

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET  
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

N° d'ordre :...../Master/2016.

Série :...../GM/2016

**MEMOIRE**

Présenté pour obtenir le diplôme de Master en Génie Mécanique

Ayant pour Thème :

**PRODUCTION DE L'ELECTRICITE A PARTIR  
D'UNE CHEMINEE SOLAIRE**

OPTION :

**Mécanique Energétique**

Réalisé par:

- **OUKIL ABDELHAKIM**
- **TENTAM FOUAZI**

Encadré par :

**M.BOUREGBI**

**Soutenu le: 09/06 /2016**

**Devant le jury composé de :**

<b>Président :</b>	M.AIT YALLA	MCB
<b>Examineurs :</b>	M.DJELLAL	MCB
	M. MOUSSAOUI	MAA

*Année universitaire : 2015-2016*

## Remerciements

*Je remercie avant tout « ALLAH » le tout puissant qui m'a donné la foi, le courage et la volonté de mener à bien ce modeste travail.*

*Je remercie également Monsieur AITYALLA le Président Jury et Monsieur DJELLAL et Monsieur Moussaoui membre de Jury, pour avoir accepté de juger ce modeste travail.*

*Je tiens à présenter mes remerciements aux personnes qui m'ont aidé durant la Préparation du mémoire.*

*Je tiens à présenter mes remerciements A Monsieur BOUREGBI Lakhder notre promoteur, pour son suivi , ses conseils, sa contribution et son aide tout le long de ce travail*

*Merci à tous les enseignants de l'université de bouira spécialement les enseignants de département génie mécanique qui ont contribué à ma formation tout au long de mes études.*

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

## *Dédicace*

*A Mes très chers parents, ma mère et mon père  
Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente  
pour Exprimer ce que vous méritez pour tous les  
sacrifices que vous n'avez Cessé de me faire  
depuis ma naissance, durant mon enfance Et même  
à l'âge adulte.*

*A mes très chers frères et ma sœur  
À toute mes collègues de section énergétique*

*Je dédie ce travail*

## *Listes des figures*

### *Chapitre I*

- Figure(I.1)** : Panneaux solaire photovoltaïque
- Figure(I.2)** : Le rayonnement solaire
- Figure(I.3)** : les différentes modes de la conversion thermique
- Figure(I.4)** : Serre pour cultures
- Figure(I.5)** : Capteur solaire plan (chauffe-eau solaire)
- Figure (I.6)** :Maison solaire
- Figure(I.7)**: Le four solaire d'Odeillo
- Figure (I.9)** : central solaire a concentration thermique
- Figure(I.10)** : composants d'un système photovoltaïque
- Figure(I.11)** : distribution du gisement solaire dans le monde

### *Chapitre II*

- Figure(II.1)** : Cheminée solaire
- Figure(II.2)** : Collecteur de cheminée solaire
- Figure(II.3)** : Turbine pour Cheminée Solaire de large diamètre
- Figure(II.4)** : Cheminée Solaire Australienne
- Figure(II.5)** : Schéma présentatif de la cheminée solaire
- Figure(II.6)** : Schéma illustrant la circulation de l'air
- Figure(II.7)** : Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'un Thermosiphon
- Figure(II.8)** : Principe du stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des galets
- Figure(II.9)** : Principe du stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des tubes noirs
- Figure(II.10)** : La Cheminée Solaire Australienne
- Figure(II.11)** : La Cheminée Solaire de Ciudad Real

**Figure(II.12) :** La Cheminée Solaire Namibienne

### *Chapitre III*

**Figure(III.1) :** Schéma de la tour solaire simplifié pour les équations d'énergie

**Figure(III.2) :** Bilan énergétique au niveau de vitrage

**Figure(III.3) :** Bilan énergétique au niveau du flux d'air

**Figure(III.4) :** Bilan énergétique au niveau de l'absorbeur (sol)

**Figure(III.5) :** l'évolution de rayonnement solaire en fonction de température

**Figure(III.6) :** Capture d'écran représente les résultats obtenus dans l'afficheur Command Window de MATLAB

**Figure(III.7) :** comparaison de la température ambiante avec la température de fluide en fonction de temps

**Figure(III.8) :** comparaison de les températures  $T_a$ ,  $T_{sol}$ ,  $T_c$ ,  $T_f$  en fonction de temps

**Figure(III.9) :** Evolution de la température du collecteur  $T_c$ , de l'air  $T_f$  et de l'absorbeur  $T_{sol}$  en fonction de l'intensité de rayonnement solaire

**Figure(III.10) :** évolution des vitesses avec la turbine et son turbine en fonction de temps

**Figure(III.11) :** évolution de la vitesse d'écoulement en fonction de la température ambiante

**Figure(III.12) :** la vitesse d'écoulement en fonction de l'intensité de Rayonnement solaire

**Figure(III.13) :** variation de débit en fonction de temps

**Figure(III.14) :** l'évolution de débit massique en fonction de la Température ambiante  $T_a$

**Figure(III.15) :** L'évolution de la densité d'air en fonction température de fluide

**Figure(III.16) :** la variation de la puissance en fonction de temps

**Figure(III.17) :** variation de la puissance de cheminée en fonction de le rayonnement solaire

**Figure(III.18) :** variation de la puissance de la cheminée en fonction de température ambiante

**Figure(III.19) :** Puissance en fonction de la hauteur de cheminée

**Figure(III.20) :** la différence de pression en fonction de la hauteur de la cheminée

**Figure(III.21) :** Puissance utile en fonction de rayon de collecteur

**Figure(III.22) :** la puissance en fonction de diamètre de la cheminée

**Figure(III.23) :** la puissance en fonction de la hauteur de collecteur

## *Chapitre IV*

**Figure(IV.1)** : Présentation des conditions aux limites

## *Chapitre V*

**Figure(V.1)** : Géométrie tridimensionnelle de la cheminée solaire

**Figure(V.2)** : géométrie de la cheminée solaire en workbench

**Figure(V.3)** : maillage généré de la cheminée solaire

**Figure(V.4)** : Vue latérale du maillage généré pour côté jonction

**Figure(V.5)** : vue latéral zoomé de collecteur et de la tour de la cheminée

**Figure(V.6)** : différentes étapes dans logiciel

**Figure(V.7)** : propriétés physique de fluide ( l'air)

**Figure(V.8)** : caractéristiques numériques

**Figure(V.9)** : la convergence de résultats

**Figure(V.10)** : Contours des vitesses

**Figure(V.11)** : Contours de température

**Figure(V.12)** : Contours de température zoomés au niveau de collecteur

**Figure(V.13)** : Contours de température zoomés

**Figure(V.14)** : Contours de pression

## *Liste des tableaux*

### *Chapitre II*

**Tableau (III.1)** : rayonnements solaire incident et température ambiante pendant une journée [28]

**Tableau (III.2)**: les résultats obtenue sous programme MATLEB

### *Chapitre V*

**Tableau V.1**: Conditions aux limites déclarées



# Sommaire

Remerciement.....	i
Dédicace.....	ii
Liste de des figures .....	iii
Liste des tables .....	iiii
Sommaire .....	iv
Résumé.....	v
Nomenclateurs .....	vi
Introduction général .....	vii

## Chapitre I : généralité sur les énergies solaires

I.1. Introduction .....	1
I.2.L'énergie solaire.....	1
I.2.1. Le Soleil, source de vie.....	2
I.2.2. La propagation du rayonnement solaire dans l'atmosphère.....	2
I.3.les différentes modes de conversion thermiques .....	3
I.3.1. La conversion thermique à basse température.....	4
I.3.1.1.les serres .....	4
I.3.1.2. Les capteurs solaires.....	4
I.3.1.3. Les maisons solaires.....	5
I.3.2. La conversion thermique à haute température.....	6
I.3.2.1. Le four solaire.....	6
I.3.2.2. La centrale thermique.....	7
I.3.3 La conversion photovoltaïque.....	8
I.4.Le gisement solaire .....	9
I.4.1. Le gisement solaire dans le monde .....	10

## **Chapitre II : Description de la cheminée solaire**

II.1. Introduction.....	11
II.2.la cheminée solaire .....	12
II.2.1.historique.....	12
II.2.2. Principaux éléments de la cheminée solaire .....	12
II.2.2.1. le collecteur.....	12
II.2.2.2la cheminée .....	13
II.2.2.3. La turbine.....	14
II.2.3.principe de fonctionnement d'un tour solaire .....	15
II.2.4.phénomène majeur : le thermosiphon .....	16
II.3.le stockage d'énergie.....	18
II.3.1. Les différentes méthodes de stockage .....	18
II.3.2.par chauffage de sable .....	18
II.3.3.par chauffage de galet .....	18
II.3.4.par chauffage de d'eau .....	19
II.4. Avantages et inconvénients de la cheminée solaire.....	20
II.4.1.avantages .....	20
II.4.2.inconvénients .....	20
II.5.quelques projets de tour solaire .....	21
II.5.1. le projet australienne.....	21
II.5.1.2.spécification du projet .....	22
II.5.2. le projet espagnol.....	22
II.5.2.1.spécification de projet .....	23
II.5.3.le projets namibienne .....	23

## **Chapitre III : Etude du comportement thermique de la cheminée solaire**

III.1.introduction .....	25
III.2. Analyse mathématique.....	25
III.3. Les bilans énergétiques.....	26
III.3.bilan énergétique au niveau de vitrage.....	26
III.3.2 bilan énergétique au niveau de flux d'air .....	28
III.3.3. bilan énergétique au niveau de sol .....	29
III.4.Corrélation théorique pour calculer les coefficients de transfert thermique.....	31

III.5. Calcul de performance de La cheminée (la tour) .....	33
III.6. Calcul de performance de la turbine (turbine éolienne).....	34
III. 7.Validation du modèle.....	34
III.7.1.algorithme simplifié .....	35
III.7.2.Description du problème.....	35
III.7.3.calcul numérique .....	37
III.8.Résultats et discussion.....	39
III.8.1.1.variation des températures.....	39
III.8.1.2.l'évaluation de la vitesse découlement .....	42
III.8.1.3. l'evaluation de débit massique .....	45
III.8.1.4.variation de la masse volumique.....	47
III.8.1.5.variation de la puissance utile de la cheminée .....	47
III.8.2.L'influence des paramètres géométriques de la cheminée .....	50
III.8.2.1.influence de la hauteur de cheminée .....	50
III.8.2.2.influence de rayon de collecteur .....	52
III.8.2.3.influence de diamètre de cheminée .....	53
III.8.2.3.influence de la hauteur de collecteur .....	53

## **Chapitre IV : modélisation mathématique**

IV.1.Introduction.....	55
IV.2.Définition du problème.....	55
IV.3.Hypothèses simplificatrices.....	55
IV.4.Formulation mathématique.....	56
IV.4.1Equation de continuité (conservation de la masse).....	56
IV.4.2. Equation de la conservation de la quantité de mouvement.....	56
IV.4.3. Equation de l'énergie.....	57
IV.5. Conditions aux limites .....	57
IV.5.1.conditions d entrée.....	58
IV.5.2.Conditions de sortie.....	58
IV.5.3. Conditions à l'axe de symétrie .....	

IV.5.4. Conditions aux limites au sol.....	58
IV.5.5. Conditions aux limites au toit du collecteur.....	58
IV.5.6. Conditions aux limites à la paroi de cheminée .....	59
IV.6. Formulation adimensionnelle.....	59
IV.6.1. les constantes .....	59
IV.6.2. Les variables adimensionnelles.....	59
IV.6.3. Les nombres adimensionnels.....	60
IV.6.4. forme adimensionnelle des équations .....	61

## **Chapitre 05 : modélisation numérique**

V.1. Introduction .....	62
V.2. Principes des codes CFD (Computational Fluid Dynamics).....	62
V.3. Description du problème .....	62
V.4. Les hypothèses .....	63
V.5. Création de la géométrie et maillage en workbench .....	65
V.5.1. géométrie .....	65
V.5.2. Optimisation de maillage.....	65
V.6. Choix des paramètres de FLUENT.....	67
V.6.1. condition aux limites .....	68
V.6.2. Quelques paramètres de résolution numérique par FLUENT.....	69
V.6.3. La convergence.....	70
V.7. Résultats et discussions.....	70
V.7.1. Champs de vitesse.....	71
V.7.2. Champ de température.....	72
V.7.3. champ de pression .....	74
Conclusion général.....	76
Références bibliographiques.....	77
Annexe .....	79

## ملخص:

يتضمن هذا العمل دراسة السلوك الحراري و دراسة السلوك الرقمي للمدخنة الشمسية المركزية. ويتكون أساسا من جزأين

الجزء الأول يتمثل في دراسة السلوك الحراري للمدخنة الشمسية باستعمال برنامج MATLAB بعد ذلك استخدمنا هذا النموذج المطور لتحديد تأثير المعايير الرئيسية المتحكممة في تشغيل محطة المدخنة الشمسية و المتمثلة في الإشعاع، ودرجة الحرارة المحيطة من جهة، والمعلمات الهندسية للمدخنة الشمسية من جهة أخرى ( قطر وارتفاع المدخنة ونصف قطر و ارتفاع المجمع الشمسي )

في الجزء الثاني وضعنا نموذج لحركة الهواء داخل المدخنة الشمسية باستعمال برنامج الحسابية العددية لدينامكية السوائل FLEUNT

**الكلمات الدالة** محطة المدخنة الشمسية . الحسابية العددية لدينامكية السوائل . الطاقة الشمسية

## Abstract:

This work is a numerical and thermal study of the solar chimney power plant. It consists mainly of two parts.

the first part It consists a thermal study of the central solar chimney with MATLAB validation program, then we used the model developed to determine the influence of the main operating parameters of the central solar chimney of the power generated, such as the radiation room temperature and the geometric parameters of the solar chimney (the radius of the collector and the chimney height, the diameter of the chimney and the collector height).

In the second part is devoted to the modeling of the flow in the solar chimney power plant, with the use of a numerical computational fluid dynamic code FLUENT

In the second part is devoted to the modeling of the flow in the solar chimney power plant, with the use of a numerical computational fluid dynamic code FLUENT

**Key words:** solar chimney power plant, flow numerical modeling, solar energy

## **Résumé :**

Ce travail est une étude du comportement thermique et numérique de la centrale cheminée solaire. Il se compose principalement de deux parties.

La première partie est consacrée à une étude comportement thermique de la centrale cheminée solaire avec une validation de programme MATLAB , Puis on a utilisé le modèle développé pour déterminer l'influence des principaux paramètres de fonctionnement de la centrale cheminée solaire sur la puissance générée, à savoir le rayonnement, la température ambiante, et les paramètres géométriques de la cheminée solaire ( le rayon du collecteur et la hauteur de la cheminée, le diamètre de la cheminée et la hauteur de collecteur ).

la seconde partie, la modélisation de l'écoulement dans une centrale cheminée solaire avec le logiciel de calcul numérique de mécanique des fluides FLUENT

## **Mots clés :**

Centrale cheminée solaire, modélisation numérique des écoulements, énergies Solaires.

## *Nomenclature*

**A<sub>c</sub>** : la surface de collecteur (m<sup>2</sup>)

**A<sub>ch</sub>** : la surface de cheminée(m<sup>2</sup>)

**C<sub>p</sub>** : capacité calorifique de l'air(w.s/kg.c°)

**C<sub>p-sol</sub>** :capacité thermique de sol (w.s/kg.c°)

**C<sub>1</sub>,C<sub>5</sub>** :constant(w/m<sup>2</sup>.C°)

**C<sub>2</sub>,C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, C<sub>6</sub>,C<sub>8</sub>, C<sub>9</sub>** :constants (1/m<sup>2</sup>)

**C<sub>7</sub>** : constant(C°/w)

**C<sub>10</sub>**=constant(m<sup>2</sup>.C°/w)

**C<sub>11</sub>,C<sub>12</sub>** :constants adimensionnels

**d<sub>sol</sub>** : le profondeur d'amortissement(m)

**d<sub>h</sub>** :Le diamètre hydraulique de collecteur (m)

**g** : l'accélération gravitationnelle (m/s<sup>2</sup>)

**h** : hauteur de collecteur (m)

**H** : hauteur de la cheminée(m)

**h<sub>rciel</sub>** :Le coefficient de transfert radiatif de ciel (w /m<sup>2</sup> .°C)

**h<sub>r c-sol</sub>** :Le coefficient de transfert radiatif entre le sol et le vitre (w /m<sup>2</sup> .°C)

**h<sub>cf</sub>** :Le coefficient de transfert convectif entre le vitre et le fluide (w /m<sup>2</sup> .°C)

**h<sub>v</sub>** :Le coefficient de transfert de vent (w /m<sup>2</sup> .°C)

**h<sub>sol-f</sub>** :Le coefficient de transfert convectif entre le sol et le fluide (w /m<sup>2</sup> .°C)

**I** :L'irradiation solaire (w/m<sup>2</sup>)

$k_{sol}$  : la conductivité thermique de sol (w/m.°C)

$k_f$  : la conductivité thermique de fluide (w/m.°C)

$m$  : le débit massique a travers la cheminée solaire (kg/s)

$R$  : le rayon de collecteur(m)

$r$  : le rayon de cheminée (m)

$T_a$  : température de l'ambiance (°C)

$T_c$  : température de collecteur (°C)

$T_f$  : température de fluide (air)(°C)

$T_{sol}$  : La température de l'absorbeur (sol) (°C)

$T_{ciel}$  : La température de ciel (°C)

$T_{fi}$  : La température a l'entrée de collecteur (°C)

$t$  : le temps (s)

$P$  : la pression (Pa)

$Q_{(1, \dots, 9)}$  : la puissance thermique (W)

$U_b$  : coefficient de perte totale au niveau de l'absorbeur (w/m<sup>2</sup> .°C)

$U_{sol}$  : coefficient de perte thermique de sol(w/m<sup>2</sup> .°C)

$V_{max}$  : la vitesse maximale dans la cheminée (m/s)

$V_{air}$  : la vitesse de vent (m/s)

$w$  : la fréquence angulaire (1/m)

$\Delta P_{tot}$  : la différence de pression entre la base de cheminée et l'ambiance (Pa)

$\Delta P_s$  : la différence de pression au niveau de la turbine (Pa)

$\Delta P_{dy}$  : la pression dynamique (Pa)

$\Delta T_{1,2}$  : la différence de température a l'entrée et la sortie de collecteur(°C)

### Nombres adimensionnels:

**Ra** :nombre de Raileigh.

**Re** :nombre de Reynolds

**Pr** :nombre de Prandtl.

**Gr** :nombre de Grashoff.

### Symbole Grecs:

$\alpha$  : diffusivité thermique ( $m^2/s$ )

$\alpha_1, \alpha_2$  : Absorptivité de vitrage et de sol

$\rho$  : Masse volumique. ( $kg/m^3$ )

$\rho_0$  : Masse volumique à  $T_a$  ( $kg/m^3$ )

$\rho_{sol}$  : la masse volumique de sol ( $kg/m^3$ )

$\sigma$  : le constant de Stefan – Boltzmann ( $W /m^2 .^\circ C$ )

$\beta$  : Coefficient de dilatation du fluide à pression constante. (1/K)

$\nu$  : Viscosité cinématique. ( $m^2 /s$ )

$\mu$  : Viscosité dynamique du fluide. (kg/m.s)

$\tau_1$  : transmissivité de vitrage

$\epsilon_c$  : L'émissivité de collecteur

$\epsilon_{sol}$  : L'émissivité de sol

$\gamma_a$  : Rapport de chute de température atmosphérique ( $^\circ C/m$ )

$\theta$  : Paramètre représente la température ( $^\circ C$ )

### Les indices

**ch** : la cheminée

**c** : collecteur

**i**: l'entrée de collecteur

**j**: la sortie de collecteur

**e**: l'entrée de cheminée

**s**: la sortie de cheminée

### **Exposant**

\* : Paramètres adimensionnels.

# Introduction général

---

## *Introduction générale*

Les sources d'énergie sont les matières premières ou les phénomènes naturels employés pour produire de l'énergie. On distingue les énergies fossiles et les énergies renouvelables. Les réserves d'énergies fossiles comme le pétrole et le gaz sont difficilement accessibles (fond des océans, par exemple) et mal réparties à la surface de notre planète, et les problèmes de pollution qui sont causés par l'utilisation de ces sources d'énergie conduisent à trouver d'autres sources d'énergie. L'utilisation actuelle de l'énergie nucléaire exige une technologie développée et peut être dangereuse. Donc les risques réels d'épuisement des sources d'énergies fossiles à terme nous font considérer de plus en plus les sources d'énergies Renouvelables.

Donc, les énergies renouvelables seront à la future les énergies alternatives de L'énergie du pétrole, et le développement préalable de l'exploitation de ce genre des énergies Aura un effet appréciable pour les consommations des énergies qui sont en plus en plus en Croissance.

La cheminée solaire est un dispositif solaire conçu pour transformer l'énergie des Rayons solaires à une énergie cinétique et cette dernière est transformée en ensuite en énergie électrique.

Ce dispositif solaire est l'une de ces études qui intéressent plusieurs pays. Dans L'Australie par exemple une grande cheminée solaire a été construite en 2005, elle produit à partir de l'énergie solaire une puissance électrique de 200 MW et alimente une ville de 200 000 habitants. Donc, la cheminée solaire est déjà mise en application et a montré un succès dans le domaine du développement d'exploitation des énergies renouvelables. Mais toujours l'augmentation de l'efficacité de production de la cheminée solaire fait l'objet de plusieurs études, et parmi les paramètres affectant l'efficacité de la cheminée solaire sont les dimensions, à savoir : la hauteur et le diamètre de cheminée, le rayon de collecteur et la hauteur de toit de collecteur. L'étude de l'effet de ces paramètres sur la production électrique de cheminée solaire sera déjà un intérêt sur l'amélioration de la conception de cet équipement pour une production plus de l'énergie.

# Introduction général

---

Le présent mémoire se compose de l'étude de la production de l'électricité à partir d'un cheminée solaire, du point de vue dynamique de fluide et transfert de chaleur en concentrant notre étude sur l'influence des dimensions climatiques et géométriques de la cheminée solaire à sa efficacité.

1. Le premier chapitre concerne une généralité sur les énergies solaires
2. Le deuxième chapitre explique le principe de la cheminée solaire et les organes principaux intervenant dans son fonctionnement.  
Le mouvement d'air crée sous forme de convection naturel dans la cheminée solaire a conduit à l'utiliser pour produire de l'énergie électrique.
3. Le troisième chapitre concerne une étude du comportement thermique de la cheminée solaire avec une validation de programme MATLAB , et exploité les différentes paramètres intervenant dans la production de l'énergie électrique dans la cheminée solaire. Et une discussion des résultats des paramètres tracés, tels que les différentes courbes de vitesse et de température, la puissance..etc.
4. Le quatrième chapitre est une modélisation mathématique sur les équations régissant le phénomène de la convection naturelle dans une cavité ouverte représentant la cheminée solaire.
5. Le cinquième chapitre est une application du code numérique Fluent, où on va présenter cet outil de calcul numérique. Et une discussion des résultats des paramètres tracés, tels que les contours de vitesse et de température, la pression..etc.

Enfin une conclusion générale sur les résultats aboutis et ainsi que les recommandations qui peuvent être déduites.

# ***CHAPITRE I***

## ***GÉNÉRALITÉS SUR LES ÉNERGIES***

## I.1. Introduction :

Dans beaucoup de régions à travers le monde on voit naître une conscience du fait que des ressources énergétiques alternatives pourraient avoir un rôle important à jouer dans la production de l'électricité.

Cependant, il n'y a que l'énergie solaire qui soit une ressource inépuisable, totalement non polluante et qui puisse être économiquement rentable pour assurer les besoins énergétiques actuels et futurs de l'homme

## I.2.L'énergie solaire :

Ce que l'on désigne par énergie solaire est le rayonnement émis dans toutes les directions par le Soleil, et que la Terre reçoit à raison d'une puissance moyenne de  $1,4 \text{ kW/m}^2$ , pour une surface perpendiculaire à la direction Terre-Soleil. Ce flux solaire est atténué lors de la traversée de l'atmosphère par absorption ou diffusion, suivant les conditions météorologiques et la latitude du lieu ; au niveau du sol, la puissance restante est de l'ordre de  $1 \text{ kW/m}^2$ . La quantité d'énergie utilisable varie entre 800 et 2 500  $\text{kWh/m}^2/\text{an}$ , encore suivant le lieu [1].



**Figure (I.1):** Panneaux solaire photovoltaïque

### **I.2.1. Le Soleil, source de vie :**

Le rayonnement solaire est à l'origine de la plupart des formes d'énergie que nous exploitons les combustibles fossiles, charbon, pétrole et gaz naturel, en sont issus, mais ne sont pas renouvelables à l'échelle de l'humanité. C'est le rayonnement solaire qui est à l'origine des cycles hydrologiques qui alimentent les cours d'eau et les flux aériens, ainsi que les marées océaniques (en liaison avec la Lune) ; c'est lui aussi qui fournit aux végétaux, la biomasse, l'énergie nécessaire à leur développement par photosynthèse. En plus de ces sources d'origine solaire indirecte, il existe des possibilités d'utilisation directe du rayonnement solaire par conversion du rayonnement en chaleur. Mais si le Soleil constitue indéniablement un énorme réservoir d'énergie, inépuisable à l'échelle humaine, son exploitation se heurte au fait qu'elle est diffusée irrégulièrement, qu'elle est de faible densité, et que le rendement de conversion est loin d'être favorable.

### **I.2.2. La propagation du rayonnement solaire dans l'atmosphère :**

Lorsque le rayonnement solaire se propage dans l'atmosphère, il interagit avec les constituants gazeux de celle-ci et avec toutes les particules présentes en suspension (aérosols, gouttelettes d'eau et cristaux de glace). Les particules dont on parle ici ont des dimensions variant du centième de  $\mu\text{m}$  à quelques centaines de  $\mu\text{m}$ .

