Diamètre de la tour	10.16 m
Diamètre du collecteur	244 m
Hauteur moyenne du toit	1.85 m
Différence de température dans le collecteur ΔT	20°C
Puissance électrique nominale	50 kW
Surface du collecteur en membrane plastique	40 000m ²
Surface du collecteur en verre	6 000m ²

II.7.2. Le projet de Borunga

Le projet le plus ambitieux aujourd'hui est celui de Borunga, en Australie. Il est développé par la société EnviroMission en collaboration avec le bureau d'ingénierie civile allemand SBP (Schlaich Bergemann and 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, ce qui correspond à environ 2 euros par Watt installé. 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 du tourisme, attiré par la plus haute structure du monde, pour rendre l'énergie produite compétitive [52].

Tableau II.2 : Données du prototype de Borunga [52]

Hauteur de la tour	1000 m
Diamètre de la tour	120 m
Diamètre du collecteur	7000 m
Hauteur moyenne du toit	1.85 m
Température de l'air chauffé	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



Figure II.18: La cheminée d'EnviroMission [52]

II.7.3. Le projet Chinois

La région de Jinsha Bay Wuhai en Mongolie intérieure (Chine) a construit un prototype de cheminée solaire expérimental de 200 kW.

La capacité totale prévue jusqu'en décembre 2013 est de 27,5 MW, ce qui représente 2,78 millions de m^2 de désert occupés par des serres en tant que collecteur et un investissement total de 1,38 milliard de yuans. La construction du prototype chinois a été réalisée en trois phases:

- la première phase du projet a déjà été achevée entre mai 2009 et décembre 2010 et a permis de construire un prototype de cheminée solaire d'une démonstration de 200 kW occupe 40 000 m^2 de tour du désert ou de cheminée de 53 m de haut et de 18 m de diamètre, représentant une dépense de 1 million de yuans ;

- la deuxième phase du projet vient de commencer en février 2011 et a duré jusqu'en décembre 2011 pour achever la construction d'une centrale électrique utilisant une cheminée solaire de 2,2 MW. Ce système de démonstration occupera 220 000 m^2 de désert et l'investissement prévu est de 110 millions de yuans;

- la troisième phase du projet sera réalisée entre janvier 2012 et décembre 2013, afin de permettre la construction d'une centrale solaire à cheminée de 25,1 MW, avec un capteur de serre occupant une zone désertique de 2,51 millions de m^2 , l'investissement étant de 1,26 milliards de yuans (1,2 milliard de yuans chinois) [53].

II.7.4. Le projet Espagnol

Un autre projet de cheminée solaire, était prévu en 2010, et préalablement développé en Espagne dans la localité de Fuente el Fresno, un village de la province de Ciudad Real. Les travaux étaient menés en collaboration avec les entreprises espagnoles Campo 3 et Imasa, et la compagnie allemande Schlaich Bergermann. Cette tour de 750 mètres de hauteur était dès lors la plus haute de ce genre en Europe [31].

Tableau 3 : Données du projet d'Espagnol [31]

Hauteur de la tour	750 m
Diamètre du collecteur	3000 m
Vitesse de l'air dans la cheminée	43 km/h
Puissance de l'installation	40MW
Coût du projet	240 millions d'euros

II.7.5. Le projet Américain (Arizona)

La cheminée aura un diamètre de 130 mètres pour une hauteur de 800 mètres – soit 60 mètres de plus que la tour Burj Khalifa de Dubaï .Cette structure est censée développer une puissance énergétique installée de 200 MW, soit au final suffisamment d'électricité pour alimenter 100 000 à 150 000 foyers américains. Mais en contrepartie, ce projet nécessiterait également un budget tout aussi démesuré de l'ordre de 750 millions de dollars.

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 de la tour, de sorte que la température au niveau du sol peut être augmentée de 80 à 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 cet apport d'air chaud pour fonctionner et produire de l'électricité. La hauteur impressionnante de la tour tient du fait que la différence de température de l'air est d'autant plus importante que la cheminée est élevée, avec pour conséquence, un gain de production énergétique appréciable.

L'avantage majeur du dispositif repose certainement sur une génération d'énergie en continu pendant 80 ans, sans avoir pratiquement besoin d'entretien.

Par ailleurs, le Southern California Public Power Authority a déjà accepté d'acheter de l'électricité produite par la tour d'EnviroMission pendant les 30 prochaines années [54].

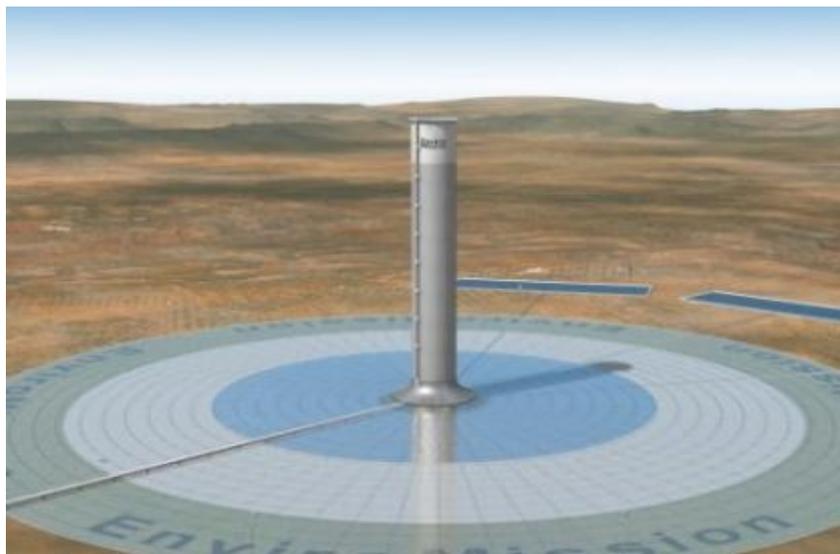


Figure II.19:Le projet Américain (Arizona) [55]

II.8. Cheminées solaires pour la ventilation des locaux

Il n'y a pas qu'un seul concept pour la cheminée solaire destinée à la ventilation des locaux. Cela dépend de différents paramètres tels que : la latitude du site, la hauteur du bâtiment, le type du capteur solaire utilisé en plus des matériaux de construction.

De nos jours, le concept le plus utilisé est celui qui fait de la façade sud de la cheminée elle-même un vitrage permettant au rayonnement solaire de pénétrer.

En résumé nous allons présenter dans ce qui suit trois types de cheminées solaires destinées à la ventilation des locaux [49] :

II.8.1. Type1

Ce type de cheminée solaire vu son caractère novatrice a été installée dans le laboratoire EPT de l'Université norvégienne de Science et technologie. Il fait l'objet de plusieurs études de thèses qui ont été proposées à l'EPT [56].

On peut voir sur la Figure II.20 le principe de fonctionnement de cette cheminée. Le rayonnement solaire passe à travers le vitrage, situé dans la partie inférieure de la façade sud, et il est absorbé par l'absorbeur (en bas de la cheminée). Le capteur solaire est constitué d'un grand nombre d'ailettes fines métalliques parallèles (33 dans le laboratoire EPT-Lab.). Chaque ailette reçoit le rayonnement solaire, augmentant la température des surfaces, cela génère un panache de convection tout autour de l'ailette.

La distance entre deux ailettes consécutifs est relativement petite ($w = 4,4\text{cm}$) et l'angle entre l'axe du panache et la limite est d'environ $\beta = 12,5^\circ$ [57]. Ainsi, la distance entre deux panaches consécutifs qui se touchent est:

$$h = \frac{w}{2 \cdot \tan \beta} = \frac{4.4}{2 \cdot \tan(12.5)} \dots \dots \dots (1)$$

$$h = 9.92 \text{ cm} \dots \dots \dots (2)$$

A cette distance, on peut considérer une température homogène à l'intérieur de la cheminée. On note que la hauteur de la cheminée est plus grande (300cm) que "h", par conséquent, on suppose que la hauteur de la cheminée et la hauteur du l'effet de pile sont pratiquement les mêmes [49].

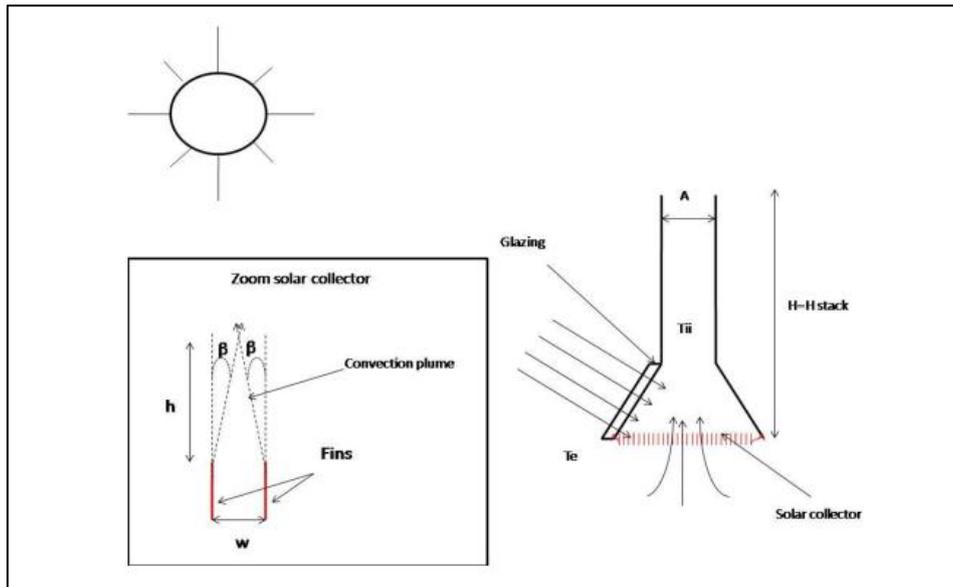


Figure II.20 : Synoptique de la Cheminée solaire réalisée au laboratoire EPT-Lab. [49]

II.8.2. Type 2

Ce type de cheminée a été installé à l'école Tanga de Falkenberg en Suède. Il est conçu pour les climats froids (latitudes plus élevées), comme le type 1, cette cheminée modifie la partie inférieure du mur sud pour un vitrage, c'est pourquoi juste une partie de la façade sud est un verre pour minimiser le creux de perte de chaleur la cheminée, car cette cheminée utilise également l'effet de pile du bâtiment pour améliorer la ventilation naturelle.

Le rayonnement traverse la fenêtre et est absorbé par le capteur solaire, mais dans ce cas, c'est le mur avant, qui est peint en noir pour améliorer l'absorption du rayonnement.

Dans ce cas, la hauteur de la cheminée et la hauteur de la pile n'y est pas la même; à titre approximatif, le début de la hauteur de l'effet de pile peut être calculé comme le point où la couche limite thermique touche le mur sud [49].

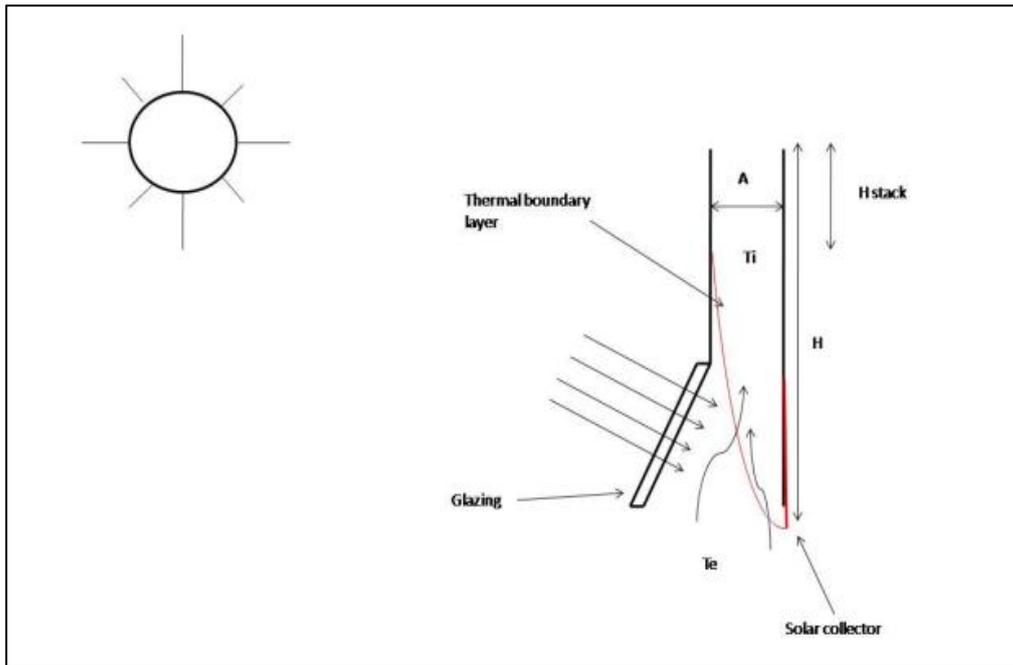


Figure II.21: Type de cheminée développée à l'Ecole Tanga [49]

II.8.3. Type 3

Ce type de cheminée solaire est le plus utilisé et donc le plus étudié. Il est principalement, développé pour les climats chauds et tropicaux.

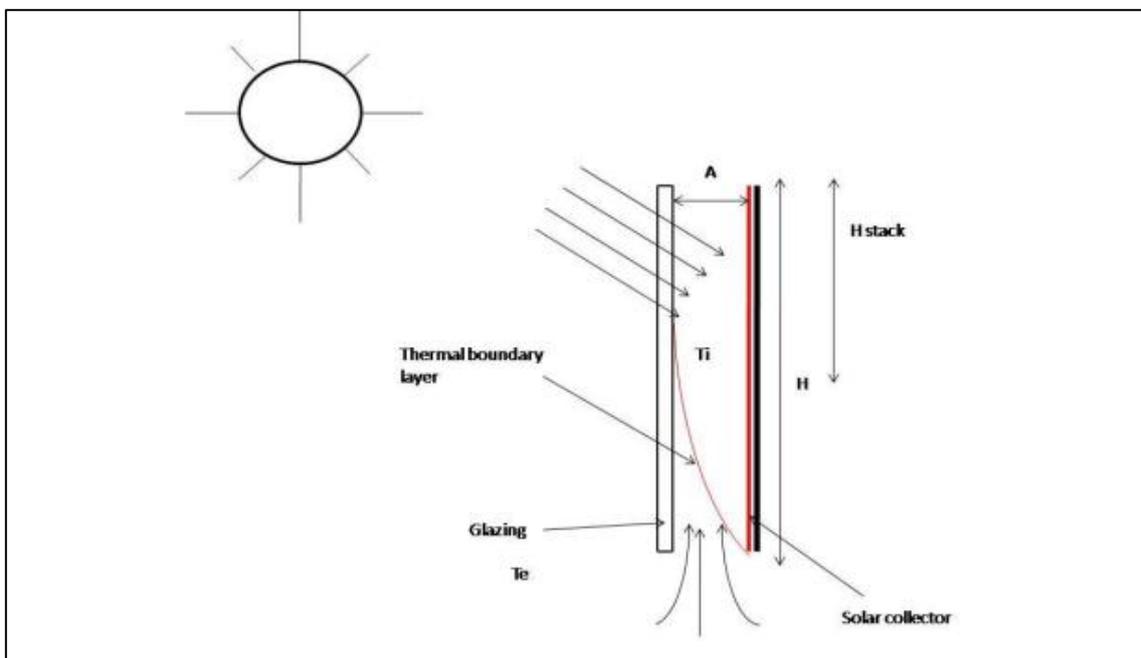


Figure II.22: Cheminée solaire standard [49]

Le design de ce type de cheminée est très simple. Le mur sud est en verre permettant ainsi au rayonnement de pénétrer à l'absorbeur, qui est tout simplement le mur opposé, également peint

en noir. Comme pour le type 2, la hauteur de l'effet de pile diffère de la hauteur de la cheminée; et qui peut être calculé avec les mêmes conditions [49].

II.9. Les différents phénomènes intervenants dans la cheminée solaire

Si le projet de tour solaire est si intéressant, c'est parce que les différents phénomènes et réactions physiques qui s'y déroulent sont connus depuis des décennies [58].

-L'effet Venturi: Le nom de cet effet vient du nom du physicien italien Giovanni Venturi. Ce phénomène se traduit par une accélération des particules gazeuses (dans ce cas-là l'air) dû à un rétrécissement de leur zone de circulation. Cela entraîne également une baisse de la pression.

-L'effet de serre: Le collecteur de la cheminée solaire est en verre ou plastique qui est transparent au rayonnement de courte longueur d'ondes, mais opaque au rayonnement I.R (de grande longueur d'ondes), permettant de réaliser un effet de serre.

-L'effet de convection naturelle: Quand l'air est chaud, il s'élève et la pression diminue : il y a une dépression. Au contraire, l'air froid descend, la pression augmente : il y a un anticyclone. Entre deux cellules d'air de pression différentes, un vent se crée et va de l'anticyclone vers la dépression. Les particules chaudes sont plus légères que les particules froides, et cherchent à les atteindre : ces particules se dilatent sous l'effet de la chaleur, et sont ainsi moins denses (donc plus légères).

-L'effet d'ovalisation: a été contré dans la tour solaire grâce à des structures circulaires disposées à intervalles réguliers dans la tour, sinon elle se replierait sur elle-même.

II.10. Le stockage d'énergie

On a appris que la cheminée solaire fonctionne en présence du rayonnement solaire, c'est-à-dire qu'il fonctionne pendant le jour. L'absence du rayonnement (la nuit), va créer un arrêt de la cheminée c'est pour cela qu'on utilise le rayonnement du jour pour faire fonctionner la cheminée pendant la nuit par la méthode du stockage d'énergie [59].

II.10.1. Les différentes méthodes de stockage

II.10.1.1. Par chauffage du sable

Le sable chauffe et absorbe 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 et de l'énergie est stockée, puis la chaleur est libérée pendant la nuit et continue à faire fonctionner la turbine.

Le tour de force de cette installation est qu'une porte à air a été ajoutée afin d'intégrer l'énergie éolienne dans le réseau électrique, ce qui permet au système de fonctionner en hiver même quand il y a un minimum de soleil. De cette façon, le système peut fonctionner 24h autour de l'horloge, 365 jours d'une année [59].

II.10.1.2. Par chauffage d'eau

Comme les collecteurs produisent de l'air chaud par effet de serre, pour produire de l'électricité durant la nuit, des réservoirs noirs tubulaires remplis d'eau sont placés sous la serre comme montré dans la Figure. [59].

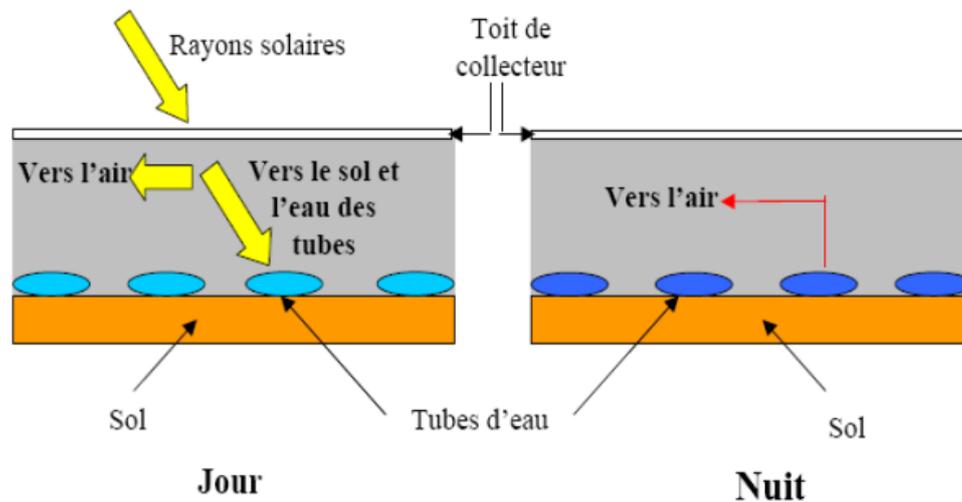


Figure II.23 : Principe du stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des tubes noirs remplis d'eau [59]

Ces poches à eau accumulent de la chaleur le jour et la restituent à l'air la nuit.

- Ces tubes sont remplis une seule fois pour toutes, il ne faut plus d'eau ensuite puisque les tubes sont hermétiquement clos après le remplissage.
- Le volume d'eau dans les tubes est calculé pour correspondre à une hauteur d'eau de 5 à 20 cm en fonction de la puissance désirée de production nocturne, l'énergie stockée pour la nuit diminuant la production de la journée.
- Un ajustement de la production peut être effectué aux heures de pointe où l'électricité se vend 3 à 10 fois plus cher qu'aux heures creuses, améliorant ainsi la rentabilité [59].

II.10.1.3. Par chauffage de galets

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

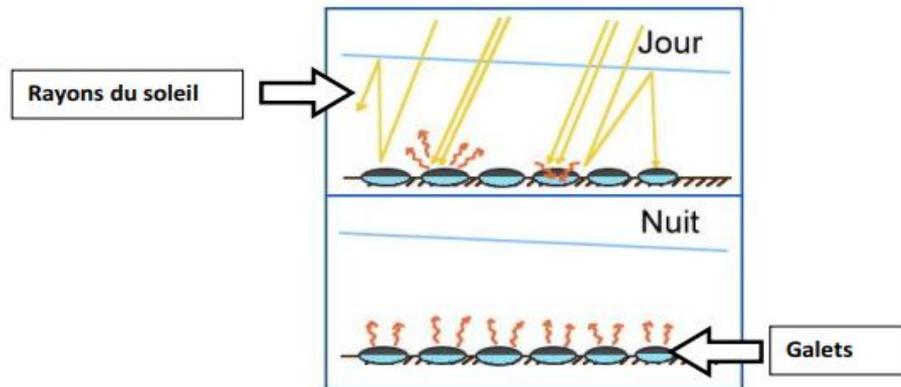


Figure II.24: Principe de stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des galets [12]

En effet durant la journée, ces galets sont exposés constamment aux rayons du soleil et donc emmagasinent cette chaleur afin de la restituer durant la nuit [31]

II.11. Les avantages et les inconvénients de la cheminée solaire

II.11.1. Avantages

- Délivre de l'énergie jour et nuit, car c'est la différence entre la température de l'air à l'intérieur de la serre et l'air ambiant qui conditionne le fonctionnement, or la nuit l'air qui circule dans la serre est encore réchauffée grâce à l'inertie thermique du sol.
- Le système bénéficie des deux composantes du rayonnement solaire, le direct et le diffus, qui est une énergie inépuisable et gratuite. De plus, le stockage thermique assure un fonctionnement régulier et continu [61].
- sera préférentiellement construite en zone désertique, où les matériaux principaux de construction (verre et béton) pourraient être élaborés à partir du sable présent sur place.
- La durée de vie prévue est de 80 années, avec un entretien quasi nul (remplacement des roulements des turbines).
- Ne nécessite pas d'eau (et au contraire, en récupérera grâce aux effets de convection/rosée sur la serre), ni aucune matière consommable une fois démarrée.
- Ne présente aucun risque de pollution pour l'environnement en cas de dysfonctionnement et lors du démantèlement.
- L'empreinte écologique de construction est modérée, et la tour ne génère aucun polluant pendant son fonctionnement [60].

II.12.2. Inconvénients

- Faible rendement : un panneau solaire convertit 15% de l'énergie reçue par m^2 , la tour solaire 10 fois moins (environ 1.5%)
- Coût important : 750 M\$. Selon les sources, le coût du kWh produit devient plus intéressant que celui du thermique ou nucléaire après 12 à 20 ans.
- Incertitudes sur la solidité de l'édifice et la probabilité d'effondrement pendant la durée de vie prévue.
- Le collecteur occupe une immense surface.
- La production n'est pas constante pendant le jour durant toute l'année [60].

Conclusion

En conclusion, la cheminée solaire est tout d'abord un moyen intéressant de production de l'énergie électrique renouvelable : les différentes réactions physiques qui s'y produisent sont connues et maîtrisées par l'homme depuis quelques dizaines d'années (Effet Venturi, convection, effet de serre et aussi ovalisation). Les matériaux nécessaires à sa construction (béton, verre acier) sont disponibles en grandes quantités, et d'un point de vue financier, la cheminée solaire est moins onéreuse qu'une centrale nucléaire. De plus, la production perdure jour et nuit. Ainsi, une seule tour produirait suffisamment d'énergie électrique pour près de 200 000 foyers, mais ces avantages ne cachent pas les contraintes majeures qui inhibent le développement du projet de cheminée solaire à l'échelle mondiale.

En effet, malgré le caractère écologique de la tour, elle requiert une surface vaste de plusieurs dizaines de km^2 , qui doit être suffisamment chauffée et ensoleillée pour assurer un meilleur rendement. Il y a donc impossibilité pour certains pays, notamment pour les pays du Nord, d'exploiter ce concept.

Les endroits les plus favorables se trouvent en Afrique du Nord et principalement au Sahara, dans le centre de l'Australie et aux Etats-Unis. Le désert algérien est donc parmi les endroits les plus remarquables au monde où l'ensoleillement global annuel est maximal et où les surfaces inoccupées ne manquent pas.

