

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**

***Ecole Nationale Polytechnique***



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

Présenté pour l'obtention du

Diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

Thème:

**MODELISATION DE L'ECOULEMENT DANS UNE CHEMINEE  
SOLAIRE**

Proposé et dirigé par :

A.Bouhdjar, D.R., CDER

B.Benkoussas, M.C., ENP

En collaboration avec :

G.Lepalec, Prof., U.Med.Marseille

Ph.Bournot, Prof, U.Med.Marseille

Réalisé par :

Abdellah-El-Hadj Amine

Promotion 2007-2008

## ملخص :

يتضمن هذا العمل دراسة رقمية لمحطة المدخنة الشمسية، ويتكوّن أساسيًا من جزأين. يحتوي الجزء الأول وضع نموذج لحركة الهواء داخل محطة المدخنة الشمسية باستعمال برنامج الحسابية العددية لديناميكية السوائل FLUENT. في الجزء الثاني، تمت المصادقة على نتائج المحاكاة العددية بمقارنتها بنتائج التجارب على النموذج Manzanares. بعد ذلك استخدمنا هذا النموذج لدراسة تأثيرات المعايير المتحكممة في تشغيل محطة المدخنة الشمسية و التي تتمثل في الإشعاع الشمسي، نصف قطر المجمع الشمسي وارتفاع المدخنة على كمية الطاقة المولدة.

الكلمات الدالة: محطة المدخنة الشمسية، الحسابية العددية لديناميكية السوائل، الطاقة الشمسية.

## Résumé :

Ce travail est une étude numérique de la centrale cheminée solaire. Il se compose principalement de deux parties. La première partie est consacrée à la modélisation de l'écoulement dans une centrale cheminée solaire avec le logiciel de calcul numérique de mécanique des fluides FLUENT. Dans la seconde partie, les résultats des simulations numériques ont été validés par les résultats expérimentaux obtenus sur le prototype de Manzanares. 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 solaire, le rayon du collecteur et la hauteur de la cheminée.

Mots clés : Centrale cheminée solaire, modélisation numérique des écoulements, énergies solaires.

## Abstract:

This work is a numerical study of the solar chimney power plant. It consists mainly of two parts; the first 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, the results of the numerical simulation were validated by the experimental results from the Manzanares prototype. Then we used the developed model to study the effect of the main operating parameters of the solar chimney power plant which are the solar radiation, the collector radius and the chimney height, on the power output.

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

*Remerciements :*

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

*Je remercie Monsieur B. BENKOUSSAS et Monsieur A. BOUADJAR pour m'avoir sélectionné pour ce stage et pour avoir cru en moi.*

*Je remercie Monsieur Ph. BOURNOT pour m'avoir accueilli au sein de l'UNMECA, et pour m'avoir permis de réaliser ce stage dans de si bonnes conditions.*

*Je remercie également Monsieur G. LEPALÉC pour ces précieux conseils.*

*Je remercie également Monsieur S. LARBI le Président de Jury et Monsieur M. BENBRAÏKA membre de Jury, pour avoir accepté de juger ce modeste travail.*

*Merci à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation tout au long de mes études.*

*Amine.*

*Dédicace :*

*A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné  
un magnifique modèle de labeur et de persévérance. « Que DIEU vous  
protège ».*

*A ma sœur MEN... Merci*

*A ma petite sœur ROM et mon petit frère MEAD?*

*A ma famille*

*A tous mes camarades d'études*

*A WLED Houmti*

*Je dédie ce modeste travail.*

*Amine.*

# Sommaire :

<b>Introduction générale</b> .....	1
------------------------------------	---

## **I. Généralités :**

1.1	Energie .....	4
1.2	Le réchauffement climatique .....	5
1.3	Le protocole de Kyoto .....	6
1.4	Les énergies renouvelables .....	7
1.5	La cheminée solaire .....	8
1.5.1	Description de la centrale cheminée solaire .....	8
1.5.2	Le prototype .....	9
1.5.3	Etude des travaux antérieurs .....	12
1.5.4	Centrales cheminée solaire commerciales.....	16
1.6	Avantages et inconvénient des centrales cheminées solaire .....	21
1.6.1	Avantage de centrales cheminées solaires.....	21
1.6.2	Inconvénients des centrales cheminées solaires .....	21

## **II. Etude théorique de la centrale cheminée solaire :**

Introduction .....	24	
2.1	Paramètres de fonctionnement.....	24
2.2	Le collecteur solaire.....	25
2.2.1	Bilan thermique du collecteur .....	25
2.2.2	Rendement optique du capteur .....	27
2.2.3	Rendement thermique du collecteur .....	28
2.2.4	Puissance utile récupérée par l'air .....	28
2.3	La cheminée.....	30
2.3.1	Pression relative statique .....	31
2.3.2	La force motrice .....	33
2.3.3	Pression totale et énergie cinétique de l'air .....	34
2.3.4	Etude énergétique de la cheminée .....	34
2.3.5	Rendement de la cheminée .....	37
2.4	La turbine à air .....	38
Conclusion.....	39	