Le rayonnement solaire peut être réfléchi, diffusé ou absorbé :

- **Réfléchi** par la surface terrestre, c'est-à-dire renvoyé dans une direction privilégiée (Réflexion dite spéculaire) ou de manière diffuse. Le sol réfléchit plutôt le rayonnement de manière diffuse et anisotrope.
- **Diffusé**, c'est-à-dire renvoyé dans toutes les directions. Le phénomène de diffusion se produit dans un milieu contenant de fines particules ou des molécules et dépend fortement de la taille des particules considérées.
- **Absorbé** par les composants gazeux de l'atmosphère. Cette absorption est dite sélective, car elle s'opère pour des valeurs de longueur d'onde bien précises. Elle est due essentiellement à la vapeur d'eau, à l'ozone, au dioxyde de carbone et, à un degré moindre, à l'oxygène.[2]

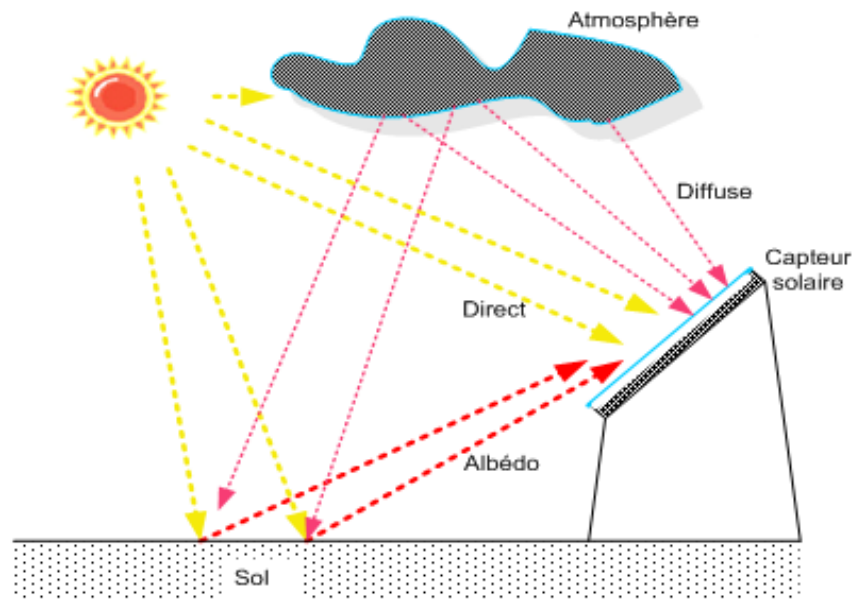


Figure (I.2): Le rayonnement solaire

### I.3. les différents modes de conversion thermiques :

On distingue Trois différents types de conversion thermique de l'énergie (à basse température, a haut température et la conversion photovoltaïque)

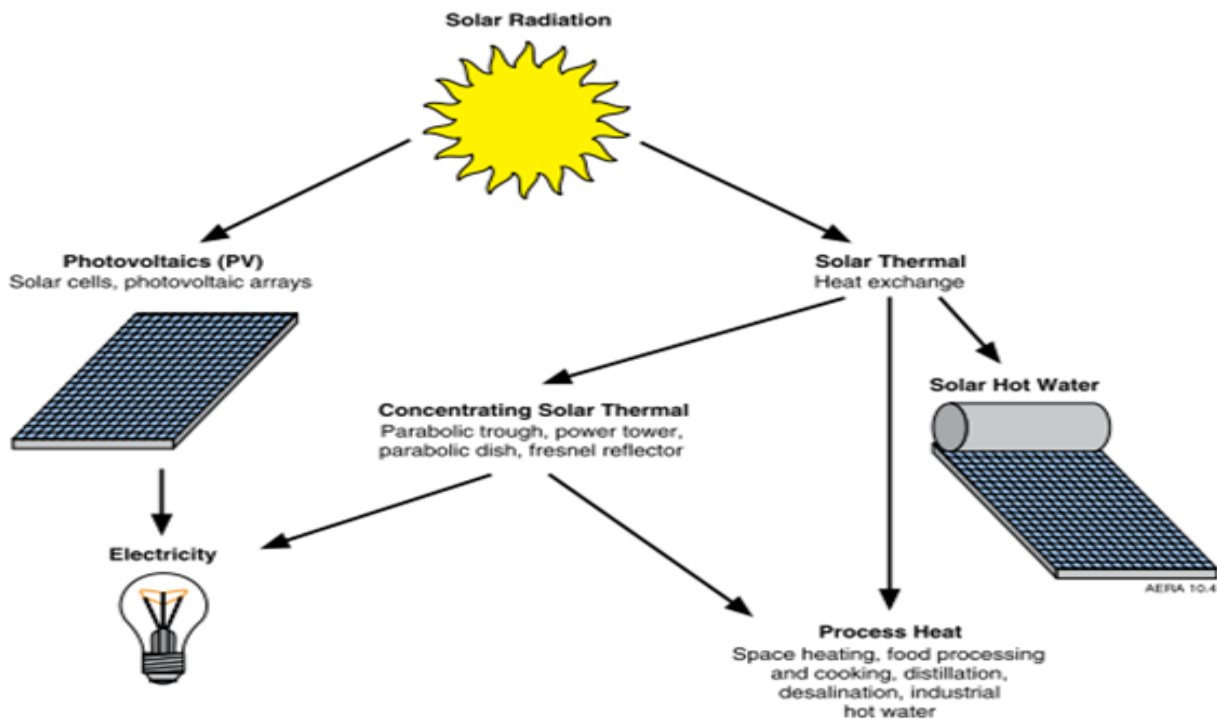


Figure (I.3) : les différents modes de la conversion thermique

### I.3.1. La conversion thermique à basse température:

Le niveau de température varier entre la température ambiante jusqu'à 200°C. On trouve plusieurs applications dans domaine de température (individuelle ou industrielle) permis lesquelles on a :

#### I.3.1.1. Les serre:

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 est converti 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 de rejets industriels, ceux des centrales électronucléaires par exemple [3]

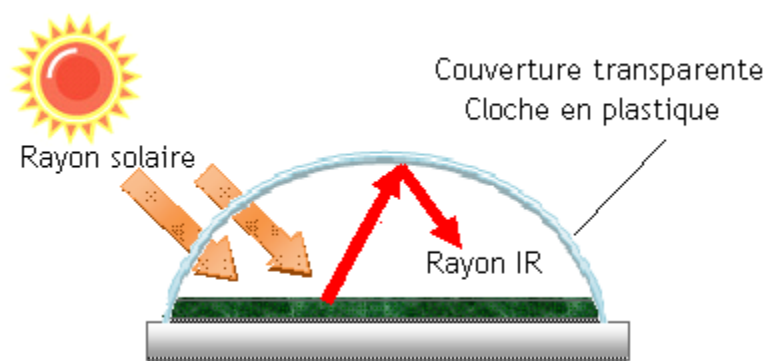
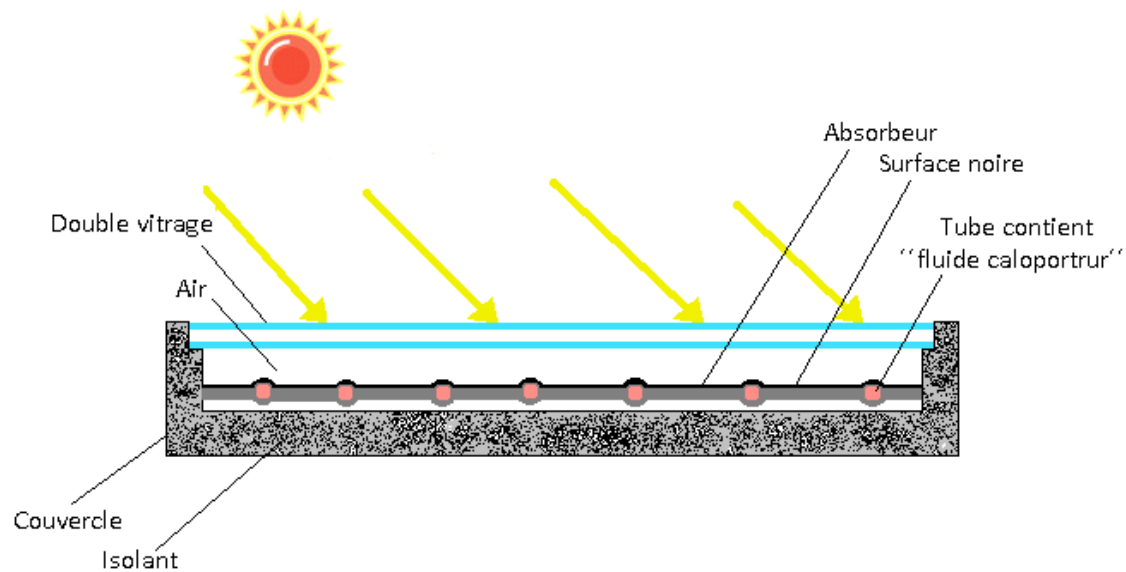


Figure (I.4) : Serre pour cultures

#### 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.5) :** Capteur solaire plan (chauffe-eau solaire)

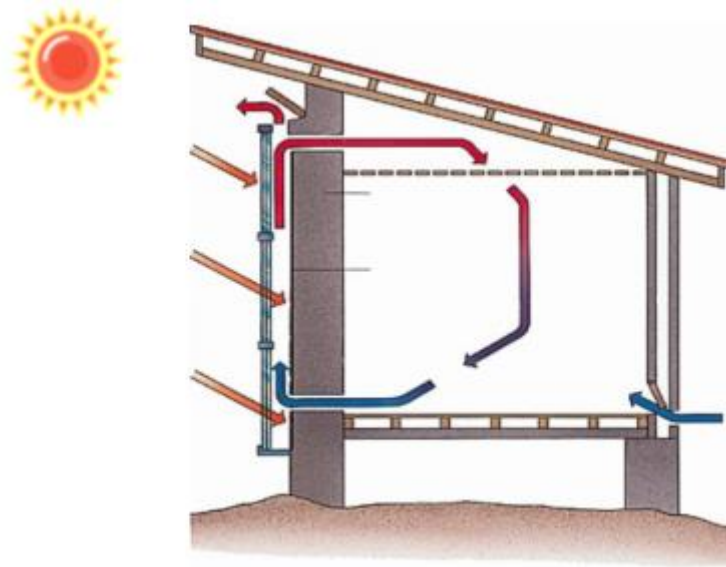
Le couplage de capteurs solaires avec un chauffe-eau électrique assure la fourniture d'eau chaude quelles que soient les conditions d'ensoleillement ; le gain d'un tel chauffe-eau solaire peut être estimé à environ 50 % de la dépense annuelle, avec un amortissement du surcoût d'installation sur une dizaine 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 [3]

### 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 [3]



**Figure (I.6) :** Maison solaire.

### **I.3.2. La conversion thermique à haute température:**

La conversion thermique à haute température son niveau de température varier entre  $T=200^{\circ}\text{C}$  jusqu'à  $450^{\circ}\text{C}$ , on distingue deux types :

#### **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  $45\text{ m}^2$  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  $3\ 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Les recherches portent sur les réactions à hautes températures, les propriétés mécaniques et électriques des matériaux, la préparation d'oxydes réfractaires de grande pureté. [4]



**Figure(I.7):** Le four solaire d'Odeillo

### **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, 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[4]



**Figure(I.8) :** Centrale solaire thermique à concentration

### **I.3.3 La conversion photovoltaïque:**

C'est la transformation directe du rayonnement solaire en électricité dans une photopile. L'effet photovoltaïque découvert en 1839 par Antoine Becquerel est produit généralement dans des disques très minces de silicium monocristallin dont des zones superposées sont dopées par des atomes de bore et de phosphore ; une tension de 0,6 V apparaît entre ces zones. Les photons incidents entrent en collision avec les atomes de la cellule et provoquent un mouvement des charges (électrons) entre les deux zones. L'intensité du courant continu fourni est de  $0,03 \text{ A/cm}^2$  de cellule.

Avec un prix de revient de l'ordre de cinq (5) euros le watt installé, un rendement de l'ordre de 15 % pour les photopiles industrielles, une durée de vie de 15 à 20 ans, et une grande sensibilité à l'humidité, ce type de convertisseur d'énergie est principalement intéressant pour les installations difficilement raccordables à un réseau de distribution électrique : balises, signalisation routière aérienne ou maritime, relais hertziens, systèmes de pompage, habitations isolées. Le développement des photopiles passe par une amélioration du rendement de conversion et un abaissement substantiel du prix de revient. Des matériaux autres que le silicium cristallin font l'objet de recherches et/ou de développements, tel le silicium amorphe qui revient moins cher (utilisé dans les calculettes, montres, détecteurs, capteurs) et le silicium poly

Cristallin à l'arséniure de gallium. Il reste que, en France, un module photovoltaïque bien orienté (exposition Sud, inclinaison d'environ 30°, sans ombre portée au module) de 1 m<sup>2</sup> fournit une puissance d'environ 100 Wc (watt crête). Une installation de 20 m<sup>2</sup> (2 kWc), qui produira environ 2 000 kWh par an, revient en moyenne à 15 000 € TTC pose comprise. Les recettes annuelles dues à la vente du courant ne dépassent pas 300 €, l'investissement n'est donc rentable qu'après 50 ans

Des centrales électriques sont en cours d'expérimentation en Allemagne, en Suisse, en Espagne, ainsi qu'en Italie qui détient la plus puissante pour l'Europe : 2 600 000 cellules pour une puissance de 3,3 MW[4]

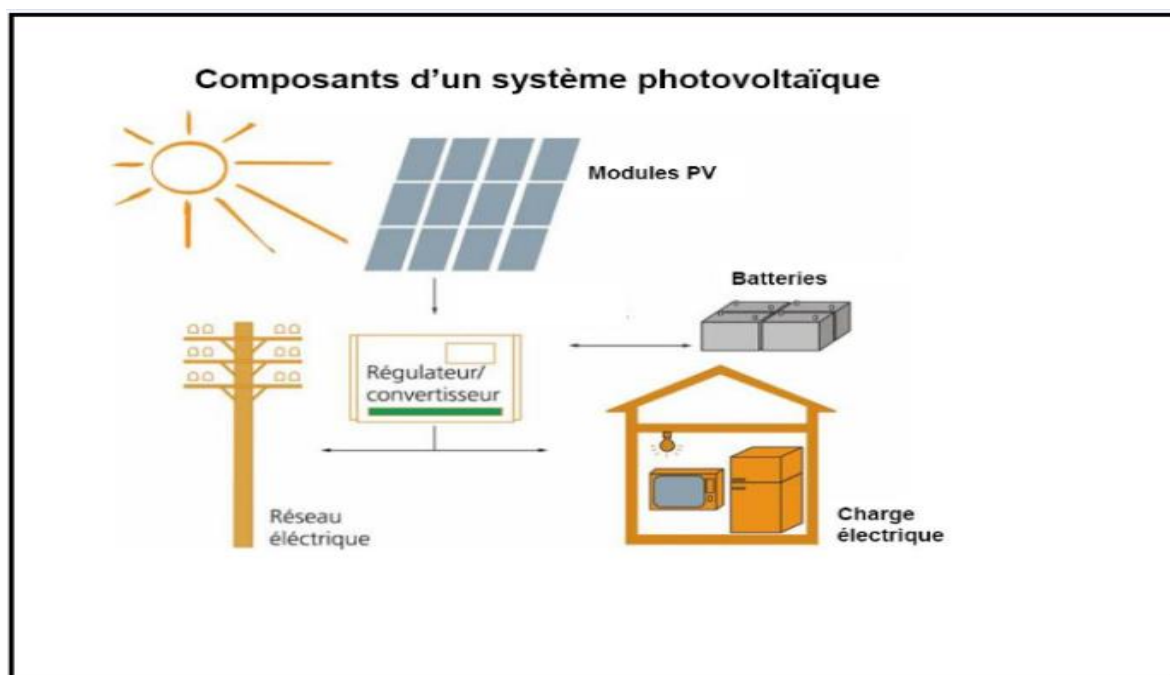


Figure (I.9): Composants d'un système photovoltaïque

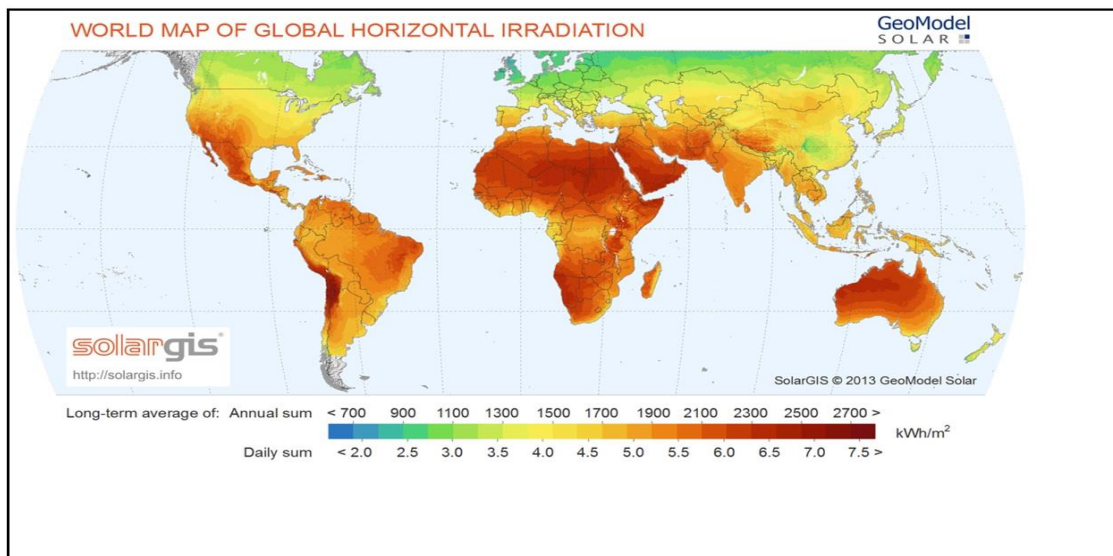
#### I.4. Le gisement solaire :

Les études faites par le Centre Aéronautique et Spatial Allemand (DLR) montrent que l'implantation de centrales thermiques solaires (Concentrating Solar Power, CSP) sur moins de 1% de la surface désertique de la région l'Afrique du nord et le moyen orient « MENA » produirait assez d'électricité et d'eau pour l'EU-MENA.[5]. Le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois.[6]

### I.4.1. Le gisement solaire dans le monde :

Le solaire a concentration nécessite un ensoleillement direct élevé et un faible taux d'humidité, il est particulièrement adapté au sud-ouest américain, au Moyen-Orient, en Afrique du nord, au pourtour méditerranéen, aux déserts d'Australie ou du Chili. Les Etats-Unis et l'Espagne sont actuellement les deux marchés les plus importants et les plus attractifs. Des tentatives récentes de tracer la carte de la ressource DNI dans le monde ont été accomplies en se basant sur des données satellites. Les régions désertiques du globe (Grand Sahara, Sud-ouest des Etats-Unis d'Amérique, Australie, Afrique du Sud) recevant jusqu'à 2900 kWh/m<sup>2</sup>/an de rayonnement direct fournissent largement la surface nécessaire à une production massive d'énergie par les technologies à concentration [7].

Nous pouvons illustrer la répartition de gisement solaire mondiale dans la figure I.10



**Figure(I.10) :** Distribution du gisement solaire dans le monde

Les pays du Maghreb ont un potentiel solaire élevé. Les taux d'irradiation solaire effectués par satellites par l'Agence Spatiale Allemande (DLR), montrent des niveaux d'ensoleillement exceptionnels de l'ordre de 1200 kWh/m<sup>2</sup>/an dans le Nord du Grand Sahara. Par contre, les meilleurs taux d'irradiation solaire en Europe sont de l'ordre de 800 kWh/m<sup>2</sup>/an limités à la partie sud de l'Europe. [8] Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen.

# ***CHAPITRE II***

## ***DESCRIPTION DE***

## ***LA CHEMINÉE***

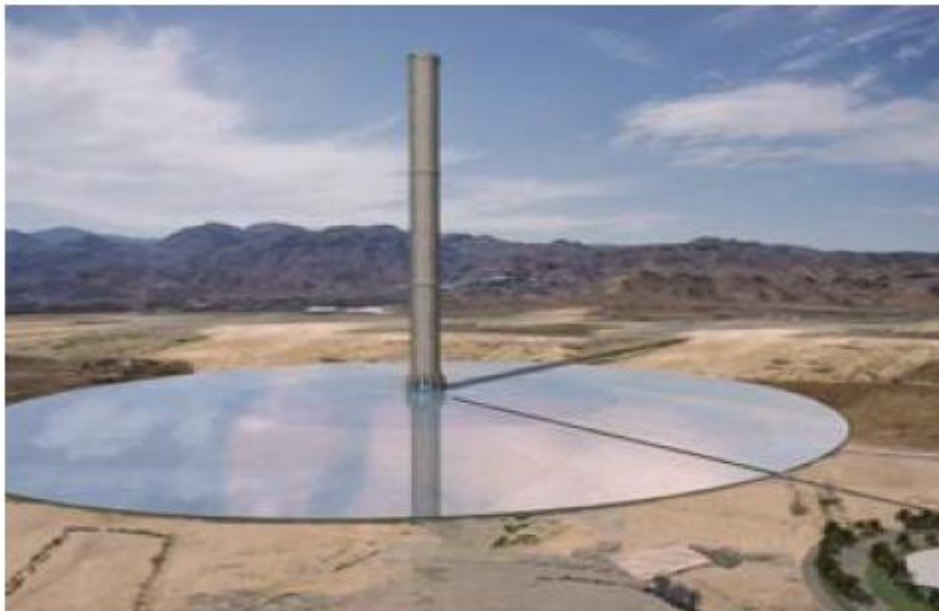
## ***SOLAIRE***

**II.1. Introduction:**

La cheminée solaire (CS) 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. Elle repose sur l'idée d'exploiter l'énergie cinétique des mouvements de convection naturelle de l'air chauffé par le soleil.

Une immense serre appelée « collecteur » contient l'air chauffé par le rayonnement solaire et le guide vers une cheminée. Cet air chaud, naturellement aspiré par cette cheminée, est continûment renouvelé par l'air situé à la périphérie de la serre. La cheminée solaire est équipée des tubes noirs contenant de l'eau qui absorbent la chaleur toute la journée pour la restituer pendant la nuit, un vent régulier se met alors en place. L'énergie cinétique de l'air est ensuite prélevée par un système des turbines éoliennes entraînant des générateurs d'électricité.

Cette simplicité confère des avantages majeurs en termes de coûts de construction, de Maintenance, de robustesse et de durée de vie [9].



**Figure (II.1)** Cheminée solaire

## **II.2. La cheminée solaire :**

### **II.2.1. Historique :**

Le concept de la Tour Solaire fut formalisé en 1968 par Jorg Schlaich ingénieur et chercheur de nationalité allemande. En 1981 et 1982, un prototype, financé par le Ministère Allemand de la Recherche et des Technologies (BMFT) et réalisé par la société d'ingénierie Schlaich Bergermann und Partner (SBP), fut construit à Manzanares (Espagne) et fonctionna jusqu'à son arrêt en 1989. La centrale a pu fournir une puissance de 50 kW en maximum. La turbine a fonctionné jour et nuit (grâce au stockage thermique du sol) en 1987, réalisant ainsi une moyenne de plus de 8h45' par jour. A la suite de cette série d'essais, de nombreuses recherches publiques et privées ont été menées jusqu'à aujourd'hui. A présent, deux consortiums d'entreprises, auxquels participe l'entreprise SBP, ont prévu la réalisation des deux premières Tours Solaires à grande échelle. Les travaux devraient démarrer en 2006 en Australie et en 2007 en Espagne. Parallèlement le bureau d'ingénierie de OTH baptisé Elioth a breveté au début de l'année 2006 le concept de Montagnes Solaires. Fondé sur le même principe, la cheminée est ici remplacée par un conduit qui épouse le relief montagneux [10].

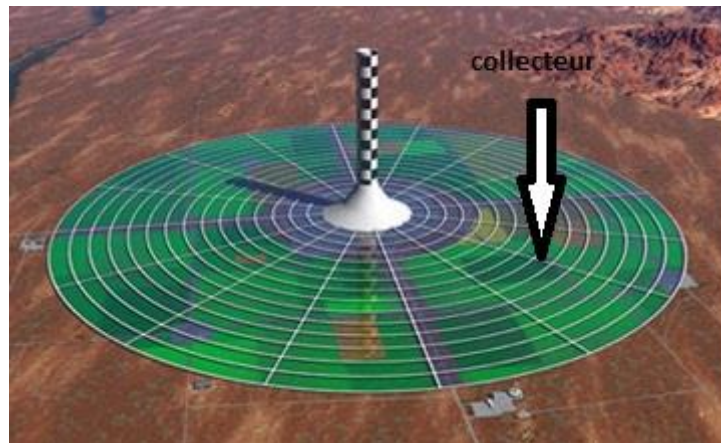
### **II.2.2. Principaux éléments de la cheminée solaire:**

Les différentes parties d'une tour solaire sont : le collecteur, la cheminée et la turbine.

#### **II.2.2.1. Le Collecteur:**

Le collecteur est la partie qui est employée pour produire l'air chaud par effet de serre.

Un toit en vitre ou en film plastique et la terre naturelle en dessous forment un collecteur d'air. Le collecteur est ouvert à la périphérie pour permettre l'introduction de l'air frais. Le toit du collecteur (qui est supporté quelques mètres au-dessus de la terre) a pour but de rassembler les rayons solaires pour réchauffer la masse d'air à l'intérieur du collecteur. Donc placée une cheminée verticale avec un joint étanche entre sa base et le toit. La hauteur de toit augmente au voisinage de la base de cheminée, afin que l'air soit détourné en mouvement vertical. Il est avantageux d'augmenter la capacité du toit de collecteur, en fournissant un double vitrage près de la cheminée [11].



**Figure (II-2):** Collecteur de cheminée solaire

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 appropriés, sa durée de vie peut facilement être de 60 ans ou plus.

#### **II.2.2.2. Cheminée :**

La cheminée elle-même est le moteur réel de l'équipement. Pour créer un écoulement d'air sous forme de vent, il faut engendrer une différence de pression.

Il faut que la hauteur de la cheminée soit plus élevée, pour atteindre un niveau de basse pression par rapport au niveau de la base. 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

La base est fixée sur la terre par des supports, qui séparent entre les entrées de l'air, ce qui permet d'augmenter la vitesse d'écoulement. La cheminée est généralement construite en béton armé [11].



**Figure (II.3) :** Cheminée de tour Solaire Australienne

Plus haute est la cheminée, plus importante est la quantité d'énergie produite par la tour solaire. L'efficacité de la cheminée ne dépend pas de la température de l'air entrant, mais de la différence de température avec l'air extérieur en haut de la cheminée. Donc l'efficacité est directement proportionnelle au ratio entre la hauteur de la cheminée et la température extérieure. Cependant, bien que l'efficacité soit proportionnelle à la hauteur de la cheminée, dans la pratique il y a une limitation.

### **II.2.2.3. Turbine éolienne :**

Les turbines sont toujours placées à la base de la cheminée où la vitesse d'écoulement d'air est plus élevée, pour transformer le maximum d'énergie cinétique en énergie mécanique.

Le générateur entraîné par la turbine transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

Le nombre de turbines utilisées est soit une turbine dont les pales couvrent la coupe transversale de la cheminée, soit de petites turbines distribuées sur toute la section de la cheminée. Mais il est aussi possible d'arranger entre la verrière et la base de la cheminée un grand nombre de petites turbines avec des axes horizontaux à la périphérie de la section du passage [11].

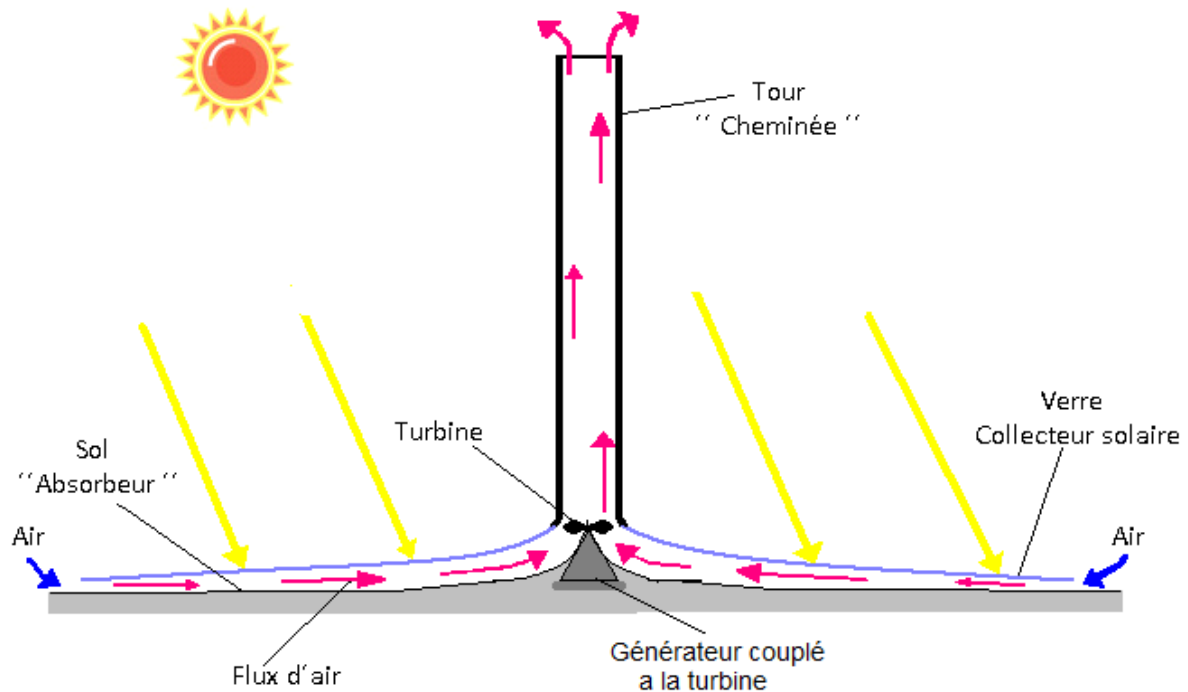


**Figure (II-4):** Turbine pour Cheminée Solaire de large diamètre

### **II.2.3.Principe de fonctionnement de la cheminée solaire :**

L'air est chauffé par le rayonnement solaire sous l'effet de serre dans le collecteur qui est ouvert à la périphérie pour introduire l'air frais, et puisque l'air le plus chaud est plus léger que l'air froid, il s'élève en haut d'une cheminée localisée au centre du collecteur.

Une turbine éolienne à la base de la cheminée est mise dans la trajectoire de l'écoulement de l'air pour convertir l'énergie cinétique de l'air écoulant en énergie mécanique, et le générateur entraîné par la turbine convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Une cheminée solaire avec un terrain large pour le collecteur et une cheminée plus haute peut produire de 100 à 200 MW pendant la journée [12].



Figure(II.5): Schéma présentatif de la cheminée solaire.

#### II.2.4. Phénomène majeur : Le thermosiphon

Le phénomène de thermosiphon, présent dans une cheminée tour solaire, est primordial à son fonctionnement. Ce système repose sur le principe de la poussée d'Archimède qui est caractéristique d'une variation de masse volumique [13].

En effet, l'air chaud et froid ont des masses volumiques différentes et l'air chaud est plus léger que l'air froid : l'air chaud est donc poussé dans la cheminée par l'air de température strictement inférieure, et s'élève ainsi

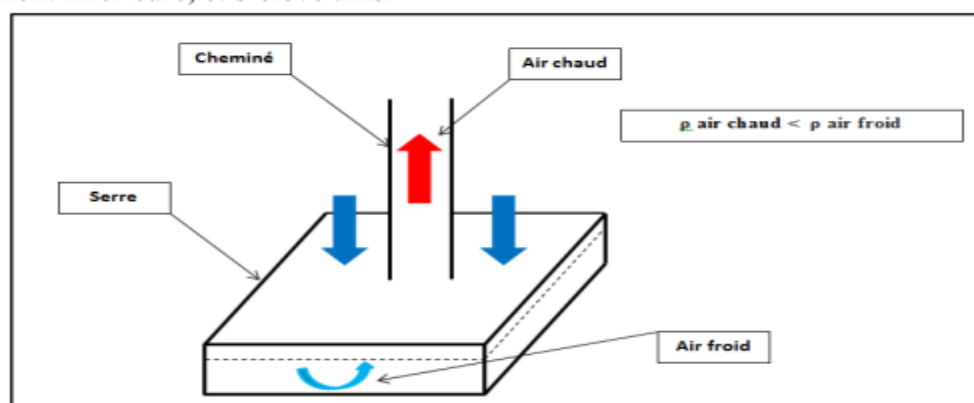
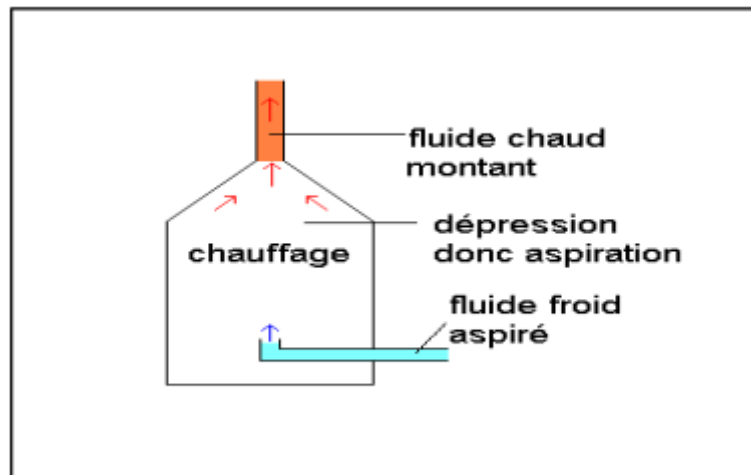


Figure (II-6): Schéma illustrant la circulation de l'air

Par définition, le thermosiphon est un système de pompage des fluides (gaz ou liquide) basé sur la dilatation et la poussée d'Archimède.

Un thermosiphon se compose d'une chambre de chauffage du fluide, d'une entrée basse et d'un conduit vertical (cheminée) positionné en haut de cette chambre. Le fluide chauffé s'élève et sort de la chambre par la cheminée et aspire alors le fluide froid sortant du conduit bas.