Chapitre III

Etude numérique

III.1. Introduction

Les méthodes analytiques semblent être incapables à résoudre les équations différentielles aux dérivées partielles. Alors, l'utilisation des méthodes numériques tel que la méthode de différences finies, des volumes finis et des éléments finis s'avère indispensable. La méthode des volumes finis (M.V.F) est la plus couramment utilisée pour la résolution des équations de la conservation. Elle consiste à transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques faciles à résoudre. Pour cela quatre étapes sont requises:

- 1- Effectuer un maillage du domaine d'étude: un maillage est une succession de volume du contrôle lié entre eux avec des nœuds placés au centre de chaque volume.
- 2- Intégrer les équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle.
- 3- Choix du schéma utilisé: choisir le profil de variation entre deux nœuds adjacents pour son évaluation à l'interface.
- 4- Etablir «n» équations algébriques à résoudre pour « n » nœuds.
- 5- Utiliser une des méthodes de résolution des équations algébriques nominalement linéaires (exemple: T.D.M.A, Gauss-Seidel) pour résoudre le système d'équation.

On s'intéresse dans ce chapitre à la modélisation de l'écoulement dans une cheminée solaire à l'aide d'un logiciel de la mécanique des fluides industriels appelé Fluent. En premier lieu, on présentera les différentes étapes de modélisation de la cheminée solaire, à savoir les dimensions de la structure à étudier et son maillage sur GAMBIT, les hypothèses, les conditions aux limites considérées et on termine par exposer le problème majeur que nous avons rencontré sur Fluent et sa résolution.

III.2. Définition du problème

Dans la présente étude nous utilisons le code numérique Fluent, qui est un solveur utilisant la méthode des volumes finis pour l'étude d'une cheminée solaire. Le but est d'étudier numériquement le comportement de l'air à l'intérieur du collecteur, chauffé par effet de serre, ensuite remonté sous l'effet du gradient de densité, à travers la tour de cheminée solaire. Donc, une cheminée solaire destinée à la production de l'électricité se compose essentiellement d'un capteur solaire (collecteur), d'une tour-cheminée et d'un aérogénérateur (turbine).

III.2.1. Hypothèses simplificatrices

Le phénomène physique devient compliqué. Il convient donc de faire des hypothèses permettant d'arriver à un temps de calcul correct. Le choix est porté sur un domaine bidimensionnel, et les hypothèses utilisées dans ce travail sont :

- L'écoulement est bidimensionnel.
- Le régime est stationnaire (indépendant du temps)
- Le système admet un axe de symétrie.
- Le fluide considéré est supposé visqueux et newtonien et obéit à l'approximation de Boussinesq.

III.3. Modèle Mathématique

Avant de se consacrer à la simulation numérique d'un phénomène, il convient de se préoccuper des lois qui le régissent et aussi de préciser les modélisations physiques et numérique adoptées.

Les équations de Reynolds moyennées ont été obtenues par l'intégration temporellement moyennée des fluctuations turbulentes à hautes fréquences à partir des équations de **Navier-Stokes** [62 -63]. Les équations décrivant l'écoulement moyen sont alors.

a. Equation de continuité

Collecteur

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho u r)}{\partial r} = 0 \quad (\text{III. 1.1})$$

Cheminée

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = 0 \quad (\text{III. 1.2})$$

b. Equation de conservation de la quantité de mouvement

Collecteur

$$u \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r u \right) \right] \quad (\text{III. 2.1})$$

Cheminée

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \rho v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] - (\rho_0 - \rho) g_z \quad (\text{III. 2.2})$$

d. Équation de conservation d'énergie

Collecteur

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v c_p T)}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[(\lambda r) \frac{\partial T}{\partial r} \right] - \nabla \cdot q_r \quad (\text{III. 3.1})$$

Ou : $\nabla \cdot q_r$ Le terme source radiative.

Cheminée

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v c_p T)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (\text{III. 3.2})$$

III.3.1. Modèle de la turbulence

La résolution des équations précédentes nécessite la détermination de la viscosité turbulente (μ_t). Pour ce faire, le modèle de turbulence adopté pour la fermeture des équations de l'écoulement moyen est le modèle κ - ϵ , largement utilisé dans la CFD. Ce modèle est obtenu à partir de la modélisation des contraintes de Reynolds figurant dans les équations de Reynolds moyennées [64].

Pour les calculs, le modèle κ - ϵ **standard** [63] 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 .

$$\nu_t = c_\mu f_\mu \frac{\kappa^2}{\epsilon} \quad (\text{II. 4})$$

Des équations de transport pour les variables turbulentes supplémentaires sont donc nécessaires pour fermer les équations de l'écoulement moyen et pour permettre le calcul de la viscosité turbulente

a. Equation d'énergie cinétique turbulente κ

$$u \frac{\partial \kappa}{\partial x} + v \frac{\partial \kappa}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial y} \right] + P_\kappa + G_\kappa - \rho \epsilon \quad (\text{II. 5})$$

b. Equation de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ϵ

$$u \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] + (c_{\epsilon 1} f_1 (P_\kappa + c_{\epsilon 3} G_\kappa) - \rho c_{\epsilon 2} f_2 \epsilon) \frac{\epsilon}{\kappa} \quad (\text{II. 6})$$

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 :

$$P_\kappa = \nu_t \left(2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right) \quad (\text{II. 6a})$$

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

$$G_\kappa = - \frac{\nu_t}{\sigma_t} g \beta \frac{\partial T}{\partial y} \quad (\text{II. 6b})$$

On donne ci-dessous les constantes empiriques utilisées dans le modèle κ - ϵ standard avec la fonction de paroi [63].

$$\begin{aligned} C_\mu &= 0.09, & C_{\epsilon 1} &= 1.44, & C_{\epsilon 2} &= 1.92, \\ \sigma_T &= 1.00, & \sigma_k &= 1.00, & \sigma_\epsilon &= 1.30, \\ f_\mu &= f_1 = f_2 = 1.0, & D &= E = 0; \end{aligned}$$

La fonction de paroi au premier nœud intérieur :

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

III.3.2. Conditions aux limites - Modèle κ - ϵ standard

Le problème physique en question ainsi que ses conditions aux limites sont montrées dans la Fig. III.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 [65].

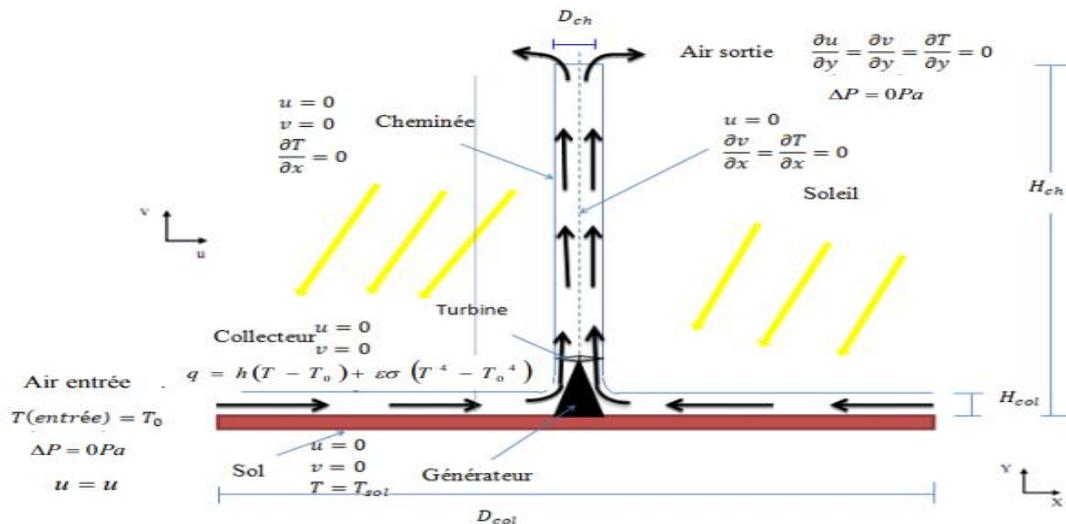


Figure III.1 : Domaine d'étude et conditions aux limites [66].

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, le non glissement et les parois imperméables ont été considérés. Ces conditions ont été appliquées à la couverture, à la jonction, aux parois de la tour et à la surface du sol. Cependant, l'air entre dans le collecteur à la température ambiante. Les parois de la tour et de la région de la jonction sont supposées adiabatiques.

- La température du toit transparent du collecteur est 300 K
- La température du sol est 305 K

III .4. Modèle numérique

III .4.1. Étapes à suivre pour résoudre un problème de CFD

Une fois que nous avons déterminé les caractéristiques importantes du problème que nous avons résolu, ont suit les étapes ci-dessous :

1. Définir les objectifs de modélisation.
2. Créez la géométrie et la grille du modèle.
3. Configurez le solveur et les modèles physiques.
4. Calculer et surveiller la solution.
5. Examiner et enregistrer les résultats.
6. Si nécessaire, réviser les paramètres numériques ou physiques du modèle.

III .4.2. Présentation de GAMBIT et Fluent

La résolution par le logiciel de simulation numérique des écoulements Fluent nécessite d'abord la présentation du logiciel GAMBIT ou un autre meilleur (ANSYS, AUTOCAD ...).

III .4.2.1. GAMBIT

Le logiciel Gambit est un mailleur 2D/3D; préprocesseur qui permet de mailler des domaines de géométrie d'un problème de CFD (Computational Fluid Dynamics). Il génère des fichiers*.msh pour Fluent. Les maillages qu'il permet de créer sont ensuite des supports exploitables avec le solveur fluent [30]
Un maillage est une modélisation géométrique d'un domaine par des éléments proportionnés finis et bien définis. Le but d'un maillage est de procéder à une simplification d'un système

par un modèle représentant ce système, dans l'optique de calculs ou de représentations graphiques.

Gambit regroupe trois fonctions :

- Définition de la géométrie du problème.
- Le maillage et sa vérification.
- La définition des frontières (Types de conditions aux limites) et définitions des domaines de calculs.

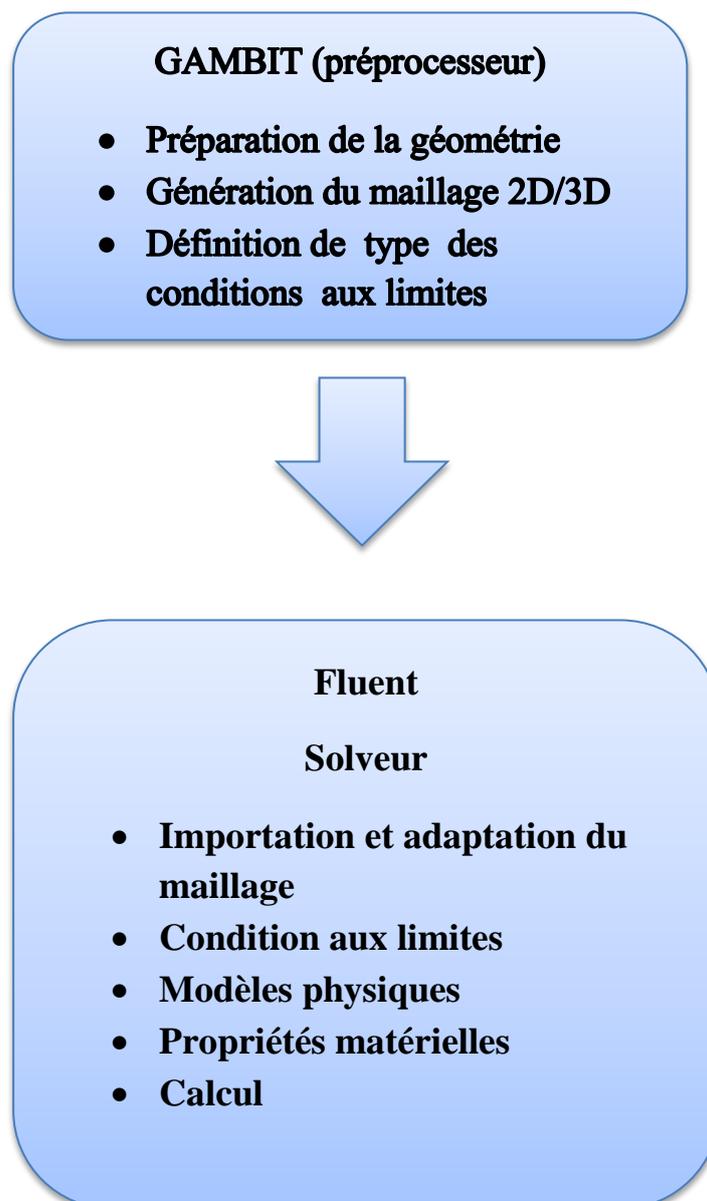
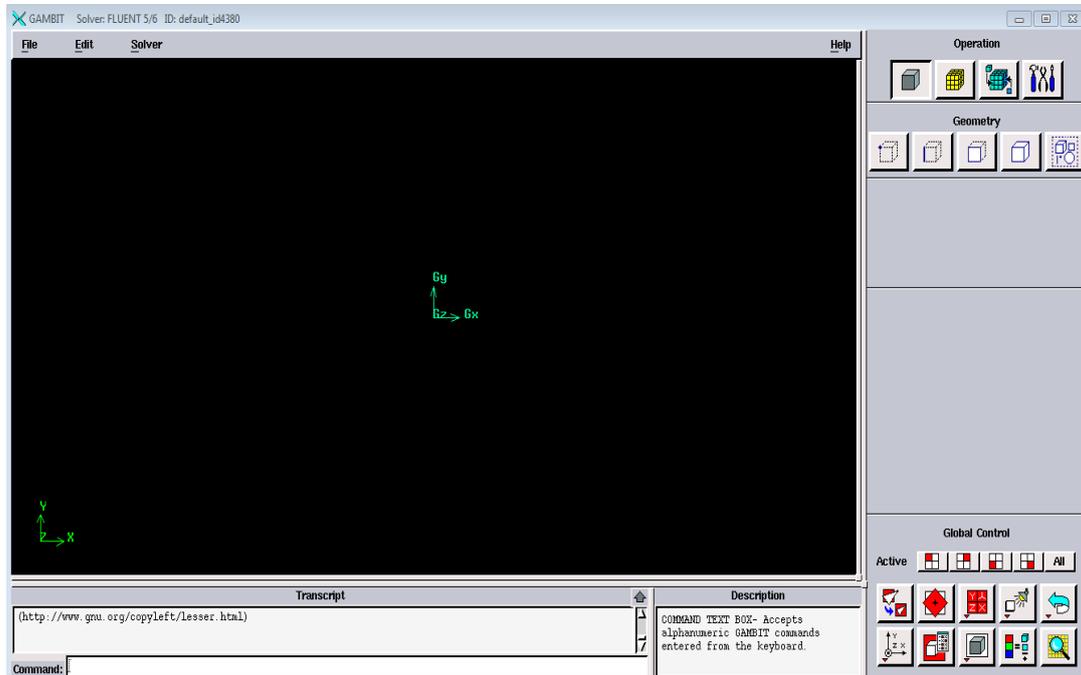


Figure III.2 : Élément du Logiciel [31]

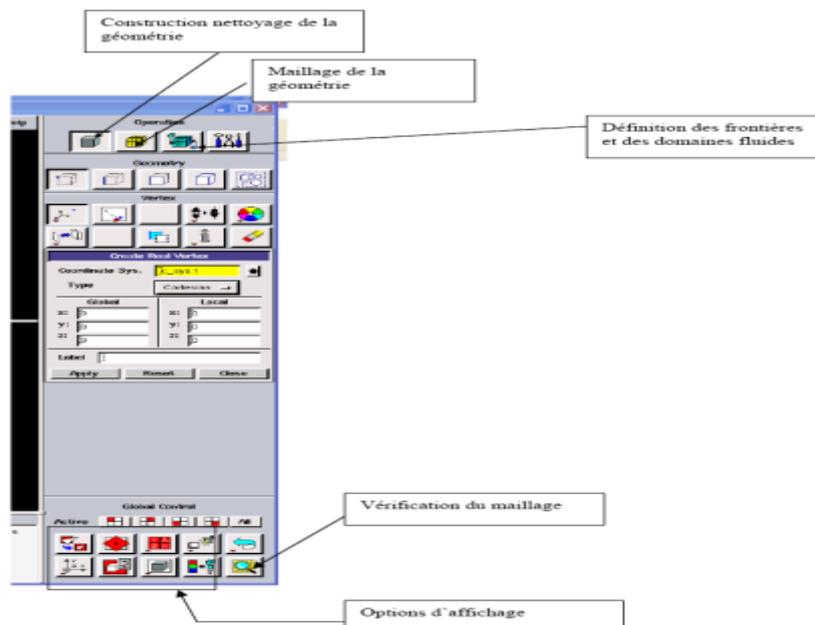
III .4.2.1.1. Démarrage de Gambit

L'interface principale de l'application Gambit est la suivante :



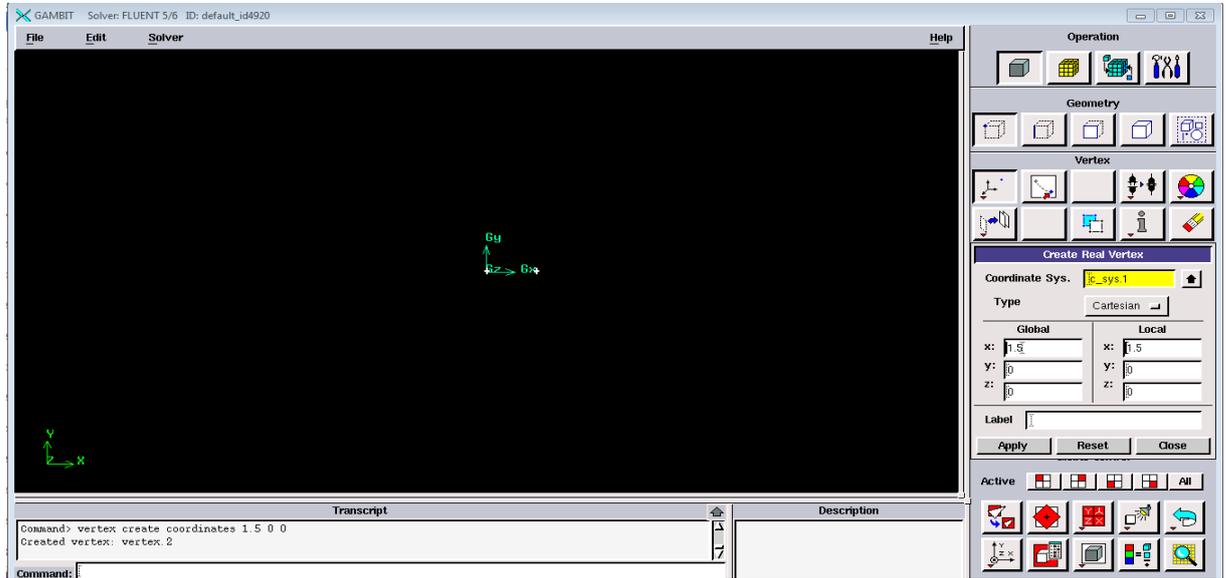
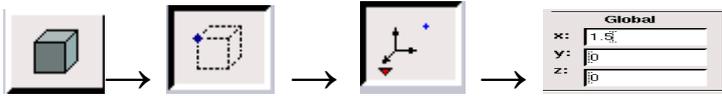
III .4.2.1.2. Construction de la géométrie

La finalité de la construction de la géométrie est de définir les domaines de calcul qui seront des faces dans un problème 2D et des volumes dans un problème 3D.

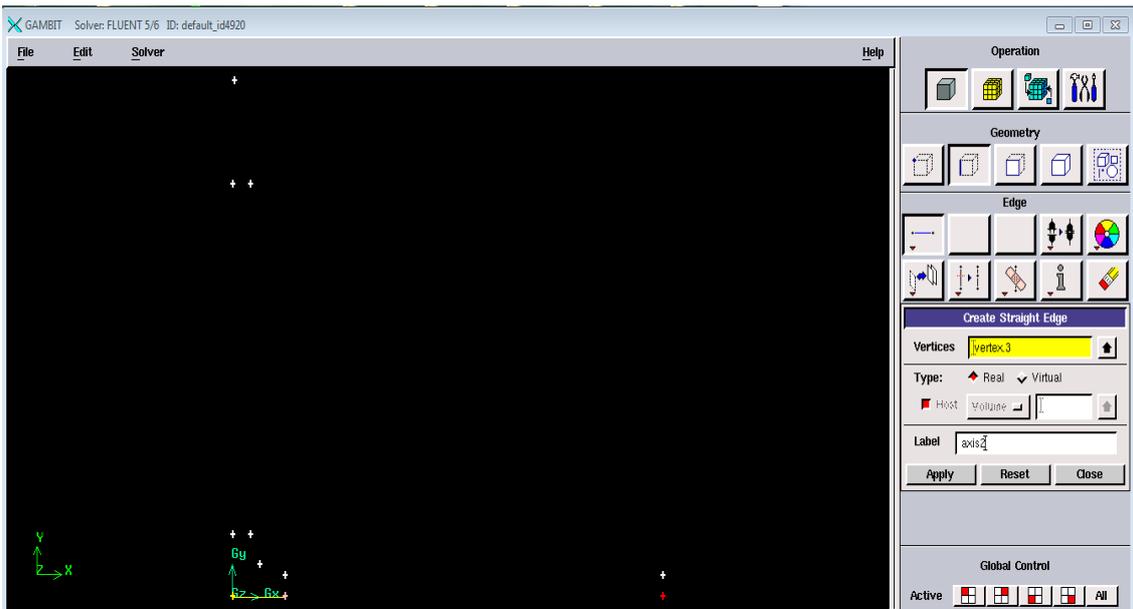
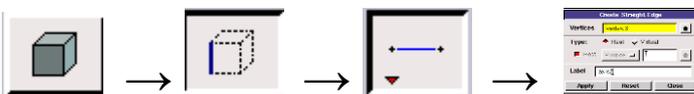


- **Etape 1 : Créer les sommets initiaux**

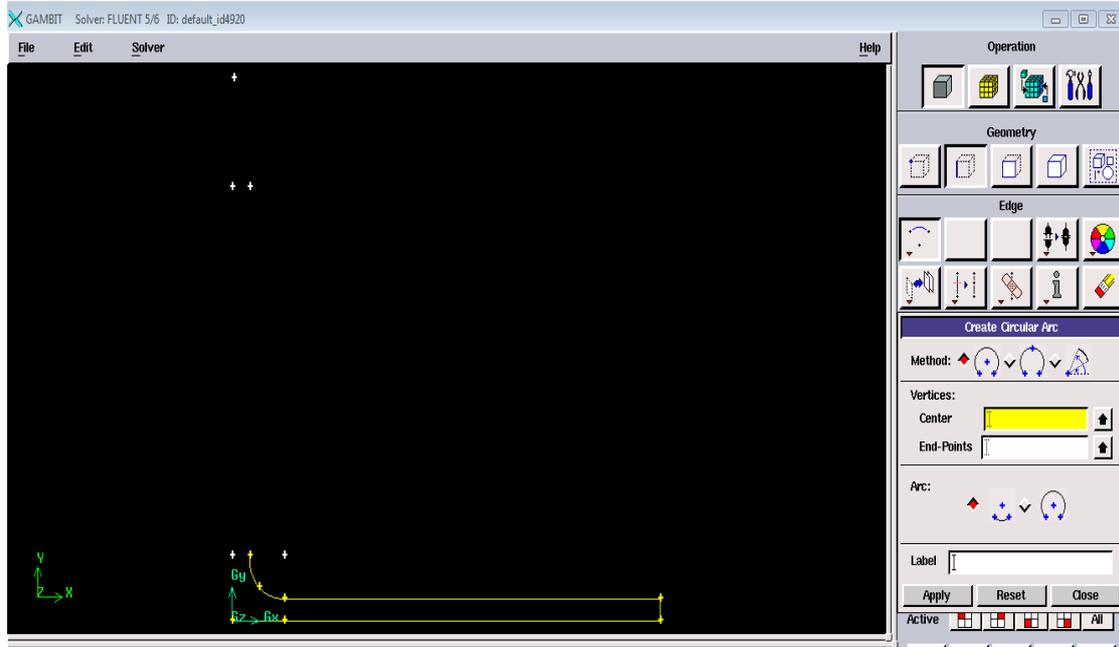
1. Créez des sommets pour définir le contour de cheminée solaire



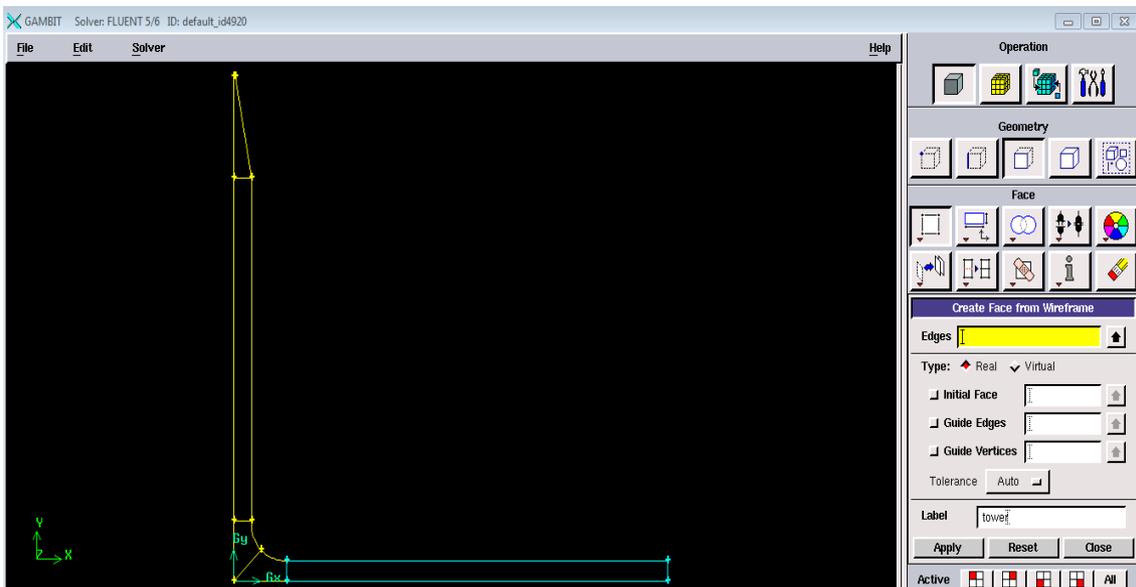
- **Etape2 : Créer des arêtes droites entre les sommets**



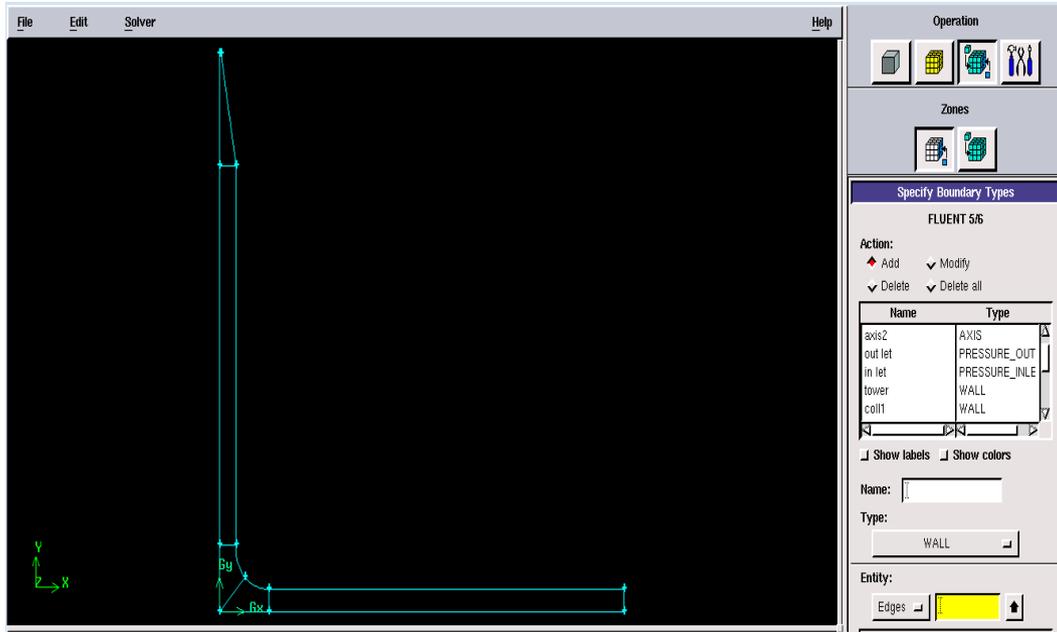
- **Etape 3 : Créer des arcs en sélectionnant le centre de courbure et les extrémités de l'arc**



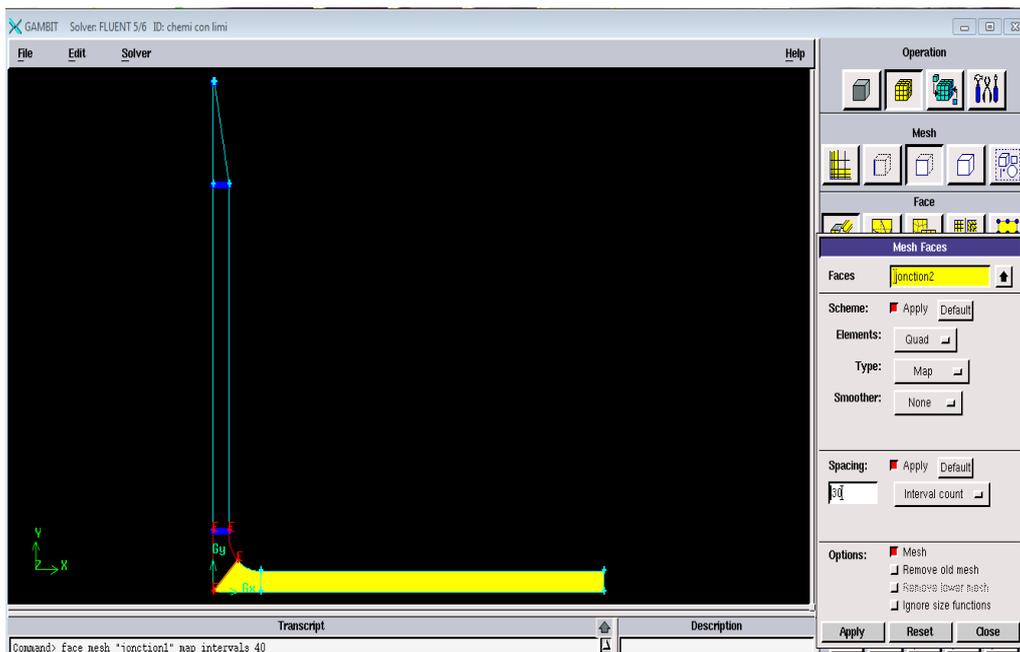
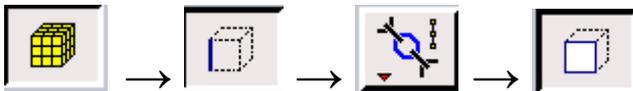
- **Etape 4 : Créer des faces à partir d'arêtes**



• Etape 5 : Définir les types de limite



• Etape 6 : Créer des maillages structurés sur les faces



Donner un nom au fichier et sélectionner le maillage “2-D”, puis sauvegarder le fichier Gambit :
File → Save As

- **Etape 7 : Préparez le maillage à lire dans FLUENT 4**

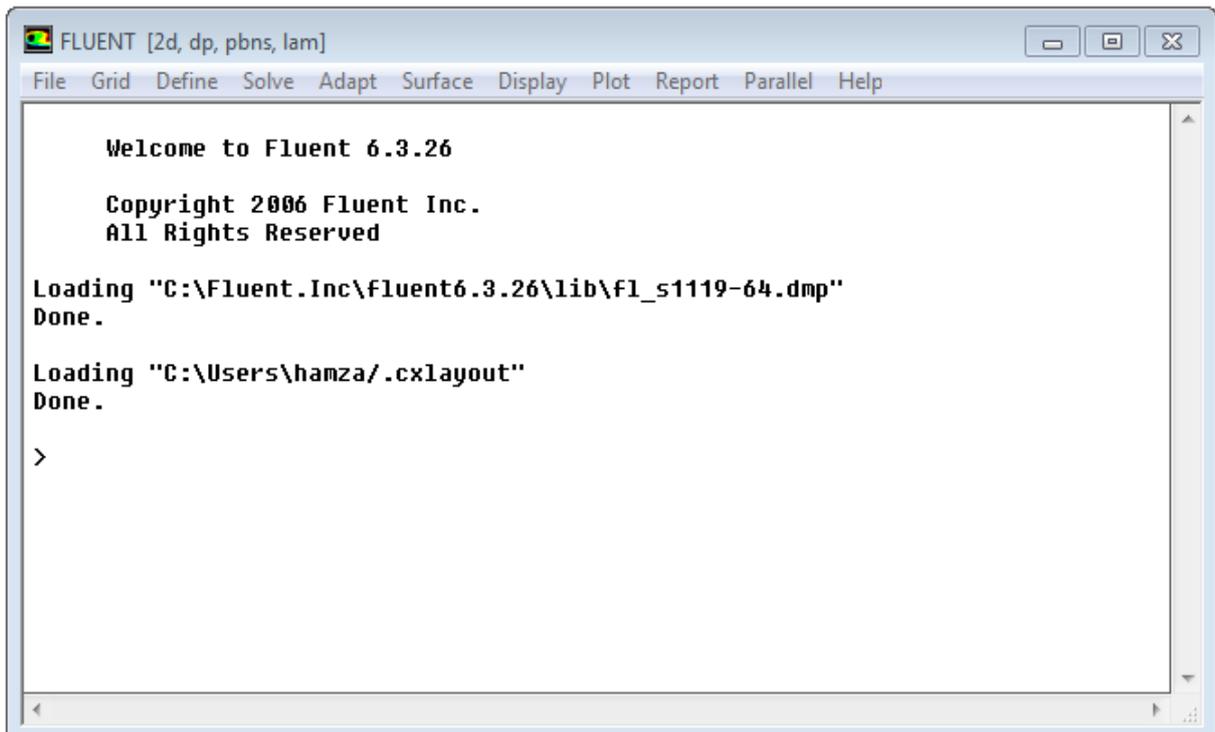
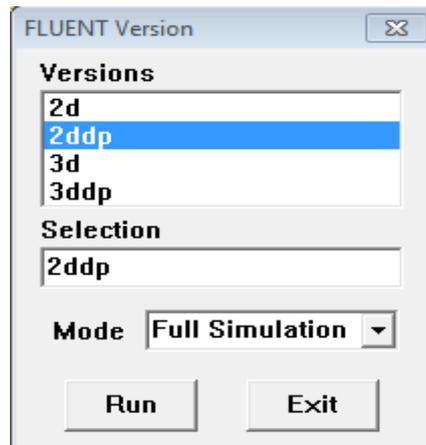
Solver → FLUENT 5/6

- **Etape 8 : Exporter un maillage**

File → Export → Mesh

III .4.2.2. Fluent

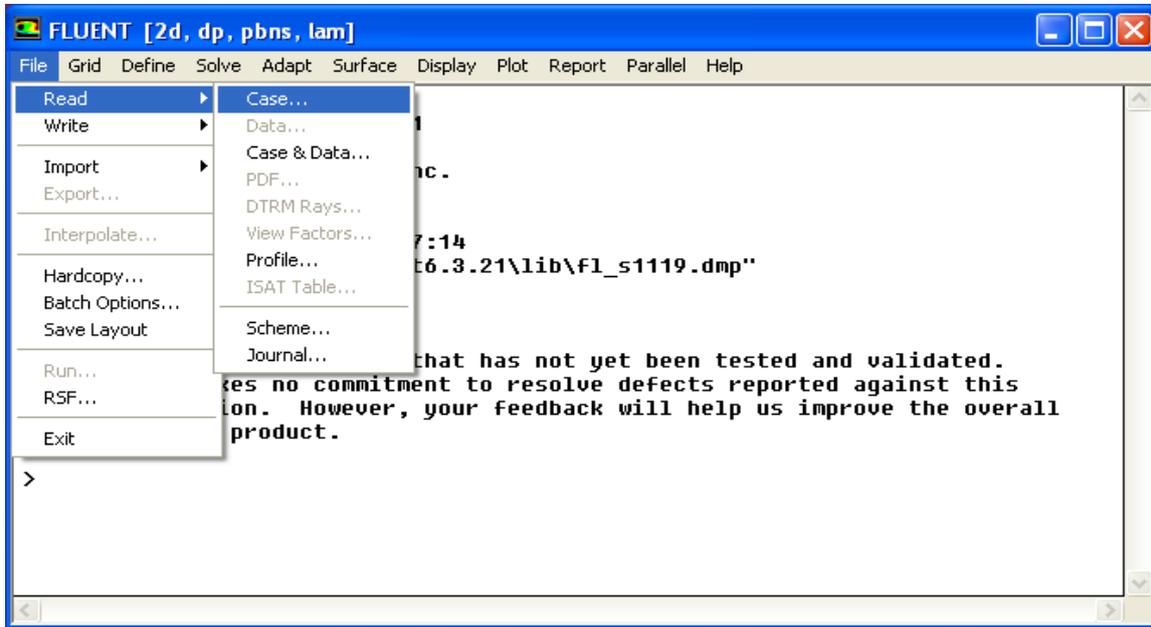
Démarrage de logiciel Fluent



III .4.2.2.1. Importation de la géométrie

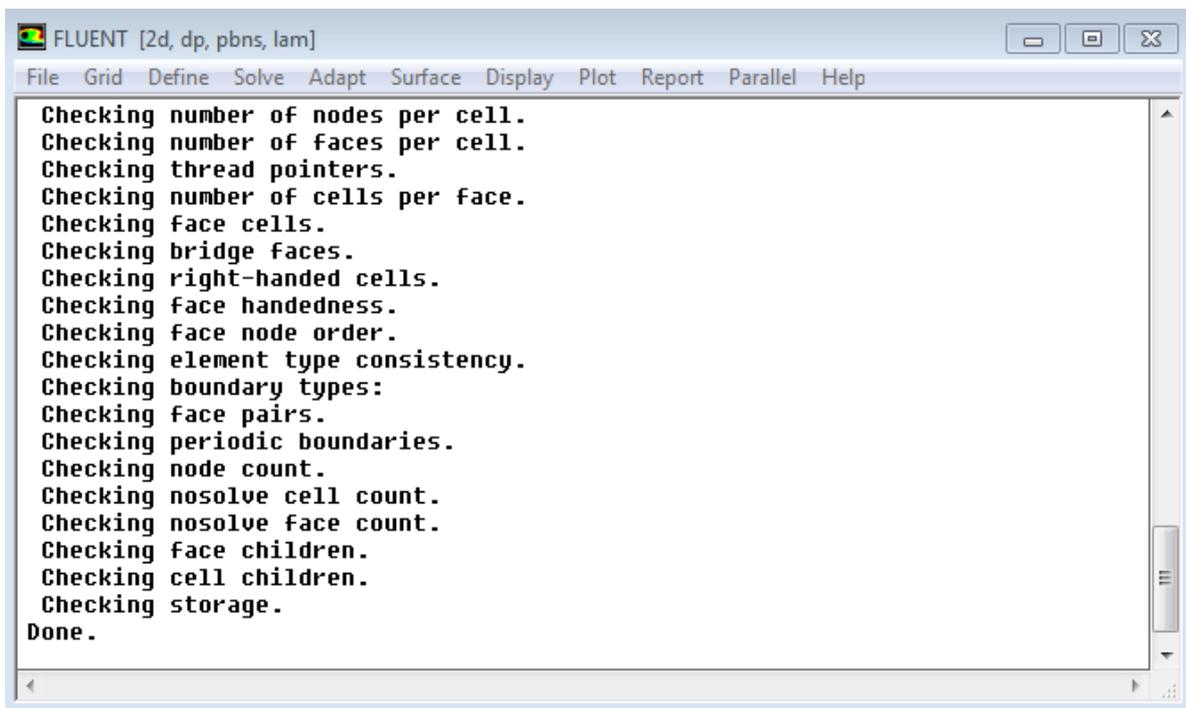
Pour commencer la simulation il faut importer le fichier (*.msh) généré sous Gambit.

File → **Read** → **Case...**



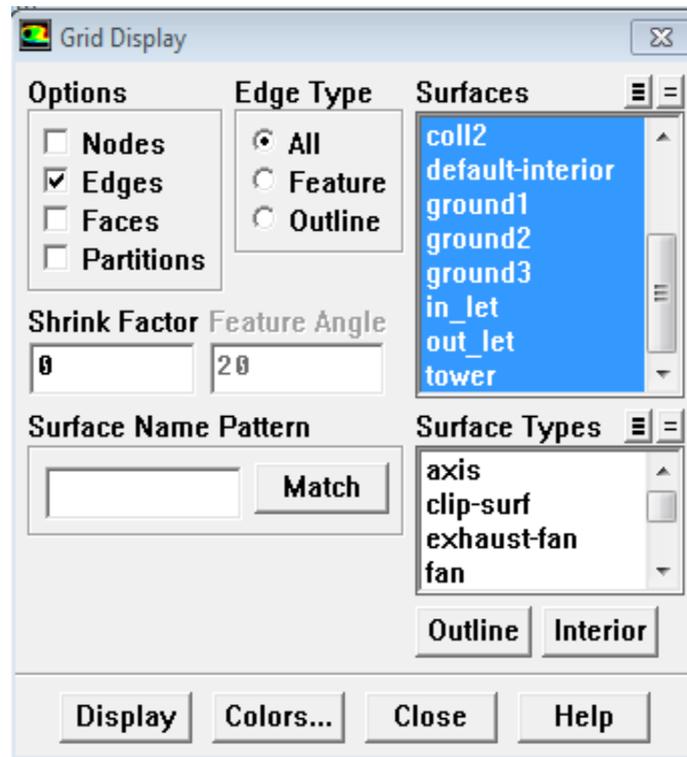
III .4.2.2.2. Vérification du maillage importé

Grid → **Check**



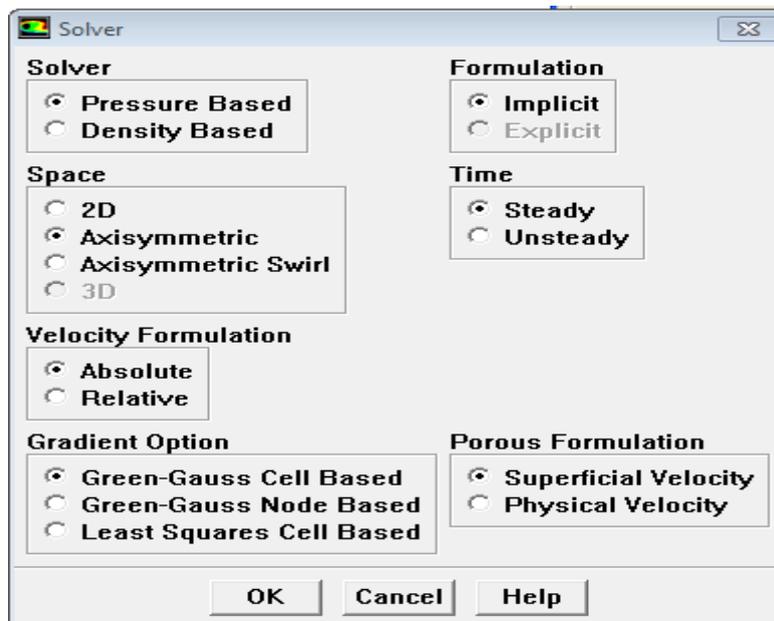
III .4.2.2.3. Affichage de la grille

Display → Grid



III .4.2.2.4. Choix du solveur

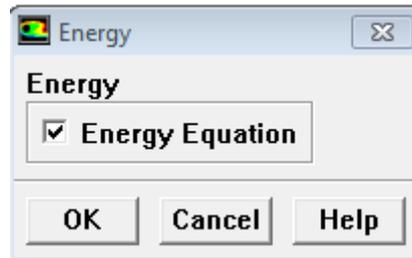
Define → Models → Solver



III .4.2.2.5. choix du modèle de turbulence

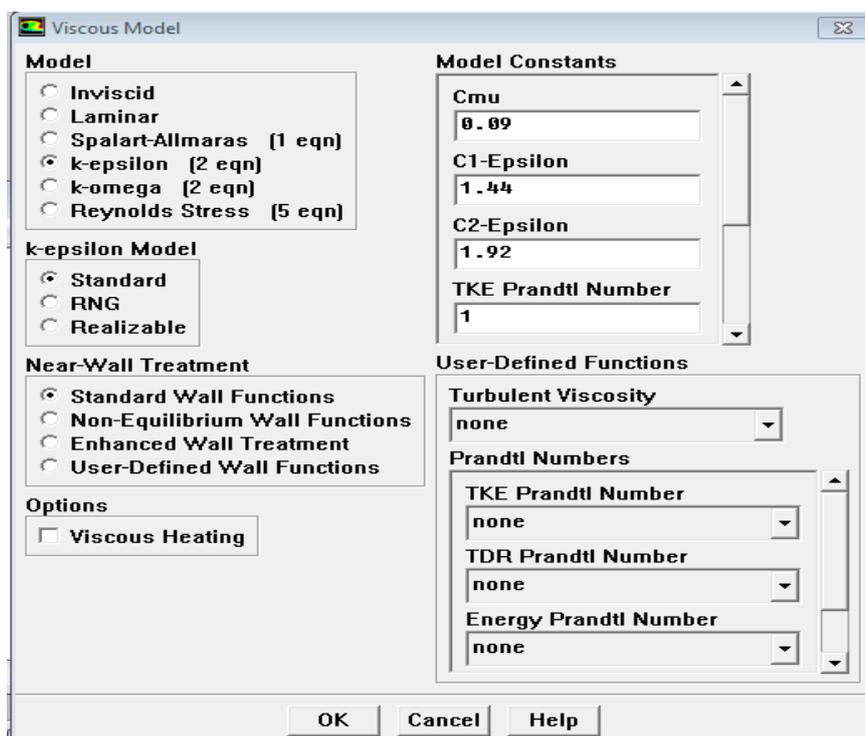
Define → Models → Energy

On introduit d'abord l'équation d'énergie dans le système des équations à résoudre.



Define → Models → Viscous

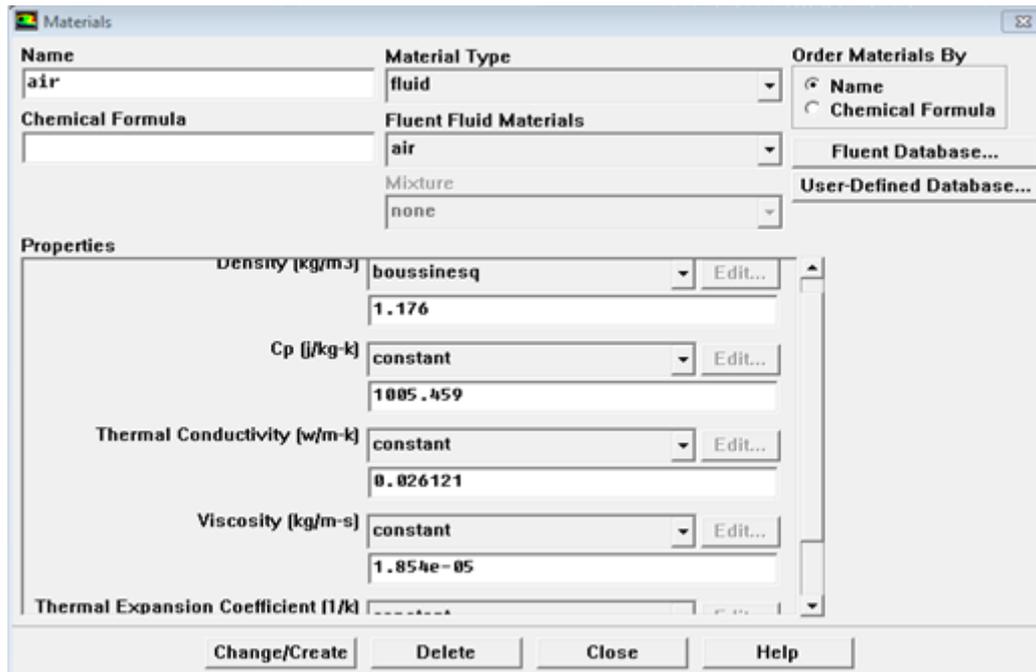
Cette étape va nous permettre de choisir le type du modèle de turbulence, pour résoudre le problème considéré, avec un affichage des différents constants.



III .4.2.2.6. Définition des caractéristiques des matériaux

Define → Materials

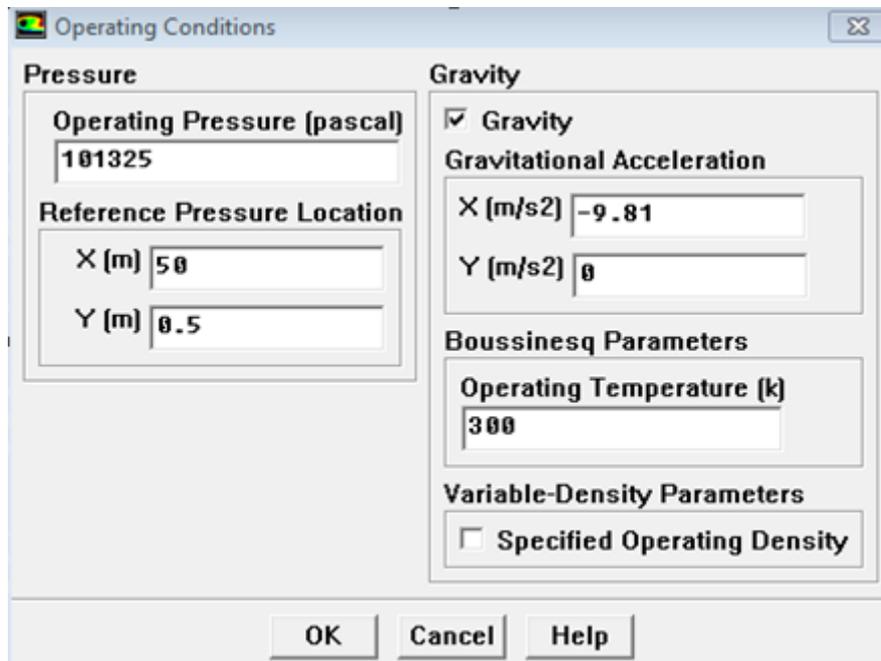
Cette tâche va nous permettre de choisir les propriétés du fluide utilisé.