**Figure (II-7):** Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'un Thermosiphon

Dans notre étude, la chambre de chauffage du fluide est la serre qui permet de chauffer l'air froid entrant. L'entrée basse est donc représentée par les ouvertures l'air situé entre le socle et la serre et le conduit vertical est donc la cheminée.

Le principe du thermosiphon est utilisé dans les installations de chauffage et de production solaire. Le déplacement du fluide caloporteur s'effectue uniquement grâce à la convection.

Un fluide caloporteur est un fluide chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de températures. De plus, la convection naturelle est un phénomène de la mécanique des fluides qui se produit lorsqu'une zone change de température et qu'elle se déplace alors verticalement sous l'effet de la poussée d'Archimède. Le changement de température d'un fluide influe en effet sur sa masse volumique, qui se trouve modifiée par rapport à la masse volumique du fluide environnant. De tels déplacements s'appellent des mouvements de convection. Nous remarquons que toutes ces explications théoriques sont spécifiques à notre fonctionnement de cheminée tour solaire. Ainsi, le phénomène de thermosiphon est donc indispensable à tout bon fonctionnement de cheminées solaire.

**II.3. Le stockage d'énergie :**

La cheminée solaire fonctionne en présence du rayonnement solaire c'est à dire qu'elle 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[11].

**II.3.1. Les différentes méthodes de stockage :**

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

**II.3.1.2. Par chauffage du sable :**

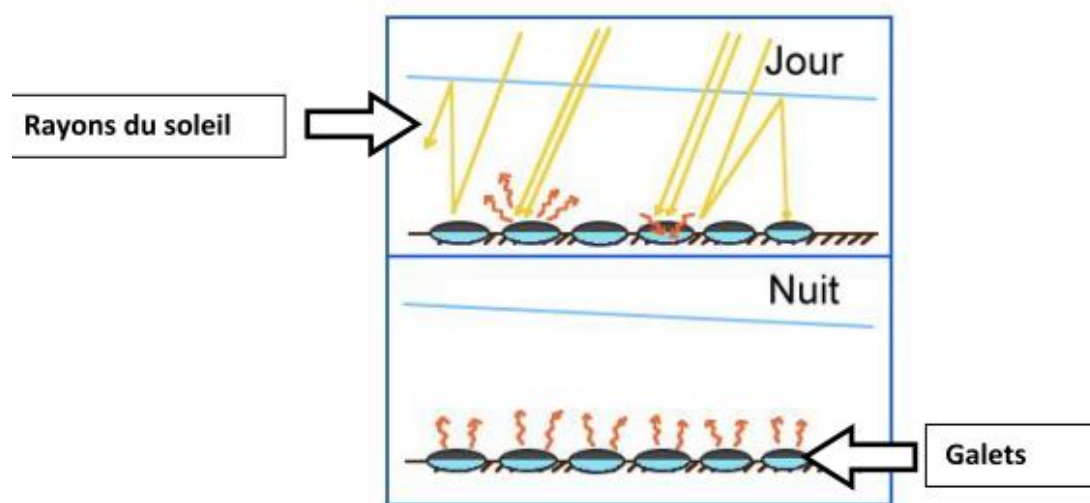
Le sable chauffe et absorbe la chaleur du soleil, le flux d'air chaud transmis à la cheminée assure la production d'électricité en faisant tourner la turbine à l'intérieur de la tour[14].

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.

**II.3.1.3. 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-15):

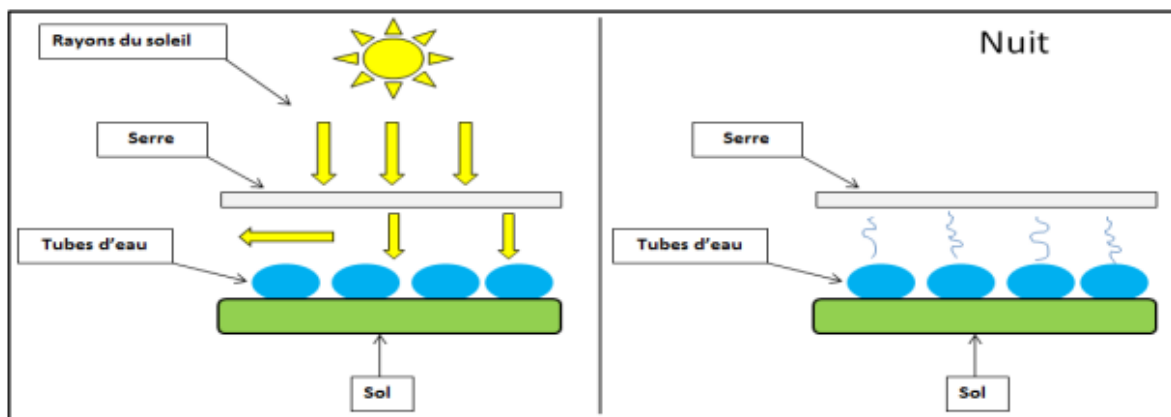


**Figure (II-8):** Principe du stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des galets

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.

#### II.3.1.4. 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 (II-9).



**Figure (II-9):** Principe du stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des tubes noirs remplis d'eau

Les 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 [13].

#### **II.4. Avantages et inconvénients de la cheminée solaire :**

##### **II.4.1. Avantages: [15]**

- Le collecteur peut employer tout le rayonnement solaire, direct et diffus.
- En raison du système de stockage de chaleur, la cheminée solaire actionnera 24 h sur l'énergie solaire pure.
- Les cheminées solaires sont particulièrement fiables et non exposées à décomposer, dans la comparaison avec d'autres installations de production solaires.
- Vue de la robustesse de sa structure, la cheminée solaire n'a pas besoin d'un grand entretien et fonctionne naturellement. Elle n'exige pas des carburants non renouvelables pour le fonctionnement et ne produit pas n'importe quelles émissions.
- Les cheminées solaires n'a pas besoin de l'eau de refroidissement. C'est un avantage principal dans les nombreux pays ensoleillés qui ont déjà des problèmes majeurs avec l'eau potable.
- Les matériaux de construction requis pour les cheminées solaire, principalement béton et verre, sont disponibles partout en quantité suffisante.
- Elle a une longue durée de vie (au moins 80 à 100 ans). La technologie d'une centrale électrique de cheminée solaire ne deviendra pas périmée facilement.
- La Tour Solaire est particulièrement fiable et nécessite peu de maintenances Comparativement aux autres usines de production d'électricité.

##### **II.4.2. Inconvénients: [11]**

- L'investissement de départ est plus élevé
- La production n'est pas constante pendant le jour ou l'année.
- Aucune structure d'échelle semblable n'a été construite auparavant.

- La construction de la cheminée demande des quantités énormes de matériels. Ces quantités peuvent causer des problèmes logistiques appartenant à la disponibilité et le transport des matériels.
- Le collecteur occupe une immense surface.
- Impact visuel négatif (certains y voient une dégradation du paysage).

## **II.5. Quelque Projets réalisés de la cheminée solaire:**

### **II.5.1. Le projet australien :**

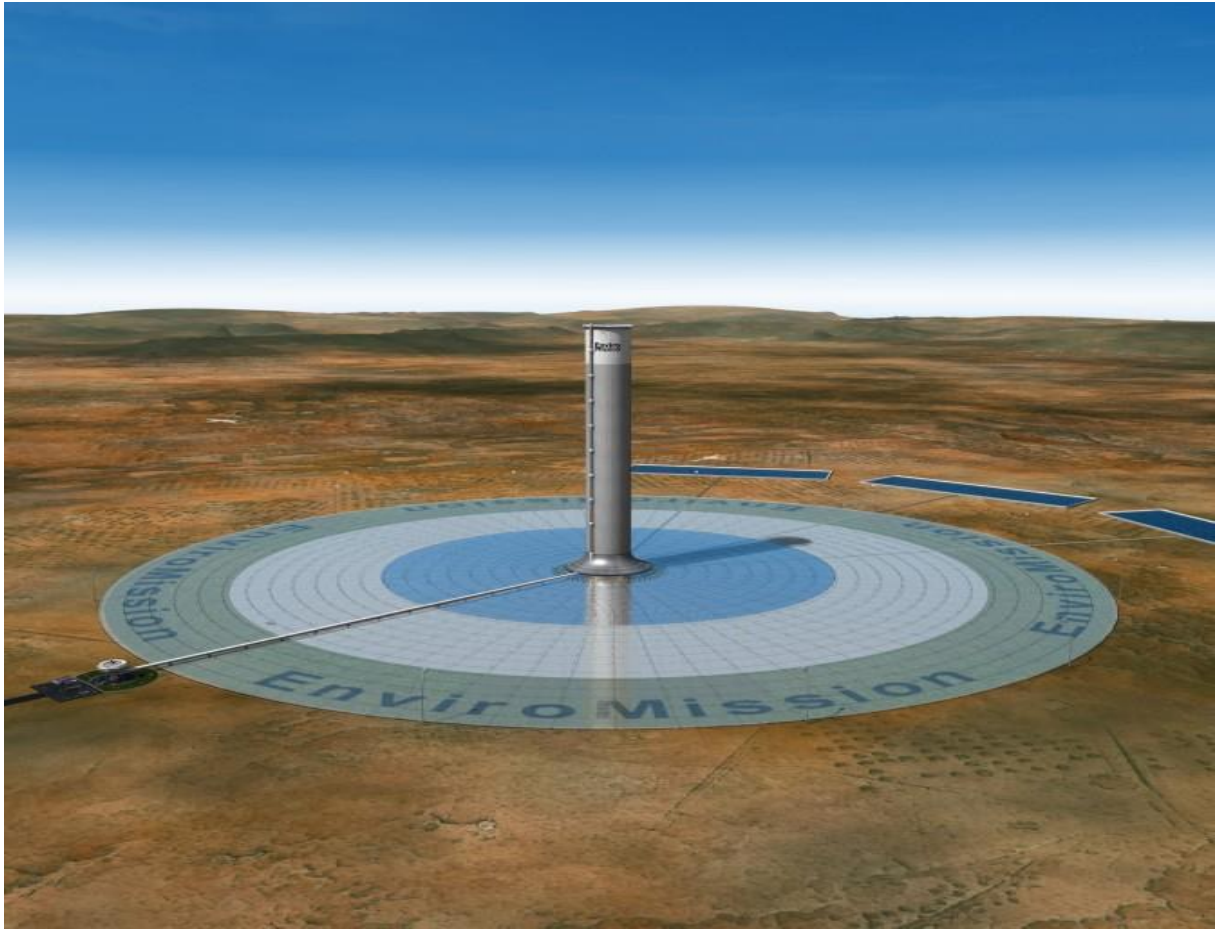
Un projet de tour solaire, appelé Projet de Buronga, est actuellement développé en Australie par la société « Enviromission ». La cheminée aurait 990 mètres de hauteur, 70 mètres de diamètre (Figure II-19).

La centrale fournirait 200 MW de puissance électrique, de quoi approvisionner en électricité environ 200 000 logements. Il s'agit d'un des projets les plus ambitieux de la planète pour la production d'énergie renouvelable sûre et propre, les centrales solaires existantes ou en projet sont plutôt de l'ordre de 10 MW, soit 20 fois moins. L'énergie produite reste largement inférieure à celle d'un réacteur nucléaire moderne (soit encore 7 fois plus), mais soutient la comparaison

Le coût d'investissement serait d'environ 400 millions d'euros, ce qui implique un coût d'investissement de 2 €/W. Par comparaison, un système photovoltaïque de 2008 coute environ le triple, tandis que la récente centrale solaire thermodynamique (11 MW) a couté 3,2 €/W, soit 1,6 fois plus. Le kWh fourni resterait néanmoins toujours cinq fois, plus cher que L'électricité de charbon, qui représente 95% de la production en Australie [16].

#### **II.5.1.2. Spécifications du projet :**

- Une cheminée de 990 m de haut.
- Un collecteur de 7 km de diamètre, soit 38,5 km<sup>2</sup> de verre et de plastique.
- Température de l'air chauffé dans la cheminée : 70 °C.
- Vitesse de l'air dans la cheminée : 15 m/s (54 km/h).
- 32 turbines.
- Puissance produite : 200 MW.



**Figure (II-10):** La Cheminée Solaire Australienne

Le coût de construction de la Tour Solaire est estimé à \$395 millions de dollars.

(Approximativement 14% de plus que pour une usine équivalente au charbon, et environ 70%

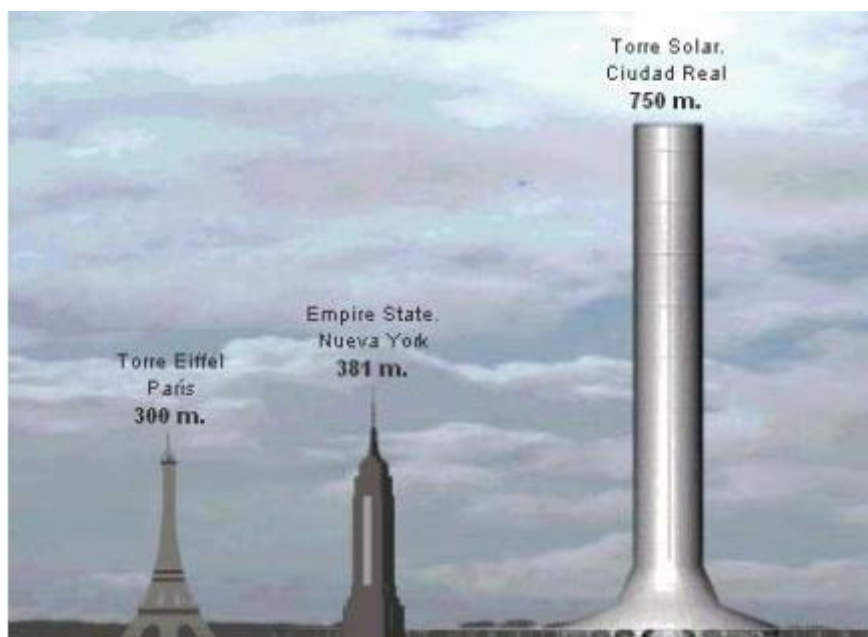
Plus par mégawatt installé qu'une ferme éolienne comparable).

Le gouvernement Australien avait pour objectif de produire en 2010, 2% de son

Énergie à partir de sources renouvelables (9500GWh): but aisément atteignable.

### II.5.2. La Cheminée Solaire Espagnole:

Un projet ambitieux en Espagne prévoit l'installation d'une tour solaire de 750 mètres, dans la localité de Fuente el Fresno, un village de la Province de Ciudad Real et les travaux devraient être menés en collaboration avec des entreprises espagnoles. Cette tour de 750 mètres de hauteur serait dès lors la plus haute de ce genre et aurait un diamètre de 3km de serre couvrant 350 hectares dont 250 hectares pourraient être utilisés pour la culture de légumes sous serre. La vitesse de l'air à l'intérieur de la cheminée serait de 12m/s (Figure II-20) [16].



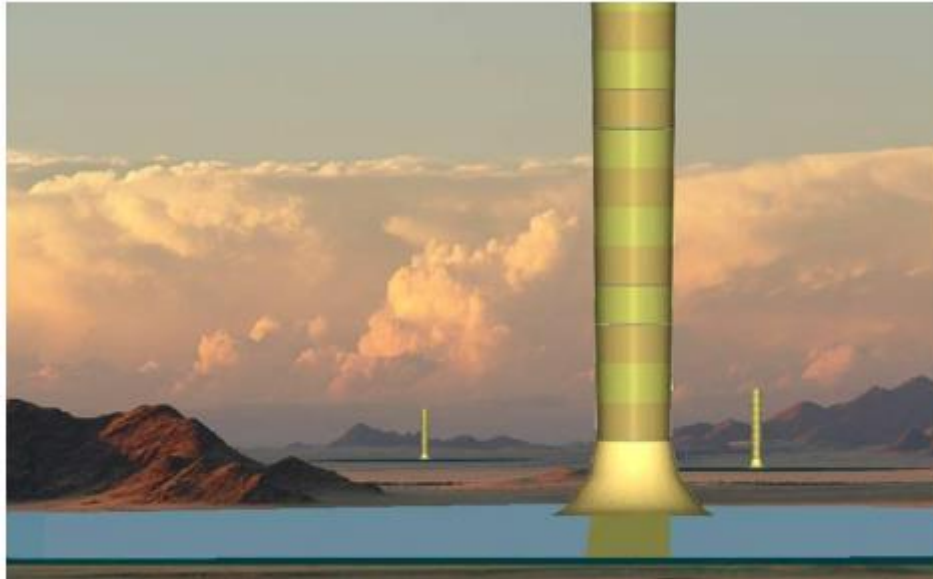
**Figure (II-11):**La Cheminée Solaire de Ciudad Real

#### II.5.2.1. Spécifications du projet :

- Une cheminée de 750 m de haut.
- Un collecteur de 3 km de diamètre, couvrant 350 hectares, dont 250 hectares pourraient être utilisés pour la culture de légumes sous serre.
- Vitesse de l'air dans la cheminée : 43 km/h.
- Puissance de l'installation : 40 MW, soit la demande en électricité d'environ 120 000 personnes.
- Coût du projet : 240 millions d'euros

**II.5.3. La Cheminée Solaire Namibienne:**

Cette tour solaire, baptisée Green tower sera de 1,5 km de hauteur et de 280 mètres de diamètre et va fonctionner en générant un courant d'air ascendant, produisant 400MW d'électricité. La superficie de la serre sera de 38,5 km<sup>2</sup> (7 km de diamètre) et d'un coût total prévu 01 milliard de dollars (Figure II-12) [17]:



**Figure (II-12):**La Cheminée Solaire Namibienne

# ***CHAPITRE III***

## ***ETUDE DU COMPORTEMENT THERMIQUE DE LA CHEMINÉE SOLAIRE***

### III.1. Introduction :

Beaucoup de facteurs, tels que les matières employées pour construire la cheminée solaire, taille de la cheminée solaire, matériaux de collecteur (capteur solaire), et le contenu de sol ou de roche sous le capteur solaire, peuvent influencer à la performance de la cheminée solaire. En outre, l'important pour la production d'électricité est la turbine éolienne et le contrôle de système de la cheminée solaire.

Ici une méthode simple est rapportée, qui prend en considération le rendement de collecteur solaire, de travail utile et de courant électrique de la turbine, et évalue l'exécution de la centrale solaire de cheminée rapporté.

Dans ce chapitre on présente une étudié de comportement dynamique et thermique et les performances énergétiques de la cheminée solaire en matière de puissance générée par la turbine, afin de prédire la puissance électrique produite par la cheminée solaire

### III.2. Analyse mathématique :

L'analyse de la cheminée solaire dépend essentiellement des paramètres suivants qui influencent a la puissance de la cheminée solaire comme représenté sur la figure 1:

- 1) Les conditions ambiantes qui sont représentés par l'ensoleillement, de la température ambiante et la vitesse du vent.
- 2) La configuration de la tour solaire qui sont représentés par les dimension s de la cheminée et le collecteur (la hauteur de cheminée  $H$ , et le rayon de collecteur  $R$ , et la hauteur de collecteur  $h$ , et le diamètre de cheminée  $D$ ).

Le modèle mathématique de la cheminée solaire a été développé sur la base de l'équilibre énergétique dans les hypothèses suivantes :[18]

- La performance de la centrale est analysée au débit de l'état d'équilibre [19], parce que le rayonnement solaire est de nature transitoire.
- L'air est un gaz parfait et l'écoulement est incompressible dans la cheminée depuis le nombre de Mach est inférieure à 0,3 [20].
- La chaleur rayonnée vers la cheminée est ignorée étant donné que la zone de surface du collecteur est beaucoup plus grande que la surface de la cheminée. Par conséquent, l'équation de transfert de chaleur est considéré pour le collecteur [20]
- Le flux d'air dans le système est due à la force de flottabilité dans la cheminée solaire [21]
- L'écoulement dans le collecteur est considéré comme un écoulement entre deux plaques parallèles [22]

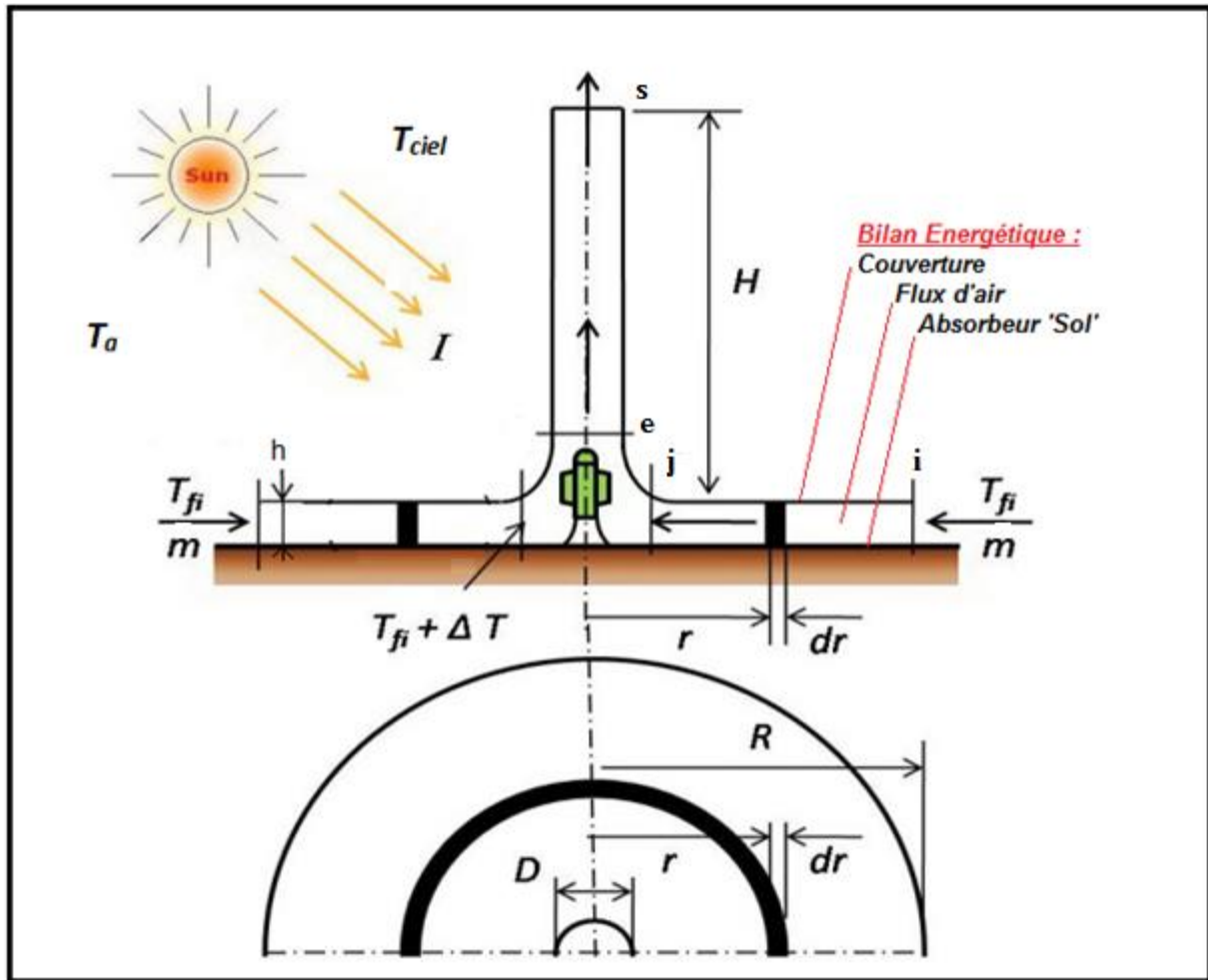


Figure (III.1) : Schéma de la tour solaire simplifié pour les équations d'énergie

### III.3.bilan énergétique :

Des équations de bilan énergétique pour les trois parties de la cheminée solaire, la couverture en verre, le flux d'air et l'absorbeur sont déterminées.

#### III.3.1. Bilan énergétique au niveau du vitrage :

La propriété physique la plus intéressante du verre est qu'il permet de laisser passer le rayonnement solaire et d'arrêter le rayonnement infrarouge d'un émetteur tel que l'absorbeur. Le vitrage absorbe la chaleur provenant du rayonnement solaire et de l'absorbeur. Cette chaleur est perdue par convection avec l'air dans la cheminée et l'air ambiant et par rayonnement vers le ciel.

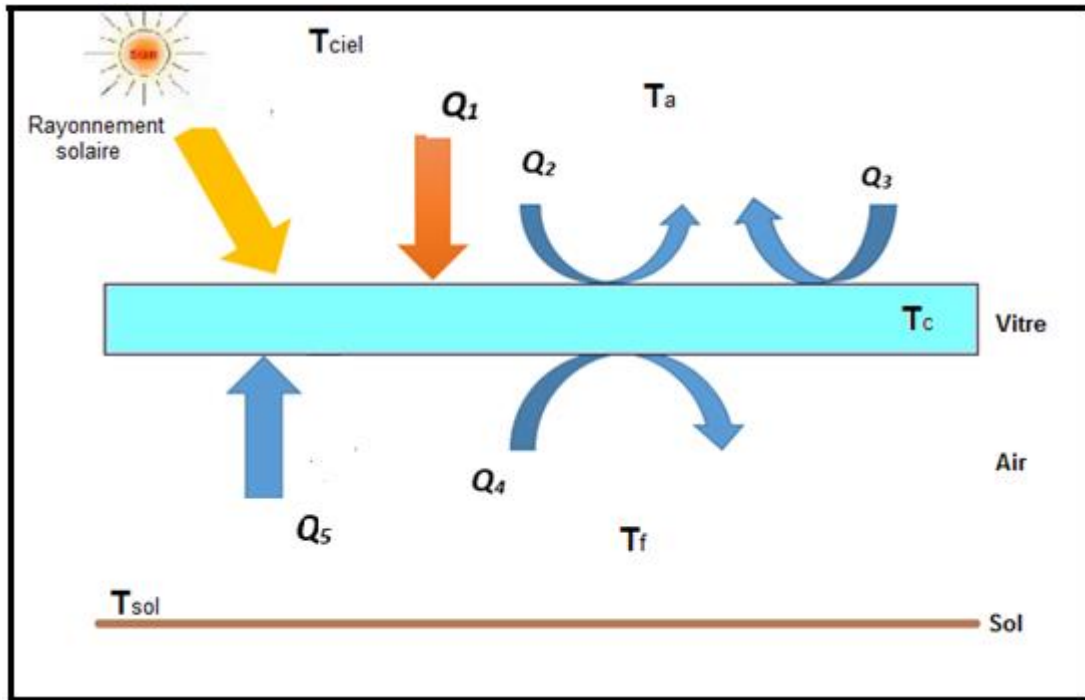


Figure (III.2) : Bilan énergétique au niveau de vitrage

Le rayonnement solaire incident = le rayonnement réfléchi par l'absorbeur+ chaleur par convection de vitrage vers l'air de la cheminée + pertes thermiques de vitrage vers l'extérieur

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

$$\alpha_1 A_c I = A_c h_v (T_c - T_a) + A_c h_{r\ ciel} (T_c - T_{ciel}) + A_c h_{cf} (T_c - T_f) + A_c h_{r\ c-sol} (T_c - T_{sol})$$

Simplification de surface  $A_c$  :

$$\alpha_1 I = h_v (T_c - T_a) + h_{r\ ciel} (T_c - T_{ciel}) + h_{cf} (T_c - T_f) + h_{r\ c-sol} (T_c - T_{sol})$$

$$\alpha_1 I = h_v T_c - h_v T_a + h_{r\ ciel} T_c - h_{r\ ciel} T_{ciel} + h_{cf} T_c - h_{cf} T_f +$$

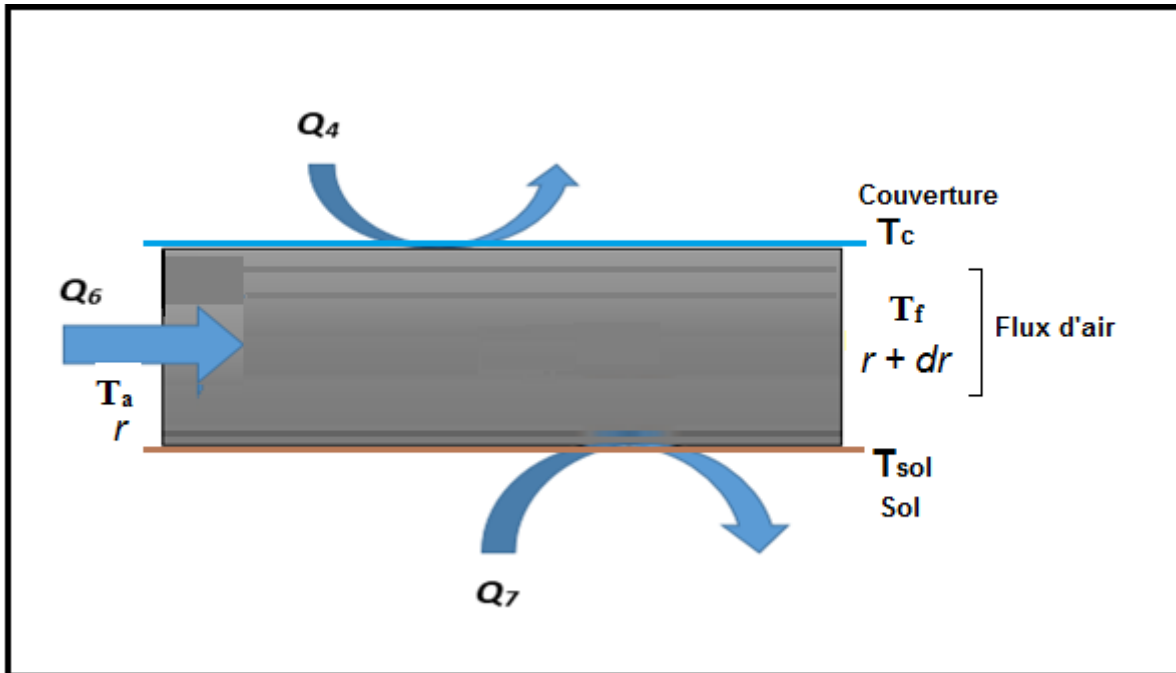
$$h_{r\ c-sol} T_c - h_{r\ c-sol} T_{sol}$$

$$\alpha_1 I + h_v T_a + h_{r\ ciel} T_{ciel} + h_{cf} T_f + h_{r\ c-sol} T_{sol} = h_v T_c + h_{r\ ciel} T_c + h_{cf} T_c + h_{r\ c-sol} T_c$$