III .4.2.2.7. Conditions d’opération

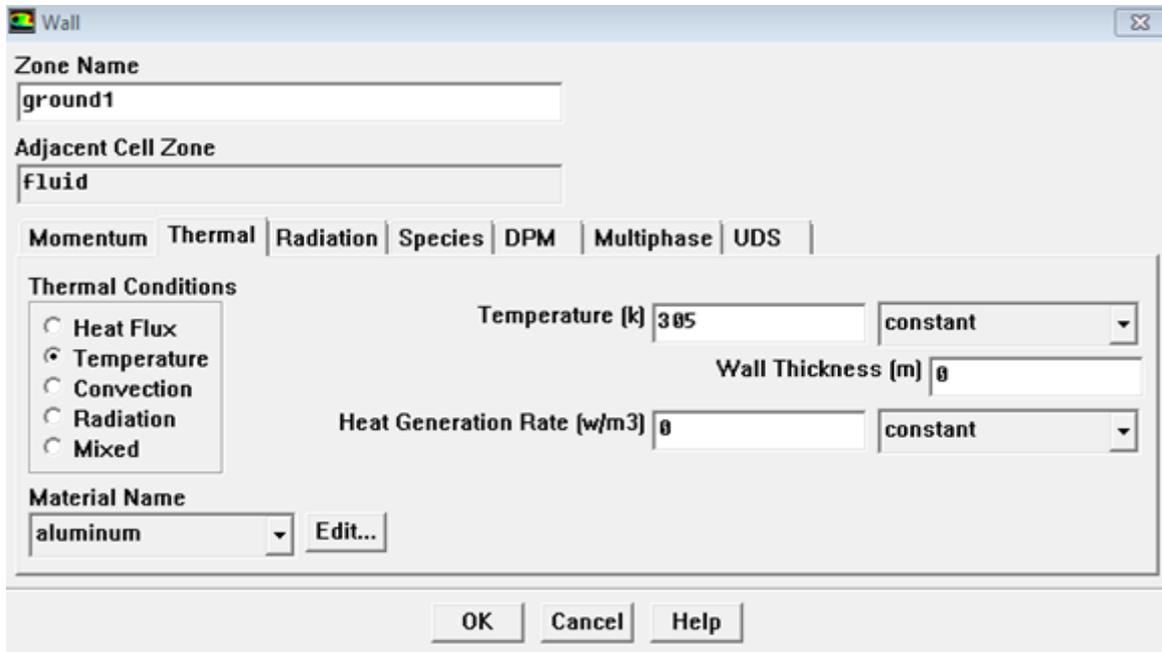
Define → Operating conditions

Il s’agit là de déterminer les conditions initiales



III .4.2.2.8. Conditions aux limites

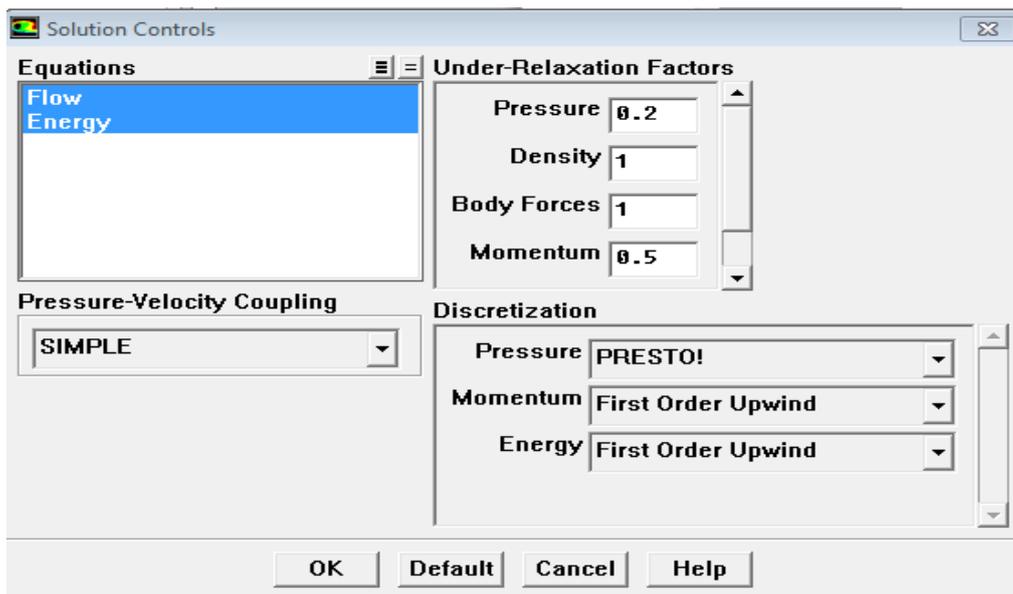
Define → Boundary Conditions



III .4.2.2.9. Choix de solution

Solve → controls → solution

Il s'agit là de définir l'algorithme de résolution du système des équations, ainsi que les coefficients de sous-relaxation ou de sur-relaxation qu'il faut admettre pour chaque équation pour faire accélérer la convergence.



III .4.2.2.10. Choix de la méthode de couplage Pression-Vitesse

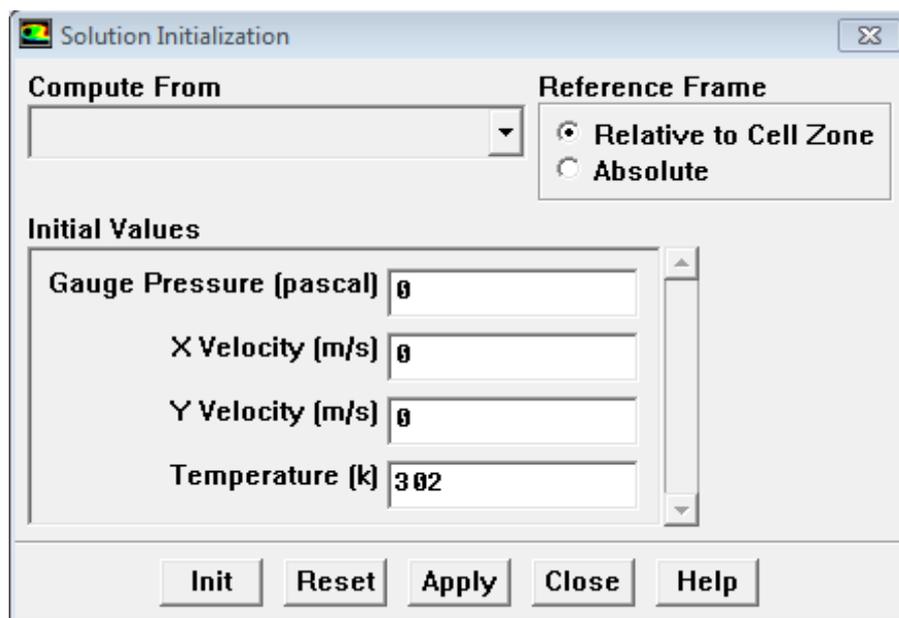
Trois algorithmes sont disponibles dans le logiciel de calcul [49] :

- SIMPLE : le plus robuste.
- SIMPLEC : il donne une convergence plus rapide pour les problèmes simples.
- PISO : il est utile pour des problèmes des écoulements instables.

L'algorithme choisit dans notre étude est l'algorithme SIMPLE.

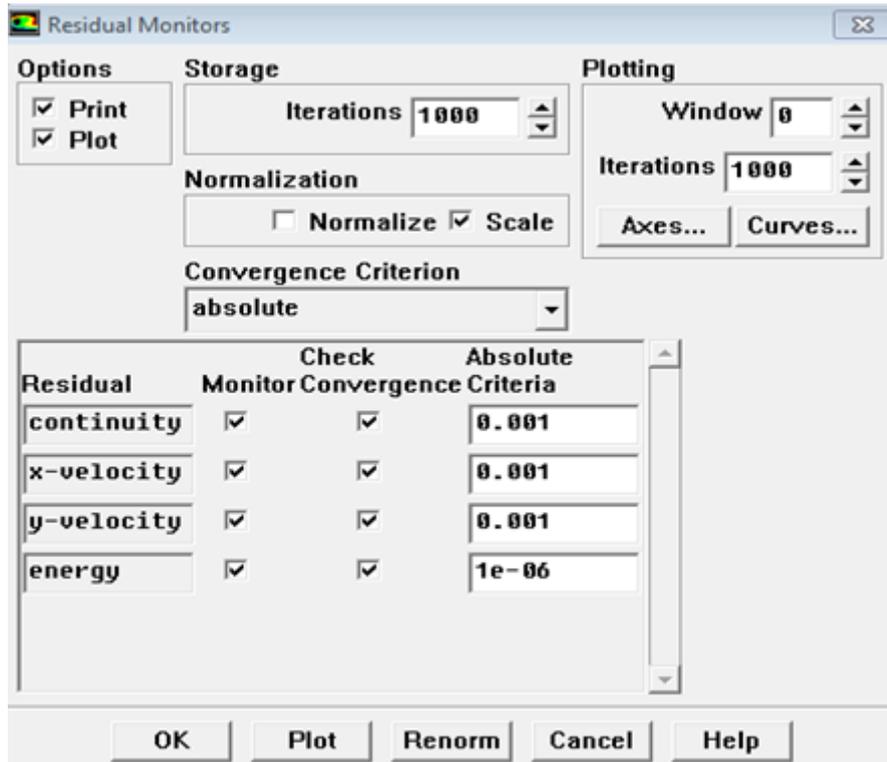
A l'initialisation du calcul, un champ de pression fixé a priori est introduit dans l'équation de bilan de la quantité de mouvement, permettant de calculer un premier champ de vitesse. La combinaison des équations de bilan de masse et de quantité de mouvement permet ensuite de corriger ces premiers champs de pression et de vitesse. Les autres équations de transports sont ensuite résolues et le champ de pression corrigé est utilisé pour initialiser le calcul à l'itération suivante. Cette succession d'opération est répétée jusqu'à ce que les critères de convergences soient atteints.

Solve → Initialize → Initialize



Solve → Monitors → Residual

Dans cette étape, on fixe les erreurs absolues pour chaque variable et on mentionne le nombre des itérations, avec la possibilité d'affichage simultané de l'évolution des erreurs ou de l'imprimer à la fin des itérations.



III.6.2. Critère de convergence

La résolution numérique des problèmes de type CFD nécessite un processus itératif. Pour apprécier la convergence du processus itératif, des critères de convergence doivent être pris en compte. Ainsi, la convergence du processus itératif est déterminée par le concept de résidu.

Après l'étape de discrétisation, l'équation de conservation d'une variable Φ donnée sur une cellule de centre P peut s'exprimer comme suit :

$$a_p \cdot \Phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \Phi_{nb} + b \dots \dots \dots (III.7)$$

Où : a_p et a_{nb} représentent les contributions convectives et diffusives, l'indice nb est lié aux centre de cellules adjacentes. b représente la contribution de partie constante du terme source $\Phi \phi$.

Le résidu normalisé a alors pour expression :

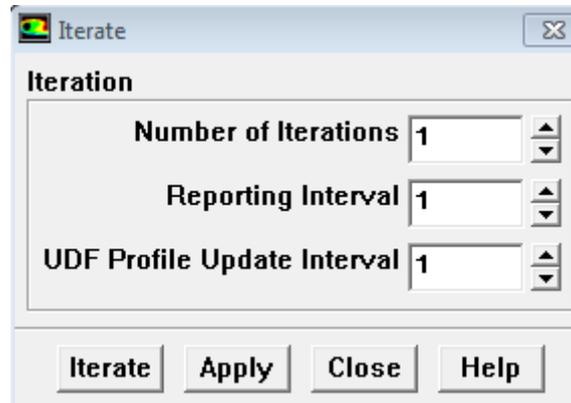
$$R\phi = \frac{\sum_{Domaine} |\sum_{nb} a_{nb} \cdot \Phi_{nb} + b - a_p \cdot \Phi_p|}{\sum_{Domaine} |a_p \cdot \Phi_p|} \dots \dots \dots (III.8)$$

Ces expressions des résidus sont valables pour toutes les grandeurs sauf la pression, dans le cas de cette grandeur, le résidu est déterminé à partir de l'équation de continuité :

$$R^c = \sum_{Domaine} |taux\ de\ création\ de\ matière\ dans\ le\ domaine| \dots \dots \dots (III.9)$$

Solve → Iterate

On cliquant sur iterate , on commence les itérations, toute en respectant la séquence d'affichage .

**Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons parlé de la modélisation de l'écoulement turbulent dans une cheminée solaire en utilisant le code de calcul Fluent. Les équations régissant le phénomène physique sont les équations de Navier-stokes moyennées avec le modèle de turbulence k- ϵ . Avant de passer à la résolution itérative des systèmes des équations, il faut générer la configuration à étudier et son maillage par le logiciel Gambit. Pour valider notre modèle, les dimensions du prototype de Maia [34] ont été adoptées. Pour que les résultats soit comparables, il faut que les conditions aux limites soit les mêmes.

Chapitre IV

Résultats et Discussion

IV .1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les résultats des simulations numériques établies par le code de calcul Fluent pour résoudre des équations différentielles aux dérivées partielles non linéaires avec les conditions aux limites associées qui ne peuvent pas être résolues analytiquement. L'effet de la variation du rayon du collecteur et du rayon de la cheminée sur le comportement du fluide à l'intérieur de la cheminée est aussi étudié.

IV .2. Description du problème

La cheminée solaire étudiée consiste en une cavité bidimensionnelle ouverte (voir Figure.IV.1)

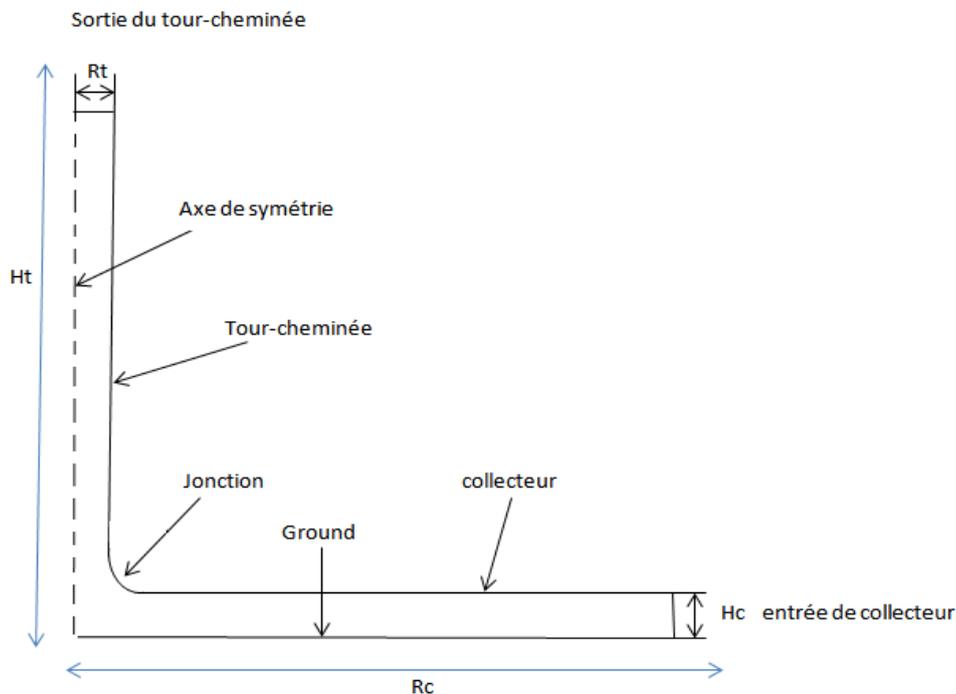


Figure IV.1 : Schéma de la configuration géométrique

La géométrie considérée dans cette étude est constituée d'une tour-cheminée ayant une hauteur $H_t=12.3$ m et un rayon R_t variable (entre 0.2 m à 0.6 m), aussi un collecteur qui a une hauteur de toit $H_c=0.5$ m et un rayon R_c variable (entre 17.5 m à 20 m). Le tableau (IV.1) récapitule les dimensions des différentes géométries considérées dans cette étude.

Tableau (IV.1) : Dimension des géométries étudiées

	Rc (m)	Hc (m)	Rt (m)	Ht (m)
Cas 1	7.5- 10.5- 12.5-14.5 –20	0.5	0.5	12.3
Cas 2	12.5	0.5	0.2- 0.3- 0.4-0.5- 0.6	12.3
Cas 3	12.5	0.5	0.5	7.5 – 10 – 14.5 -20

IV .3. Les conditions aux limites

Chaque problème est caractérisé par ses conditions .Nous présentons dans le tableau (IV.2) le domaine de calcul ainsi que les conditions aux limites imposées. A la sortie de la tour-cheminée le régime d’écoulement est supposé en régime établi. Le dispositif est supposé axisymétrique. Les parois sont imperméables et la condition de non glissement est adoptée. Ces conditions sont appliquées au collecteur, à la jonction, aux parois de la tour et à la surface du sol.

Tableau (IV.2) : Condition aux limites

Parois (limite)	Condition aux limites
Entrée de collecteur	$y = R_c , 0 \leq x \leq H_c , u = u , v = 0 , T = T_0$
Sortie de la tour	$x = H_t , 0 \leq y \leq R_t , \frac{du}{dx} = \frac{dv}{dx} = 0 , \frac{dT}{dx} = 0$
Paroi de la tour	$y = R_t , H_c - h \leq x \leq H_t , u = v = 0$ $, q = -\lambda \frac{\delta T}{\delta Y}$
Axe de symétrie	$y = 0 , H_t - h \leq x \leq H_t , \frac{du}{dy} = \frac{dv}{dy} = 0 , \frac{dT}{dy} = 0$
Toit de collecteur	$x = H_c , R_c - r \leq x \leq R_c , u = v = 0$ $, T = T_{coll}$
Paroi du sol	$x = 0 , R_c - r \leq y \leq R_c , u = v = 0 , T = T_{sol}$

Sur GAMBIT, ces conditions aux limites se présentent comme indiquer dans le tableau (IV.3) ci-dessous

Tableau (IV.3) : Les types de conditions aux limites utilisées sur GAMBIT

Nom	Type de condition
Axe	Axis
Tour	Wall
Jonction	Wall
collecteur	Wall
Sol	Wall
Entrée	Pressure-inlet
Sortie	Pressure-outlet

IV .4. Les propriétés physiques de fluide

Dans cette étude, le fluide en écoulement est l'air. Le tableau (IV.4) résume les propriétés physiques de l'air à une température de travail de 300 K.

Tableau (IV.4) : Propriétés physique de l'air à 300 K

Densité (Boussinesq) $\rho(\frac{Kg}{m^3})$	1.17663
Chaleur massique $c_p(j/Kg.k)$	1005.459
Conductivité thermique $\lambda (w/m.k)$	0.02625121
Viscosité dynamique $\mu (kg/ms.)$	$1.84e^{-05}$
Coefficient de dilatation thermique $\beta(\frac{1}{K})$	0.0033333

IV.5. L'effet du maillage

Dans une analyse préliminaire pour déterminer le maillage optimum, nous avons effectué un test de maillage sur une configuration de base semblable à celle de Maia et al [34]. Le nombre des nœuds a été varié comme indiqué au tableau (IV.5). Le maillage est bidimensionnel, structuré et uniforme. Le tableau (IV.5) présente les différents maillages testés. Nous avons constaté que la différence relative entre le débit à l'entrée et à la sortie de la cheminée est de 0.044% entre un calcul effectué avec une grille de (64*800) et une autre de (80*1000).

Tableau (IV.5) : Erreur relative du débit massique à l'entrée du collecteur avec le nombre des nœuds

Taille de maillage	Débit massique à l'entrée (kg/s)	Nombres des nœuds	Erreur relative du débit massique de l'air entrant	Nombres d'itération
32 x 400	1.0588692	13233		880
48 x 600	1.0809678	29449	2.21 %	1373
64 x 800	1.0827984	52065	0.18 %	21811
80 x 1000	1.0823569	81081	0.044 %	3397

Le choix du maillage optimal est un compromis entre l'erreur la plus petite et une solution stable. Dans notre étude, nous avons opté pour une grille de 80 x 1000, vu que l'erreur relative du débit massique atteint un niveau que nous jugeons suffisant.

De la figure (IV.2), il paraît clairement que la variation du débit massique devient faible à partir d'un maillage de 80x1000, ce qui permet de constater que le maillage optimal correspond à cette valeur.

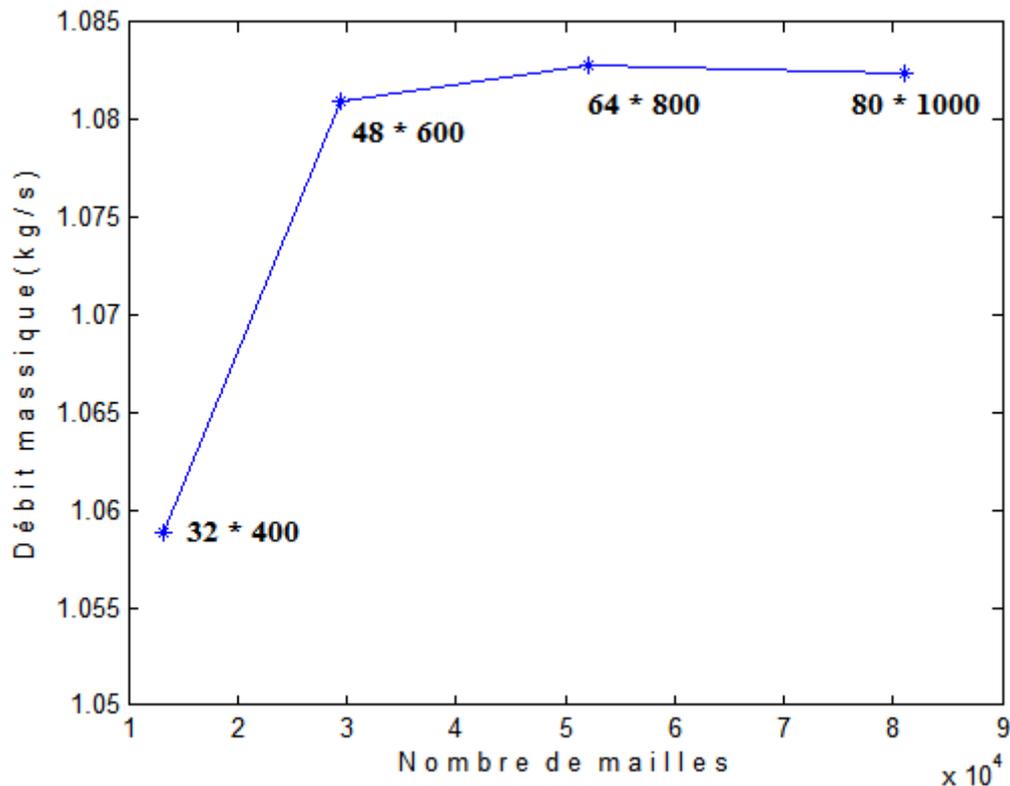


Figure IV.2 : Débit massique en fonction de nombre des mailles

La Figure(IV.3) illustre le maillage considéré au niveau du collecteur, la tour-cheminée et la jonction.

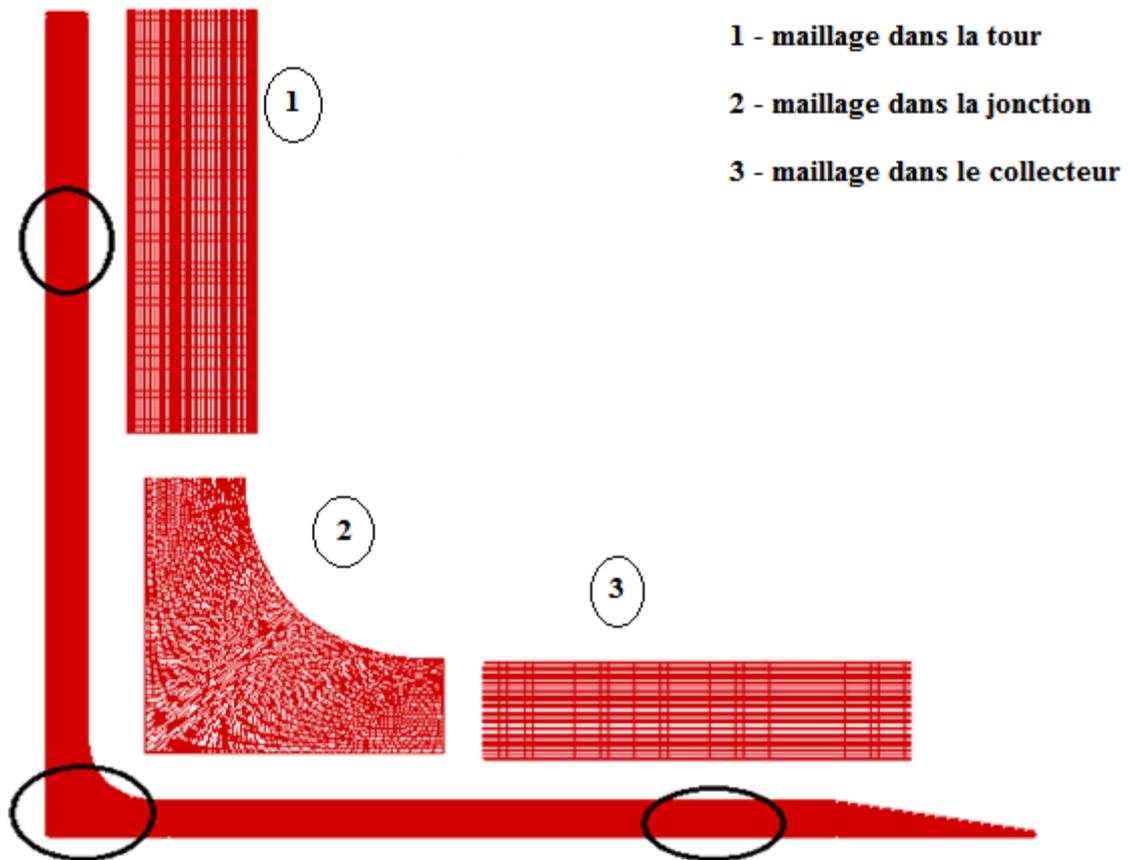


Figure IV.3 : Maillage de la configuration géométrique (80 x 1000 mailles)

IV.6. Validation et comparaison avec des résultats expérimentaux

Pour valider nos résultats numériques, nous avons réalisé une simulation numérique sur une géométrie semblable à celle de Maia et al [34]. Cette géométrie est constituée d'un tour de hauteur $H_t = 12.3$ m et de rayon $R_t = 0.5$ m, d'un collecteur de rayon $R_c = 12.5$ m et d'une hauteur $H_c = 0.5$ m et $H_e = 0.05$ m à l'entrée. On présente sur la figure (IV.4) le profil de vitesse dans une section de la tour à $x=11.7$ m pour pouvoir comparer nos résultats avec ceux de Maia et Al [34]

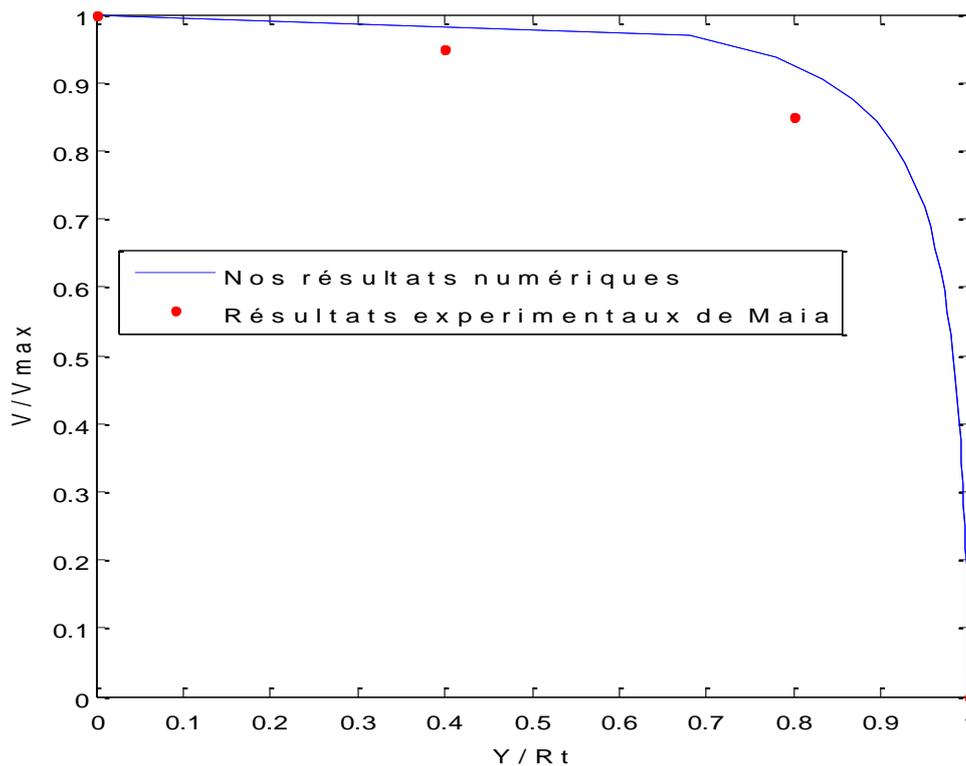


Figure IV.4 : Comparaison du profil de la vitesse dans une section transversale de la tour

IV.7. Résultats et discussion

Nous présentons les principaux résultats numériques du champ de vitesse et de la température sous forme graphiques avec une visualisation des contours de température, des vitesses et des lignes du courant.

L'analyse des résultats sera faite en premier temps pour une variation du rayon du collecteur $R_c = (7.5\text{m}, 10\text{m}, 12.5\text{m}, 14.5\text{m}, 20\text{m})$, dans ce cas les autres paramètres sont considérés constants ($H_t = 12.3\text{ m}$ et $H_c = R_t = 0.5\text{m}$).

Une variation du rayon de la tour R_t est considérée aussi. Le rayon de la tour prendra les valeurs suivantes : 0.2m, 0.3m, 0.4m, 0.5m et 0.6 toute en gardant les mêmes dimensions de R_c , H_c et H_t ($R_c = 12.5\text{ m}$, $H_c = 0.5$ et $H_t = 12.3\text{ m}$).

IV.7. 1. Influence du rayon du collecteur sur la structure de l'écoulement

Dans ce cas on fixe d'abord R_t , H_c , H_t et on fait varier le rayon R_c entre les valeurs (7.5m, 10.5m, 12.5m, 14.5m, 20m).

IV.7. 1.1. Sur le débit massique

L'évolution du débit massique de l'air en fonction du rayon du collecteur est présenté sur la figure(IV.5). On remarque, d'après cette courbe, que le débit massique s'accroît légèrement avec l'accroissement du rayon du collecteur. Cela peut s'expliquer par le fait que l'augmentation du

rayon du collecteur fait augmenter la quantité d'air soumise au gradient de température et par conséquent une augmentation des forces de flottabilité.

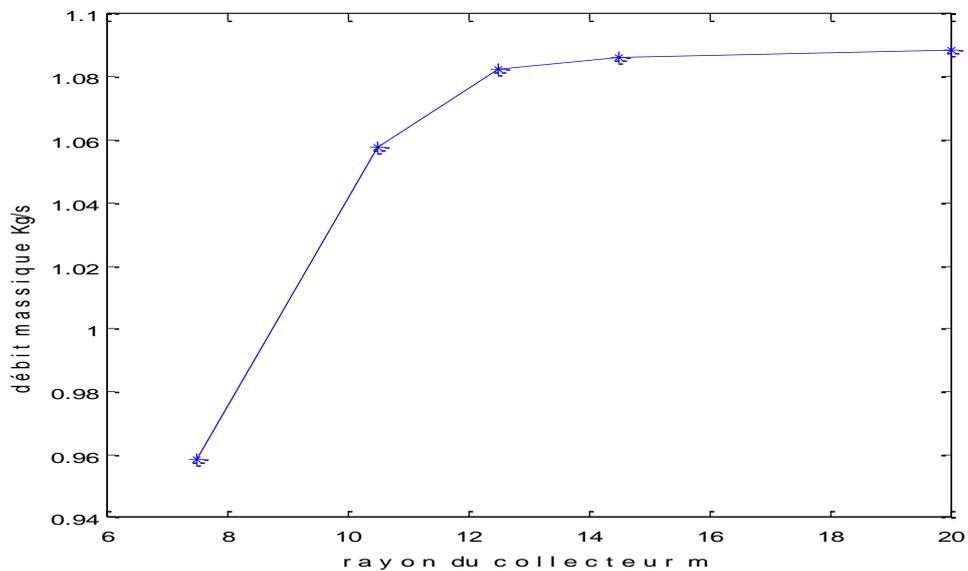
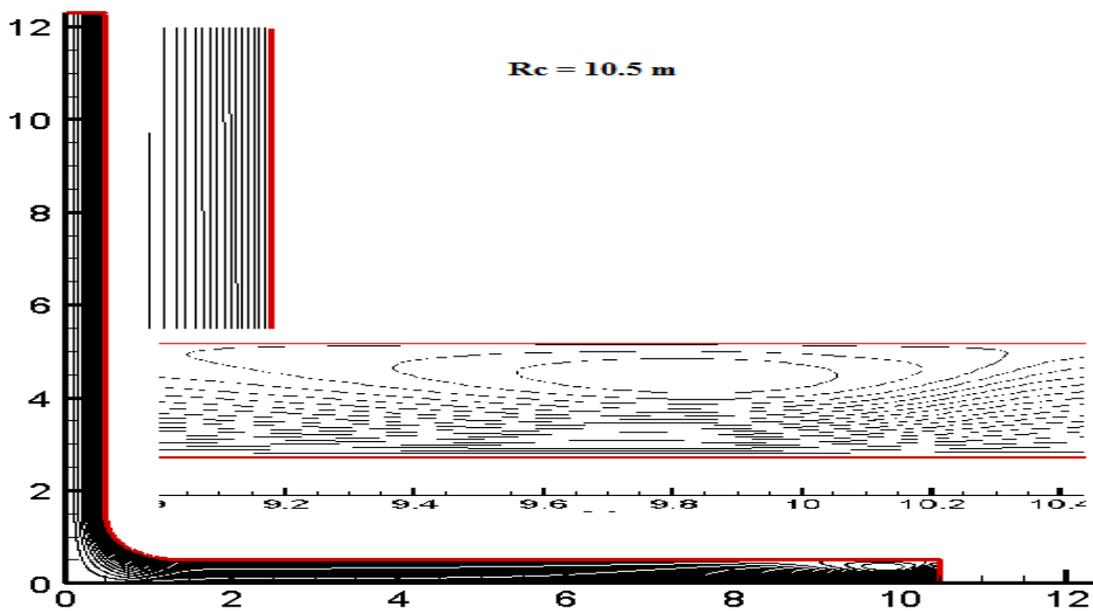


Figure IV.5 : Evolution du débit massique en fonction du rayon du collecteur

IV.7. 1.2. Sur la distribution des lignes du courant

Les lignes de courant pour différents valeurs du R_c , ont été présentées sur la figure (IV.6). On remarque qu'il y a naissance d'une zone de recirculation juste au niveau de l'entrée du collecteur. Elle est entourée par des iso-surfaces qui prennent des formes d'ellipse. On remarque que la taille de cette zone de recirculation augmente avec l'augmentation du rayon du collecteur, cela montre que l'effet de la flottabilité dû au gradient de température domine l'effet de convection, nous choisissons arbitrairement trois valeurs des valeurs étudiée.



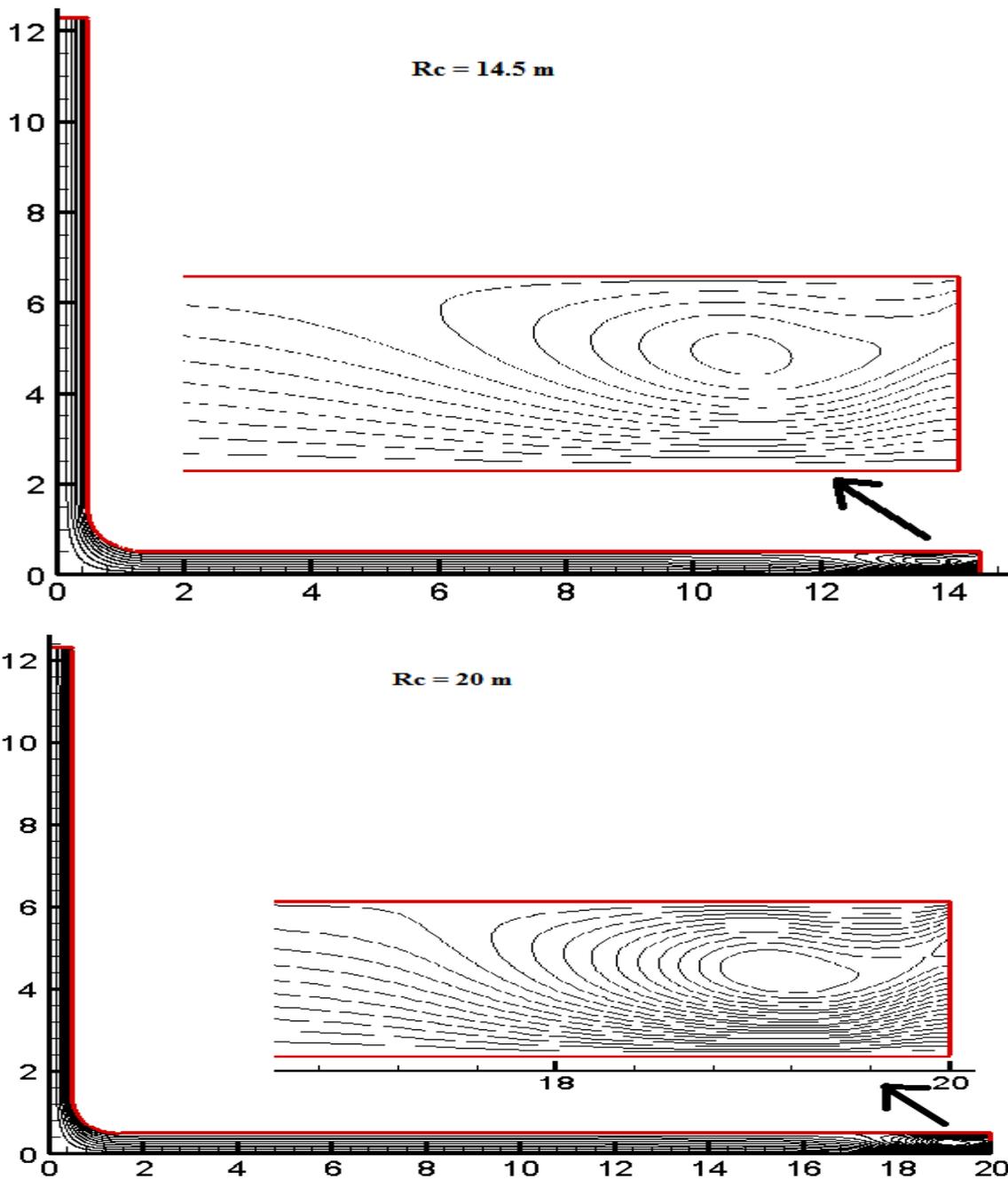
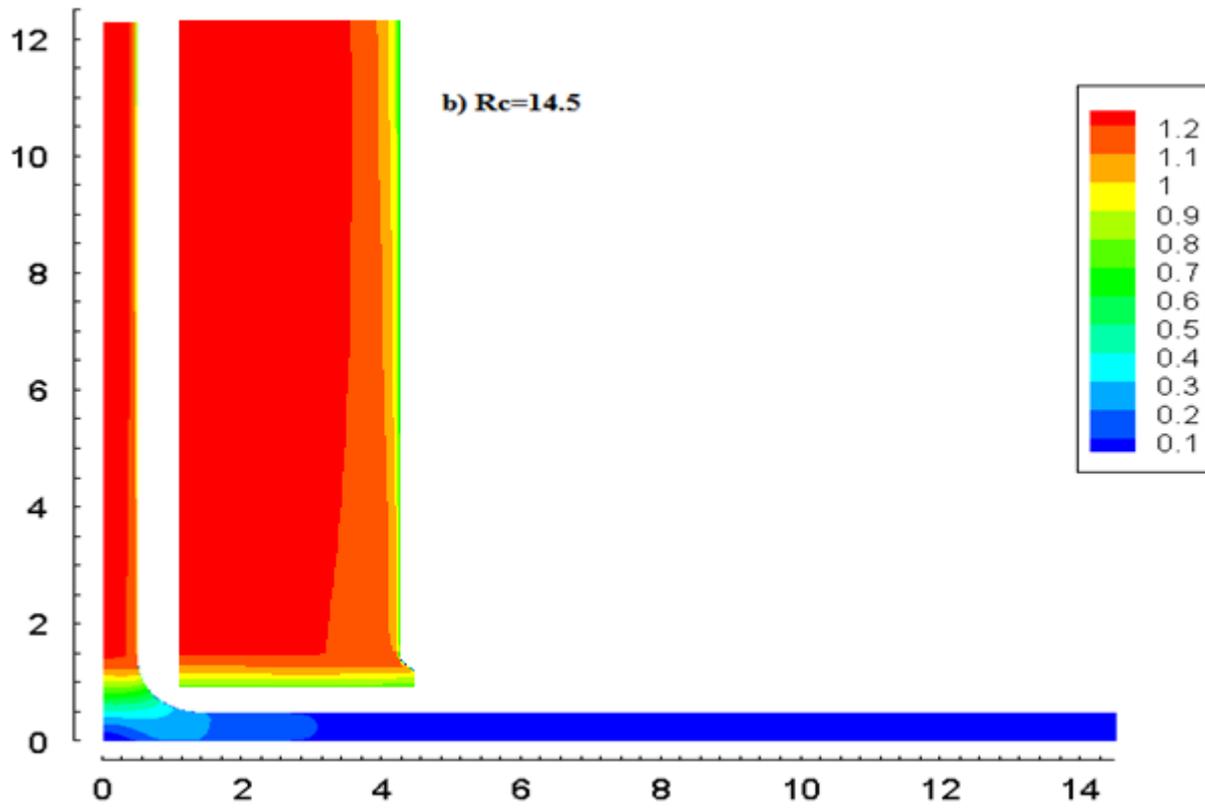
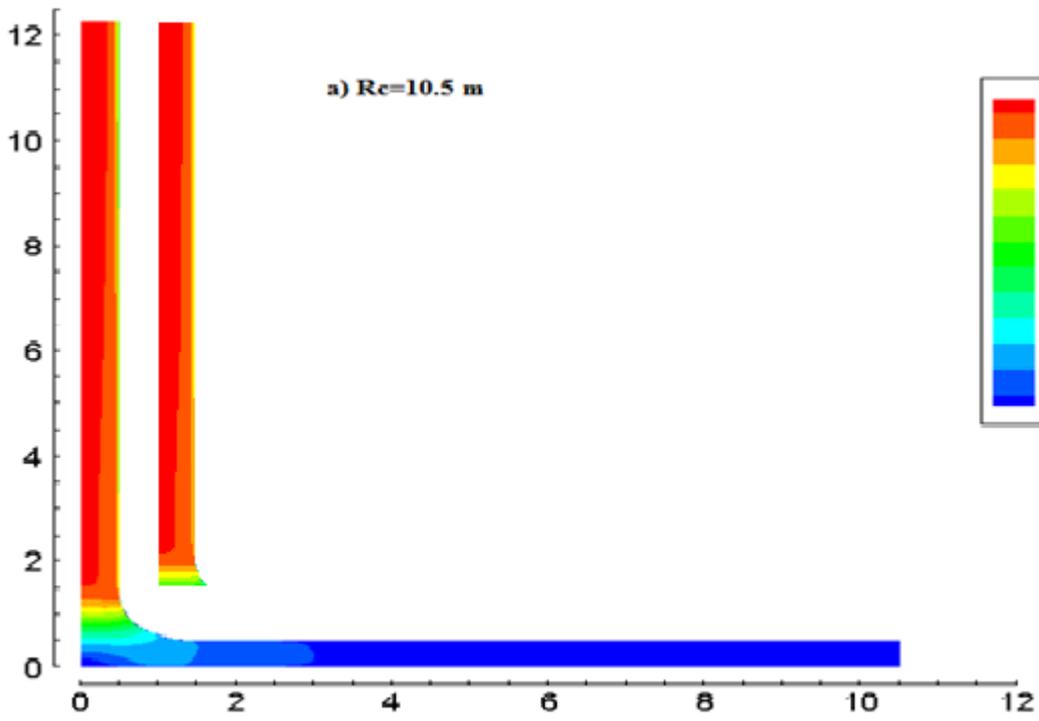


Figure IV.6 : La fonction du courant pour différentes valeurs du rayon du collecteur

IV.7. 1.3. Sur le champ de vitesse

La figure (IV.7) présente les distributions de vitesse pour différentes valeurs du rayon R_c . On remarque qu'en allant vers la jonction courbée la vitesse s'accélère constamment le long du collecteur pour atteindre son maximum dans la tour-cheminée, on remarque que la vitesse augmente avec l'augmentation du rayon du collecteur en raison des particules d'air chaud qui monte par l'effet de la force d'Archimède.



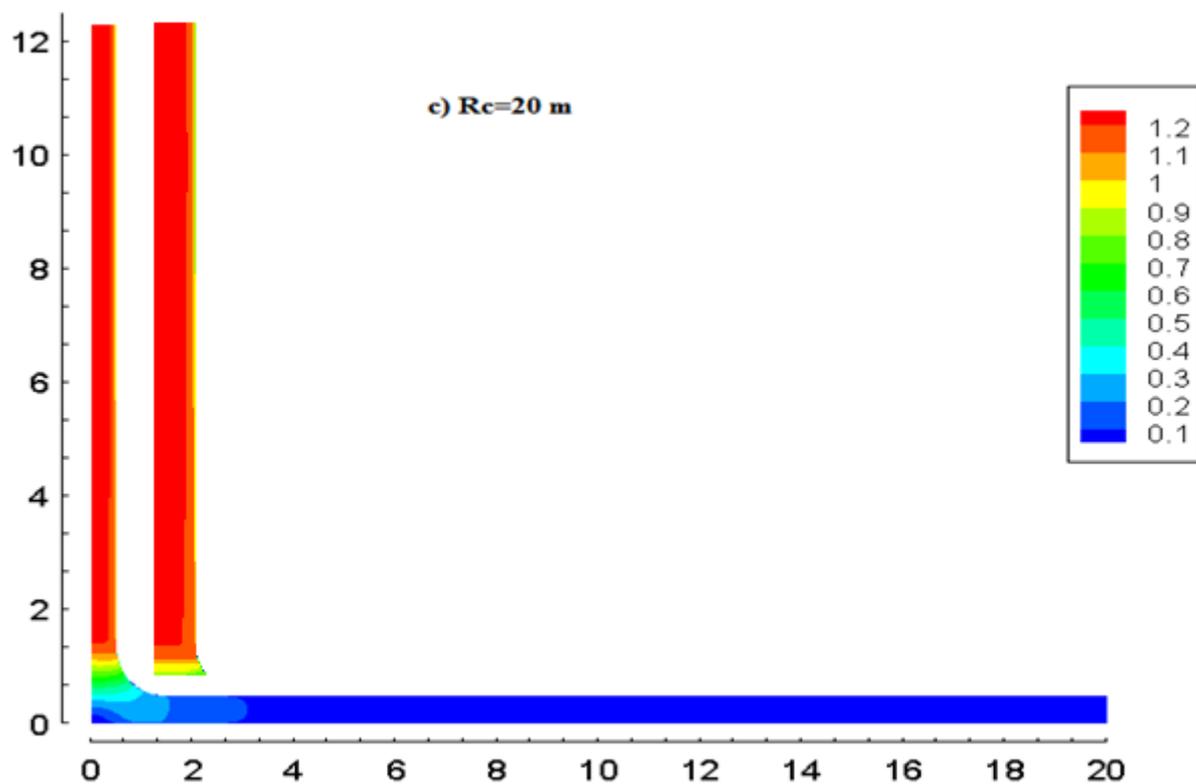
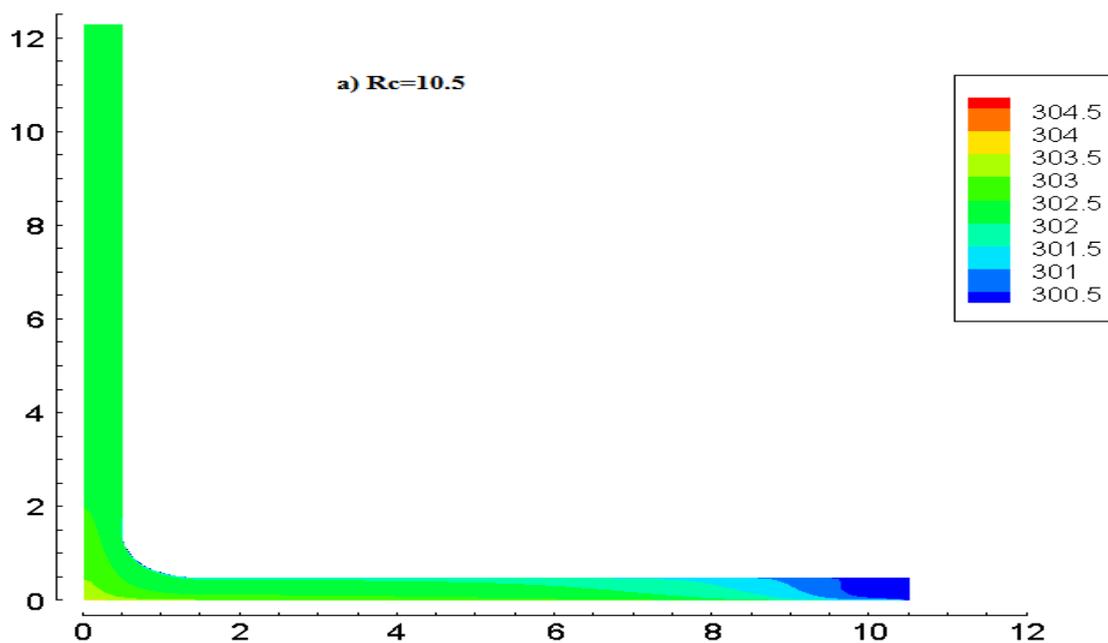


Figure IV.7: Distribution de la vitesse pour différentes valeurs du rapport du rayon du collecteur

IV.7. 1.4. Sur le champ de température

Le champ de la température pour différentes valeurs de R_c est présenté sur la figure (IV.8). On peut noter que les isothermes sont structurées. Aussi, on obtient au long du collecteur un profil de température élevé près du sol-absorbeur.