On posse :  $C_1 = h_v + h_{r\ c-ciel} + h_{r\ c-sol} + h_{cf}$

$$C_1 T_c - h_{cf} T_f - h_{r\ c-sol} T_{sol} = \alpha I + h_v T_a + h_{r\ ciel} T_{ciel} \dots \dots \dots (III.1)$$

**III.3.2. Bilan énergétique au niveau du flux d'air :**



**Figure (III.3) :** Bilan énergétique au niveau du flux d'air

L'air dans le collecteur reçoit des flux convectifs de la part de l'absorbeur (sol) et du vitrage. Donc, il se produit un flux convectif au niveau de l'air qu'on peut le déterminer par le bilan suivant :

$$Q_6 = Q_4 + Q_7$$

$$mC_p dT_f = h_{cf} A_c (T_c - T_f) - h_{sol-f} A_c (T_f - T_{sol})$$

$$mC_p dT_f = h_{cf} (2\pi r dr) (T_c - T_f) - h_{sol-f} (2\pi r dr) (T_f - T_{sol})$$

$$\frac{dT_f}{dr} = \frac{h_{cf}}{m C_p} (2\pi r) (T_c - T_f) - \frac{h_{sol-f}}{m C_p} (2\pi r) (T_f - T_{sol})$$

On pose :  $C_2 = \frac{h_{cf}}{m C_p}$ ,  $C_3 = \frac{h_{sol-f}}{m C_p}$

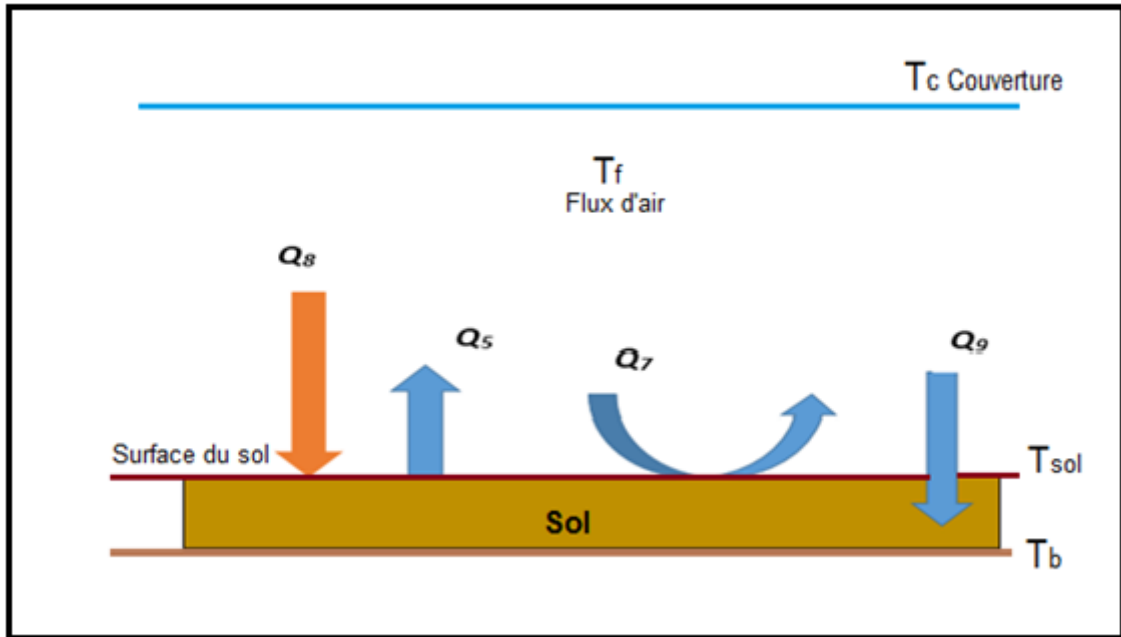
$$\frac{dT_f}{dr} = C_2 (2\pi r) (T_c - T_f) - C_3 (2\pi r) (T_f - T_{sol})$$

$$\frac{dT_f}{dr} = C_2 (2\pi r) T_c - (2\pi r) C_2 T_f - (2\pi r) C_3 T_f - (2\pi r) C_3 T_{sol}$$

on pose :  $C_4 = C_2 + C_3$

$$\left(\frac{d}{dr} + (2\pi r) C_4\right) T_f - (2\pi r) C_3 T_{sol} - (2\pi r) C_2 T_c = 0 \dots \dots \dots (III.2)$$

**III.2.3. Bilan énergétique au niveau de sol (absorbeur) :**



**Figure (III.4) :** Bilan énergétique au niveau de l'absorbeur (sol)

L'absorbeur absorbe la totalité du rayonnement qui traverse le vitrage, par contre il va la perdre par rayonnement avec le vitrage, et par convection avec l'air qui circule dans le collecteur de la cheminée.

$$Q_9 = Q_8 + Q_7 + Q_5$$

$$U_b(T_{sol} - T_b) = \tau\alpha_2 I + h_{sol-f}(T_f - T_{sol}) + h_{r\ c-sol}(T_c - T_{sol})$$

Dans ce modèle, une valeur moyenne pendant une période t de 84600 secondes est utilisée dans le calcul de l'énergie en un jour et :  $T_b$  est égale à  $T_a$  [23].

$$U_b T_{sol} - U_b T_{amb} = \tau\alpha_2 I + h_{sol-f} T_f - h_{sol-f} T_{sol} + h_{r\ c-sol} T_c - h_{r\ c-sol} T_{sol}$$

$$\tau\alpha_2 I + U_b T_a = (U_b + h_{sol-f} + h_{r\ c-sol}) T_{sol} - h_{sol-f} T_f - h_{r\ c-sol} T_c$$

On pose :  $C_5 = h_{sol-f} + h_{r\ c-sol} + U_b$

$$\tau\alpha_2 I + U_b T_a = C_5 T_{sol} - h_{sol-f} T_f - h_{r\ c-sol} T_c \dots \dots \dots (III.3)$$

Selon les bilans (1) et (2) et (3) on peut former la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} -h_{cf} & -h_{rc-sol} & c_1 \\ \frac{d}{dr} + (2\pi r) & -(2\pi r)c_3 & -2\pi r \\ -h_{cf} & c_5 & -h_{rc-sol} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_f \\ T_{sol} \\ T_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha I + h_{rciel} T_{ciel} + h_v T_a \\ 0 \\ \tau_1 \alpha_2 I + U_b \end{bmatrix} \dots\dots(III.4)$$

On note ici que la solution de la matrice devient difficile par une méthode numérique itérative est ceci à cause du terme  $\left(\frac{d}{dr} + (2\pi r)\right)$  qui figure dans la deuxième équation du système c'est pour cette raison on a préféré de continuer la solution analytique pour but de trouver une équation finale qui donne la température du flux d'air en fonction des paramètres connus.

Alors à travers le système d'équations ci-dessus sous forme matricielle  $[A][T] = [B]$  on peut déterminer le vecteur de la température  $[T]$  par inversion matricielle de la façon suivante:

$$[T] = [A]^{-1}[B]$$

Sur cette base, le système d'équations (III. 4 ) peut être résolue pour la température débit d'air  $T_f$  pour obtenir l'équation suivante:

$$\frac{dT_f}{dr} = (2\pi r)c_6(c_{10}I - T_f + c_{11}T_a + c_{12}T_{ciel})\dots\dots\dots(III.5)$$

Où:

$$C_6 = \frac{c_1(c_5 - h_{sol-f}c_3) - h_{rc-sol}(h_{sol-f}c_2 + h_{rc-sol}c_4 + h_{cf}c_3) - h_{cf}c_2c_5}{c_1c_5 + h_{rc-sol}^2}$$

$$C_7 = \frac{(h_{rc-sol}c_3 + c_3c_5)\alpha_1 + (h_{rc-sol}c_2 + c_1c_3)\tau_1\alpha_2}{c_1c_5 + h_{rc-sol}^2}$$

$$C_8 = \frac{(c_2h_{rc-sol}U_b + h_v c_5) + c_3(h_v h_{rc-sol} + U_b c_1)}{c_1c_5 + h_{rc-sol}^2}$$

$$C_9 = \frac{h_{rc-sol}(h_{rc-sol}c_3 + c_2c_5)}{c_1c_5 + h_{rc-sol}^2}$$

$$C_{10} = \frac{C_7}{C_6} \qquad C_{11} = \frac{C_8}{C_6} \qquad C_{12} = \frac{C_9}{C_6}$$

Nous pouvons écrire l'équation 5 avec un nouveau paramètre ( $\theta$ ) :

$$\theta = c_{10}I - T_f + c_{11}T_a + c_{12}T_{ciel}$$

On pose :  $\frac{d\theta}{dr} = -\frac{dT_f}{dr}$

Ensuite, l'équation (5) devient:

$$\frac{d\theta}{dr} + (2\pi r)c_6\theta = 0 \dots \dots \dots (III.6)$$

La solution de cette équation est donné par [24] :

$$\theta = B e^{-\int (2\pi r)c_6 dr} = B e^{-c_6\pi(R^2-r^2)} \dots \dots \dots (III.7)$$

pour  $r = R$  et  $\theta = \theta_i$ , la solution de l'équation (III.7) devient :

$$\theta = \theta_i e^{-c_6\pi(R^2-r^2)}$$

On remplace :

$$\theta = c_{10}I - T_f + c_{11}T_a + c_{12}T_{ciel} \text{ et } \theta_i = c_{10}I - T_f + c_{11}T_a + c_{12}T_{ciel}$$

Nous allons obtenir la solution finale pour l'équation (III.7) comme suit:

$$T_f = T_{fi} e^{-c_6\pi(R^2-r^2)} + (1 - e^{-c_6\pi(R^2-r^2)})(c_{10}I + c_{11}T_a + c_{12}T_{ciel}) \dots \dots \dots (III.8)$$

### III.4. Corrélation théorique pour calculer les coefficients de transfert thermique:

Avant d'entamer l'estimation de la température du flux d'air  $T_f$  à travers l'équation (III.8) on va regrouper les relations nécessaires des paramètres à calculer à partir des paramètres connus

- Coefficient radiatif entre deux plaques parallèle :

$$h_{r\ c-sol} = \frac{\sigma(T_c^2 + T_{sol}^2) + (T_c + T_{sol})}{\left[\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{1}{\varepsilon_{sol}} - 1\right]}$$

- on peut calculer la température de ciel en fonction de la température ambiante à l'aide de l'équation suivante [23] :

$$T_{ciel} = 0,552.T_a^{1,5}$$

- Le coefficient de transfert radiatif de ciel [22]:

$$h_{r\text{ ciel}} = \frac{\sigma \varepsilon_c (T_c^2 + T_{sol}^2)(T_c - T_{sol})(T_c + T_{sol})}{(T_{col} - T_a)}$$

- Le coefficient convectif de vent [25]:

$$h_V = 5,47 + 3,95V_{air}$$

- Le coefficient de transfert thermique convectif entre le collecteur et le débit de l'air ( $h_{cf}$ ), et entre débit de l'air et le sol ( $h_{sol-f}$ ) sont considérés égaux, on peut les calculer d'après les équations suivantes [26]:

$$h_{c-f} = h_{sol-f} = \frac{k_f}{d_h} Nu$$

$$Nu = 0.54 Ra^{0.25} \text{ pour } 2 \cdot 10^4 < Ra < 8 \cdot 10^7$$

- Le diamètre hydraulique de collecteur [26]:

$$d_h = \frac{4(2\pi R h)}{2(2\pi R + h)} \approx 2h$$

- Le coefficient de transfert de perte totale au niveau de l'absorbeur (sol) [23]:

$$U_b = \frac{1}{\frac{d_{sol}}{k_{sol}} + \frac{1}{U_{sol}}}$$

- la profondeur d'amortissement, qui dicte le degré de variation de la température est donnée par mètre [27]:

$$d_{sol} = \sqrt{\frac{2\alpha}{w}}$$

- la fréquence angulaire durant la journée est égale  $w = 0.0000727 \text{ s}^{-1}$  [27]:

$$w = \frac{2\pi}{t}$$

- Le coefficient de transfert thermique de sol [23]:

$$U_{sol} = 2 \sqrt{\frac{k_{sol} \rho_{sol} c_{p\ sol}}{\pi t}}$$

### III.5. Calcul de performance de La cheminée (la tour) :

La cheminée convertit le flux thermique  $Q$  produit par le collecteur de la cheminée solaire en énergie cinétique et énergie potentielle. Ainsi, la différence de densité de l'air

( $\Delta\rho = \rho_s - \rho_e$ ) Provoquée par l'élévation de température dans le collecteur fonctionne comme force motrice. La différence de pression  $\Delta P_{tot}$  produite entre la base (sortie du collecteur = entrée cheminée) et le haut de la cheminée (sortie cheminée) donné par la relation suivante :

$$\Delta P_{tot} = g \cdot \int_0^H (\rho_s - \rho_e) \cdot dH$$

Cette différence de pression est appelée la pression d'entraînement disponible. On néglige les pertes des frottements (frottement de l'air avec les parois internes de la cheminée),  $\Delta P_{tot}$  peut être subdivisé en un composant d'extraction de turbine  $\Delta P_s$  représentant la Pression extraite à la turbine, et d'une composante dynamique  $\Delta P_{dy}$  décrivant l'énergie cinétique de l'écoulement d'air:

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_s + \Delta P_{dy}$$

En utilisant la définition standard pour la pression dynamique, on obtient :

$$\Delta P_{dyn} = \frac{1}{2} \rho_2 V_2^2$$

$$\Delta P_{tot} = \frac{1}{2} \rho_2 V_{max}^2$$

On peut calculer la différence de pression [21] :

$$\Delta P_{tot} = 0.00353 g h \left( \Delta T_{1-2} + \frac{(\gamma_a - \gamma) H}{2} \right)$$

On peut calculer la vitesse maximale à partir de la relation suivante qui donnée par [21]:

$$V_{max} = \sqrt{\frac{2\Delta P_{tot}}{\rho_2}} = \sqrt{\frac{0.00353 g h \left( \Delta T_{1-2} + \frac{(\gamma_a - \gamma) H}{2} \right)}{\rho_2}}$$

La puissance maximale est tirée lorsque la vitesse  $V_2$  est égal un tiers de ( $V_{max}$ ) dans le cas de la turbine étant en charge [21].

La vitesse  $V_2$  dans la cheminée exprimée comme suit:

$$V_2 = \frac{1}{3} V_{max} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{0.00353 g h (\Delta T_1 - 2 + \frac{(\gamma_a - \gamma) H}{2})}{\rho_2}}$$

La puissance total de la tour solaire peut être calculé à partir de l'équation suivante [ 29] :

$$P_{tot} = \Delta P_{tot} V_2 A_{ch}$$

### III.6. Calcul de performance de la turbine (turbine éolienne):

La turbine convertit l'énergie cinétique d'écoulement d'air en énergie mécanique, et le Générateur entraîné par la turbine convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. La chute de pression dans la turbine est deux tiers la différence de pression totale [30].

$$\Delta P_s = \Delta P_{tot} - \frac{1}{2} \rho_2 \cdot v_2^2$$

La puissance utile théorique à la turbine (énergie cinétique du flux d'air convertit en énergie mécanique à l'arbre de la turbine) est donnée par [30]

$$P_{wt} = \Delta P_s \cdot v_2 \cdot A_{ch}$$

La puissance est obtenue sa valeur maximal lorsque les deux tiers de la différence de pression total est utilisée par la turbine est donnée par : [30]

$$P_{wt max} = \frac{2}{3} v_2 \cdot A_{ch} \cdot \Delta P_{tot}$$

### III.7. Validation du modèle :

Dans cette partie on va présenter les résultats obtenu de la résolution analytique du système d'équation qui représentant les trois bilans énergétique au niveau du vitrage, absorbeur (sol) et flux d'air qui traverse le collecteur est ceci afin de trouver les température  $T_{sol}$ ,  $T_c$ ,  $T_f$ , et la vitesse de l'air à la sortie du collecteur.

Pour but de faciliter les calculs et exploité les valeurs obtenus dans des courbe claire et compréhensible on a élaboré un programme (Voir Annexe) écrit en langage de MATLAB et un outil très puissant et contient plusieurs modules, outils et fonction qui rond la programmation très facile

**III.7.1.Algorithme simplifié :**

Le principe de la méthode itérative suivi dans ce programme se résume par l'algorithme simplifié suivant :

1. On fixe des valeurs initiales raisonnables des températures ( $T_f$ ,  $T_c$ , et  $T_{sol}$ ) en fonction de la température ambiante  $T_{c0} = T_a + 5$ ,  $T_{sol0} = T_a + 15$  et  $T_{f0} = T_a + 10$
2. On calcule les paramètres en fonction des températures  $T_{c0}$  et  $T_{sol0}$
3. On calcule la température du fluide  $T_f$
4. On fait un teste  $Er = \text{abs}(T_f - T_{f0}) \leq 0.5^\circ\text{C}$ 
  - Si Non ( $Er > 0.5$ ) Allez aux point 2 et recommencé les calculs avec les nouvelle valeurs d'initialisation de  $T_f$ ,  $T_c$  et  $T_{sol}$
  - Si Oui ( $Er \leq 0.5$ ) arrêté le calcul itérative et passer à l'étape suivante
5. Calculer tous les paramètres avec ces dernières valeurs de  $T_f$ ,  $T_c$  et  $T_{sol}$
6. Affichage des résultats et courbe

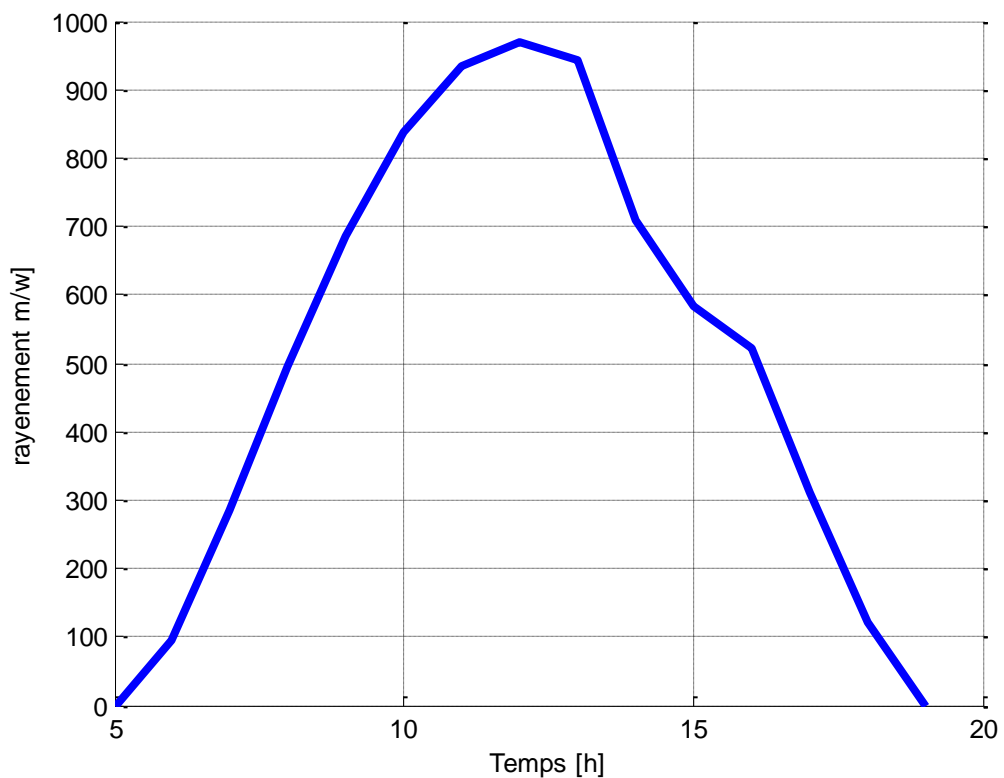
**III.7.2.Description du problème:**

On base notre étude sur un prototype de cheminée solaire de taille proche de celle de Manzanares (Projet de l'Espagne). Il constitue d'une cheminée (tour) de hauteur  $H=180$  m et de diamètre  $D = 10$  m et d'un collecteur de rayon  $R=120$  m.

Alors on a choisi pour notre étude la journée du 1Aout et les prélèvements des paramètres commence de 05h : 00 min de matin jusqu' au 19h : 00 min de soir avec une période de 1heures entre deux enregistrement. Ces paramètres l'éclairement solaire et la température ambiante sont représenté sur le tableau suivant [28].

Temp s [h]	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
Ta [°C]	30	30	31.2	33	35.6	38	40.5	43.3	45	45.6	45.5	45.2	44.8	43.3	41.2
I [w/m <sup>2</sup> ]	00	96	285	496	687	837	934	970	942	852	708	522	312	120	00

**Tableau (III.1)** : rayonnements solaire incident et température ambiante pendant une journée [28]



**Figure (III.5)**: l'évolution de rayonnement solaire en fonction de température

Figure (III.5): montre la variation du rayonnement solaire qui augmente d'une façon progressive avec le temps jusqu'à atteindre sa valeur maximale de 970 w.m<sup>2</sup> entre 12h00 et 13 h00. à partir de ce moment le rayonnement commence à s'affaiblir.

### III.7.3.calcul numérique :

Après injection dans le programme MATLAB les valeurs météorologique ( $T_a$  [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $I$  [ $\text{w}/\text{m}^2$ ] et Vitesse de vent [ $\text{m}/\text{s}$ ]) ainsi que les valeurs caractéristique du modèle choix de la cheminée solaire (modélé de Manzanares) cité ci-dessus nous obtenons les résultats suivant

Les résultats ( $T_{\text{sol}}, T_c, T_f$ ) obtenus sous MATLEB:

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
Vitesse du vent Vwind [m/s]=0
Rayon max du collecteur R [m]=120
Rayon min du collecteur r [m]=5
t          Ta          I          Tc          Tsol          Tf
[h]        [°C]        [w/m²]     [°C]        [°C]         [°C]
5.00      30.00      0.00      35.561      36.450      37.451
6.00      30.00     96.00     36.549      40.465      38.155
7.00      31.20     285.00    40.058      48.222      41.364
8.00      33.00     496.00    44.215      56.619      45.397
9.00      35.60     687.00    49.150      65.219      50.321
10.00     38.00     837.00    53.487      72.355      54.686
11.00     40.50     934.00    57.506      78.206      58.783
12.00     43.20     970.00    61.262      82.742      62.670
13.00     45.00     942.00    63.311      84.418      64.841
14.00     45.60     708.00    61.972      79.001      63.703
15.00     45.50     582.00    60.684      75.400      62.518
16.00     45.20     522.00    59.741      73.315      61.616
17.00     44.80     310.00    57.162      66.480      59.272
18.00     43.30     120.00    52.957      58.095      55.444
19.00     41.20      0.00     49.265      50.521      51.897
fx >>

```

**Figure(III.6)** : Capture d'écran représente les résultats obtenus dans l'afficheur Command Window de MATLAB

Une fois nous avons les températures ( $T_a, T_{\text{sol}}, T_c$  et  $T_f$ ) qui permet de calculer les différentes paramètres intervenant a la production de l'énergie électrique dans la cheminée solaire

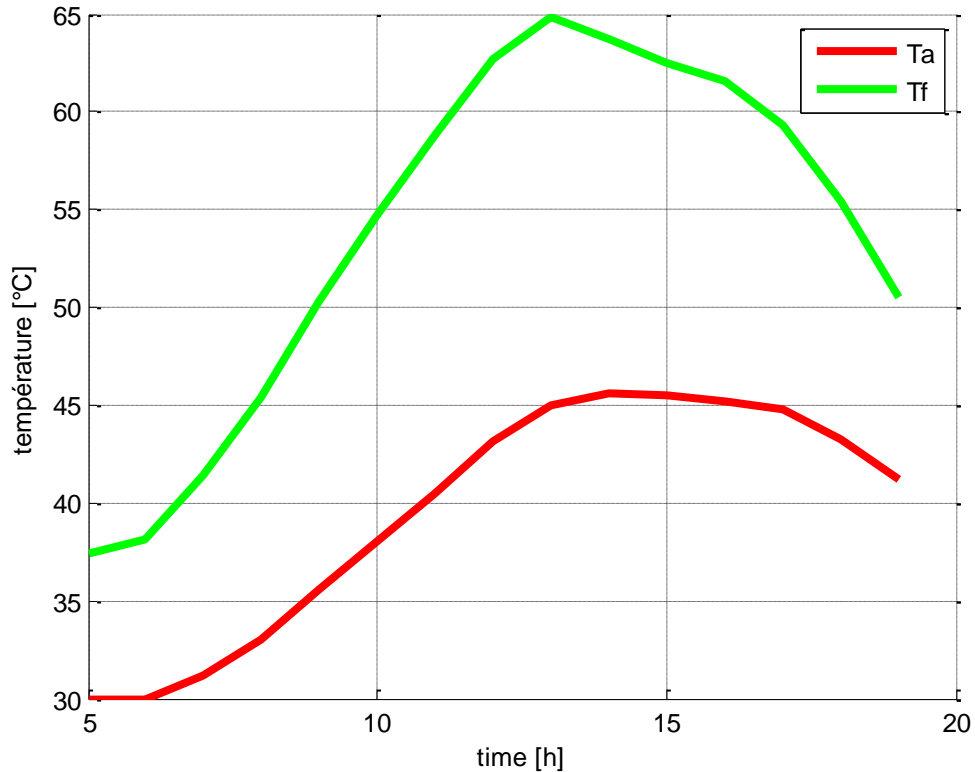
D'après notre programme MATLEB qui calcul la puissance utile et la vitesse d'écoulement ainsi que le débit et la différence de pression et la vitesse maximal nous avons avoir les résultats suivantes, le tableau(III.2) montre les résultats obtenue :

Temps [h]	$T_a$ [°C]	$T_f$ [°C]	$V_{max}$ [m/s]	$V_2$ [m/s]	$\rho_{f2}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$m$ [kg/s]	$\Delta P_{tot}$ 10 <sup>3</sup> * [Pa]	$P_u$ [kw]
05 :00	30	37.451	23.981	7.994	1.137	713.843	326.941	205.260
06 :00	30	38.155	24.169	8.056	1.134	717.804	331.330	209.644
07 :00	31.2	41.364	24.748	8.249	1.123	727.901	343.852	222.955
08 :00	33	45.397	25.405	8.468	1.109	737.365	357.771	237.955
09 :00	35.6	50.321	26.114	8.705	1.092	746.395	372.257	254.498
10 :00	38	54.686	26.719	8.906	1.077	753.506	384.906	268.959
11 :00	40.5	58.783	27.231	9.077	1.064	758.471	394.460	281.213
12 :00	43.2	62.670	27.646	9.215	1.052	761.106	401.859	290.851
13 :00	<b>45</b>	<b>64.841</b>	<b>27.815</b>	<b>9.272</b>	<b>1.045</b>	<b>760.836</b>	<b>404.172</b>	<b>294.312</b>
14 :00	45.6	63.703	27.523	9.174	1.048	755.403	397.078	286.115
15 :00	45.5	62.518	27.109	9.036	1.052	746.661	386.575	274.354
16 :00	45.2	61.616	26.941	8.980	1.055	744.029	382.823	270.006
17 :00	44.8	59.272	26.418	8.806	1.062	734.737	370.705	256.385
18 :00	43.3	55.44	25.745	8.582	1.075	724.377	356.169	240.058
19 :00	41.2	50.521	24.913	8.304	1.091	711.631	338.598	220.841

**Tableau (III.2):** les résultats obtenue sous programme MATLAB

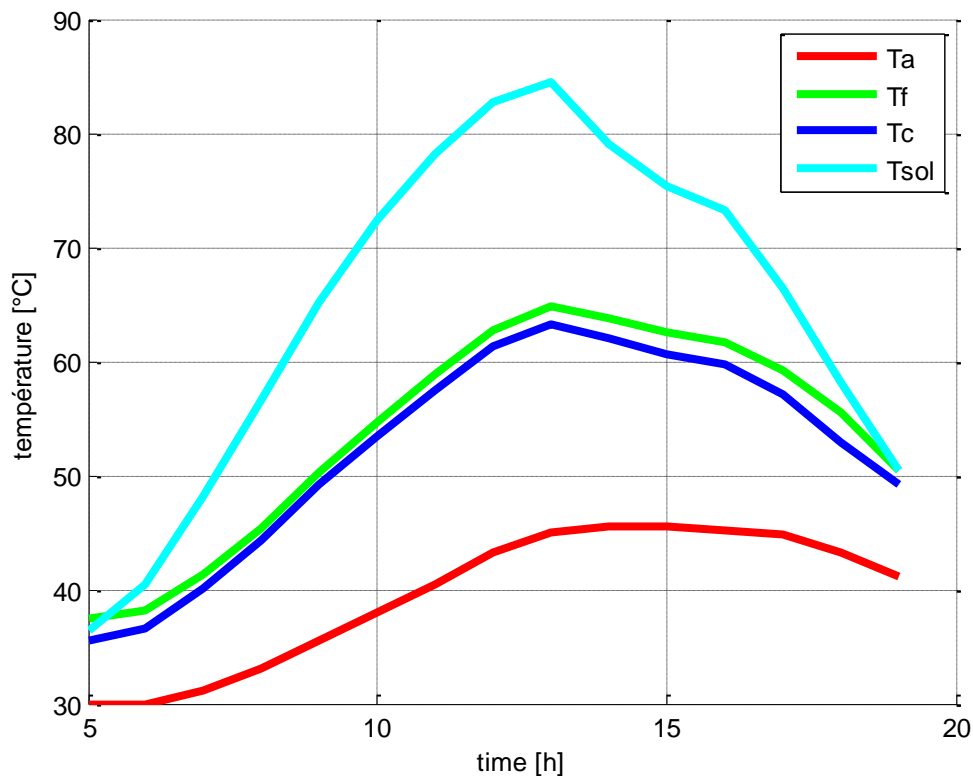
### III.8.Résultats et discussion :

#### III.8.1.1.variation des températures :



**Figure(III.7) :** comparaison de la température ambiante avec la température de fluide en fonction de temps

La figure (III.7) montre l'évolution de température ambiante et la température de fluide en fonction de temps. La température ambiante est augmentée dans le collecteur de l'entrée vers le centre, ceci est expliqué par le fait que le flux d'air dans celui-ci s'échauffe où il atteint la valeur maximale de 64.841 °C vers 13 :00h ou la température est plus élevée sous l'effet de serre dans le collecteur



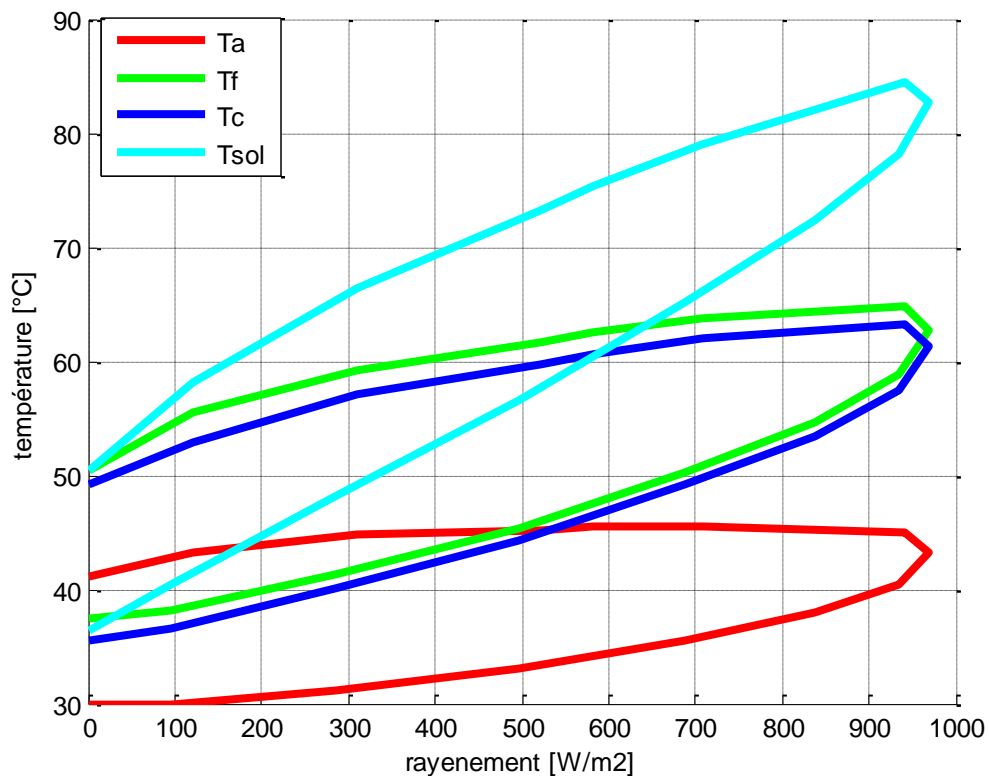
**Figure(III.8):** comparaison de les températures  $T_a$ ,  $T_{sol}$ ,  $T_c$ ,  $T_f$  en fonction de temps

Comme signalé la figure (III.8), nous avons mesuré les trois températures caractéristiques soit la température du collecteur ( $T_c$ ), la température de l'absorbeur (le sol)  $T_{sol}$  et la température de fluide ( $T_f$ )

Des résultats obtenus (III.8), nous tirons les conclusions suivantes:

- Ces températures culminent vers 13h00 et affichent les valeurs suivantes :  
 $T_a = 45^\circ\text{C}$ ,  $T_c = 63.311^\circ\text{C}$ ,  $T_f = 64.841^\circ\text{C}$  et  $T_{sol} = 84.418^\circ\text{C}$
- On remarque une augmentation significative de la température de sol par rapport les autres températures parce que ce dernier absorbe une grande partie de rayonnement solaire, puis la température de fluide qui s'écoule dans le collecteur a cause de l'effet de serre.  
 On remarque que la température du vitrage ( $T_c$ ) est basse, due à la faible absorptivité du vitrage à son refroidissement convectif des deux côtés.

L'évolution de ces températures expliquent les liens qui existent entre-elles mais surtout leurs influences sur la cinétique de la vitesse d'écoulement.

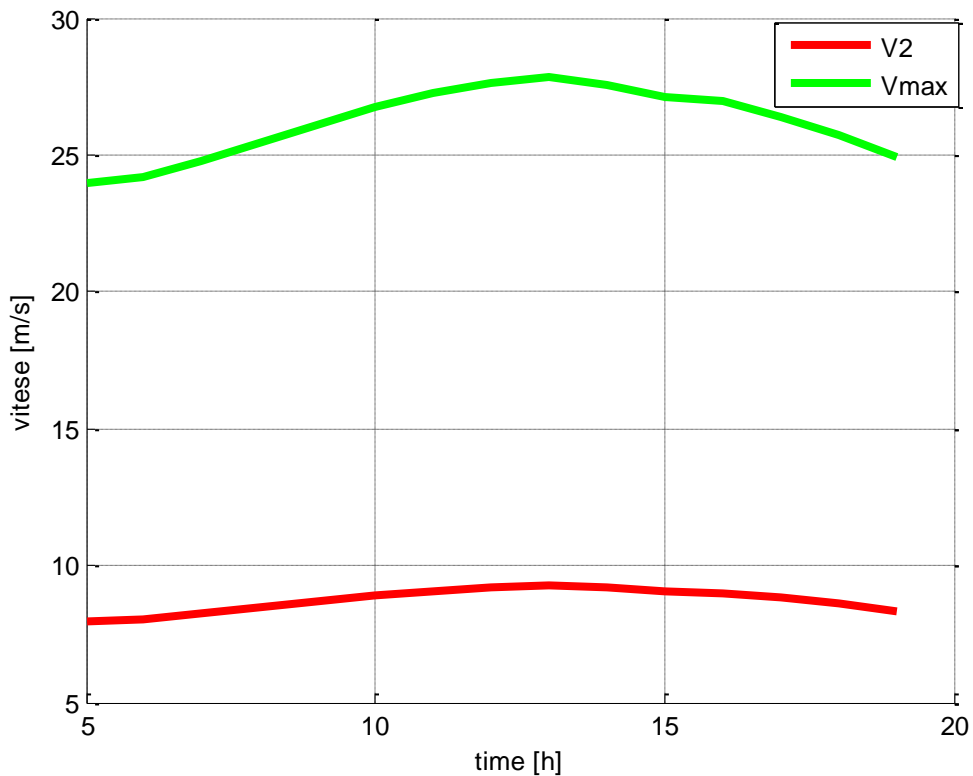


**Figure(III.9) :** Evolution de la température du collecteur  $T_c$ , de l'air  $T_f$  et de l'absorbeur  $T_{sol}$  en fonction de l'intensité de rayonnement solaire

La figure (III.9) montre l'évolution de la température ambiante et la température de l'absorbeur, du vitrage et de l'air circulé dans la cheminée en fonction de l'intensité de rayonnement solaire.

On constate que la température de l'absorbeur est la plus importante et qu'elle augmente avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire puisque ce dernier absorbe la grande partie du rayonnement solaire en raison de l'absorptivité de sa surface qui stocke le rayonnement thermique. En outre, sa réflectivité et sa transmissivité sont presque nulles.

En outre, on remarque que la température moyenne du vitrage ( $T_c$ ) est plus basse que la température de l'absorbeur, due à la faible absorptivité du vitrage à son refroidissement convectif des deux côtés.

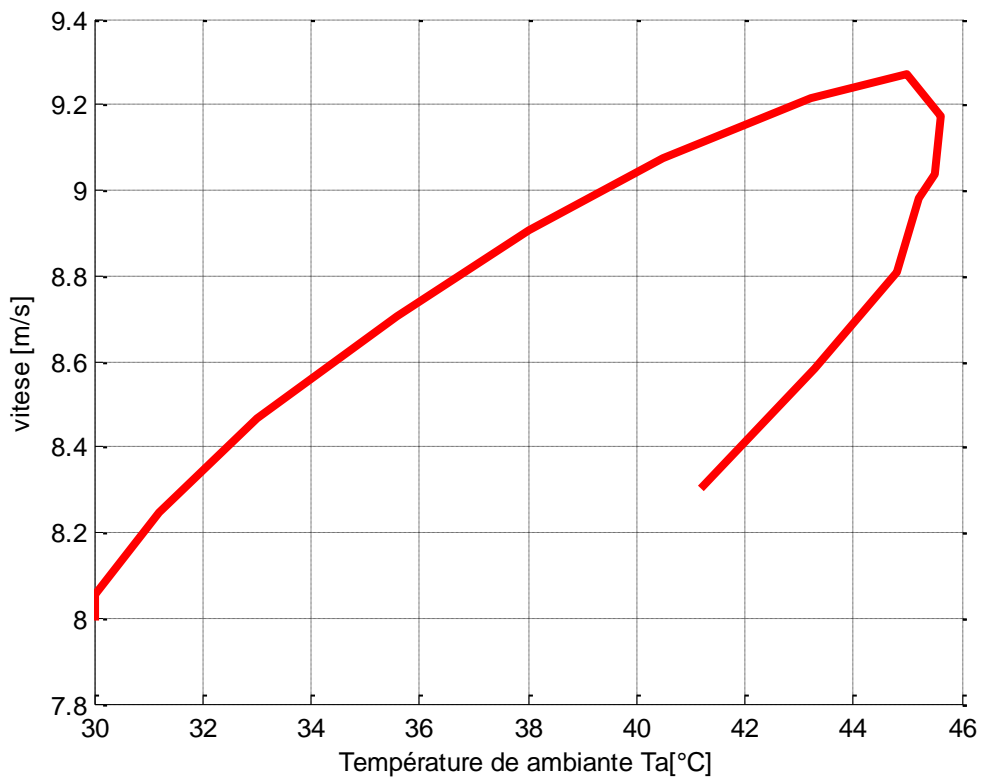
**III.8.1.2. l'évaluation de la vitesse d'écoulement :****Figure(III.10) :** évolution des vitesses en fonction de temps

La Figure (III.10) montre l'évolution de la vitesse de l'écoulement de l'air à la sortie de collecteur avec et sans turbine en fonction de temps.

L'air est chauffé par le rayonnement solaire sous l'effet de serre dans le collecteur qui est ouvert à la périphérie pour introduire l'air frais, et puisque l'air le plus chaud est plus léger que l'air froid, il s'élève en haut d'une cheminée localisée au centre du collecteur.

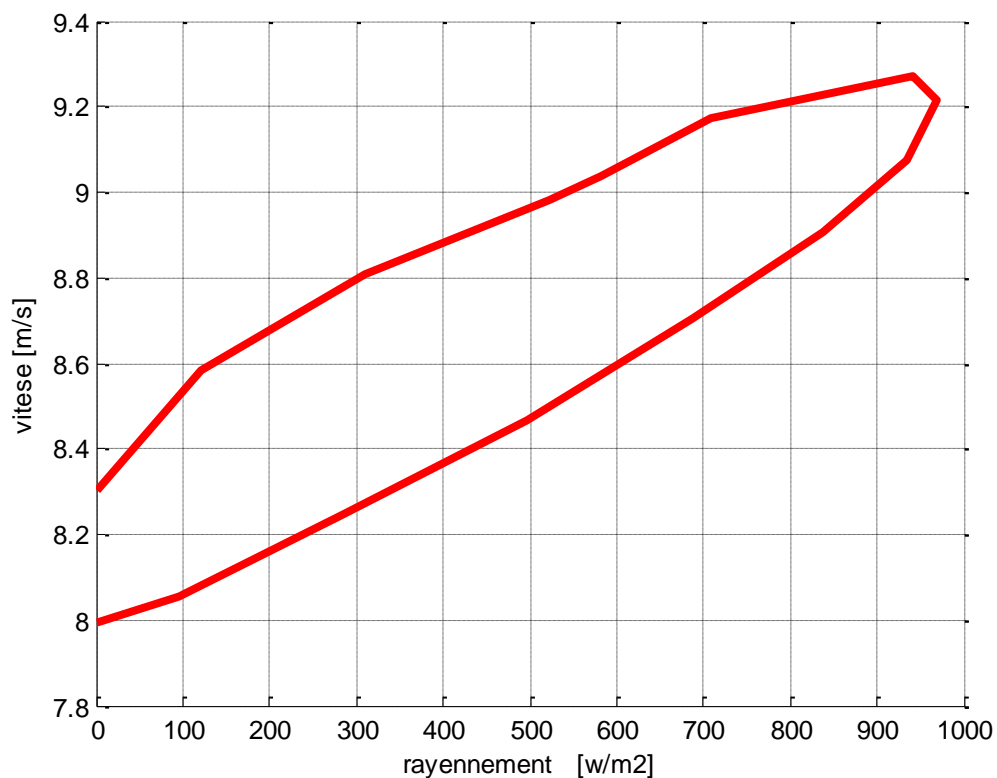
La vitesse d'écoulement d'air est maximale au niveau à la base de la cheminée où il trouve la turbine éolienne, pour transformer le maximum d'énergie cinétique en énergie mécanique.

La chute de vitesse dans la turbine est un tiers de la vitesse sans turbine ( $v_2=1/3 \cdot v_{max}$ )



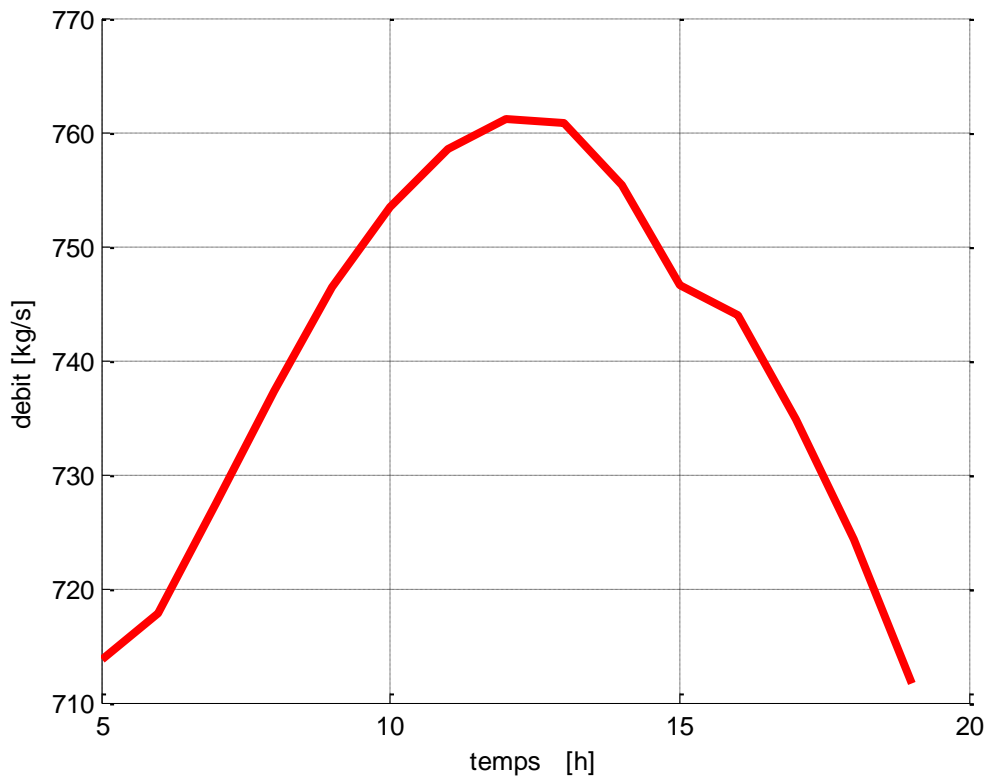
**Figure(III.11) :** évolution de la vitesse d'écoulement en fonction de la température ambiante

La Figure (III.11) montre l'évolution de la vitesse de l'écoulement de l'air en fonction de la température ambiante. la vitesse augmente avec l'augmentation de la température ambiante jusqu'à atteindre sa valeur maximale ( $T_a=45.5^{\circ}\text{C}$ ) ou la vitesse est maximale ( $V= 9.272 \text{ m/s}$ ) cette augmentation due a l'effet de cheminée sous l'effet de serre dans le collecteur , puisque L'augmentation de l'écart entre la température du fluide et la température de l'air va créé une différence de densité donc l'air le plus chaud est le plus léger que l'air froid il s'élève avec une certain vitesse  $V$  , puis la vitesse commence a diminuer avec la diminution de  $T_a$ .

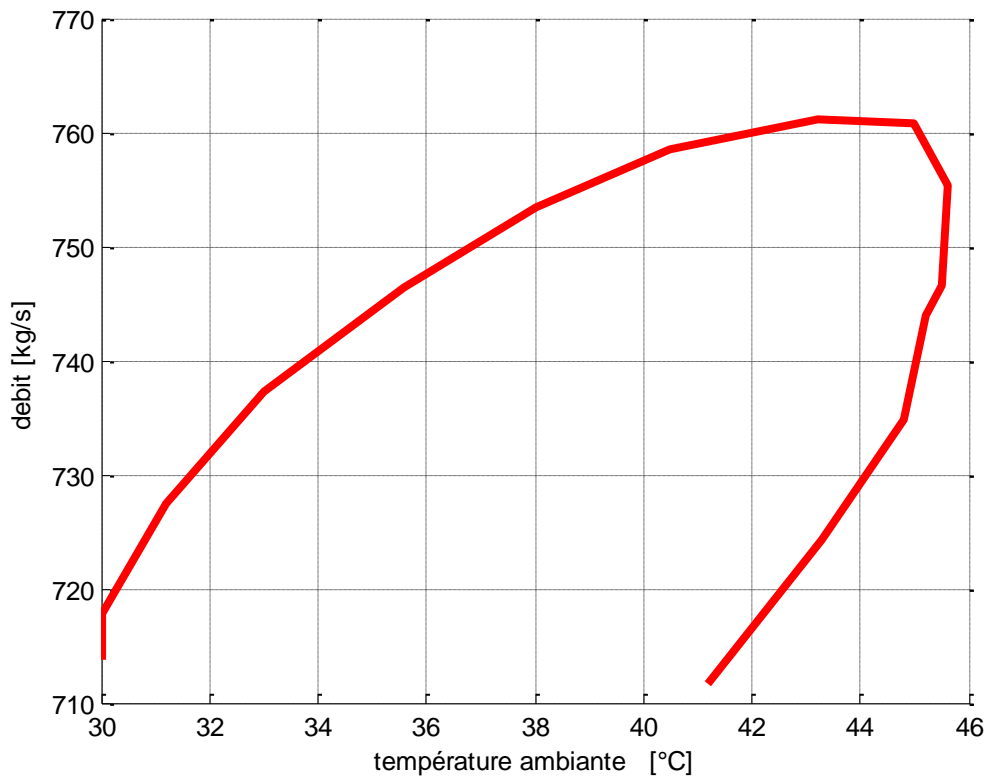


**Figure(III.12) :** la vitesse d'écoulement en fonction de l'intensité de Rayonnement solaire

La figure (III.12) montre l'évolution de la vitesse d'écoulement en fonction de l'intensité de Rayonnement solaire. On remarque que la vitesse de l'air dans la cheminée augmente avec l'augmentation du rayonnement solaire. En tant que puissance principale de la cheminée solaire, le rayonnement solaire est transmis par le verre transparent, puis il est principalement absorbé par la paroi de stockage thermique (absorbeur) pour augmenter la température de l'air à l'intérieur. L'air chaud monte par l'effet de la cheminée, ce qui favorise la convection naturelle à l'intérieur avec une certaine vitesse, puis la vitesse d'écoulement diminue avec la diminution de l'intensité de rayonnement solaire.

**III.8.1.3. l'évaluation de débit massique :****Figure(III.13) : variation de débit en fonction de temps**

La figure (III.13) montre l'évolution du débit massique en fonction de temps. On remarque que le débit massique de l'air dans la cheminée augmente d'une façon progressive avec le temps jusqu'à atteindre sa valeur maximale de 761.106kg/s à 13 :00 , puis commence à s'affaiblir avec l'avancement de temps vers le soir.



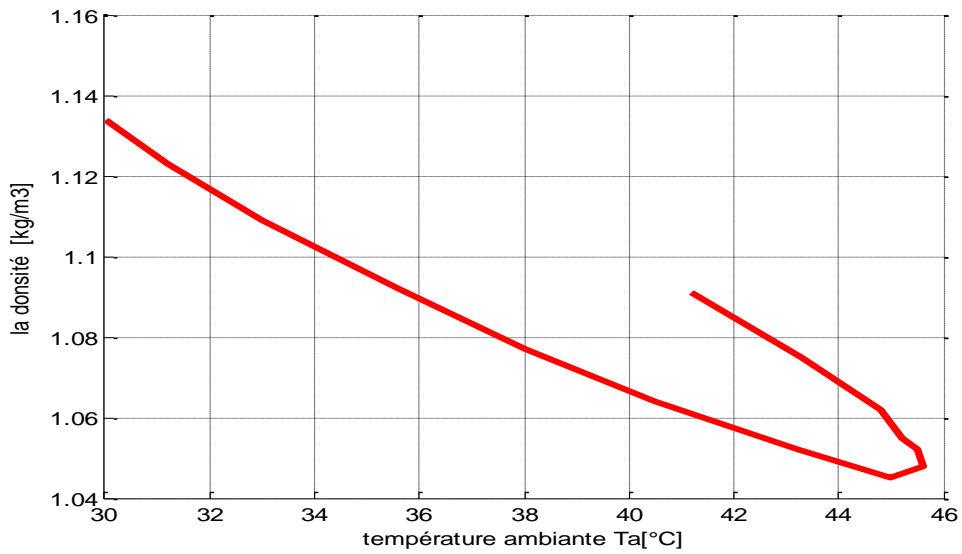
**Figure(III.14) :** l'évolution de débit massique en fonction de la Température ambiante  $T_a$

La figure (III.14) montre l'évolution du débit massique en fonction de la température ambiante

Le débit augmente d'une façon proportionnelle avec la température ambiante

L'écoulement d'air entrée avec un débit égal  $m = 713.843 \text{ kg/s}$  à une température de  $T_a=30^\circ\text{C}$  est commence a augmenter jusqu' a atteindre ca valeur maximal ou la température ambiante est maximal  $T_a= 45.5^\circ\text{C}$  , cette augmentation a cause de l'effet de cheminée ou la température est plus élève sous l'effet de serre dans le collecteur qui est ouvert à la périphérie pour introduire l'air frais, et puisque l'air le plus chaud est plus léger que l'air froid, il s'élève en haut d'une cheminée localisée au centre du collecteur, puis le débit commence à s'affaiblir avec la diminution de de la température .

**III.8.1.4.variation de masse volumique :**

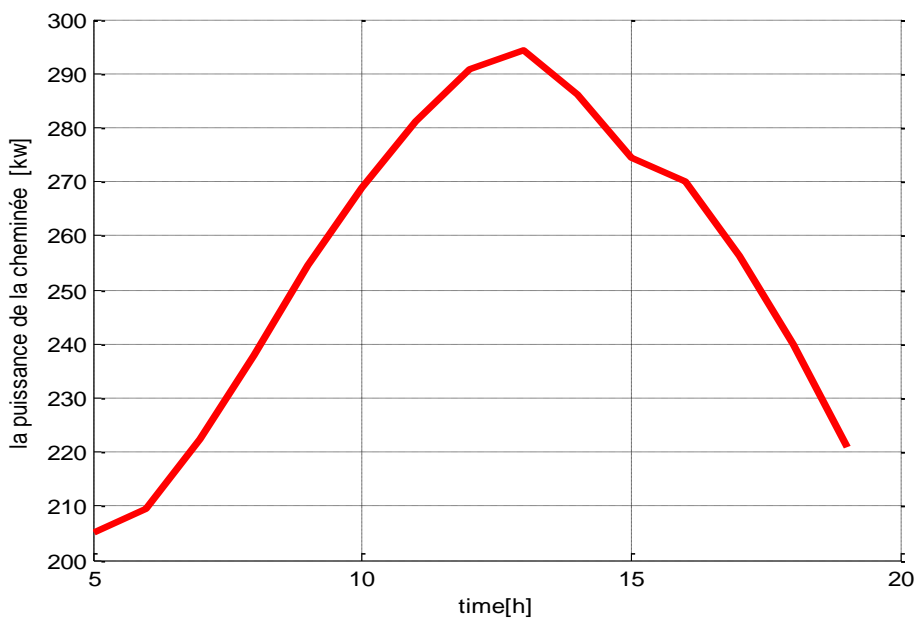


**Figure(III.15) :** L'évolution de la densité d'air en fonction température de fluide

La Figure (III.15) montre l'évolution de la densité d'air (masse volumique) en fonction de la température ambiante. On remarque que plus la température augmente, la masse volumique de l'air diminue. L'effet de cheminée est dû à cette différence de densité

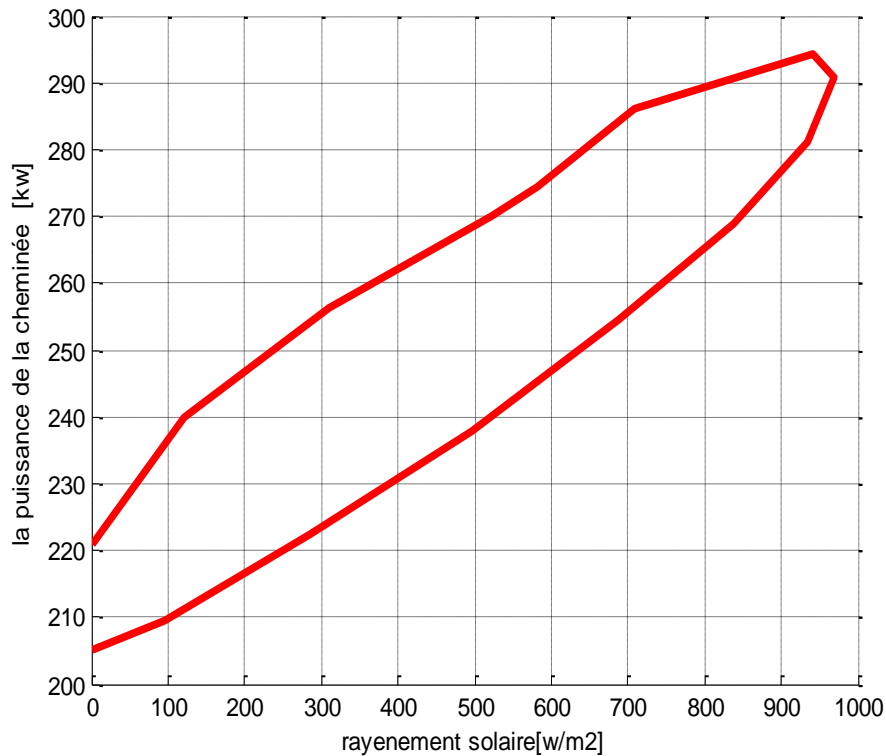
Entre l'air chaud et l'air froid. Ceci est généralisé en  $\rho = 1.293 \frac{273}{273+T}$

**III.8.1.5.variation de puissance utile de la cheminée :**



**Figure(III.16) :** la variation de la puissance en fonction de temps

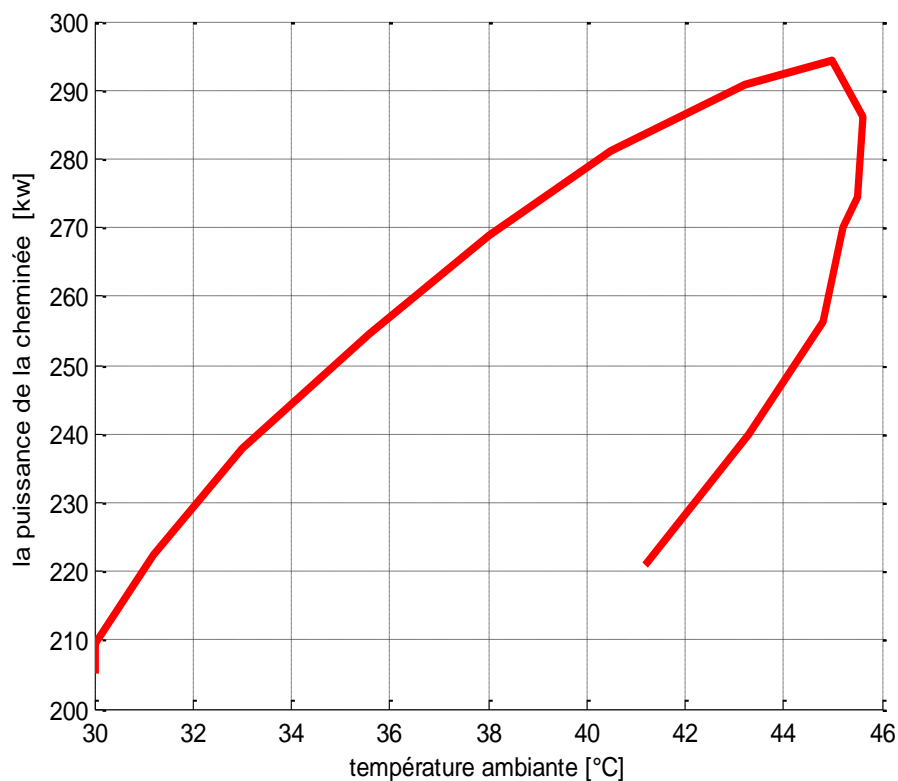
La figure (III.16) montre l'évolution de puissance de la cheminée en fonction de temps ,On remarque que la puissance augmente d'une façon progressive avec le temps jusqu'à atteindre sa valeur maximale de  $P = 294.312\text{kw}$  à 13 :00 puis commence à s'affaiblir



**Figure (III.17)** : variation de la puissance de cheminée en fonction du rayonnement solaire

On remarque que la puissance est proportionnelle au rayonnement solaire.

L'analyse des résultats établis montre que le rayonnement solaire est le paramètre qui pilote tout le fonctionnement de la cheminée solaire, Ceci est attendu car la puissance thermique fournie au fluide est d'autant plus importante que le rayonnement solaire est important. En effet la vitesse de l'écoulement et le débit massique qui sont deux paramètres liés



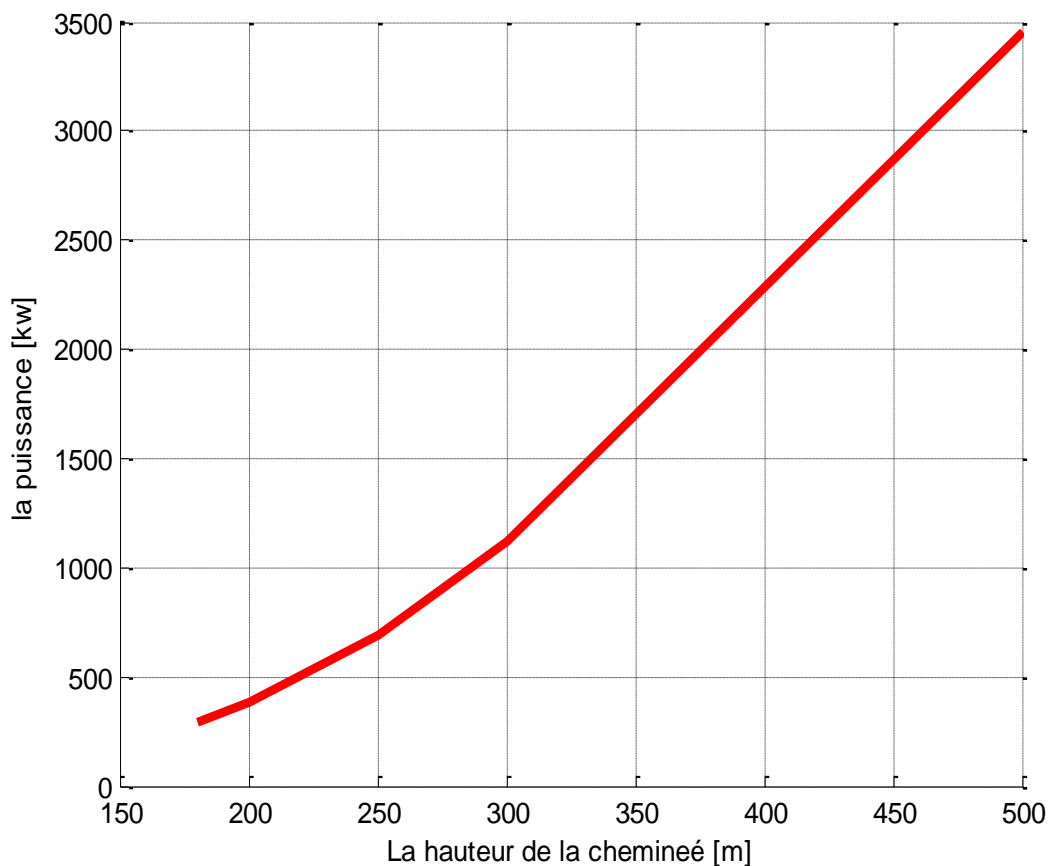
**Figure (III.18)** : variation de la puissance de la cheminée en fonction de température ambiante

Et comme le rayonnement solaire, la température ambiante aussi est un paramètre qui pilote tout le fonctionnement de la cheminée. On remarque aussi que plus l'élévation de la température est importante plus le débit massique est important, ceci est le principe de fonctionnement de la cheminée. Car plus la différence de température du fluide entre l'intérieur et l'extérieur de la cheminée est importante plus la différence de pression totale est importante est la puissance liée directement avec ces paramètres

### III.8.2.L'influence des paramètres géométriques de la cheminée :

Les résultats sont variés en fonction des dimensions de la cheminée solaire. L'influence des paramètres géométriques principaux de la cheminée solaire sur le comportement d'écoulement d'air a été évaluée. Les paramètres géométriques analysés sont la hauteur et le diamètre de la cheminée, et le rayon de collecteur

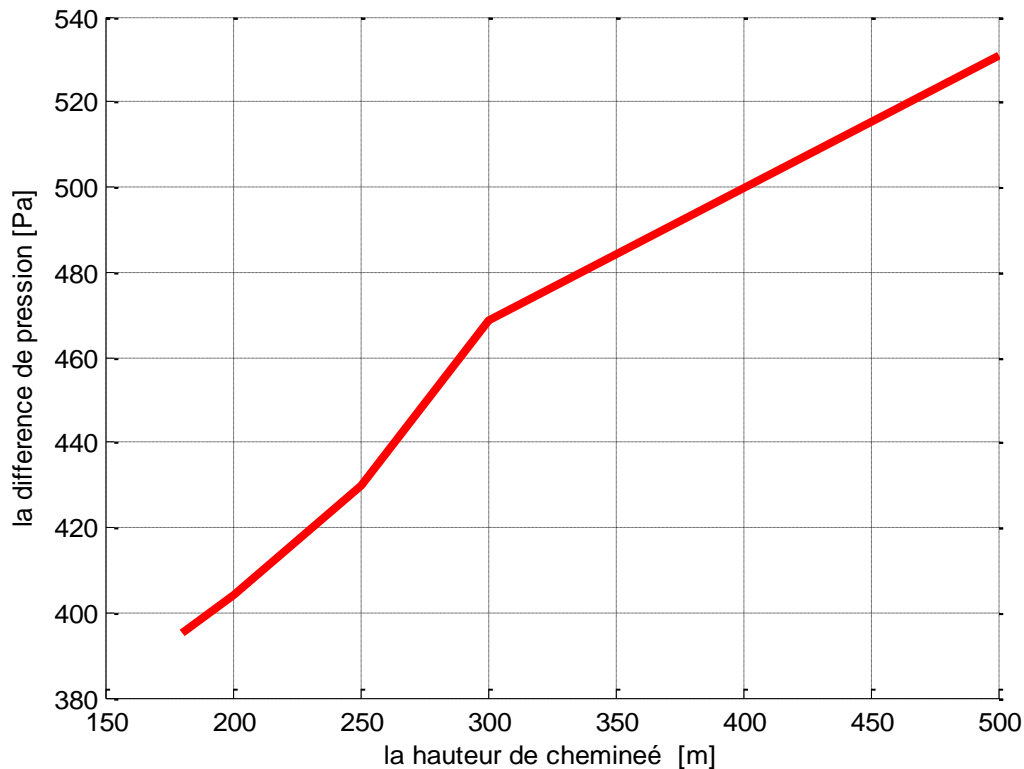
#### III.8.2.1.l'influence de la hauteur de la cheminée



**Figure (III.19):** Puissance en fonction de la hauteur de cheminée

La résolution pour des hauteurs de cheminée de 180 m (correspondant à la hauteur du prototype), 200 m, 250 m, 300 m et 500 m. L'analyse a montré que l'augmentation de la hauteur de cheminée augmente la productivité (la puissance utile) en énergie représenté par l'énergie cinétique à la jonction (emplacement des turbines éoliennes), figure ( III.19), où une chute de pression aura lieu le long de la cheminée, permettant ainsi un débit massique et des vitesses d'écoulement plus élevés.

Comme il a été observé, des grands débits massiques et vitesses très élevées permettent une diminution de la température.

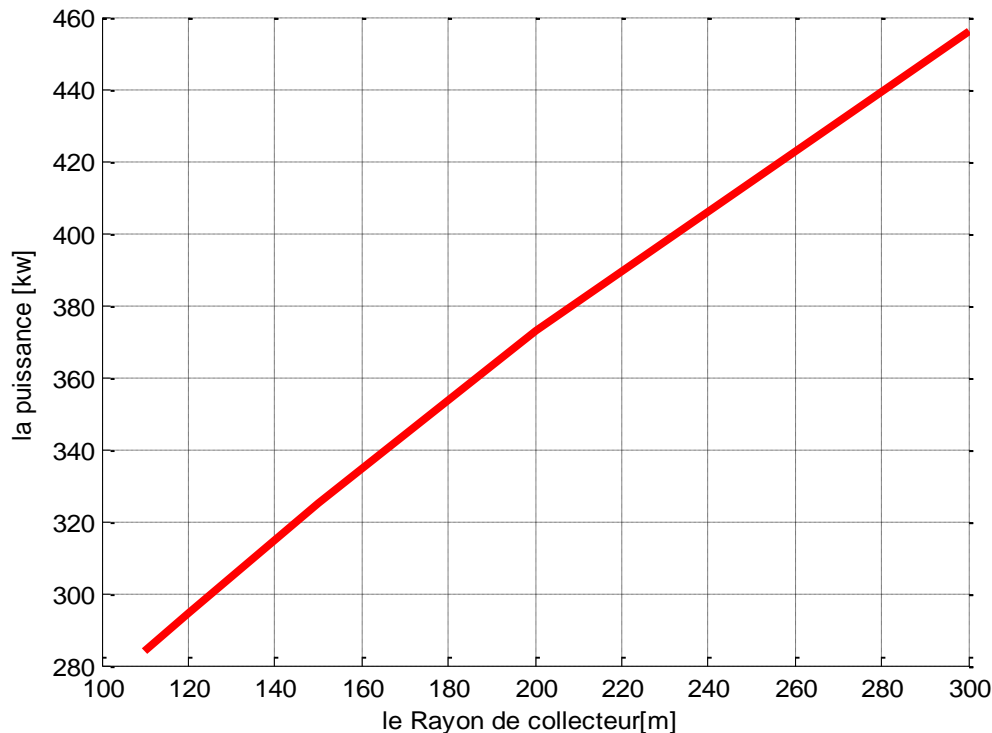


**Figure(III.20) :** la différence de pression en fonction de la hauteur de la cheminée

La figure (III.20) montre l'évolution de la différence de pression en fonction de la hauteur de la cheminée. On remarque une augmentation de la différence de pression avec l'augmentation de la hauteur de cheminée.

Pour créer un écoulement d'air sous forme de vent, il faut engendrer une différence de pression.

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

**III.8.9.2. Influence du rayon de collecteur:**

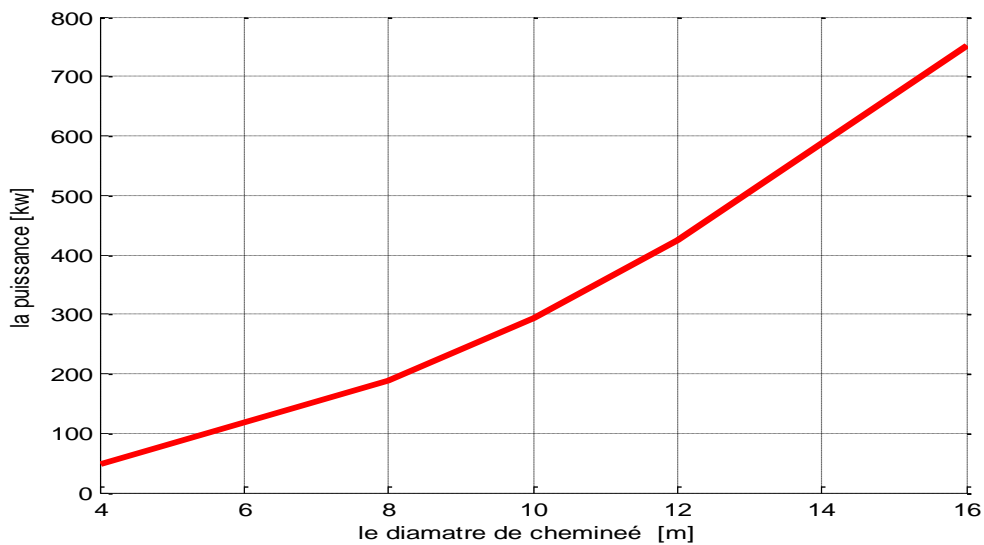
**Figure(III.21) :** Puissance utile en fonction de rayon de collecteur

L'influence du rayon de collecteur sur le comportement de l'écoulement a été évaluée pour des différentes valeurs du rayon, 110 m, 120 m, 150 m, 200 m et 300 m, en maintenant les autres paramètres dimensionnels.

La figure (III.21) montre une augmentation de la puissance utile représentée par l'énergie cinétique en fonction de l'augmentation du rayon de collecteur

Une augmentation de rayon de collecteur permet d'une augmentation de la température du sol c'est-à-dire une augmentation de  $T$ , la différence de température  $\Delta T$  est proportionnelle avec le nombre de Raileigh, donc la vitesse augmente.

### III.8.9.3. Influence du diamètre de la cheminée:



Figure(III.22) :la puissance en fonction de diamètre de la cheminée