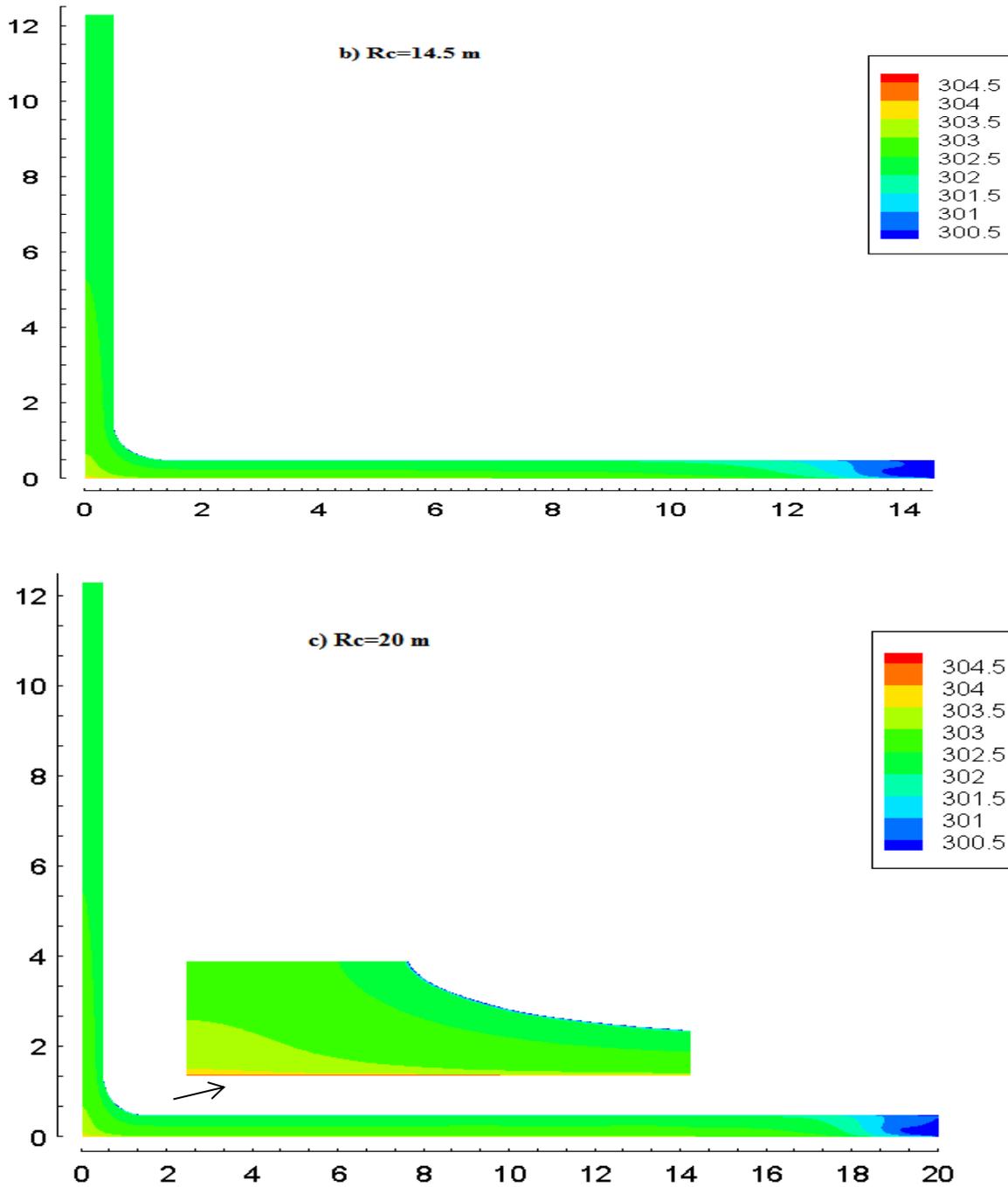


Figure IV.8 : Evolution de la température pour différentes valeurs du rayon du collecteur

La température diminue en s'éloignant du sol vers le toit du collecteur car on s'éloigne de l'absorbeur et qui prend une valeur uniforme jusqu'à atteindre la tour-cheminée qui prend sa valeur maximale aux parois de la tour et se diminue en approchant de l'axe. Ceci peut être expliqué par le phénomène d'échange thermique en convection naturelle entre l'air et le sol (absorbeur) dans le collecteur.

IV.7. 1.5. Influence du rayon du collecteur sur la température

La figure (IV.9) présente l'influence du rayon du collecteur R_c sur l'évolution de la température de l'air dans une section du collecteur ($r = 3$). On observe que la température augmente continuellement avec l'augmentation du rayon du collecteur.

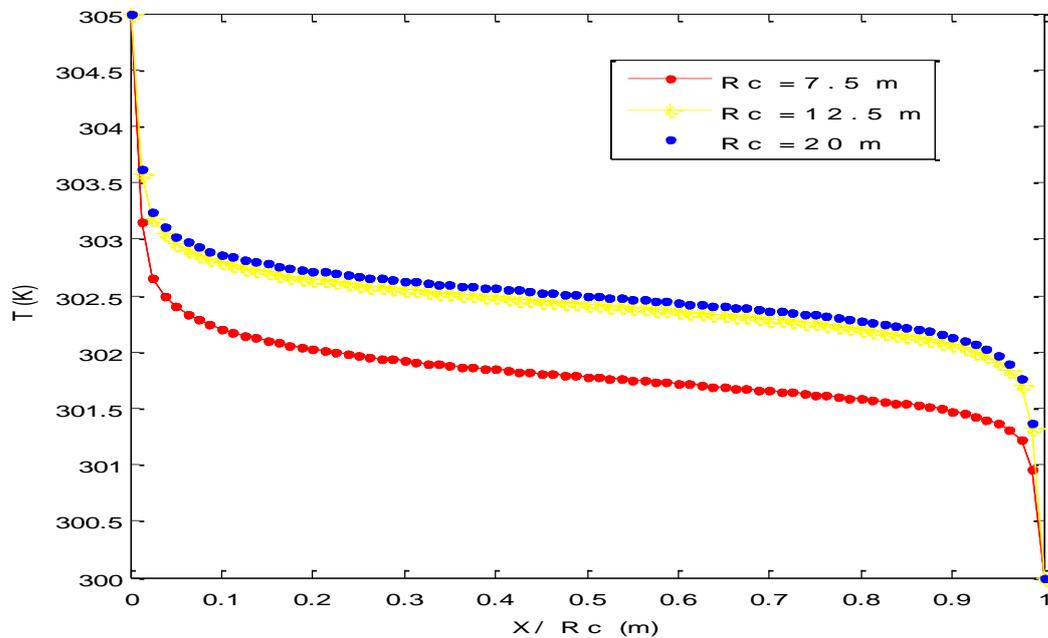


Figure IV.9 : Profils de température dans une section dans le collecteur pour différentes valeurs du rayon du collecteur

IV.7. 1.6. Influence du rayon du collecteur sur la vitesse

La figure (IV.10) présente l'influence du rayon du collecteur R_c sur l'évolution de la vitesse de l'air à l'intérieur du collecteur dans une section du collecteur ($r = 3$). On peut noter que la vitesse augmente continuellement avec l'augmentation du rayon du collecteur.

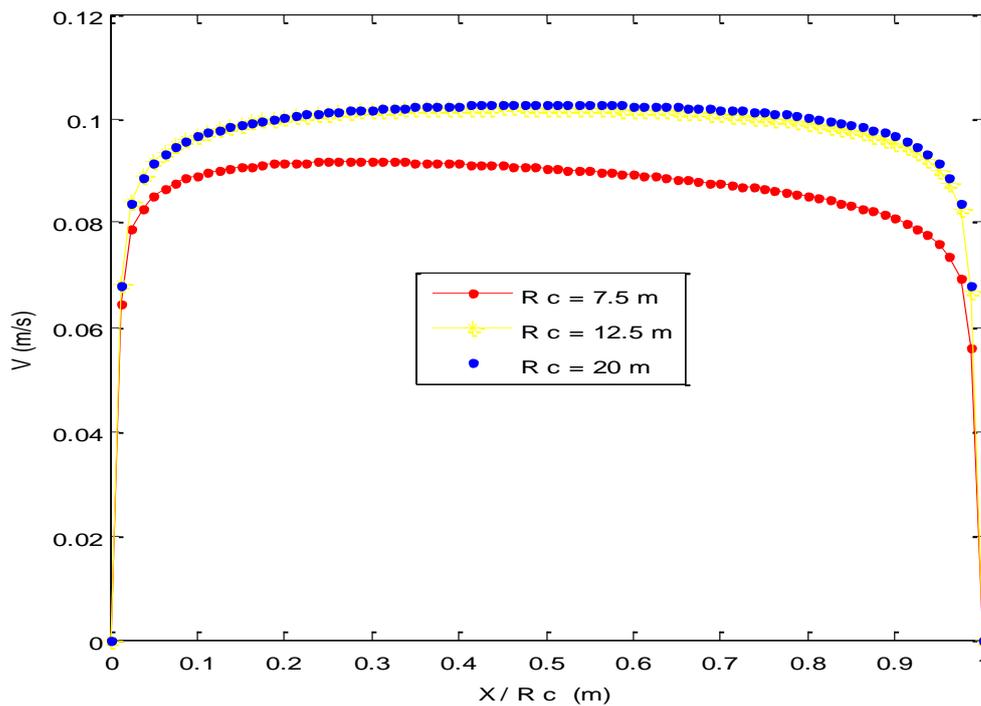


Figure VI.10 : Profils de vitesse dans une section dans le collecteur pour différentes valeurs du rayon du collecteur

IV.7. 2. Influence du rayon de la tour sur la structure de l'écoulement

Dans ce cas on fixe d'abord R_C , H_c , H_t et on fait varier le rayon de la tour R_c de (0.2m , 0.3m, 0.4m ,0.5m ,0.6m).

IV.7. 2.1. Sur le débit massique

L'évolution du débit massique de l'air en fonction de rayon de la tour est présentée sur la figure (IV.11). Cette courbe montre que le débit massique d'air produit par le système augmente continuellement avec l'augmentation du rayon de la tour.

Cela peut s'expliquer par le fait que les dimensions de la tour favorisent le système de circulation de fluide basé sur la dilatation-contraction.

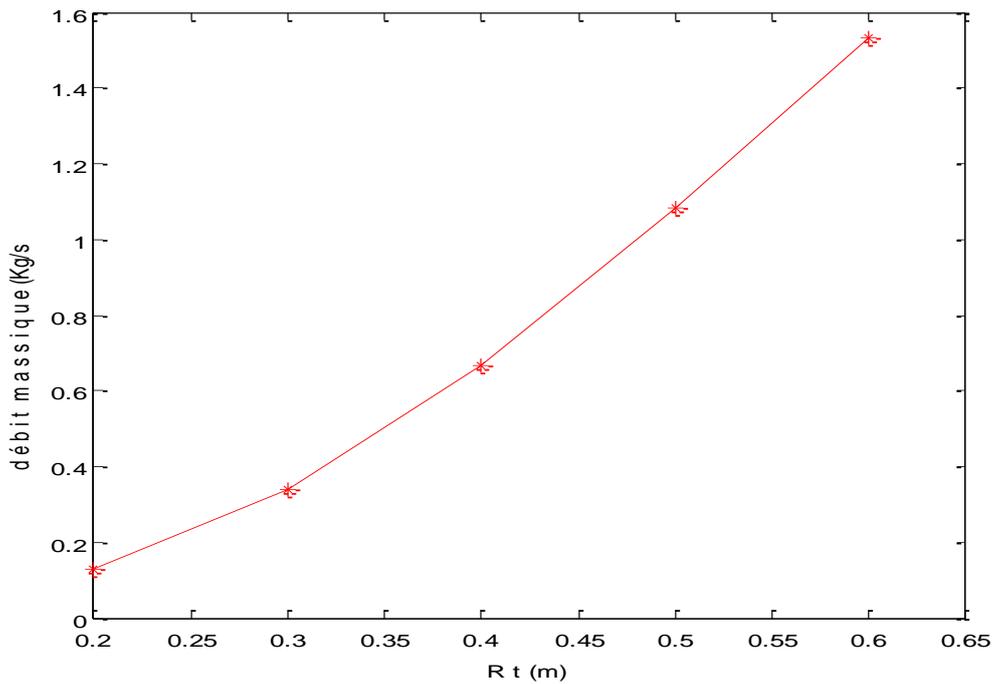
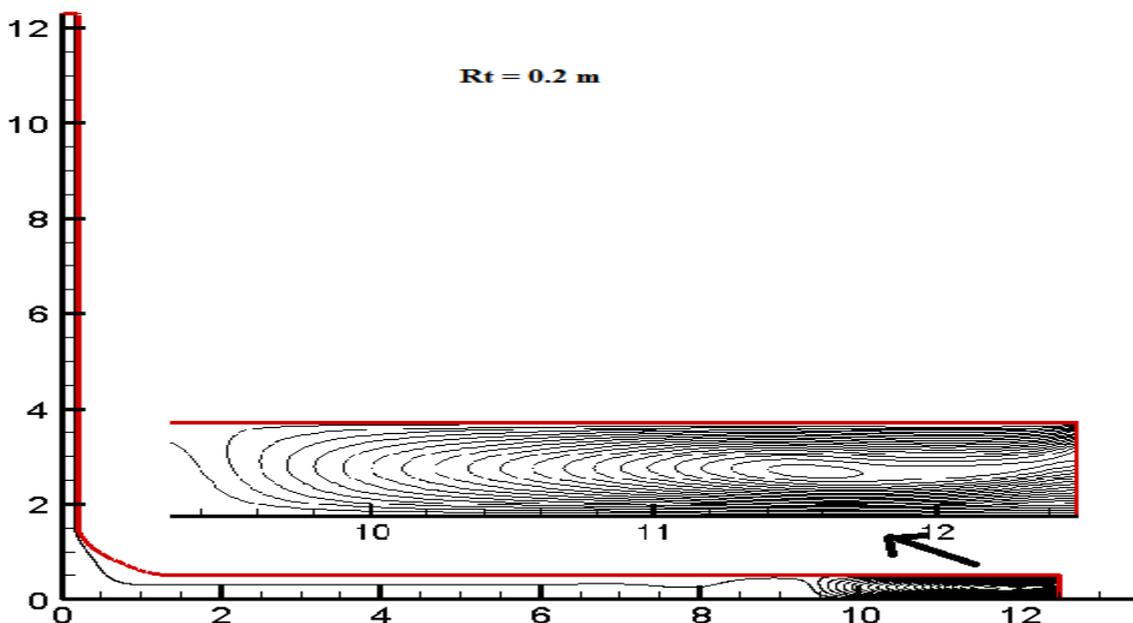


Figure IV.11 : Evolution du débit massique en fonction de rayon de la tour

IV.7. 2.2. Sur la distribution des lignes de courant

La figure (IV.12) présente les lignes de courant pour différentes valeurs de Rt (0.2m, 0.4m, 0.6m). On remarque que les valeurs de ligne augmentent avec l’augmentation du rayon de la tour comme on note l’existence d’une zone de recirculation formée uniquement à l’entrée du système. Au fur et à mesure que le rayon de la cheminée augmente, la zone de recirculation disparaît et la structure de l’écoulement devient relativement uniforme dans le collecteur.



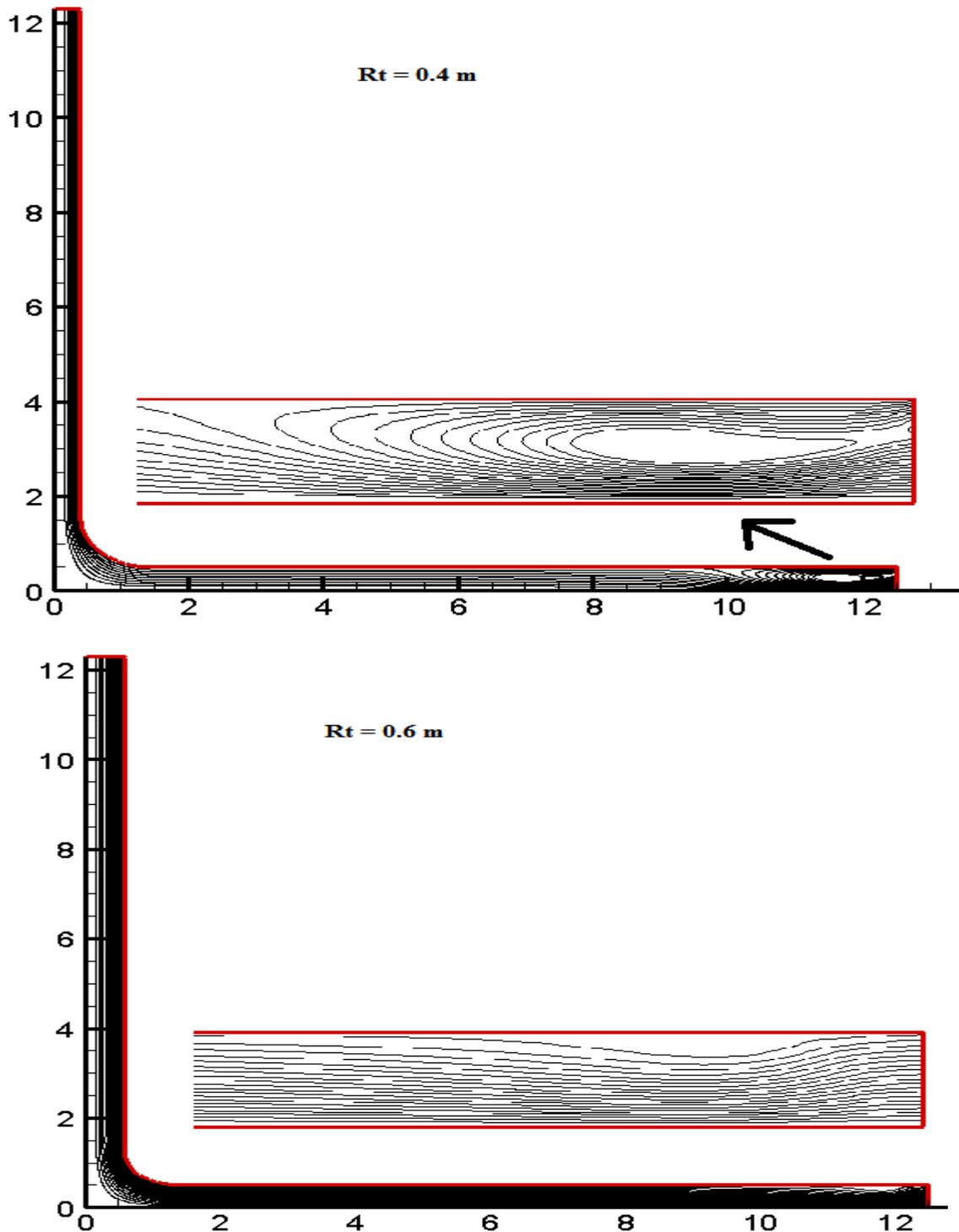
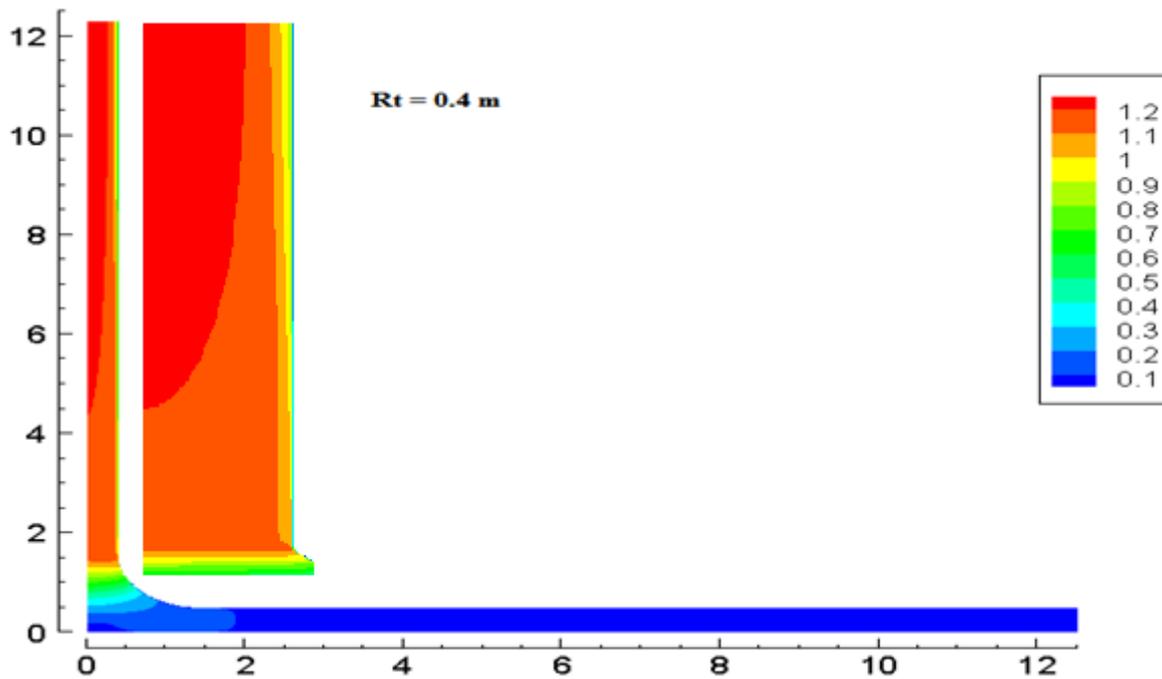
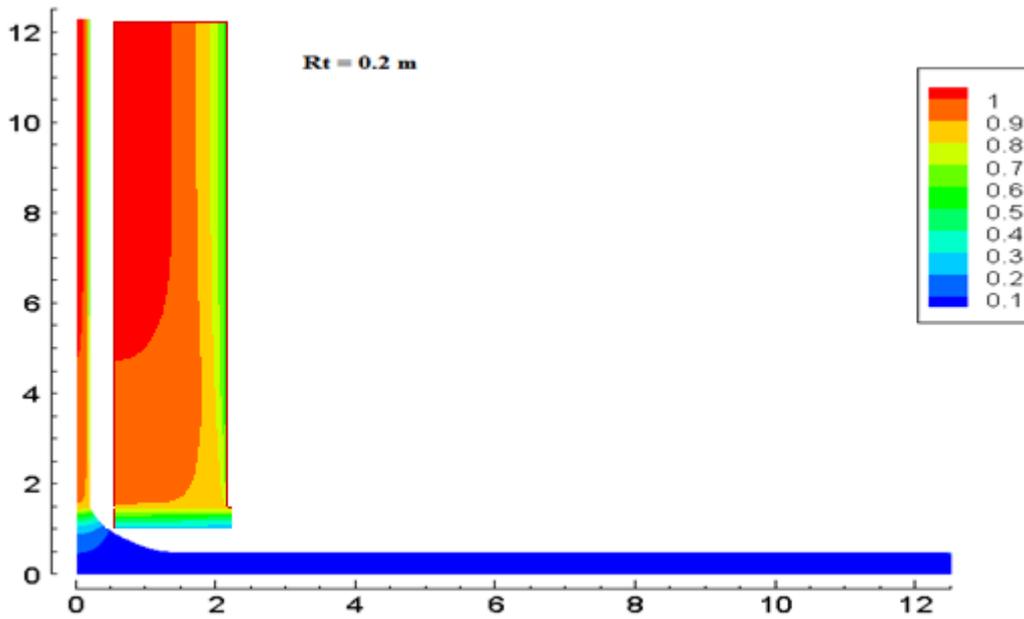


Fig.IV.12. Fonction du courant pour différentes valeurs du rayon de la tour

IV.7. 2.3. Sur le champ de vitesse

La figure (IV.13) présente les iso-vitesses pour différentes valeurs de Rt . On observe que l'air entre dans le collecteur à des vitesses très basses, ces vitesses augmentent au fur à mesure qu'on avance vers le centre du collecteur. L'air atteint une vitesse moyenne à la sortie du collecteur, on constate que les vitesses augmentent avec l'augmentation du rayon de la tour-cheminée et

atteignent leur maximum dans la tour en raison des particules d'air chaud qui monte par l'effet de la force d'Archimède.