Pour des valeurs variées de diamètre de cheminée, 4m, 8 m, 10 m, 12 m et 16 m, L'augmentation de cette grandeur (diamètre de cheminée) dimensionnelle permet une augmentation de débit massique, ce qui est traduit par l'élévation de productivité (puissance utile) en relation proportionnelle avec le diamètre de la cheminée comme le montre la figure(III.22).

### III.8.9.4. Influence de la hauteur du collecteur :

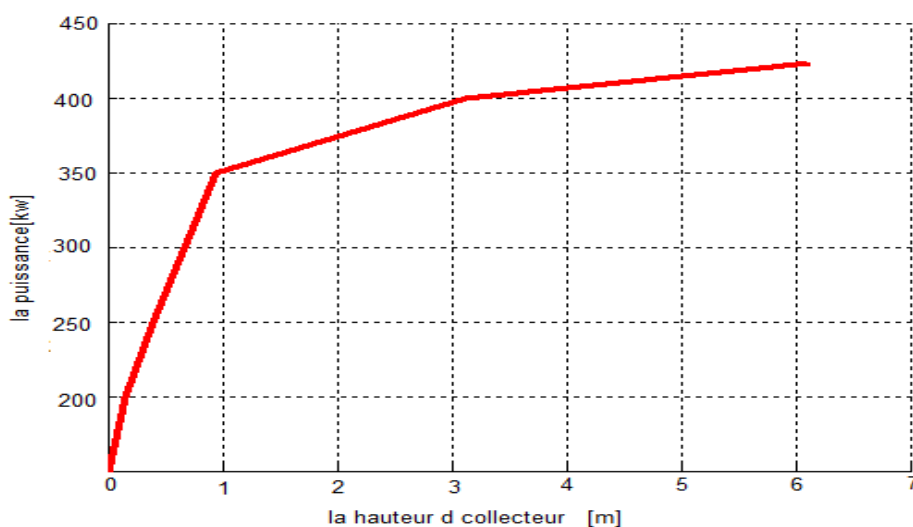


Figure (III.23) : la puissance en fonction de la hauteur de collecteur

La résolution a été simulée pour des hauteurs de collecteur de 1 m, 2 m, 3 m, 4 m et 5 m.

La figure (III.23) montre une augmentation de productivité (puissance utile) représentée par

L'énergie cinétique en fonction de l'augmentation de la hauteur de collecteur. L'augmentation

De la hauteur de collecteur permet une diminution des pertes thermiques de l'écoulement dans

le collecteur, et par la suite des vitesses et débits massiques plus élevés. Ainsi le nombre de

Raleigh augmente dû à l'augmentation de la hauteur de collecteur (Diamètre hydraulique), ceci

implique une augmentation de la vitesse

# ***CHAPITRE IV***

## ***MODÉLISATION MATHÉMATIQUE***

### IV.1.Introduction :

Pour formuler un phénomène physique, on utilise souvent des équations mathématiques. Ces dernières représentent une modélisation de ce phénomène. Une formulation mathématique doit obligatoirement exprimer le comportement de ce phénomène dans l'espace et dans le temps. En mécanique des fluides, on suppose que le fluide est un milieu continu, ce qui permet d'utiliser les lois classiques de conservation à savoir

- Conservation de la masse.
- Conservation de la quantité de mouvement.
- Conservation de l'énergie.

Ce chapitre expose les équations mathématiques générales gouvernantes de l'écoulement en régime laminaire, il s'agit de la convection naturelle.

### IV.2.Définition du problème:

L'air à l'intérieur du collecteur, chauffé par effet de serre, remonte sous l'effet du gradient de densité, à travers la tour de cheminée solaire. Donc, une cheminée solaire se compose essentiellement d'un capteur solaire appelé collecteur, d'une tour ou cheminée et d'un aérogénérateur (turbine).

### IV.3.Hypothèses simplificatrices :[31]

Les hypothèses considérées dans la formulation mathématique sont basées sur:

- L'écoulement est laminaire bidimensionnel:  $Ra < 10^9$  : l'écoulement est laminaire.
- L'écoulement est incompressible axisymétrique en régime stationnaire.
- Les parois de la tour "cheminée" sont supposées adiabatiques.
- Du fait que les vitesses sont relativement faibles en convection naturelle, le terme de la dissipation visqueuse est négligeable.
- Toutes les propriétés du fluide sont constantes sauf la masse volumique  $\rho$  qui varie

Linéairement avec le gradient de température T selon l'approximation de Boussinesq:

$$\rho = \rho_0(1 - \beta(T - T_a)) \quad (IV.1)$$

$$\text{Ou } \beta = -\frac{1}{\rho_0} \left( \frac{d\rho}{dT} \right)_p \quad (IV.1.a)$$

#### IV.4. Formulation mathématique:

L'écoulement bidimensionnel d'un fluide visqueux incompressible est régi par des équations de base qui sont respectivement :

- Conservation de la masse.
- Conservation de la quantité de mouvement.
- Conservation de l'énergie.

Ces équations sont à partir de l'équation de transport généralisée et d'après les hypothèses précédentes.

##### IV.4.1. Equation de continuité (conservation de la masse):

C'est l'équation qui exprime la loi de la conservation de la masse pour un volume de contrôle. L'équation de conservation de la masse pour un fluide incompressible est obtenue par l'équation suivante:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (IV.2)$$

Cette équation peut s'écrire en coordonnées cartésiennes comme suit :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (IV.3)$$

##### IV.4.2. Equation de la conservation de la quantité de mouvement:

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide et son mouvement et les causes qui le produisent. On peut indiquer que le taux de variation de quantité de mouvement contenu dans le volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont appliquées. On retrouve l'équation de la quantité de mouvement:

$$\nabla(\mathbf{V} \cdot \mathbf{V}) = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (IV.4)$$

Cette équation peut s'écrire sous la forme explicite suivante:

- Selon l'axe des abscisses x:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (IV.5)$$

- Selon l'axe des abscisses y :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_a) \quad (IV.6)$$

#### IV.4.3. Equation de l'énergie:

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie. On obtient l'équation de l'énergie :

$$\nabla \cdot (\rho V T) = \nabla \cdot \left( \frac{k_f}{c_p} \nabla T \right) \quad (IV.7)$$

Ou encore:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (IV.8)$$

#### IV.5. Conditions aux limites:

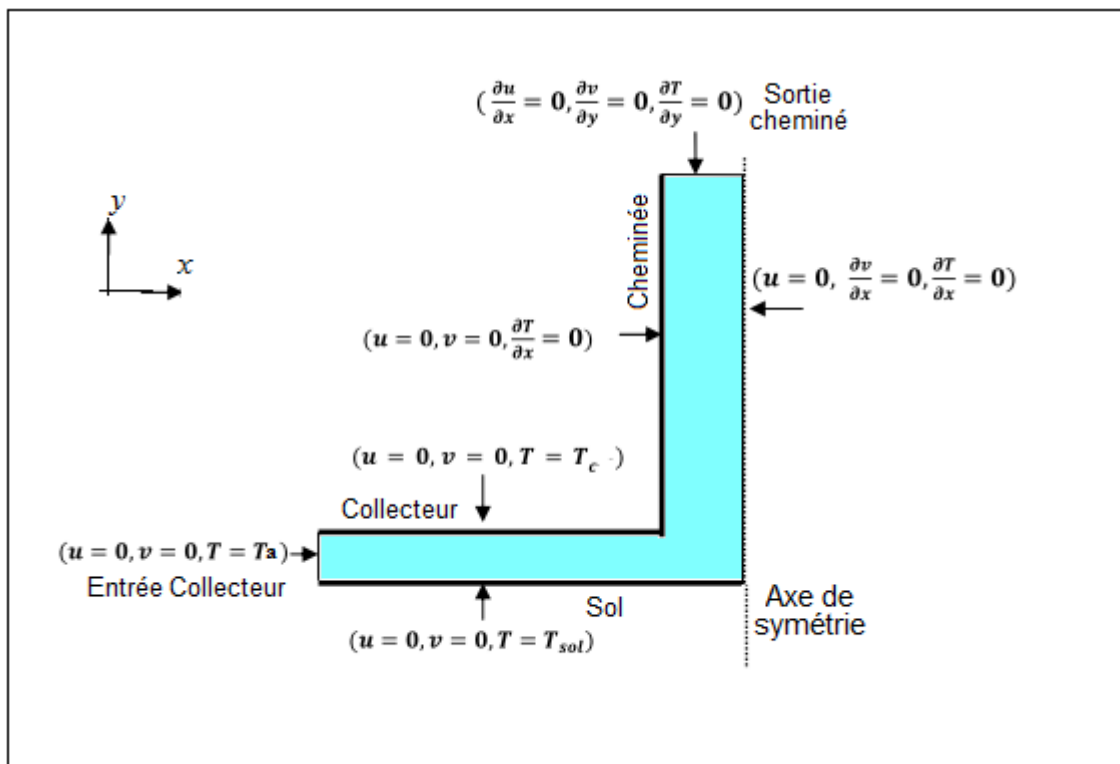


Figure (IV.1):Présentation des conditions aux limites

**IV.5.1. Conditions d'entrée :**

A la section d'entrée, l'écoulement et les conditions aux limites thermiques ne sont pas bien définis puisque l'écoulement à l'intérieur de la cheminée est induit par les forces de flottabilité. Le profil d'entrée est déduit des données expérimentales. Pour cela, dans la présente étude on va prendre la condition d'entrée suivante :

vitesse uniforme à l'entrée est nulle avec température  $T_a$ .

$$u=0, v=0, T=T_a \quad (IV.9)$$

**IV.5.2. Conditions de sortie:**

La condition de sortie est de type Newman

$$\frac{\partial u}{\partial x}=0, \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (IV.10)$$

**IV.5.3. Conditions à l'axe de symétrie :**

A l'axe de symétrie, il n'y a pas de variation par rapport à  $x$  pour les variables  $v$ ,  $T$  mais la vitesse  $u$  est variée :

$$u=0, \frac{\partial v}{\partial x}=0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (IV.11)$$

**IV.5.4. Conditions aux limites au sol :**

Au sol de la cheminée solaire, Les conditions aux limites des vitesses et de température sont celles de Dirichlet, où:

$$u=0, v=0, T=T_{sol} \quad (IV.12)$$

**IV.5.5. Conditions aux limites au toit du collecteur :**

Les conditions aux limites des vitesses et de température prises au toit du collecteur sont de celles de Dirichlet, où:

$$u=0, v=0, T=T_c \quad (IV.13)$$

**IV.5.6. Conditions aux limites à la paroi de cheminée :**

A la paroi de la cheminée, on prend les conditions aux limites de Dirichlet pour les vitesses et la température, où:

$$u=0, v=0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (IV.14)$$

**IV.6. Formulation adimensionnelle:**

Pour simplifier le problème, nous procédons à adimensionner les équations fondamentales. En regroupant les termes prépondérants par rapport à des paramètres caractéristiques de référence.

**IV.6.1. Les constantes:** (IV.15)

- Longueur :  $L$
- Vitesse :  $V_0 = \frac{a}{L}$
- Pression :  $P_0 = \rho V_0^2$

**IV.6.2. Les variables adimensionnelles:** (IV.16)

- $x^* = \frac{x}{L}$
- $y^* = \frac{y}{L}$
- $u^* = \frac{u}{u_0} = u \frac{L}{a}$
- $v^* = \frac{v}{v_0} = v \frac{L}{a}$
- $P^* = \frac{P}{P_0} = \frac{P}{\rho V_0^2}$
- $T^* = \frac{T - T_a}{T_{sol} - T_a}$

**IV.6.3. Les nombres adimensionnels:**

Dans bien des cas, les principales caractéristiques d'un écoulement peuvent être déterminées à l'aide des nombres sans dimension. Dans cette section, on présente les nombres adimensionnels qui sont utilisés pour le phénomène de convection naturelle. La majorité de ces nombres apparaissent naturellement lors de la construction des équations sans dimension.

**IV.6.3.2 Nombre de Prandtl:**

Dans les écoulements thermiques, le rapport entre les transferts de quantité de mouvement par les forces visqueuses sur le transfert de chaleur par conductivité thermique est appelé nombre de Prandtl :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (IV.17)$$

**IV.6.3.3. Nombre de Grashof:**

Le nombre de Grashof est employé pour comparer les forces de flottabilité causées par la différence de masse volumique entre le fluide chaud et le fluide froid et les forces visqueuses qui s'exercent sur un volume élémentaire de fluide. Il apparaît dans les problèmes de convection mixte ou de convection naturelle.

$$Gr = \frac{\rho^2 g L^3 \beta \Delta T}{\mu^2} \quad (IV.18)$$

**IV.6.3.4. Nombre de Rayleigh:**

Un autre nombre utilisé pour l'analyse par similitude des écoulements engendrés par la convection naturelle ou la convection mixte est le nombre de Rayleigh : Ce nombre est similaire au nombre de Grashof. Il compare les forces de flottabilité dues à la différence de masse volumique entre le fluide chaud et le fluide froid au produit des forces visqueuses et thermiques qui s'exercent sur un volume élémentaire de fluide.

$$Ra = \frac{C_p \rho^2 g L^3 \beta \Delta T}{\mu \lambda} \quad (IV.19)$$

➤ Pour faire une analyse par similitude d'un écoulement induit par la convection

naturelle, une des deux combinaisons suivantes de nombres sans dimension est suffisante :

a). Pr et Ra.

b). Pr et Gr.

## IV.7. Forme adimensionnelle des équations:

### IV.7.1. Equation de continuité:

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0 \quad (\text{IV.20})$$

### IV.7.2. Equation de la conservation de la quantité de mouvement:

➤ Selon l'axe des abscisses x :

$$u^* \frac{du^*}{dx^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P^*}{\partial x^*} + Pr \left( \frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \right) \quad (\text{IV.21})$$

➤ Selon l'axe des abscisses y :

$$u^* \frac{\partial v^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P^*}{\partial y^*} + Pr \left( \frac{\partial^2 v^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} \right) + Ra \cdot Pr \cdot T^* \quad (\text{IV.22})$$

### IV.7.3. Equation de l'énergie:

$$u^* \frac{\partial T^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial T^*}{\partial y^*} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^{*2}} \right) \quad (\text{IV.23})$$



# ***CHAPITRE V***

## ***MODÉLISATION NUMÉRIQUE***

**V.1. INTRODUCTION:**

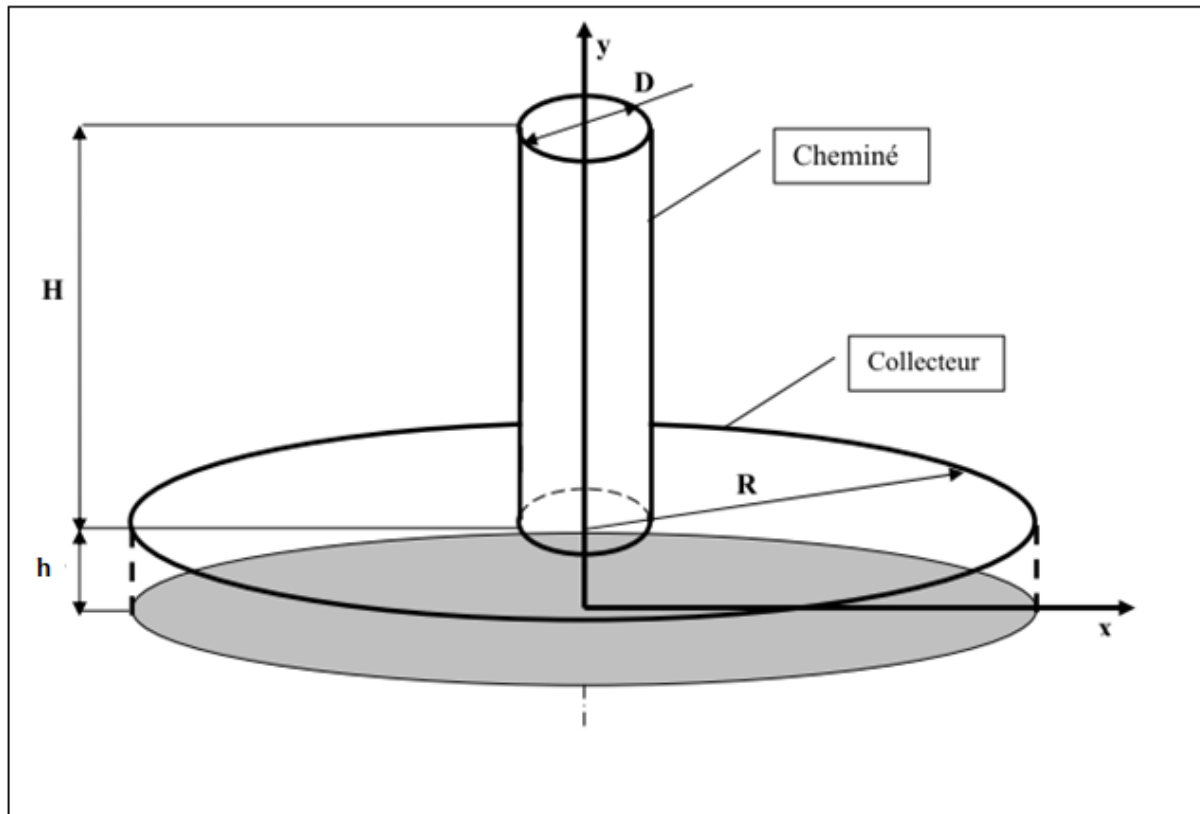
Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'analyse des résultats numériques obtenus en ce qui concerne l'influence des dimensions (géométrie) de la cheminée solaire sur l'efficacité énergétique (la puissance électrique produite). Un ensemble des paramètres définissant la taille de la cheminée. A travers les contours et les courbes de différentes grandeurs physiques ( contour de vitesse et le contour température et la pression), une discussion et interprétation auront lieu.

**V.2. Principes des codes CFD (Computational Fluid Dynamics) :**

Les logiciels de simulation numérique des écoulements basés sur la méthode des volumes finis peuvent maintenant être considérés comme de véritables « expériences numériques », lorsqu'elles sont faites avec soin. L'avantage des « méthodes numériques » est que toutes les quantités physiques liées à l'écoulement (champ de vitesse, champ de pression, contraintes etc.), sont immédiatement disponibles en tout point de l'écoulement. Dans une expérimentation, l'obtention de ces quantités physiques en tout point du champ est souvent impossible ou très difficile en pratique.

**V.3. Description du problème:**

On base notre étude numérique sur un prototype de cheminée solaire de taille proche de celle de Manzanares (Projet de l'Espagne). Il constitue d'une cheminée (tour) de hauteur  $H=180$  m et de diamètre  $D=10$  m et d'un collecteur de rayon  $R=120$  m et de hauteur  $h=2$  m. L'étude de l'efficacité dimensionnelle de la cheminée est basée sur la variation d'un paramètre dimensionnel. L'analyse de l'évolution des grandeurs physiques, telles que la vitesse et la température et la pression, est en fonction de la variation de ce paramètre.



**figure (V.1):** Géométrie tridimensionnelle de la cheminée solaire

#### V.4. Les hypothèses :

Premièrement, il nous faut connaître la nature de l'écoulement dans la cheminée solaire. Celui-ci sera soit laminaire soit turbulent. Pour prouver la nature de l'écoulement, nous devons calculer le nombre de Rayleigh de la cheminée solaire. Une fois la nature de l'écoulement déterminé, nous en saurons plus sur les hypothèses que nous pourrions réaliser pour ce calcul, on considère l'air à la pression atmosphérique à l'entrée et à la sortie de la cheminée. De part la taille de cette dernière et de fait que nous supposons l'écoulement incompressible dans la cheminée solaire.

On calcule le nombre de Rayleigh pour assurer l'hypothèse de l'écoulement laminaire.

- $Ra < 10^9$  : L'écoulement est laminaire.
- $Ra > 10^9$  : L'écoulement est turbulent.

Pour obtenir un nombre de Rayleigh inférieur de  $10^9$ , modifier par valeur de  $g$  (adimensionnement de  $g$ ), on donne  $g$  la valeur de  $(6,96 \cdot 10^{-5})$ . Ceci est bien sûr sans sens

physique, mais cela permet, sans modifier le maillage ni les conditions limites, de traiter le nombre de Rayleigh.

$$Ra = \frac{C_p \rho^2 g L_c^3 \beta \Delta T}{\mu k_f} \quad (V.1)$$

Ou :  $C_p = 10007,4 \text{ J/kg.k}$

$$\rho = 1,0924 \text{ kg/m}^3$$

$$L_c = 2 \text{ m}$$

$$\beta = 0,00309 \text{ K}^{-1}$$

$$\Delta T = 20 \text{ K}$$

$$\mu = 1,957 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}$$

$$k_f = 0,02781 \text{ W/m.k}$$

Donc :

$$Ra = \frac{(1007,4)(1,0924)^2(6,96 \cdot 10^{-5})(2)^3(0,00309)(20)}{(1,957 \cdot 10^{-5})(0,02781)}$$

$Ra = 9,5 \cdot 10^4 < 10^9$  L'écoulement est laminaire.

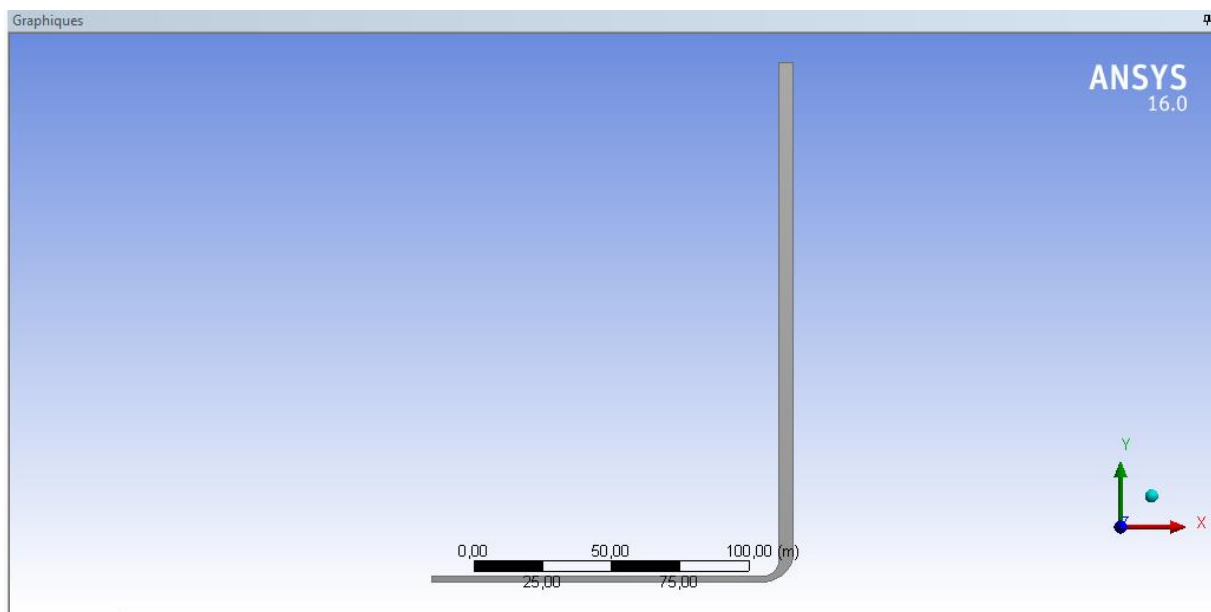
De plus, pour notre étude, nous faisons les hypothèses suivantes :

- On considère un vent extérieur nul partout dans le but de ne pas avoir de déséquilibre dans la cheminée et d'obtenir une vitesse de flux d'air symétrique.
- On considère qu'il n'y a pas d'ombre sur la cheminée engendrée par un nuage, un arbre, une montagne ou la cheminée elle-même pour que la variation de température soit symétrique à l'intérieur de cette dernière. Le soleil est donc à son zénith et le restera au cours des simulations.
- On considère le sol à une température constante et différente de la température à l'intérieur de la serre.
- L'écoulement d'air est supposé incompressible et permanent car nous souhaitons observer le régime permanent du système (température et vitesse ne varient « plus » étant donné que ne pouvons pas modéliser la convection naturelle.

## V.5.Création de la géométrie et le maillage en Workbench :

### V.5.1.Géométrie :

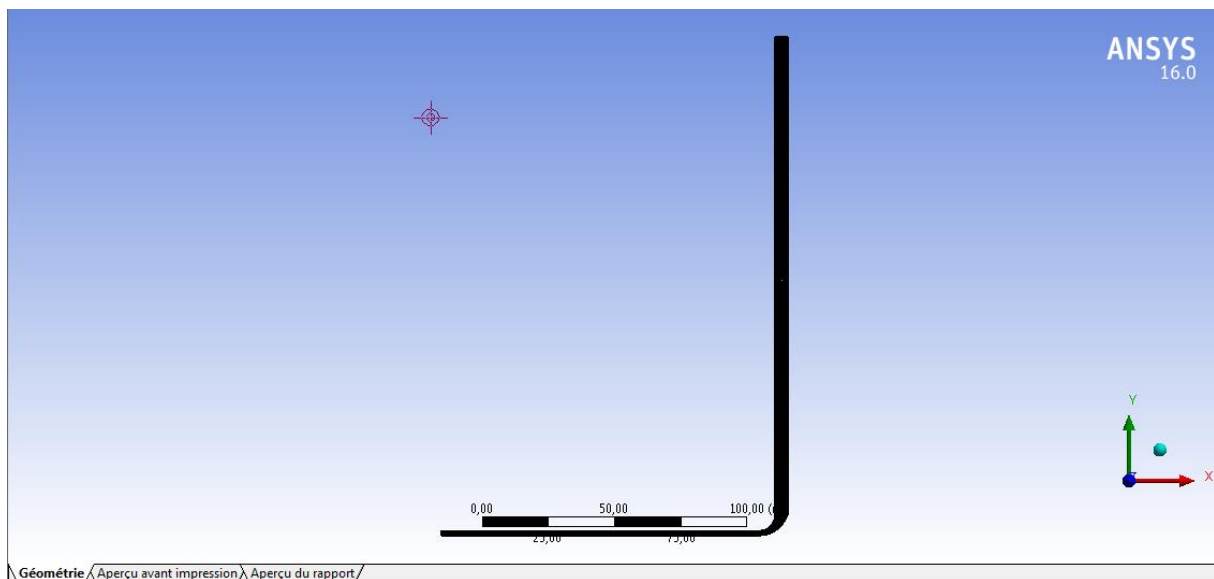
On crée la géométrie du prototype de base par trois éléments (surfaces) en deux dimensions sur le plan (x,y), et avec une axe de symétrie (l'axe des abscisses x). Le collecteur est un rectangle horizontal d'une longueur (représente ici le rayon R) de 120 m et d'une largeur (représente ici la hauteur h) de 2m, le collecteur a une jonction avec la cheminée par un coude convergent et de diamètre 10m, son entrée est avec une largeur de 2m et son sortie est avec une largeur de 5m. La cheminée est un rectangle vertical d'une longueur (représente ici la hauteur H) de 180 m et d'une largeur (représente ici le rayon D/2) de 5m



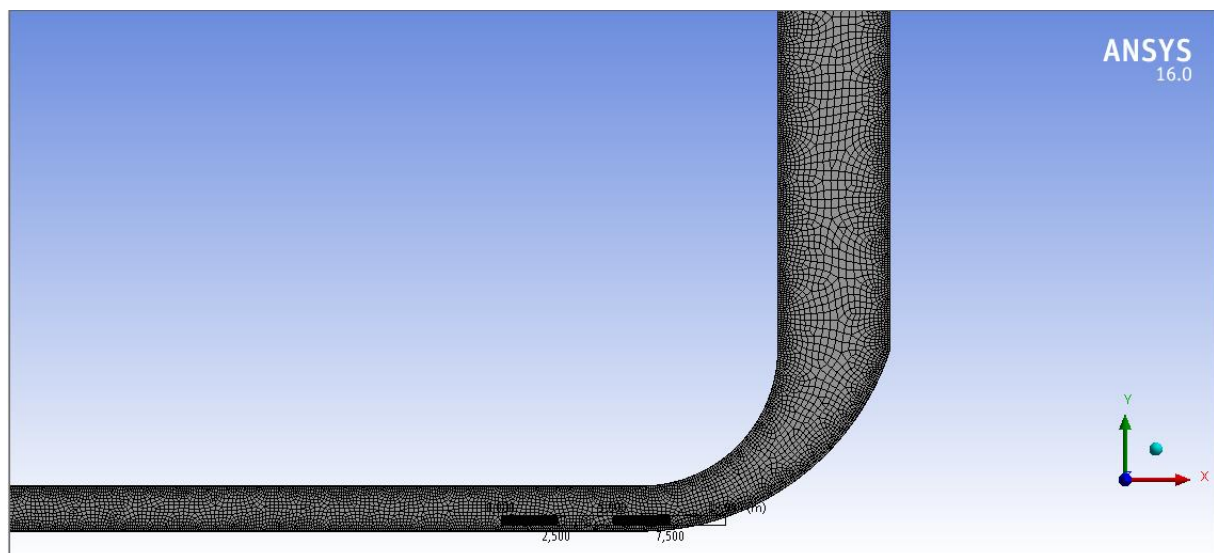
Figure(V.2) : géométrie de la cheminée solaire en workbench

### V.5.2.Optimisation de maillage:

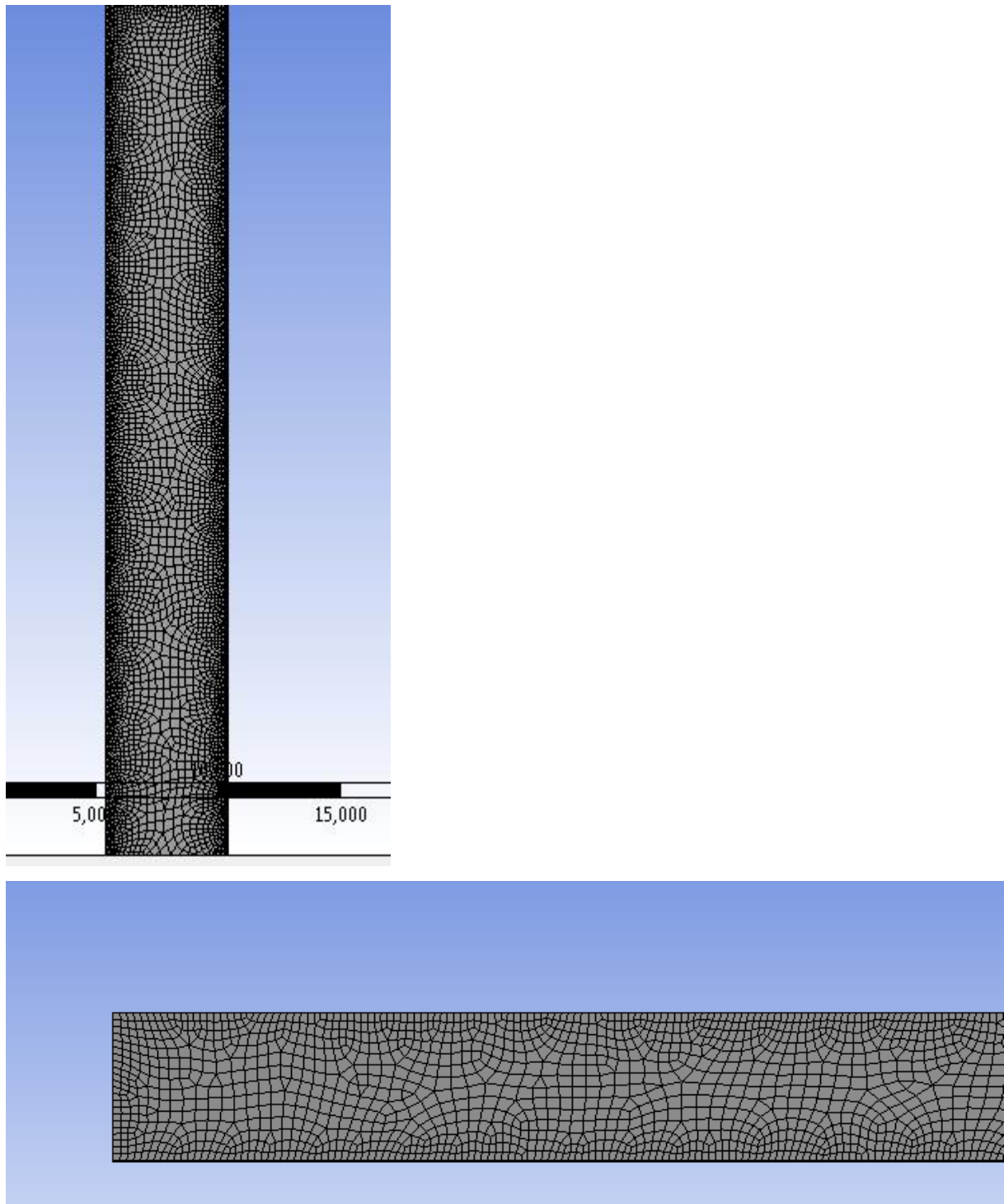
Pour une meilleure précision et une meilleure stabilité, nous avons adopté un maillage quadrilatéral structuré à multi bloc formé de lignes continues à travers le domaine, qui suivent au mieux le contour des surfaces définissant la géométrie. Après des tests de précision, un maillage de 77150 cellules a été adopté.



**Figure(V.3) :** maillage généré de la cheminée solaire



**Figure (V.4):** Vue latérale du maillage généré pour côté jonction

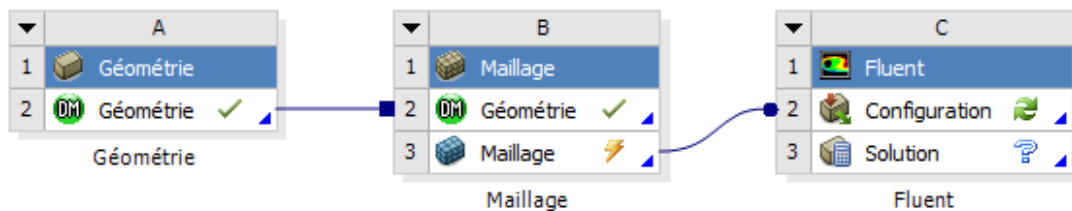


**Figure(V.5) :** vue latéral zoomé de collecteur et de la tour de la cheminée

## V.6. Choix des paramètres de FLUENT:

Une fois le chargement du fichier de maillage (réalisé avec le logiciel workbenche) effectué sous Fluent, nous devons mettre à l'échelle de la géométrie (pour notre cas, on utilise le mètre).

Le logiciel Fluent permet aussi de réordonner les noeuds, les surfaces et les cellules en mémoire, de telle façon qu'ils aient la même disposition dans la grille et dans la mémoire et cela pour améliorer les performances du calcul et l'efficacité d'accès à la mémoire (Grid\Reorder).



Figure(V.6) : différentes étapes dans logiciel

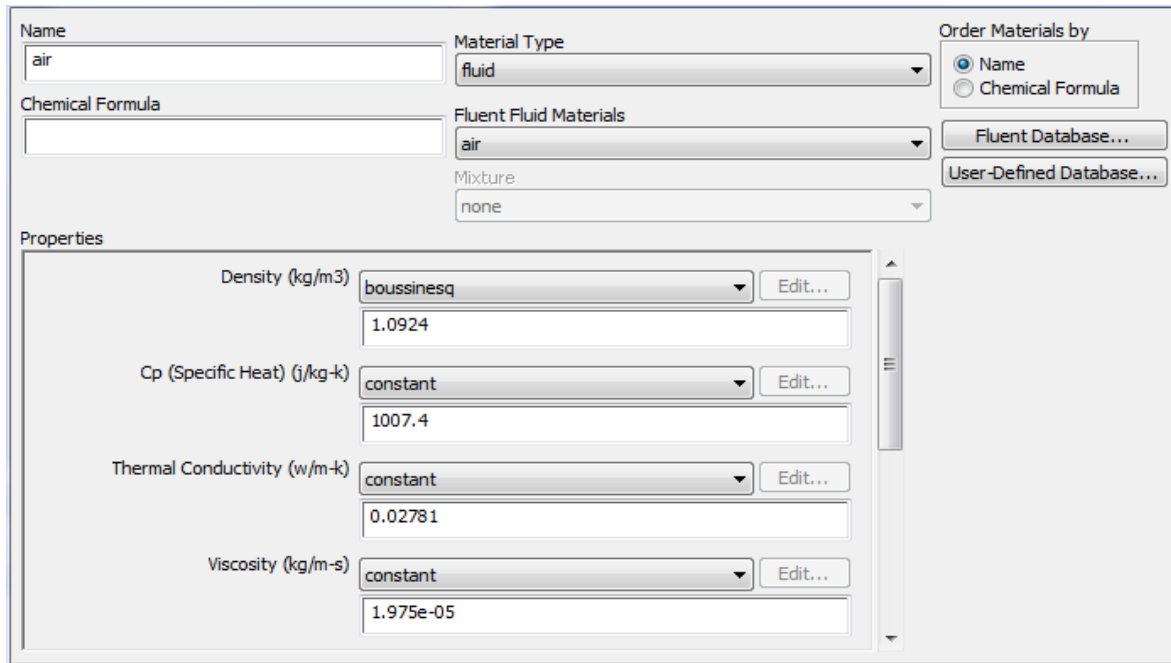
### V.6.1.condition aux limites :

Le tableau ci-dessous (Tableau V.1) résume les conditions aux limites déclarées

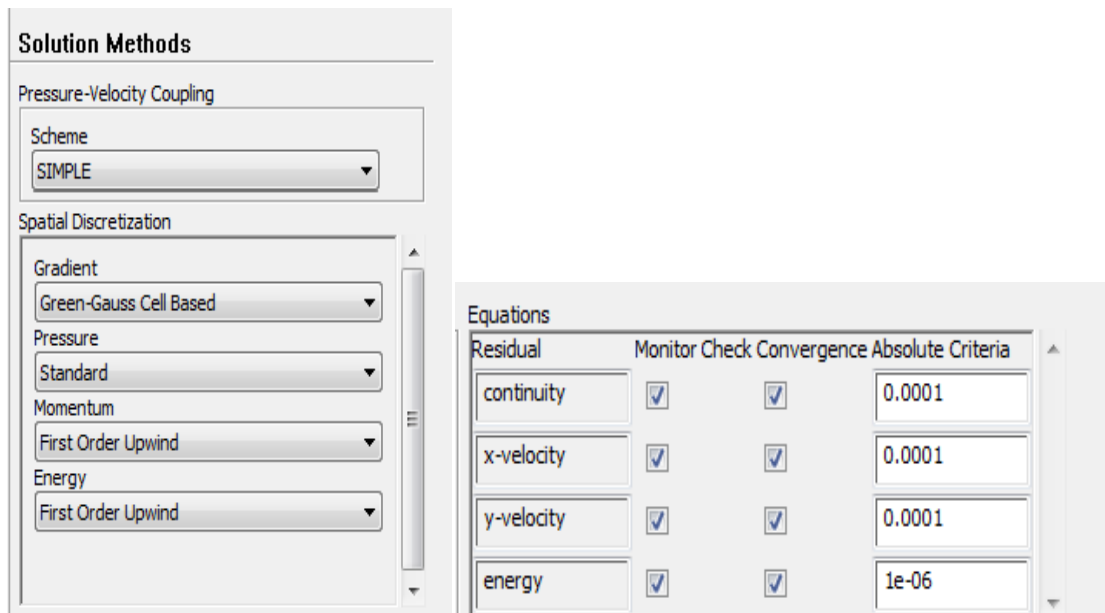
Nom de limite	Position de limite	Type de limite
Entrée collecteur	Gauche	Pressure inlet (la pression a l'entrée )
Sol collecteur	Bas	Wall (paroi)
Toi collecteur	Haut	Wall(paroi)
Paroi cheminée	Gauche	Wall (paroi)
Paroi jonction	Gauche centre	Wall (paroi)
Axe de symétrie	Centre	Axis (axe)
Sortie cheminée	Haut	Pressure outlet (pression a la sortie)

Tableau V.1: Conditions aux limites déclarées

V.6.2. Quelques paramètres de résolution numérique par FLUENT:



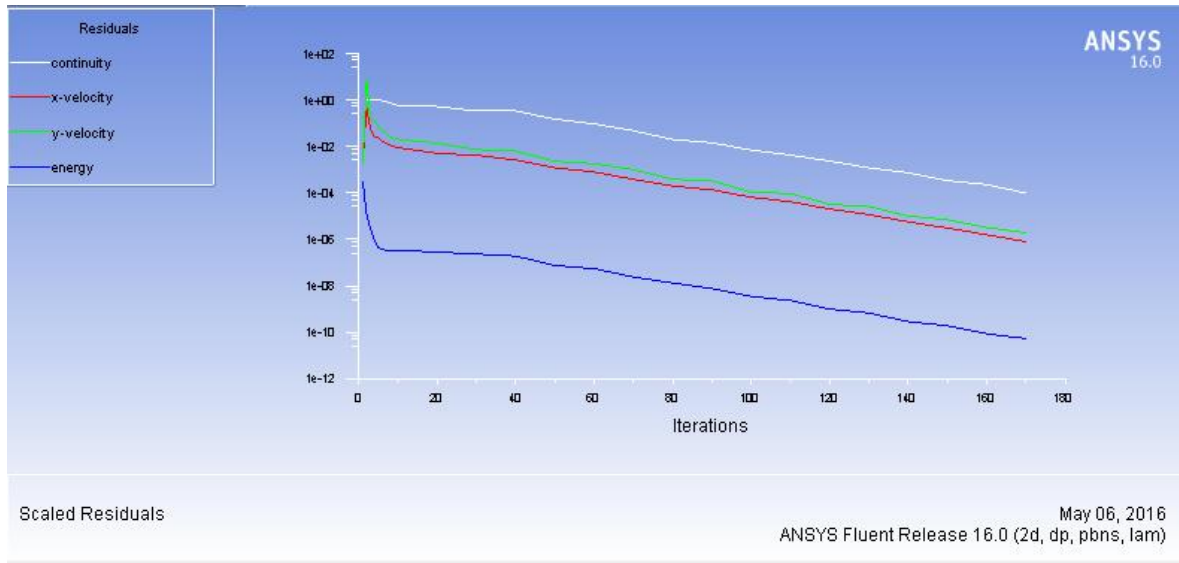
Figure(V.7) : Propriétés physique de fluide (air).



Figure(V.8) : Caractéristiques numériques.

**V.6.3. La convergence :**

L'algorithme SIMPLE est utilisé pour résoudre le couplage entre la pression et la vitesse dans les équations de continuité et de quantité de mouvement. L'équation d'énergie est résolue numériquement en utilisant le modèle de radiation ROSSELOND , Une solution numérique est prise convergée lorsque les résidus pour les différentes grandeurs physiques deviennent inférieurs à  $10^{-6}$



**Figure(V.9) :** la convergence des résultats

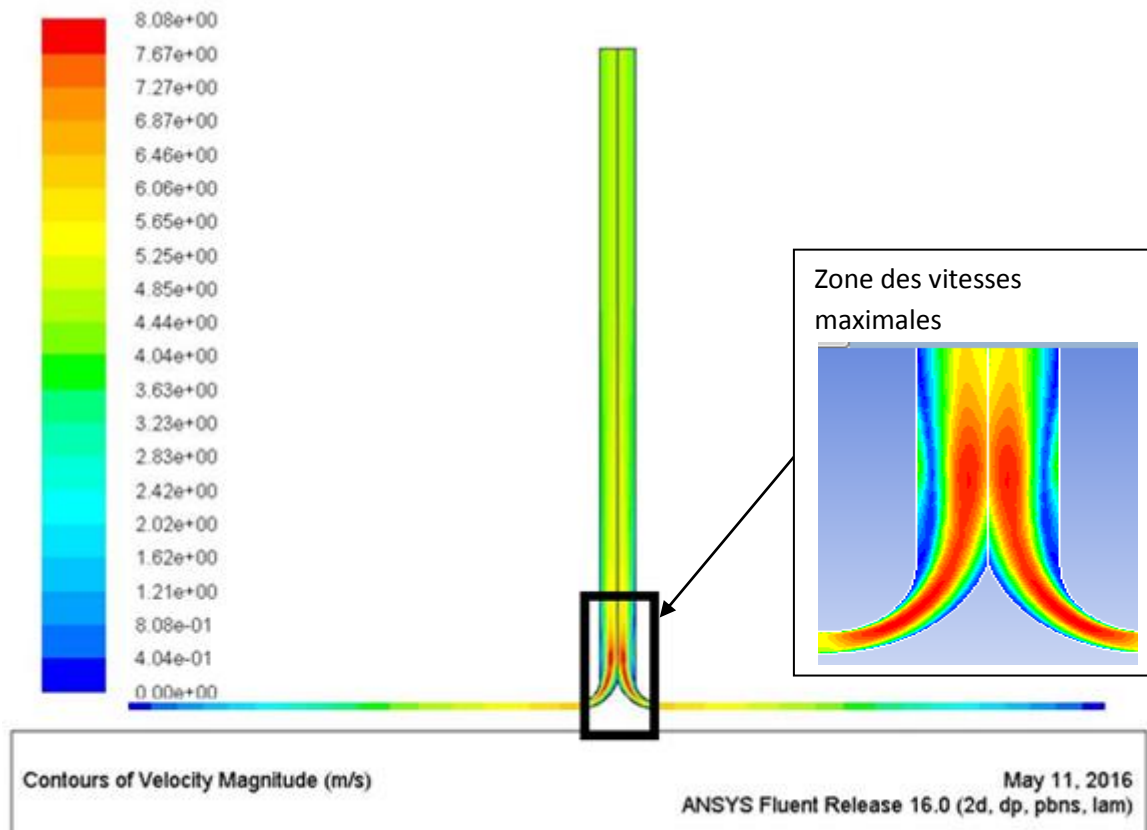
**V.7.Résultats et discussions :**

Les résultats sont variés en fonction des dimensions de la cheminée solaire. L'influence des paramètres géométriques principaux de la cheminée solaire sur le comportement d'écoulement d'air a été évaluée. Les paramètres géométriques analysés sont la hauteur et le diamètre de la cheminée, et le rayon et la hauteur de collecteur.

**V.7.1. Champs de vitesse:**

L'évolution de la vitesse à l'intérieur de la cheminée solaire est représentée sur la figure(V.10), on remarque que cette vitesse est importante au centre de la cheminée, où son maximum atteint à la jonction (figure V.11), parce que la différence de pression  $\Delta P$  est maximum dans cette zone.

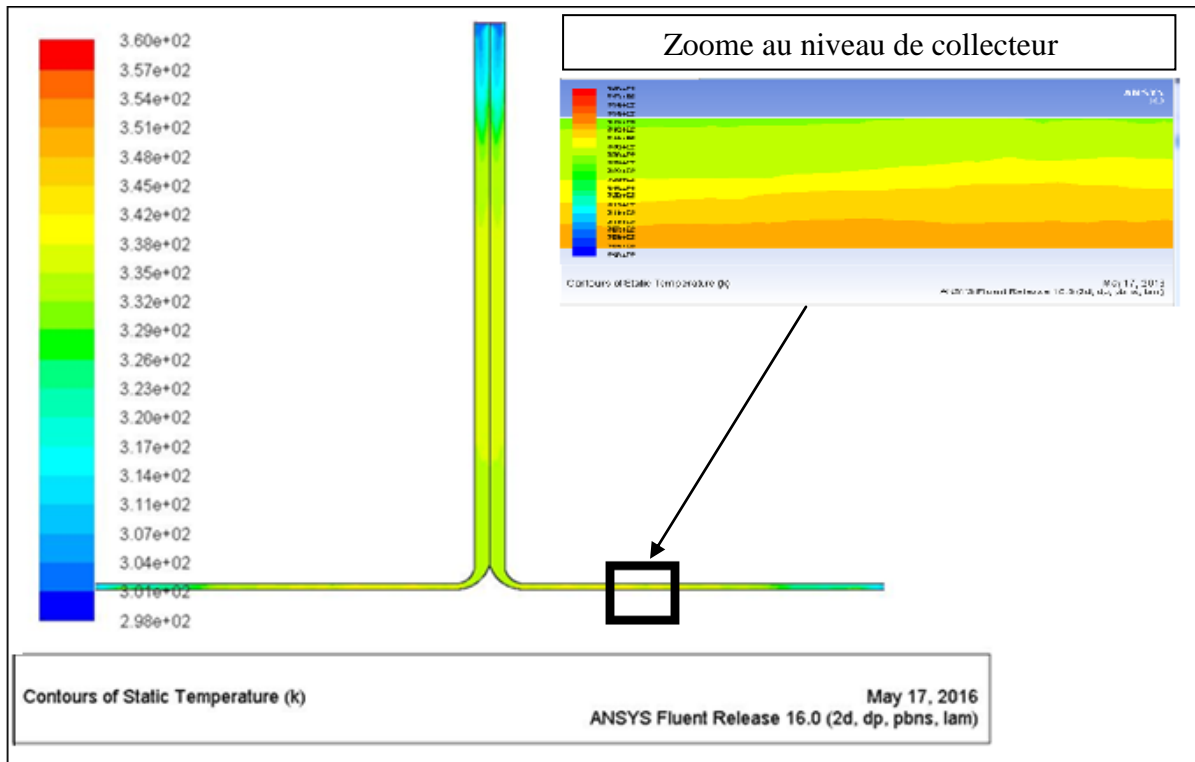
Pour créer un écoulement d'air sous forme de vent, il faut engendrer une différence de pression. Il faut que la hauteur de la cheminée soit plus élevée, pour atteindre un niveau de basse pression par rapport au niveau de la base. Donc la pression de l'air à la sortie de la cheminée est inférieure à celle d'entrée, ce qui augmente la vitesse d'élévation verticale de l'air chaud dans la cheminée



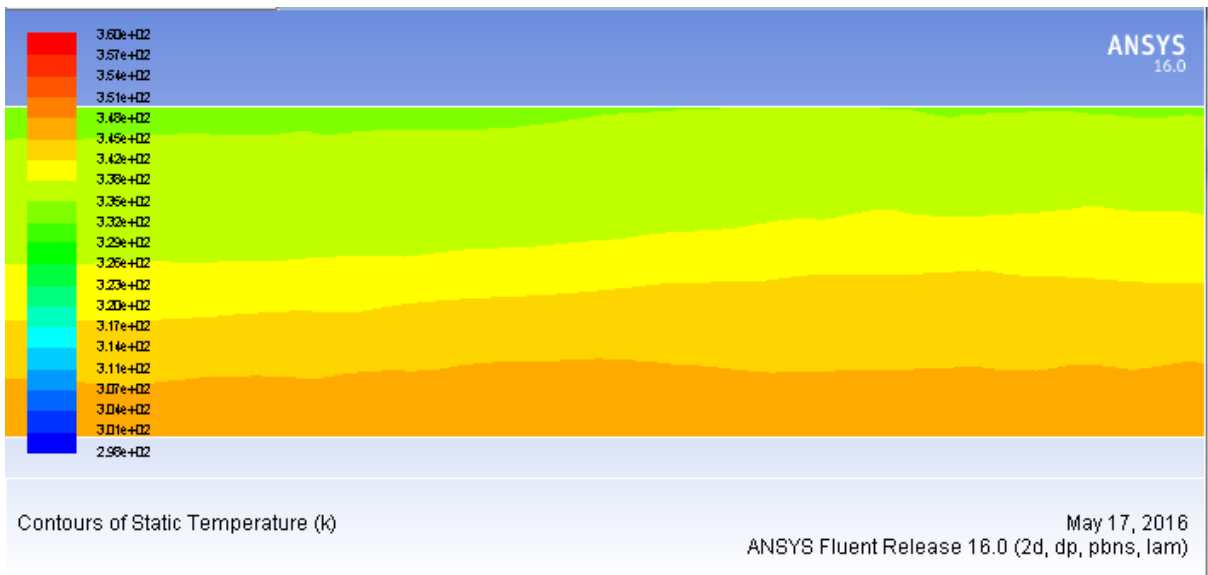
**Figure (V.10):** Contours des vitesses.

### V.7.2.champs de température :

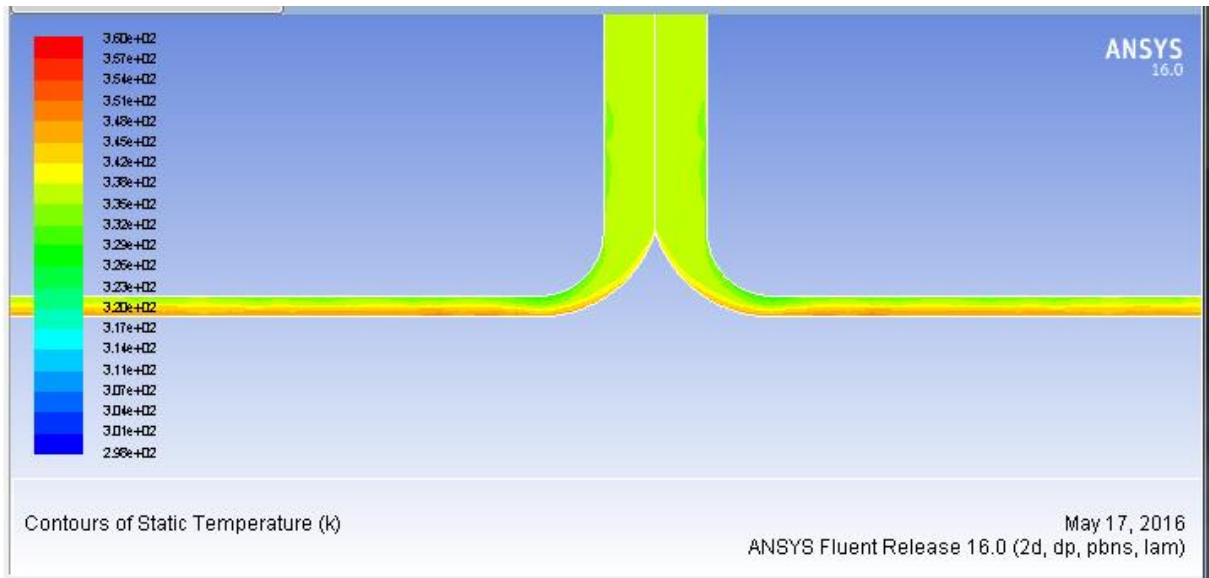
La figure(V.12) représente le contour de la température le long de la cheminée solaire, on voit que la température a l'entrée de collecteur égal a la température ambiante, cette température va augmenter avec le déplacement de l'air vers le centre de collecteur ceci expliquer par le fait que l'air celui –ci s'échauffe a cause de l'effet de serre dans le collecteur. La température de sol est la plus important dans le collecteur comme montre la figure (V.13) parce que ce dernier absorbe une grande partie de rayonnement solaire en raison de l'absorptivité de sa surface qui stock le maximum de rayonnement solaire. En outre sa réflectivité et sa transmissivité sont presque nulles. En outre, on remarque que la température moyenne du vitrage( $T_v$ ) est plus basse que les autres températures, dues à la faible absorptivité du vitrage à son refroidissement convectif des deux côtés.



Figure(V.11) : Contours de température



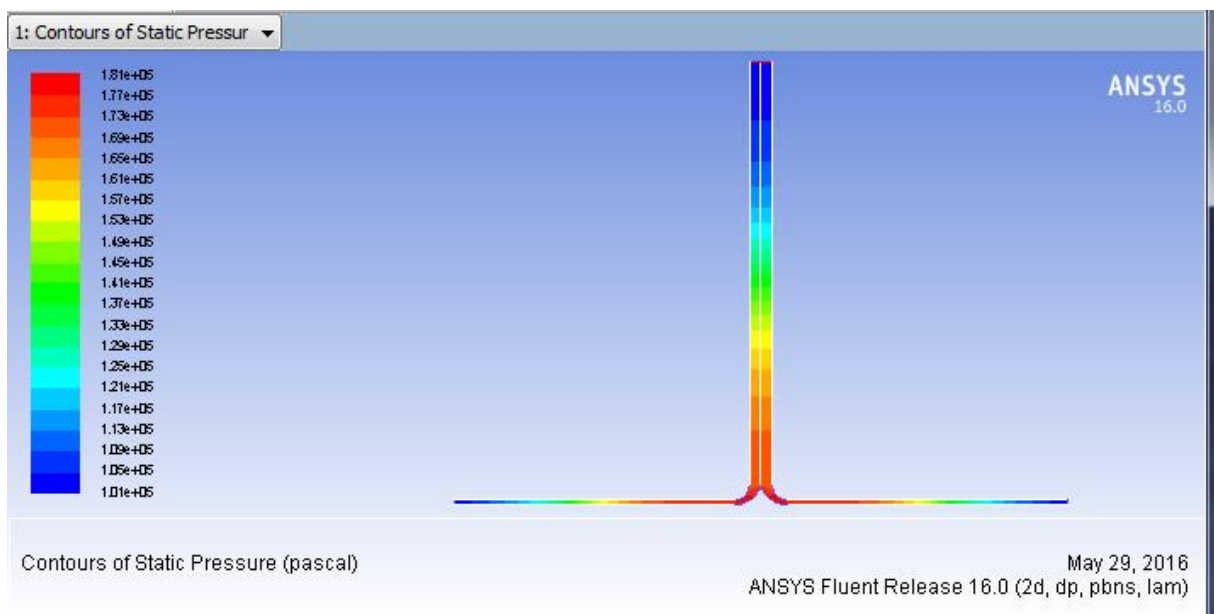
Figure(V.12) : Contours de température zoomés au niveau de collecteur



**Figure(V.13) :** Contours de température zoomés

### V.7.3. Contours de pression:

La figure (V.14), représente le contour de pression le long de la zone de jonction où la différence de pression est plus grande. Lorsque les particules changent sa direction vers le haut, un freinage accompagné d'un encombrement produit une augmentation de pression. Ces contours nous permettent de déterminer la section qui nous réalise une meilleure P, pour un emplacement optimal de la turbine tout en profitant du maximum de vitesse axiale générée, Afin d'avoir une meilleure puissance



**Figure (V.14):** Contours de pression



***CONCLUSION***

***GENERALE***

---

# Conclusion général

---

## *Conclusion générale*

Face au double défi climatique et énergétique, et avec la dépendance absolue au gaz dans le domaine de production d'électricité, il doit s'orienter vers les énergies renouvelables, parce qu'elles dépendent moins de stocks finis et parce qu'elles présentent des avantages environnementaux importants (faible pollution atmosphérique et faibles émissions de gaz à effet de serre (GES))

Le tour solaire remplace beaucoup plus la centrale électrique conventionnelle l'énergie électrique produite doit être transportée vers son lieu de consommation. Cette technologie produit aussi de la chaleur à basse température. Elle a ainsi l'avantage d'être exploitée aussi dans les champs pétroliers. Aussi une technologie à stratégie politique et économique.

Cette technologie couvre certes aujourd'hui une infime partie des besoins mondiaux. La prochaine décennie prévoit des productions de puissances s'évaluant en MW et à moyen terme leur apport sera tel qu'une marche arrière ne sera plus possible.

L'objectif principal de notre étude a été d'atteindre une plus grande vitesse possible

D'écoulement au sien de la cheminée afin d'utiliser cette vitesse pour faire tourner une turbine.

Une analyse numérique de l'écoulement à l'intérieur d'une cheminée solaire a été présentée. L'écoulement a été modélisé par la résolution numérique des équations de conservation de la masse, de l'énergie, aussi bien que du mouvement.

L'évolution de la vitesse est importante au centre de la cheminée, où son maximum atteint à la jonction.

**1.** L'analyse a montré que les bonnes conditions climatiques comme la température ambiante et le gisement solaire sont des paramètres qui pilotent tout le fonctionnement de la cheminée.

**2.** L'analyse a montré que l'augmentation des paramètres géométriques aussi augmente la productivité (la puissance) :

- l'augmentation de la hauteur de cheminée augmente la productivité en énergie représenté par l'énergie cinétique à la jonction (emplacement des turbines éoliennes).
- L'augmentation de diamètre de cheminée permet une augmentation de débit massique, ce qui est traduit par l'élévation de productivité en relation proportionnelle avec le diamètre de la cheminée.

## Conclusion général

---

- L'influence de collecteur sur le comportement de l'écoulement a été évaluée où l'augmentation de productivité représentée par l'énergie cinétique en fonction de l'augmentation du rayon de collecteur s'accompagne avec l'augmentation de la température (force motrice du mouvement) le long de la cheminée.
- L'élévation de la hauteur de collecteur permet une diminution des pertes thermiques de l'écoulement dans le collecteur, et par la suite des vitesses et débits massiques plus élevées. A certaine valeur (seuil) de la hauteur de collecteur, la vitesse se réduit comme une conséquence d'une augmentation du temps requis par l'écoulement pour atteindre le toit du collecteur. L'intensification des échanges thermiques entre le sol et le toit entraîne une petite élévation dans la température d'écoulement.

On a observé que les variables physiques les plus importants pour une cheminée solaire sont les dimensions, où elles permettent les variations les plus significatives dans le comportement de l'écoulement.

Une augmentation en hauteur et diamètre de la cheminée produit une augmentation de la vitesse et une diminution de la température d'écoulement le long de la cheminée.

Le modèle développé a permis de déterminer les champs des vitesses et de la température à l'intérieur des cheminées solaires dépendamment de ses dimensions, et d'évaluer l'influence de ces grandeurs physiques comme variables opérationnelles sur le comportement de l'écoulement.

Le modèle développé est un outil utile pour la conception et le fonctionnement des cheminées solaires, permettant la détermination des paramètres les plus appropriés dans les différentes conditions.

***RÉFÉRENCE***  
***BIBLIOGRAPHIQUE***

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : D. WILGENBUS, "L'énergie solaire", La main à la pâte – Société française de physique, Paris 2012.
- [2] : Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette , LaMétéorologie 8e série - n°31 - septembre 2000.
- [3] : S. BONNET, M. ALAPHILIPPE, P. STOUFFS, "Conversion Thermodynamique de l'Energie Solaire dans des Installations de Faible ou de Moyenne Puissance : Réflexions sur le Choix du Meilleur Degré de Concentration", Journées Internationales de Thermique, pp 73-80, (2003).
- [4] : A. OUBARRA, "Conversion de l'énergie solaire", Maroc Bouznika 11 – 15 Mai 2010.
- [5] : AFRIQUE EXPANSION (revue internationale des affaires et des partenariats nord - sud): l'énergie solaire concentrée la chance énergétique des pays du sud, septembre 2010
- [6] : le ministère de l'énergie et des mines: Le Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, Mars 2011
- [7] IEA: Technology road map, concentrating solar power, 2010.
- [8] : la Commission économique des Nations Unies pour l'Afrique (CEA-AN): Le secteur des énergies renouvelables en Afrique du Nord, Situation actuelle et perspectives, Maroc Septembre 2012,
- [9] : H. Günther, 'In hundert Jahren – Die künftige Energieversorgung der Welt (In hundred years – Future energy supply of the world)' Kosmos, Franckh'sche Verlagshandlung, Stuttgart, 1931.
- [10]: Taylor, R.H. (1983). Alternative energy Sources; Adam Hilger Ltd, p.292.
- [11]: JÖRG SCHLAICH, "The solar chimney: electricity from the sun", Edition Axel Menges, Novembre 2004.
- [12]: SolarChimney-Technology. Retrieved 10.11.2004 from; [http://www.sbp.de/de/html/projects/solar/aufwind/pages\\_auf/techno.htm](http://www.sbp.de/de/html/projects/solar/aufwind/pages_auf/techno.htm)
- [13]: M. ULIAN M. RICARD, B. LASMARRIGUES, M. LELAIDIER Mathias, "Cheminée tour solaire", Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2010/2011.
- [14] : <http://www.tour-solaire.fr/nouvelles-infos.php>, 30 avril 2014.
- [15] : T. TAYEBI, "Processus de la convection naturelle laminaire dans une cheminée solaire", magister en physique, faculté des sciences exactes, département de physique, Université Mentouri Constantine 06 / 07 / 2010.

- [16] : PABLO GONZALEZ GASCON Y MARIN, "Les tours solaires, deux approches pour utiliser l'énergie du soleil, Énergies renouvelables, ENSTA, Paris 05.01.2011.
- [17] : A. DHAHRI, A. OMRI, "A Review of solar Chimney Power Generation Technology", (IJEAT), February 2013
- [18]: [www.ccsenet.org/mas/moderne](http://www.ccsenet.org/mas/moderne) Applied Science Vol. 7, n° 4; 2013 58
- [19]: (Direksataporn, 2008), URL: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n4p55> College of Engineerin2010
- [20]: (Hamdan, 2011). URL: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n4p55> College of Engineerin2010
- [21]: (Zhou, Yang, Xiaco, et Shi, 2008). URL: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n4p55> College of Engineerin2010
- [22]: (Bernardes & Weinrebe, 2003), URL: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n4p55> College of Engineerin2010
- [23]: (Xinping et al., 2010). URL: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n4p55> College of Engineerin2010
- [24]: (Wylie, 1966). URL: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n4p55> College of Engineerin2010
- [25]: (Annaratone, 2010), URL: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n4p55> College of Engineerin2010
- [26]: (Chergui, Larbi, & Bougdjar, 2011): URL: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n4p55> College of Engineerin2010
- [27]: (Storage, 2005) URL: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n4p55> College of Engineerin2010
- [28]: (Stine & Gayer, 2001) URL: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n4p55> College of Engineerin2010
- [29] : (Schlaich, Bdrgermann, Schiel, & Weinrebe, 2005) URL <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n4p55> College of Engineerin2010
- [30]: (article)7\_IJPAST-444-V13N2.32215919\_2.pdf , URL: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n4p55> College of Engineerin2010
- [31]: Mourad GAHGAH "Influence des régimes d'écoulements sur les performances énergétiques des cheminées solaires" mémoire de magistère E.N.P, 2008.
- [32]: Jyotirmay Mathur , Sanjay Mathur, Anupma. Summer-performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation. Energy and Buildings 38 (2006) pp 1156–1163



***ANNEXE***

### Le programme MATLAB :

- Le programme qui calcule les températures (Tsol,Tf,Tc)