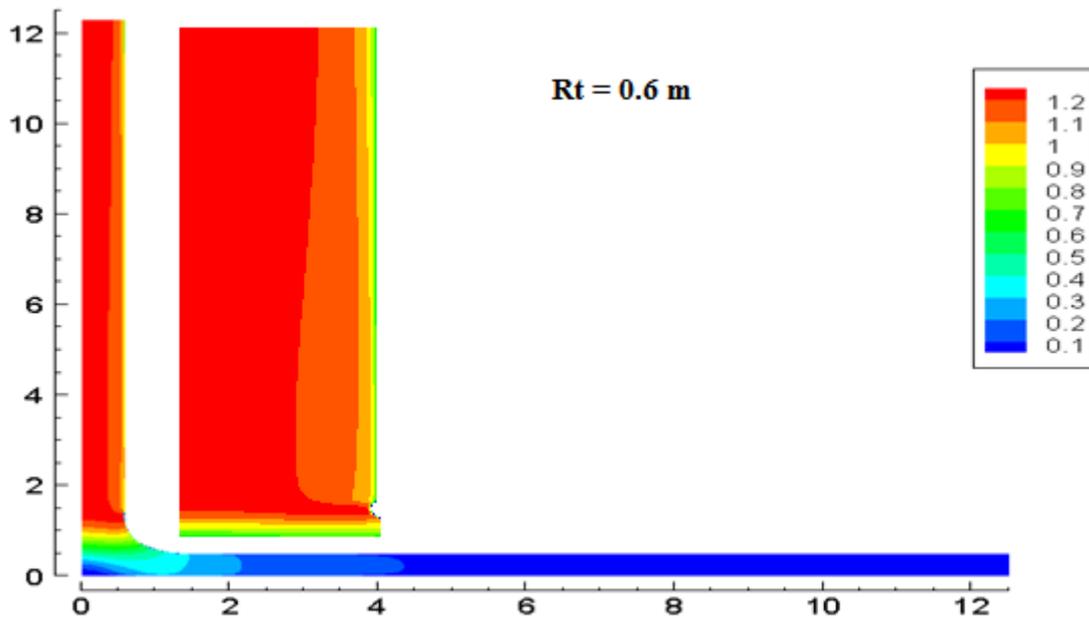
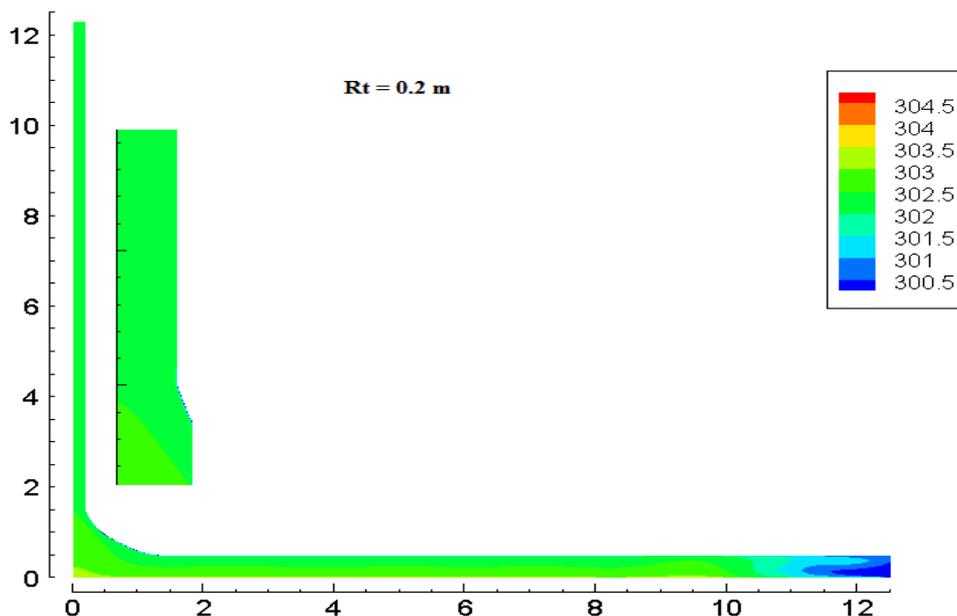


Figure IV.13 : Distribution de la vitesse pour différentes valeurs de rayon de la tour-cheminée

IV.7. 2.4. Sur le champ de température

La figure (IV.14) présente isothermes pour différentes valeurs de Rt . On observe que ces isothermes sont structurées et la distribution de la température est croissante de l'entrée vers la sortie du collecteur. Ceci peut être expliqué par le phénomène d'échange thermique en convection naturelle entre l'air et le sol (absorbeur) dans le collecteur. Aussi on remarque que l'augmentation du rayon de la tour-cheminée provoque une diminution de la température le long du collecteur par l'effet de l'élévation de la vitesse d'écoulement.



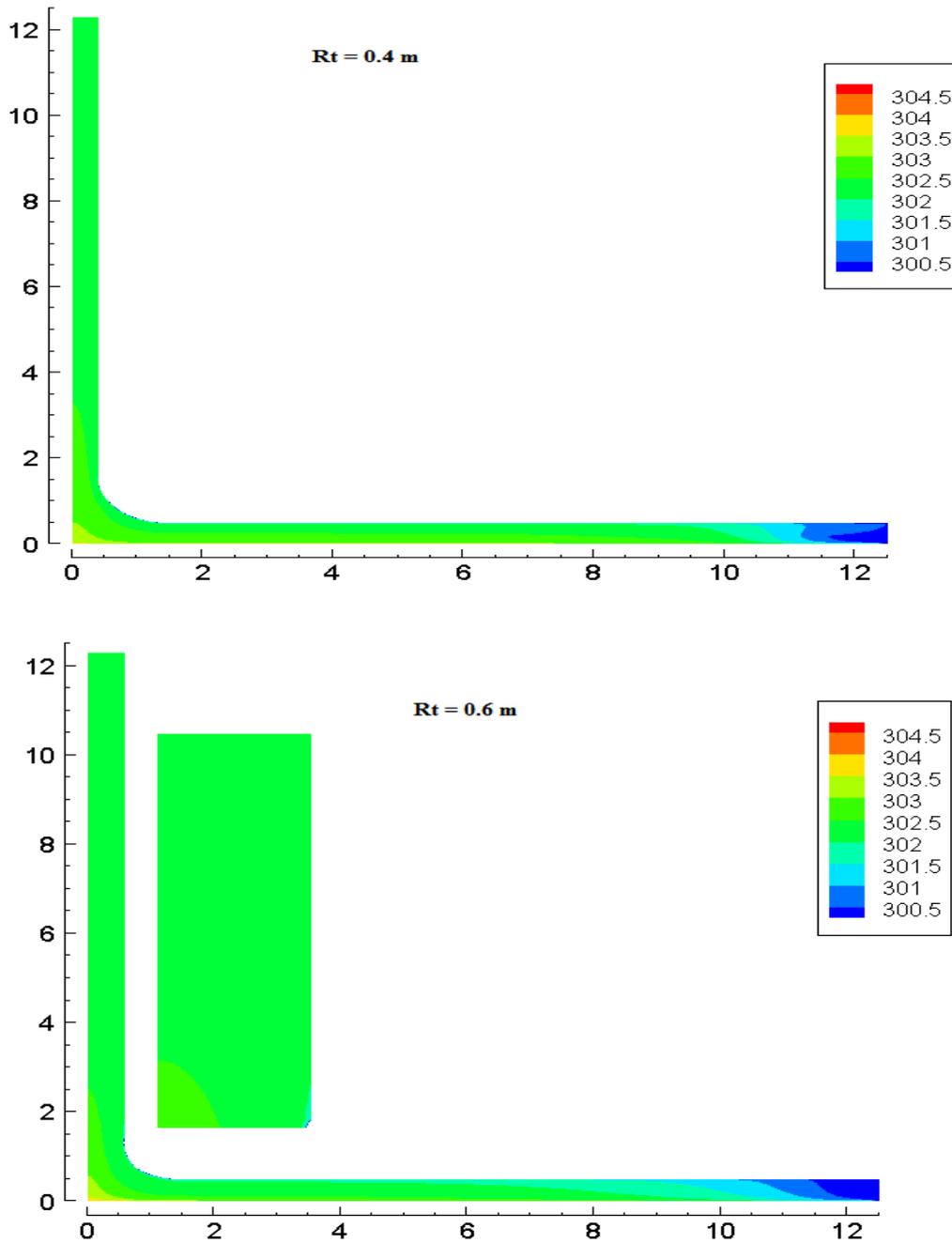


Figure IV.14 : Evolution des isothermes pour différentes valeurs du rayon de la tour

IV.7. 2.5. Influence du rayon de la tour-cheminée sur la vitesse

Le profil de la vitesse à $x = 6 \text{ m}$ pour différentes valeurs du rayon de la tour-cheminée est présenté sur la figure (IV.15). On constate qu'une augmentation dans le rayon de la tour engendre une augmentation de la vitesse moyenne dans la tour. Cet accroissement est le résultat de l'accroissement du débit massique de l'air.

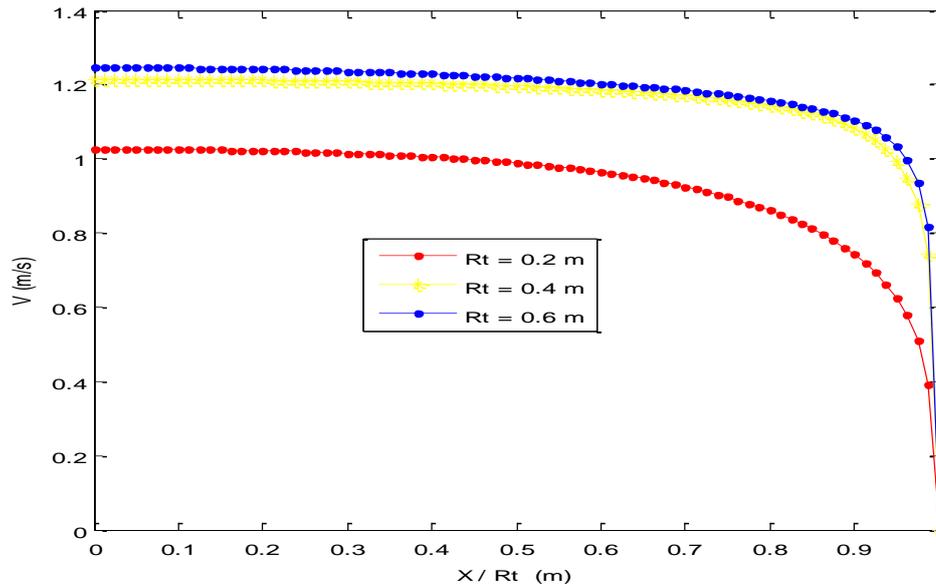


Figure VI.15 : Profils de vitesse à $x=6$ dans la tour-cheminée pour différents valeurs du rayon

IV.7. 3. Influence de la hauteur de la tour-cheminée sur la structure d'écoulement

Dans ce cas on fixe d'abord R_t , H_c , R_c et H_t va être varié (7.5m, 10m, 12.3m, 14.5m, 20m).

IV.7. 3. 1. sur le débit massique

L'évolution du débit massique de l'air en fonction de la hauteur de cheminée solaire a été présentée sur la figure (IV.16). Cette courbe montre que le débit massique d'air produit par le système augmente continuellement avec l'augmentation de la hauteur de la tour-cheminée.

Cela peut s'expliquer par le fait que les dimensions de la tour favorisent le système de circulation de fluide basé sur la dilatation contraction et la poussée d'Archimède.

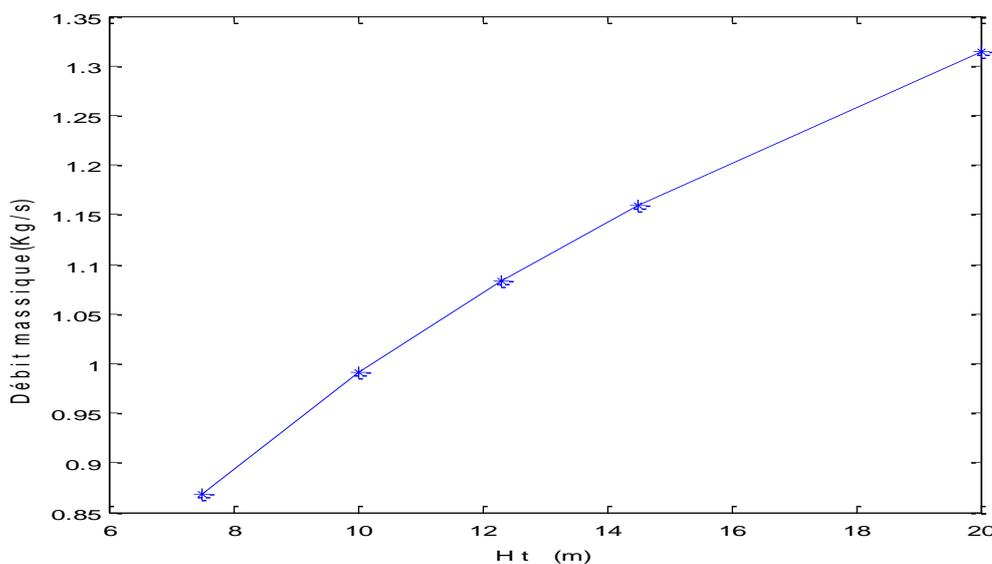


Figure IV.16 : Evolution du débit massique en fonction de la hauteur de la tour-cheminée

IV.7. 3. 2. sur la distribution des lignes de courant

La présentation de lignes du courant pour différentes valeurs de Ht dans la figure (IV.17), on note qu'il y a une zone de recirculation qui se forme juste au niveau de l'entrée du collecteur. Elle est entourée par des iso-surfaces qui prennent des formes d'ellipse. Lorsqu'on augmente la hauteur de la tour-cheminée, on observe une diminution du volume de la zone de recirculation et la structure de l'écoulement devient presque uniforme dans le collecteur.

Cela est justifié par l'effet d'augmentation de la force inertielle, qui sert à minimiser la force de flottabilité.

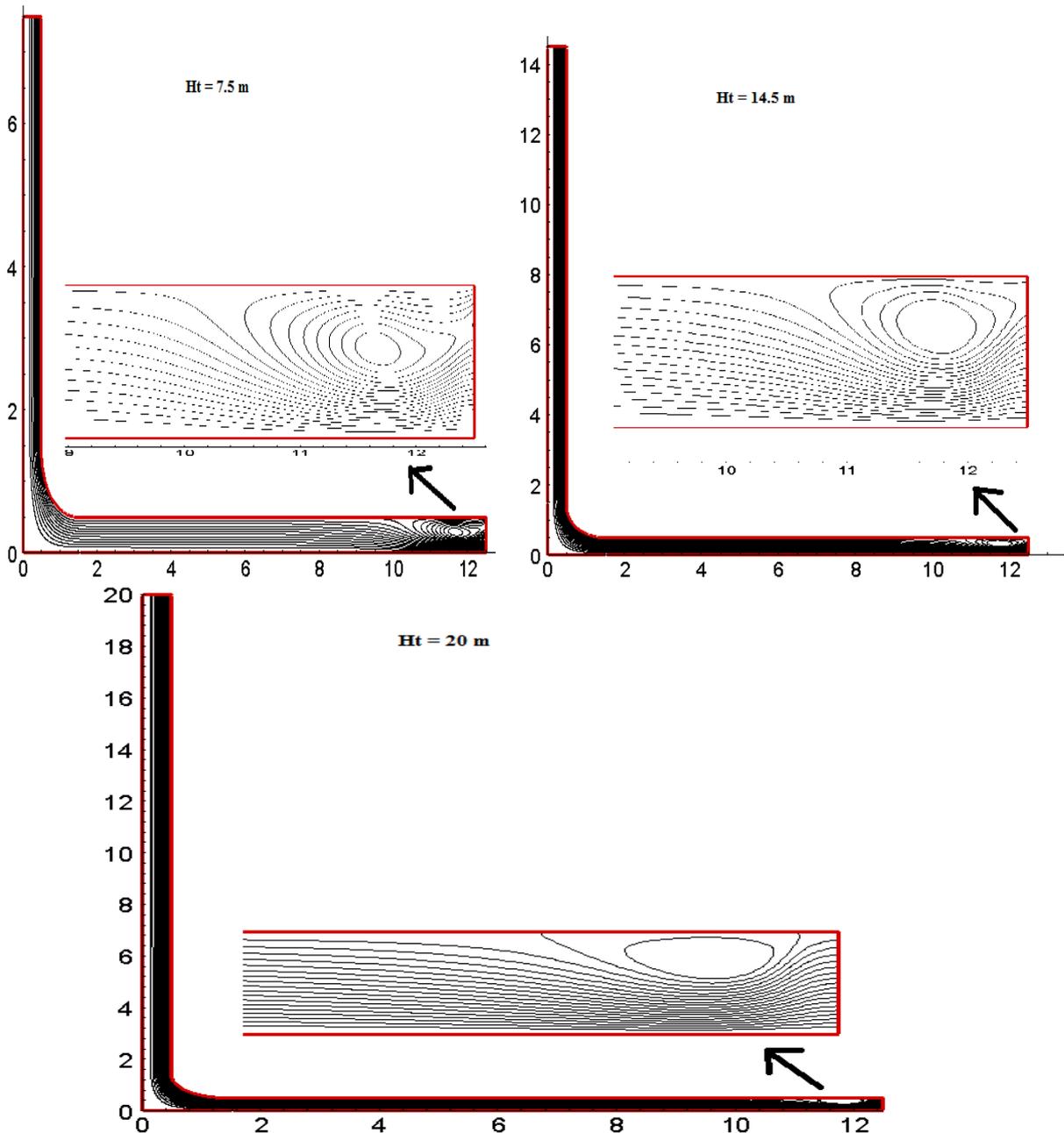


Figure IV.17 : Evolution de la fonction du courant pour les différentes valeurs de la hauteur de la tour-cheminée H

IV.7. 3. 3. sur le champ de vitesse

La présentation de la vitesse pour différentes valeurs de H dans la figure (IV.18). On remarque que l'air entre dans le collecteur à des vitesses très basses, ces vitesses augmentent au fur à mesure qu'on avance vers le centre du collecteur. L'air atteint une vitesse moyenne à la sortie du collecteur, on constate que les vitesses augmentent avec l'augmentation de la hauteur de la tour-cheminée et atteignent leur maximum dans la tour en raison des particules d'air chaud qui monte par l'effet de la force d'Archimède

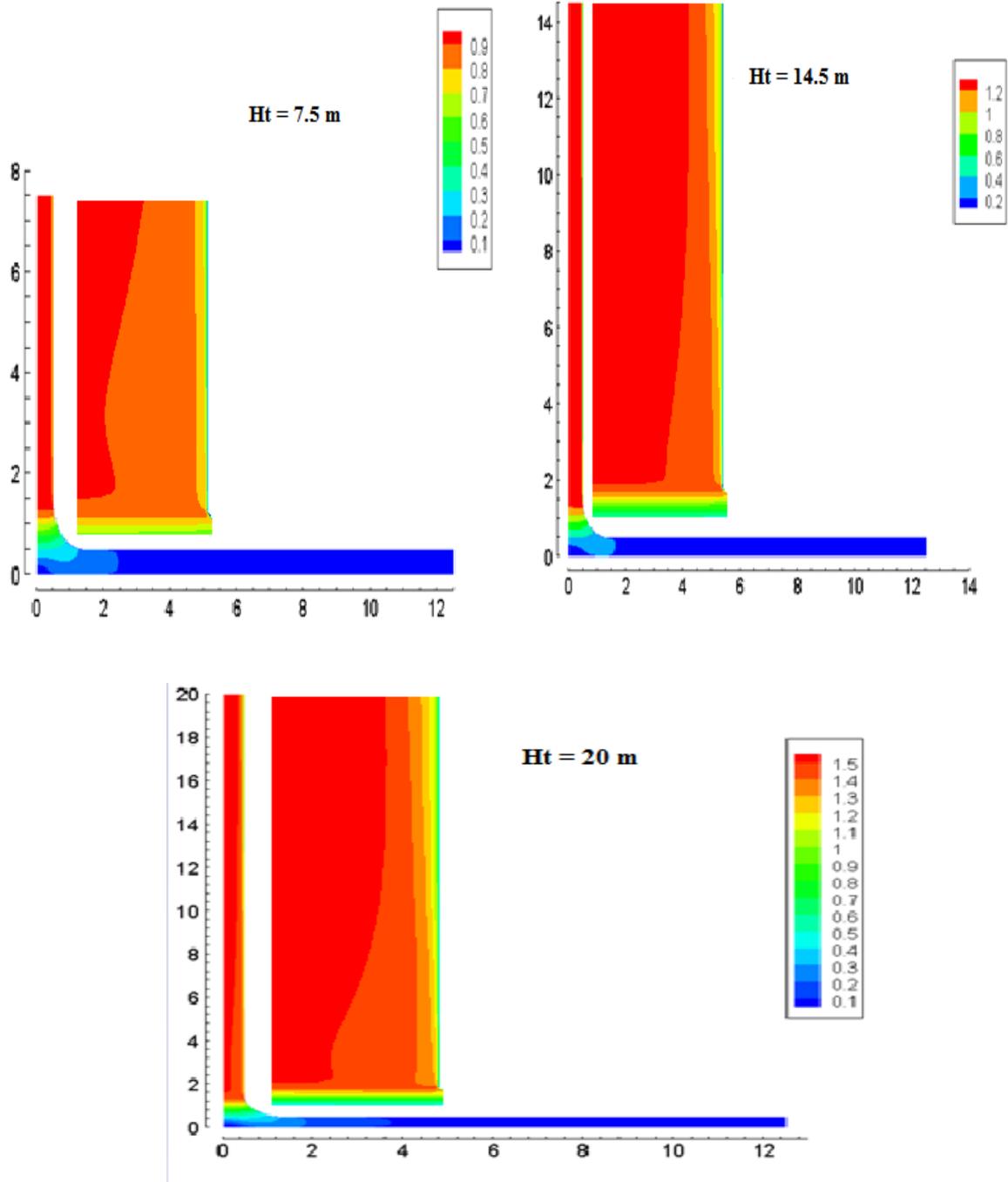


Figure IV.18 : Distribution de la vitesse pour différentes valeurs de la hauteur de la tour-cheminée H

IV.7. 3. 4. sur le champ de température

La figure (IV.19) représente les contours de la température pour différentes valeurs de Ht. On remarque que l'augmentation de la hauteur de la tour-cheminée provoque une diminution de la température le long du collecteur par l'effet de l'élévation de la vitesse d'écoulement.