```
% programme calcul des températures solaire
clc
clear all

Vwind = input('Vitesse du vent Vwind [m/s]=');
R = input('Rayon max du collecteur R [m]=');
r = input('Rayon min du collecteur r [m]=');

fprintf( 't          Ta          I          Tc          Tsol          Tf
\n');
formatSpace = ' [h]          [°C]          [w/m²]          [°C]          [°C]          [°C]
\n';
fprintf( formatSpace);

for i = 1:15
    t=[5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 ];
    Ta =[30 30 31.2 33 35.6 38 40.5 43.2 45 45.6 45.5 45.2 44.8 43.3 41.2];
    I = [0 96 285 496 687 837 934 970 942 708 582 522 310 120 0 ];
    t=t(i);
    Ta =Ta(i);
    I = I(i);
    %Temperature initial
    Tc0 = Ta + 5;
    Tf0 = Ta + 10;
    Tsol0 = Ta + 15;
    Vf0 = 0.3; % Vitesse de l'air a l'entrée [m/s]

% Les constantes
sigma = 5.7*(10^(-8)); % Stefan Boltzman
g = 9.81;
% Format d'affichage
% fprintf( ' iter          Tf          Tc          Tsol \n');

for iter = 1:1000

% Constantes de sol
Apha = 5.6*(10^(-7)); % Deffusivité thermique du sol
w = 0.0000727 ; % [1/s] frequence angulaire
ro_sol = 1500; % [k masse volumique du sol
ksol = 0.75; % [---] Conductivité thermique du sol
Cp_sol = 1350 ; % Capacité calorifique de sol

% Constante Collecteur
Alpha1 = 0.06;
```

## Annexe

---

```
Taux1 = 0.8;
Eps_c = 0.9;

% Constantes Absorbeur
Alpha2 = 0.93;
Eps_s = 0.9;

h = 2; % [m] Hauteur entre vitre sole

% Les Relations
% Température moyenne fluide
Tf_in = Ta;
Tf_out = Tf0 + 5;%
Tfm = 0.25*Tf_in +0.75*Tf_out;
% Caracteristique de l'air a Tfm
ro_f = 1.293*(273/(273+Tfm));
%ro_f = 1.0924; % densité de l'air a l'entrée
Pr_f = 2.54*(10^(-4))*Tfm + 0.7147;
Lambda_f = 7.57*(10^(-5))*Tfm + 0.0242;
Cp_f = 1008; % [J/ksol.°C]
Mu_f = 1.957*10^(-7); %[--]
% Débit d'air à l'entrée du colleteur
m = ro_f*Vf0*(2*pi*R*h);

Tciel = 0.0552*Ta^(1.5); % Température ciel
Q1 = Alpha1*I;

%===== Calcul des coefficient des perte de chaleur h

% 1 - Coef radiatif entre le vitrage et le siel
hr-ciel = sigma*Eps_c*(Tc0*Tc0 + Tsol0*Tsol0)*(Tc0 + Tsol0);

% 2- Coef radiatif entre le sole et le vitrage
khrc-sol = sigma*(Tc0*Tc0 + Tciel*Tciel)*(Tc0 + Tciel)*(Tc0 - Tciel)/(Tc0 - Ta);

% 3- Coeff convectif entre vitre et ambiant
hv = 5.47 + 3.95*Vwind;

% 4 et 5- Coeff convectif du fluide (Air hsol-f = hcf)
dh = 2*h; % diametre hdraulique
Beta_f = 1/Tfm;
Ra = (g*Beta_f*(Tsol0 - Tf0)*(dh^3)/(Mu_f^2))*Pr_f;
Num = 0.54*Ra^0.25; % Regime laminaire
hcf = (Lambda_f*Num)/dh;
hsol-f = hcf;

% 6- Coeff de perte global vers le sol Ub

dsol = sqrt( (2 * Apha)/w);
Usol = 2*sqrt((ksol*ro_sol *Cp_sol) / (pi * (2*pi)/w ));
Ub = 1/((dsol/ksol) + (1/Usol));
%===== Calcul des constants C1
```

## Annexe

```
C1 = hv + hr-ciel + hcf + hrc-sol ;
C2 = (hcf)/(m * Cp_f);
C3 = hsol-f/(m * Cp_f);
C4 = C2 + C3;
C5 = hsol-f + hrc-sol + Ub;
C6 = (C1*(C4*C5 - hsol-f*C3) - hrc-sol *(hsol-f*C2 + hrc-sol *C4 + hcf*C3) -
hcf*C2*C5)/(C1*C5 + hrc-sol *hrc-sol )/2;

C7 = ((hrc-sol *C3 + C2*C5)*Alpha1 +(hrc-sol *C2 + C1*C3)*Taux1*Alpha1)/(C1*C5
+ hrc-sol *hrc-sol );

C8 = (C2*(hrc-sol *Ub + hv*C5)+ C3*(hv*hrc-sol + Ub*C1))/(C1*C5+ hrc-sol
*hrc-sol );

C9 = (hrc-sol *(hrc-sol *C3 + C2*C5))/(C1*C5 + hrc-sol *hrc-sol );

C10= C7/C6;
C11= C8/C6;
C12= C9/C6;

% Calcul de la température du fluide (Air)
Tf = Tf_in*exp(-C6*(pi*(R*R -r*r))) + (1 - exp(-C6*pi*(R*R - r*r)))*(C10*I +
C11*Ta + C12*Tciel);

ErrTf = abs(Tf - Tf0);
if(ErrTf<0.01)

    Tf = Tf0;
    Tc = Tc0;
    Tsol = Tsol0;

else
    % Calcul des température du collecteur en fonction de Tf, Tsol0
    Tc = (S1 +hv*Ta +hr-ciel *Tciel + hcf*Tf + hrc-sol *Tsol0)/C1;

    % Calcul des température du sol en fonction de Tf, Tc
    Q2 = Taux1*Alpha2*I;
    Tsol = (S2 + Ub*Ta + hsol-f*Tf +hrc-sol *Tc)/C5;

    %initialisation
    Tf0 = Tf;
    Tsol0 = Tsol;
    Tc0 = Tc;

end
end
formatSpace = ' %4.2f      %3.2f      %3.2f      %3.3f      %3.3f      %3.3f\n';
fprintf( formatSpace,t,Ta,I,Tc,Tsol,Tf);

end
```

## Annexe

---

- **Le programme qui calcule les paramètres de cheminée solaire :**

```
clc
clear all
Ta= input('Température ambiante Ta [°C] =');
Tf= input('Température ambiante Tf [°C] =');

H = input('la hauteur de cheminée H [m]=');
r = input('Rayon max du cheminée r [m]=');
formatSpace = ' Ta          Tf          Delta_P          ro_f2          Vmax          V2
m          P_ch \n';
fprintf( formatSpace);
formatSpace = ' [°C]          [°C]          [Pa]          [kg/m3]          [m/s]          [m/s]
[kg/s]          [KW]\n';
fprintf( formatSpace);

%les constantes
g = 9.81;
Cp_f = 1008;
% relations
ro_f2 = 1.293*(273/(273+Tf));
Delta_T = -(Ta - Tf);
Delta_gama = 0.5;
A_ch = pi*r*r;

%Delta_gama = gama_a - gama;
Delta_P = 0.00353*g*H*(Delta_T + (Delta_gama*H)/2);

% Vitesse maximal
Vmax = (2*Delta_P/ro_f2)^(1/2);

% Vitesse avec turbine
V2 = (1/3)*Vmax;

%Débi massique
m = ro_f2*A_ch*V2;

%Puissance du chminie solaire
Pu = 0.5*m*Vmax*Vmax/1000; % Puissance en KW

formatSpace = ' %4.3f          %3.3f          %3.3f          %3.3f          %3.3f          %3.3f          %3.3f          %3.3f\n';
fprintf( formatSpace,Ta,Tf,Delta_P, ro_f2,Vmax, V2,m,P_ch);
```

## Annexe

---

### Influence de hauteur de cheminée (H) :

<b>H</b> [m]	<b>Delta_P</b> [Pa]	<b>V<sub>max</sub></b> [m/s]	<b>V<sub>2</sub></b> [m/s]	<b>m</b> [kg/s]	<b>P<sub>tot</sub></b> [kw]
<b>180</b>	404.172	27.815	9.272	760.836	294.312
<b>200</b>	483.709	30.428	10.143	832.339	385.332
<b>250</b>	712.853	36.939	12.313	1010.434	689.381
<b>300</b>	985.283	43.428	14.476	1187.924	1120.214
<b>500</b>	2507.872	69.286	23.095	1895.224	3449.012

### Influence de Rayon de collecteur (R):

<b>R</b> [m]	<b>Delta_P</b> [Pa]	<b>V<sub>max</sub></b> [m/s]	<b>V<sub>2</sub></b> [m/s]	<b>m</b> [kg/s]	<b>P<sub>tot</sub></b> [kw]
<b>110</b>	395.115	27.442	9.147	753.886	283.863
<b>120</b>	404.172	27.815	9.272	760.836	294.312
<b>150</b>	429.984	28.864	9.621	779.989	324.925
<b>200</b>	468.605	30.405	10.135	806.988	373.005
<b>300</b>	530.95	32.826	10.942	846.916	456.283

### Influence de diamètre de cheminée (D):

<b>D</b> [m]	<b>Delta_P</b> [Pa]	<b>V<sub>max</sub></b> [m/s]	<b>V<sub>2</sub></b> [m/s]	<b>m</b> [kg/s]	<b>P<sub>tot</sub></b> [kw]
<b>4</b>	404.334	27.821	9.274	121.753	47.120
<b>8</b>	404.240	27.817	9.272	486.968	188.411
<b>10</b>	404.172	27.815	9.272	760.836	294.312
<b>12</b>	404.091	27.811	9.270	1095.515	423.674
<b>16</b>	403.885	27.803	9.268	1847.181	752.586

## Annexe

### Influence de la hauteur de collecteur (h):

h [m]	Delta_P [Pa]	V <sub>max</sub> [m/s]	V <sub>2</sub> [m/s]	m [kg/s]	P <sub>tot</sub> [kw]
1	324.242	24.436	8.145	694.77	207.425
2	333.362	24.833	8.273	702.899	216.723
3	343.460	25.268	8.423	711.702	227.702
4	362.110	26.063	8.688	727.460	247.00
5	404.172	27.815	9.272	760.836	294.312
6	498.431	31.572	10.524	826.613	411.979

### Propriétés physiques de l'air et de :

<b>Propriétés de l'air à 1 atm</b>						
T	ρ	c <sub>p</sub>	K <sub>f</sub>	10 <sup>5</sup> μ	10 <sup>5</sup> . a	Pr
°C	kg.m <sup>-3</sup>	J.kg <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup>	W.m <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup>	Pa.s <sup>-1</sup>	m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>	
0	1,292	1006	0,0242	1,72	1,86	0,72
20	1,204	1006	0,0257	1,81	2,12	0,71
40	1,127	1007	0,0272	1,90	2,40	0,70
60	1,059	1008	0,0287	1,99	2,69	0,70
80	0,999	1010	0,0302	2,09	3,00	0,70
100	0,946	1012	0,0318	2,18	3,32	0,69
120	0,898	1014	0,0333	2,27	3,66	0,69
140	0,854	1016	0,0345	2,34	3,98	0,69
160	0,815	1019	0,0359	2,42	4,32	0,69
180	0,779	1022	0,0372	2,50	4,67	0,69
200	0,746	1025	0,0386	2,57	5,05	0,68
220	0,700	1028	0,0399	2,64	5,43	0,68
240	0,688	1032	0,0412	2,72	5,80	0,68
260	0,662	1036	0,0425	2,79	6,20	0,68
280	0,638	1040	0,0437	2,86	6,59	0,68
300	0,616	1045	0,0450	2,93	6,99	0,68

**Tableau** : Propriétés d'air à la pression atmosphérique.

## Annexe

---

Les valeurs des coefficients du rayonnement solaire du vitrage et de l'absorbeur [32]:

	Absorbeur	Vitrage
<b>Absorptivité</b>	0.95	0.06
<b>Transmissivité</b>	/	0.84
<b>Emissivité</b>	0.95	0.9