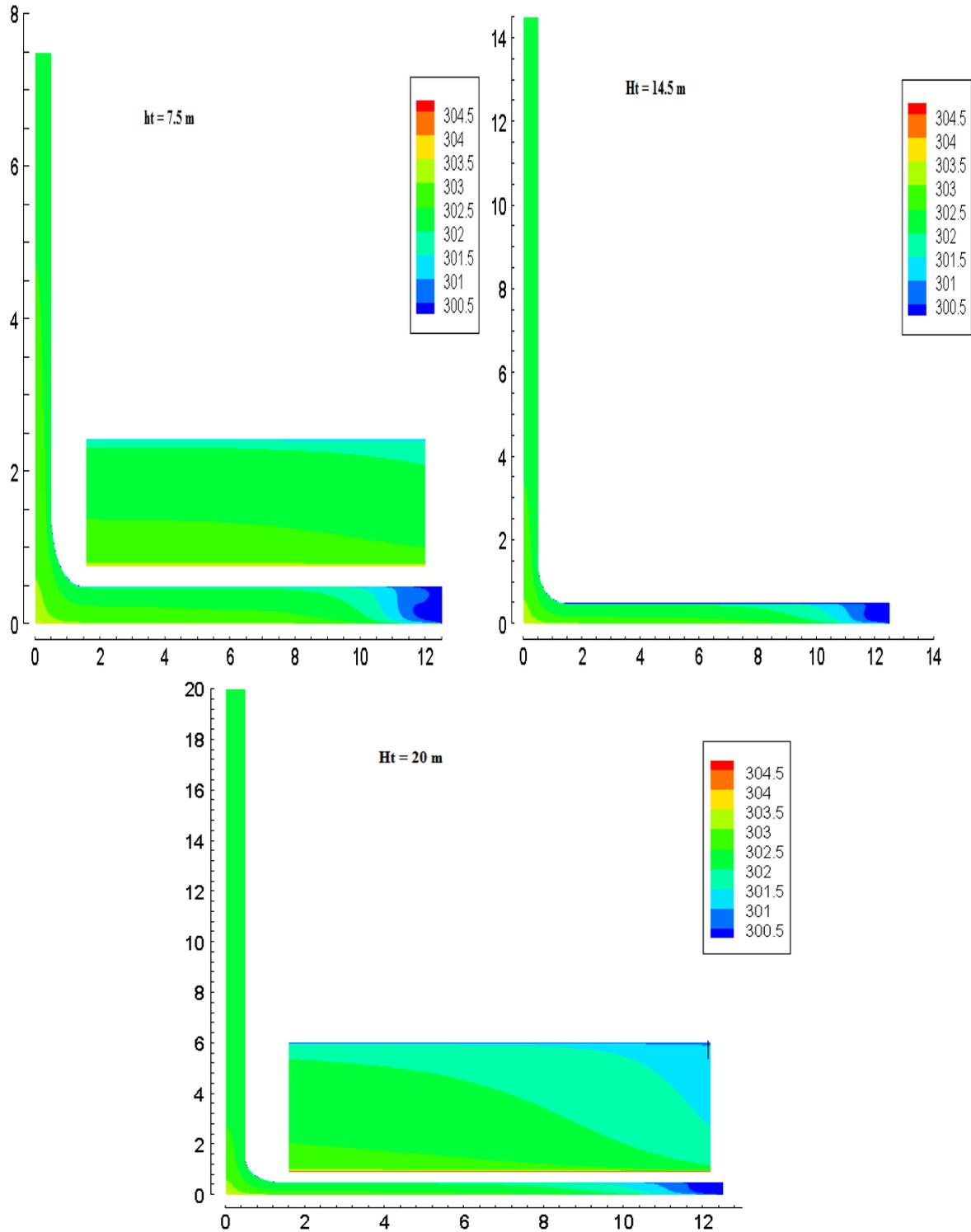


Figure IV.19 : Distribution de la température pour différentes valeurs du rapport de la hauteur de la tour-cheminée H

IV.7. 3. 5. Influence de la hauteur de la tour-cheminée sur la vitesse

L'évolution de la vitesse dans la hauteur de la tour a été présentée dans la figure (IV.20) à $r=0.3\text{m}$ pour différentes valeurs de la hauteur de la tour-cheminée. on remarque que la vitesse augmente avec l'augmentation de la hauteur de la tour-cheminée. Cet accroissement est le résultat de l'accroissement du débit massique de l'air.

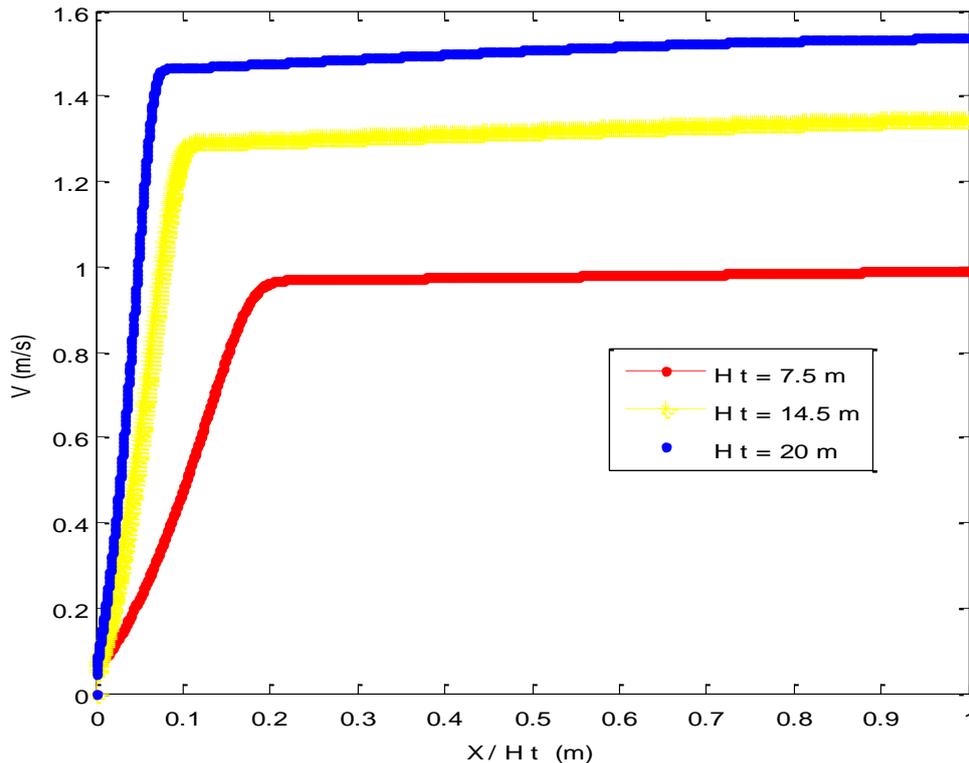


Figure IV.20 : Profil de vitesse dans une section transversale dans la tour pour différentes valeurs de la hauteur de la tour-cheminée H_t

IV.7. 4. Influence de différence de la température entre le sol et le collecteur sur le débit massique

Dans ce cas on fixe d'abord $H_t = 12.3\text{m}$, $R_t = 0.5\text{m}$, $H_c = 0.5\text{m}$, $R_c = 12.5\text{m}$ et la différence de la température entre le sol et le collecteur (DT) va être varié (5 – 10 – 15 – 20)

La figure (IV.21) présente l'évolution du débit massique de l'air en fonction de différence de la température entre le sol et le collecteur. Cette courbe montre que le débit massique de l'air s'accroît très légèrement avec l'accroissement de la DT .

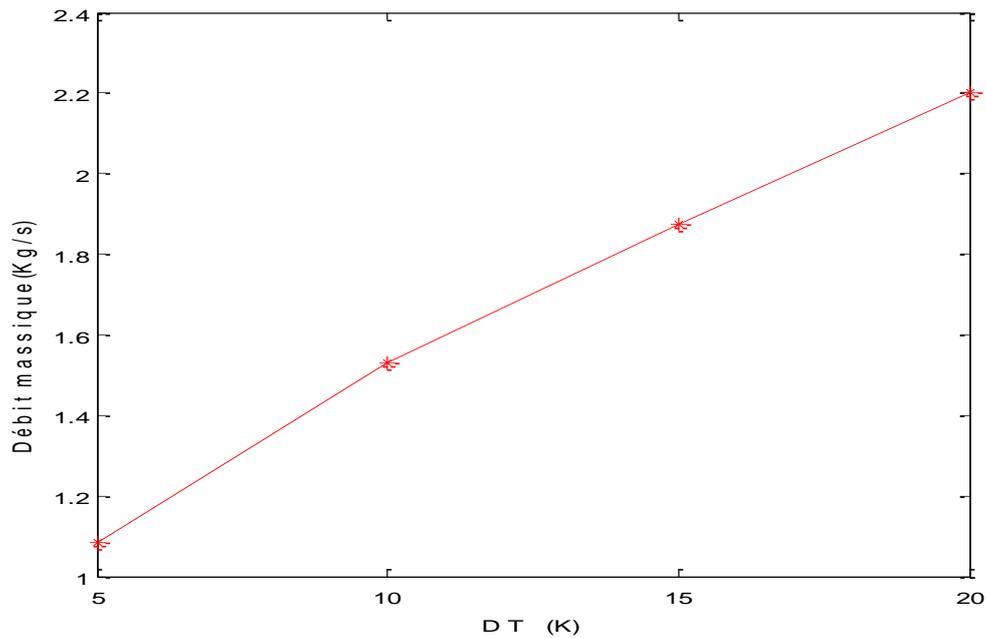


Figure IV.21 : Evolution du débit massique en fonction différence de la température entre le sol et le collecteur

Afin de connaître l'effet du changement de débit massique sur la production de l'énergie électrique dans une centrale de cheminée solaire, nous allons présenter les équations suivantes:

La puissance cinétique de l'air en écoulement est égale à [67] :

$$P_{\text{Cin}} = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot V_{\text{moy,tour}}^2$$

$$\dot{m} = \rho \cdot A_{\text{Tour}} V_{\text{moy,tour}}$$

$$V_{\text{moy,tour}} = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A_{\text{Tour}}}$$

$$P_{\text{Cin}} = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot \left(\frac{\dot{m}}{\rho \cdot A_{\text{Tour}}} \right)^2 = \frac{\dot{m}^3}{2(\rho \cdot A_{\text{Tour}})^2}$$

La puissance électrique délivrée peut être calculée comme suit [68] :

$$P_{\text{Elect}} = \frac{1}{3} \eta_{\text{Aerog}} \cdot P_{\text{Cin}}$$

$$P_{\text{Elect}} = \frac{1}{3} \eta_{\text{Gen}} \cdot \rho \cdot A_{\text{Tour}} \cdot V_{\text{moy}}^3$$

$$P_{\text{Elect}} = \frac{1}{3} \eta_{\text{Gen}} \cdot \rho \cdot A_{\text{Tour}} \cdot \left(\frac{\dot{m}}{\rho \cdot A_{\text{Tour}}} \right)^3$$

$$P_{\text{Elect}} = \frac{1}{3} \eta_{\text{Gen}} \cdot \frac{\dot{m}^3}{(\rho \cdot A_{\text{Tour}})^2}$$

$$P_{\text{Elect}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\eta_{\text{Gen}}}{(\rho \cdot A_{\text{Tour}})^2} \cdot \dot{m}^3$$

η_{Aerog} : est le rendement de l'aérogénérateur (généralement entre 50% et 90%).

A_{Tour} : La section transversale de la tour (de passage) ($A_{\text{Tour}} = \pi R_t^2$)

V_{moy} : La vitesse moyenne présenté à A_{Tour}

Par conséquent, l'augmentation du débit est compensée par l'augmentation de l'énergie électrique, ce qui nécessite de modifier le changement des variables géométriques de la cheminée qui modifie le débit.

Conclusion

Une simulation numérique sur Fluent a été développée afin d'étudier l'effet du rayon de la collecteur et le rayon de la tour-cheminée sur l'écoulement dans une cheminée solaire. Le modèle a d'abord été validé par confrontation aux résultats expérimentaux de la littérature. L'analyse des résultats a permis de conclure :

- L'augmentation du rayon du collecteur permet une augmentation de la vitesse et de la température ainsi que le débit massique, par contre cette élévation permet une diminution de la température le long de la cheminée.
- L'augmentation du rayon de la tour-cheminée permet une augmentation de la vitesse ainsi que le débit massique par contre cette élévation permet une diminution de la température le long de la cheminée.
- L'augmentation de la hauteur de la tour-cheminée permet une augmentation de la vitesse et le débit massique.
- On peut conclure que le rayon du collecteur et la hauteur de la tour de la cheminée sont des paramétrés géométriques importants dans le contrôle thermo-hydrodynamique de l'écoulement.
- L'augmentation de débit massique est permet augmenté la production de l'électricité.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'énergie renouvelable est la tendance actuelle du monde en tant qu'alternative aux combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel et uranium) et en tant que solution aux problèmes environnementaux.

La cheminée solaire est tout d'abord un moyen intéressant de produire de l'énergie électrique renouvelable : qui utilise la radiation solaire pour augmenter l'énergie interne de l'air circulant dans le système, ce qui permet de transformer le gain utile du capteur solaire en énergie cinétique d'écoulement qui peut être transformée en énergie électrique au moyen d'une turbine appropriée.

Les différentes réactions physiques qui s'y produisent sont connues et maîtrisées par l'homme depuis quelques dizaines d'années (Effet Venturi, convection, effet de serre), les matériaux nécessaires à sa construction (béton, verre, acier) sont disponibles en grandes quantités, et d'un point de vue financier, la tour solaire est moins onéreuse qu'une centrale nucléaire. De plus, la production perdure jour et nuit

Pour obtenir les meilleures performances, une cheminée solaire doit être construite dans une zone très ensoleillée et dans de grandes zones inhabitées, les zones les plus favorables étant situées en Afrique du Nord et dans le désert, principalement en Australie centrale et aux États-Unis. Ainsi, le désert algérien est l'un des endroits les plus en vue du monde où l'ensoleillement global annuel est le plus élevé et où il ne faut pas manquer les surfaces inoccupées.

Le désert algérien a de très bonnes conditions climatiques, ce qui permet certainement de réaliser de bons rendements dans une cheminée solaire.

L'objectif principal de notre travail est de réaliser une simulation numérique sous Fluent de l'écoulement dans la cheminée solaire pour étudier l'effet de la variation de certains paramètres géométrique comme le rayon de la tour-cheminée, la hauteur de la cheminée et le rayon du collecteur afin de recueillir la conception de la cheminée solaire.

Les résultats numériques ont été validés pour la première fois en le comparant aux résultats expérimentaux de la littérature.

Une étude numérique a été présentée à travers laquelle on comprend le comportement dynamique et thermique de l'écoulement qui s'écoule à travers les cheminées solaires, en particulier lorsque on fait varier certains paramètres géométriques.

L'analyse des résultats obtenus a permis de conclure :

- L'importance de choisir le bon maillage pour augmenter le flux avec le moins de temps pour calculer

- Le rayon du collecteur, la hauteur et le rayon de la tour de la cheminée sont des paramètres géométriques importants dans le contrôle thermo-hydrodynamique de l'écoulement.
- Les variations du rayon du collecteur influent directement sur le champ thermique par l'augmentation du gain de chaleur utile (augmentation de la surface chauffée).
- L'augmentation de rayon du collecteur, le rayon et la hauteur de la tour-cheminée permet une augmentation du débit massique d'air.
- L'augmentation de la hauteur de la tour cheminée a tendance à augmenter la vitesse maximale dans la tour, et à diminuer la température dans le collecteur.
- L'augmentation de la différence de la température entre le sol et le collecteur a augmenté le débit massique.
- L'augmentation de débit massique est très importante pour augmenter l'énergie électrique.
- Les dimensions géométriques de la cheminée solaire notamment la hauteur de la cheminée et le rayon du collecteur solaire sont des paramètres importants pour l'optimisation de ce système solaire.

Cette étude offre plusieurs perspectives qui restent à étudier, comme le cas d'un régime instationnaire ou la simulation 3D. Cette dernière permettra une meilleure approche du comportement des CCS, cependant avec un temps de calcul énorme.

Références

Bibliographiques

[1] Benzaghoul, Hana. "Etude ab initio des propriétés structurales, électroniques des semi-conducteurs chalcopyrites CuGaX₂ (X= S, Se)." (2012).

[2] <https://e-rse.net/definitions/energies-renouvelables-definition>

[3] Bahache Hadjer, Simulation numérique de la convection naturelle dans une cheminée solaire, mémoire master, université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2016/2017

[4] <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9288:ed-1:v1:fr>

[5] <https://www.connaissancedesenergies.org>

[6] S.Bensaada, M.T.Bouziane, Transfert de chaleur, 16 février 2015

[7] Benchemsa Issam, L'utilisation de l'énergie thermique pour le chauffage domestique, mémoire de master, université Badji Mokhtar Annaba, 2016/2017

[8] <https://lenergeek.com>

[9] www.uraer.cder.dz

[10] www.claude.bonello.free.fr

[11] www.ecosource.info

[12] Cheloufi Djassem, réalisation et expérimentation d'une cheminée solaire, mémoire de master, Université KASDI Merbah Ouargla, 2013/2014

[13] www.serresdelaperrine.com

[14] www.2es.fr/fr/nos-comptences/le-solaire-thermique.

[15] David Martin, Etude d'un cycle de brayton-joule solaire à l'aide de la thermodynamique à vitesse finie, mémoire master, université de Lorraine, 2013

[16] www.mode/transport.fr/energie-solaire-maison-prix-entretien-chaudiere-16/85/

[17] A.OUBARRA, Conversion de l'énergie solaire, Maroc Bouznika

[18] Rahui Sahar, Bousshine Lahbib, étude du comportement mécanique de la structure de la cheminée solaire, école nationale supérieure d'électricité et de mécanique ENSEM, université Hassan II, Casablanca, 2017

[19] Abdellah-El-Hadj Amine, Modélisation de l'écoulement dans une cheminée solaire, mémoire, Ecole Nationale Polytechnique, 2007/2008

[20] Toufik Chergui, Modélisation des écoulements dans les cheminées solaires, mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.

- [21] A, Dugué, Caractérisation et valorisation de protections solaires pour la conception de bâtiments: analyse expérimentale et propositions de modélisations (Doctoral dissertation, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I) ,2013.
- [22] Pardo, Pierre. Développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermo-chimique. Diss. 2013.
- [23] S.Bensaada, M.T.Bouziane, transfert de chaleur, 16 février 2015
- [24] Benhissen Nacer Eddine, modélisation des coulages électrothermiques dans les composants électroniques, mémoire, université du Québec , 1998.
- [25] Jannot, Yves. "Transferts thermiques." Cours transferts thermiques 2ème année, Ecole des Mines Nancy (2012).
- [26] Olivier Farges, conception optimale de centrales solaires a concentration :application aux centrales à tour et aux installations (deam down), thèse de doctorat ,université de Toulouse,2014
- [27] Rahui Sahar, Bousshine Lahbib ,étude du comportement mécanique de la structure de la cheminée solaire ,école nationale supérieure d'électricité et de mécanique ENSEM ,université Hassan II ,casablanca,2017
- [28] T. Chergui, Abd. H. Boualit, M. Lebbi, L. Boutina, A. Bouhdjar, S. Larbi, Analyse de l'effet de la température ambiante sur le champ Thermo-hydrodynamique des cheminées Solaires, Vol.3, 31-40,2015
- [29] Cottam, Patrick John. Innovation in solar thermal chimney power plants. Diss. UCL (University College London), 2018
- [30] I.cabanyes, "Proyecto de motor solar ,La energia Eléctrica revista general de electricidad sus aplicaciones 8,61-65,1903
- [31] Azerou Belaid , Berrichi Mohamed Hani ,Influence de la hauteur de la tour-cheminée et du rayon du collecteur sur l'écoulement dans les cheminées solaires, mémoire de master, Université M'Hamed BOUGARA- Boumerdes,2016/2017
- [32] Schlaich, Jörg, Wolfgang Schiel, "solar chimney encyclopedia of physical science and technology third edition ,2000,consulting engineers,stuttgart
- [33] <http://www.energythic.com>
- [34] C.B. Maia, A.G. Ferreira, R.M. Valle, M.F.B. Cortez, «Theoretical evaluation of the influence of geometric parameters and materials on the behaviour of the air flow in a solar chimney»,Comput Fluids, vol. 38, pp. 625-636, 2009
- [35] Abdulcelil BUĞUTEKİN, Experimental study of temperature filed in a solar chimney plant in Adiyaman ,Isı BilimiveTekniğiDergisi, 32, 2, 73-80 ,of Thermal Science and Technology , TIBTD Printed in Turkey ISSN 1300-3615, 2012

- [36] Amir Shahreza, Hadi Imani, Experimental and numerical investigation on an innovative solar chimney , *Energy Conversion and Management* 95 ,446–452 ,2015.
- [37] Penghua Guo, Yuan Wang, QinglongMeng, Jingyin Li ,Experimental study on an indoor scale solar chimney setup in an artificial environment simulation laboratory , *Applied Thermal Engineering*,vol.107,pp. 818-826, 2016.
- [38] M.Ghalamchi, A.Kasaeian, N.Fadaei, R.Daneshazaria ,Optimizing.of solar chimney Performance using electro hydrodynamic system based on array geometry , *Energy Conversion and Management*, vol.135, pp. 261-269, 2017.
- [39] Siyang Hu, Y.C. Leung, Z.Q. Chen , C.Y. Chan ,Effect of guide wall on the potential of a solar chimney power plant , *Renewable Energy*,vol.96,pp.209-219,2017.
- [40] 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).
- [41] M.Lebbi, T.Chergui, H. Boualit, L. Boutina , Influence of geometric parameters on the hydrodynamics control of solar chimney , *Int J Hydrogen Energy* , vol. 39, pp. 15246-15255, 2014.
- [42] S.Sudprasert, C.Chinsorranant, P.Rattanadecho ,Numerical.study.of vertical solar chimneys with moist air in a hot and humid climate , *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.102, pp.645-656, 2016.
- [43] A. Ayadi, Z. Driss, A.Bouabidi, M.SalahAbid , Experimental and numerical study of the impact of the collector roof inclination on the performance of a solar chimney power plant , *Energy and Buildings*,vol.139,pp. 263–276 (2017).
- [44] K.Shirvan,S.Mirzakhani,M.Mamourian , Numerical investigation and sensitivity analysis of effective parameters to obtain potential maximum power output , *Energy Conversion and Management*, vol.136, pp.350-360 ,2017.
- [45] E. Bilgen, J. Rheault, Solar chimney power plants for high latitudes ,*Solar Energy* 79, pp, 449–458,2005.
- [46] Von Backström, Theodor W., and Thomas P. Fluri , Maximum fluid power condition in solar chimney power plants—an analytical approach , *Solar Energy* 80.11 , 1417-1423,2006.
- [47] A. Kasaeian , M. Ghalamchi , Simulation and optimization of geometric parameters of a solar chimney in Tehran“, *Energy Conversion and Management* 83 pp28–34, 2014.
- [48] Y. Jae Choi, HoonKam, Won Park, HoonJeong , Development of analytical model for solar chimney power plant with and without water storage system , *energy*, vol.112, pp.200-207 ,2016.
- [49] Paez Ortega, Elias. Analyzes of solar chimney design. MS thesis. Institutt for energi-og prosessteknikk, 2011.

[50] Schlaich, Jorg, Rudolf Bergermann, Wolfgang Schiel, and Gerhard Weinrebe , Design of commercial solar updraft tower systems -utilization of solar induced convective flows for power generation , Journal of Solar Energy Engineering 127, no. 1, 117-124,2005.

[51] Schlaich, Joerg, and Rudolf Bergermann ,The solar updraft tower: das aufwindkraftwerk motivation and Concept-Text .

[52] Pablo González Gascón y Marín, Guillermo Gómez Fontecha, Ole Geisen ,Les tours solaires :Deux approches pour utiliser l'énergie du soleil ,Energie Renouvelables, ENSTA Paris Tech,2011

[53] Amel Dhahri, Ahmed Omri, A review of solar chimney power generation technology, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) ISSN: 2249 – 8958, Volume-2, Issue-3, February 2013

[54] <http://www.enerzine.com/1/12410+arizona-une-tour-solaire-de-800-metres-de-haut/13486-2011-07>.

[55] <http://www.actionnovation.com/innovation-environnement/energie-tour-solaire-800metre-2716.htm>

[56] <http://www.enerzine.com/1/12410+arizona-une-tour-solaire-de-800-metres-de-haut/13486-2011-07>.

[57] <http://www.actionnovation.com/innovation-environnement/energie-tour-solaire-800metre-2716.htm>

[58]Tayebi Taher , contribution à l'étude numerique de la convection naturelle laminaire d'un système radial de chauffage solaire ,mémoire master ,université Constantine 1,2014.

[59]Bouziane Ibrahim el-khalil, Louchani sifeddine, Analyse numérique du comportement aérothermique dans une cheminée solaire combinée avec l'énergie géothermique ,mémoire master ,université Kasdi Merbah,2011.

[60] <http://www.nice-fictions.fr/wp-content/uploads/2014/11/presentation-tour-solaire-2>

[61] Semai Hakim, recherche d'une configuration optimale d'une centrale solaire a cheminée, Thèse , Université Abou-Bekr belkaid – Tlemcen, 2017.

[62] Ferziger, J.H, Perić, M, Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer, 2002

[63] Launder, B. E. and Spalding, D.B, The Numerical Computation of Turbulent Flows. Comput Methods Appl Mech, Vol. 3, pp. 269–289, 1974.

[64] Toufik Chergui, Etude des écoulements avec transfert de chaleur dans les centrales à cheminées solaires, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 2013

[65] Versteeg, H. K , Malalasekera W, An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method -. Prentice Hall, London, 1995.

[66] Benlahcene Djaouida, Etude des phénomènes de transfert dans un système thermodynamique ouvert: application aux écosystèmes constitués de cultures sous serre comme le collecteur d'une cheminée solaire, Thèse de Doctorat, Université Hadj Lakhdar-Batna 1, Algerie, 2019

[67] 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

[68] Schlaich J, 1995. The solar chimney: electricity from the sun. In: Maurer C, editor. Germany: Geislingen; 1995