### III. Modélisation mathématique :

Introduction .....	41
3.1 Equations générales .....	41
3.1.1 Equation de la conservation de la masse .....	41
3.1.2 Equation de conservation de la quantité de mouvement .....	41
3.1.3 Equation de conservation de l'énergie.....	42
3.2 Equations moyennes du mouvement .....	43
3.2.1 Décomposition de Reynolds.....	43
3.2.2 Moyenne de l'équation de la conservation de la masse.....	43
3.2.3 Equation de conservation de la quantité de mouvement moyennée .....	43
3.2.4 Equation de conservation de l'énergie moyennée .....	44
3.3 Méthodologie pour la fermeture des équations.....	44
3.3.1 Méthodologie pour la fermeture en un point .....	45
3.3.2 Equations du mouvement fluctuant .....	45
3.3.3 Fermetures simplifiées.....	47

### IV. Modélisation numérique :

Introduction .....	51
4.1 Logiciels CFD.....	51
4.1.1 Historique .....	51
4.1.2 Avantage des codes CFD.....	52
4.2 Fluent .....	53
4.3 Modélisation de la cheminée solaire.....	56
4.3.1 Dimensions de la structure .....	56
4.3.2 Nomenclature .....	57
4.3.3 Maillage (GAMBIT) .....	58
4.3.4 Hypothèses .....	61
4.3.5 Conditions aux limites.....	62
4.4 Adaptation du code de calcul.....	65
4.4.1 Identification du problème .....	65
4.4.2 Source d'erreur et résolution du problème .....	66
4.4.3 Résultats des simulations.....	67
4.4.4 Energie potentielle <-> FLUENT.....	68
Conclusion.....	69

## **V. Résultats et interprétations :**

Introduction .....	71
5.1 Présentation d'un cas type aux dimensions du prototype de Manzanares .....	71
5.1.1 Traitement relatif au collecteur .....	71
5.1.2 Traitement relatif à la cheminée .....	74
5.1.3 Champ de pression .....	77
5.2 Etude paramétrique de la centrale cheminée solaire sans couplage avec la turbine .....	80
5.2.1 Etude de l'impact du rayonnement solaire sur le comportement de l'écoulement.....	80
5.2.2 Etude de l'impact de l'épaisseur du mur de la cheminée sur le comportement de l'écoulement.....	83
5.2.3 Etude de l'impact du rayon du collecteur sur le comportement de l'écoulement.....	86
5.2.4 Etude de l'impact de la hauteur de la cheminée sur le comportement de l'écoulement....	89
5.3 Etude de l'impact de la hauteur de la cheminée sur la puissance électrique générée .....	92
5.3.1 Couplage de la centrale cheminée solaire avec une turbine à air .....	92
5.3.2 Validation de l'approche numérique .....	92
5.3.3 Puissance électrique générée .....	94
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>96</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>98</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>99</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>102</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>103</b>
Annexe A.....	104
Annexe B.....	112

## **Nomenclature :**

$A$  : Surface d'une aire ( $m^2$ ) ;

$C_p$  : Chaleur spécifique ( $J/Kg.K$ ) ;

$F'$  : Rapport des résistances thermiques ;

$f_i$ : Forces volumiques ( $N/m^3$ ) ;

$G$  : Rayonnement solaire global sur le plan du capteur ( $W/m^2$ ) ;

$g$ : Accélération gravitationnelle ( $m/s^2$ );

$H$  : Hauteur (m) ;

$h$  : Coefficient de transfert thermique par convection ( $W/m^2.K$ ) ;

$k$  : Energie cinétique de turbulence ;

$\dot{m}$  : Débit massique d'air à l'intérieur du système ( $Kg/s$ ) ;

$P$  : Pression du fluide (Pa) ;

$\Delta P_{tot}$ : Différence de pression totale (Pa);

$Q$  : Puissance thermique ( $W/m^2$ ) ;

$Q_v$  : Débit volumique ( $m^3/s$ ) ;

$R$  : Rayon (m) ;

$S$  : Flux solaire absorbé à la surface de l'absorbeur ( $W/m^2$ ) ;

$S_p$  : Pression statique relative (Pa);

$T$  : Température ( $^{\circ}C$ );

$t$  : Temps (s) ;

$U$  : Coefficient d'échange thermique global ( $W/m^2.K$ ).

$u$  : Vitesse verticale (m/s) ;

$v$ : Vitesse horizontale (m/s) ;

### **Lettres Grecques :**

$\alpha$  : Coefficient d'absorption ;

$\tau$  : Facteur de transmissivité ;

$\rho_d$  : Coefficient de réflexion hémisphérique ;

$\eta$  : Rendement;

$\rho$  : Masse volumique ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ) ;

$\gamma_\infty$  : Rapport de chute de température atmosphérique ( $^\circ\text{C}/\text{m}$ ) ;

$\delta$  : Epaisseur du mur de la cheminée (m) ;

$\lambda$  : Conductivité thermique ( $\text{W}/\text{m.K}$ );

$\beta$  : Coefficient de dilatation volumique à pression constante ;

$\tau_{ij}$ : Tenseur des contraintes visqueuses ( $\text{N}/\text{m}^2$ ) ;

$\Phi$  : Sources internes de dissipation d'énergie (W),

### **Indices :**

coll : Collecteur solaire ;

chem : Cheminée ;

turb : turbine à air ;

absor : Absorbeur ;

elec : électrique.

## **Introduction Générale :**

La demande en énergie est de plus en plus importante alors que plus de 86% de l'énergie électrique est générée par des énergies fossiles [17]. Selon le dernier rapport du GIEC (Le groupe expert intergouvernemental sur l'évolution du climat), le réchauffement climatique causé par les gaz à effet de serre a atteint des niveaux alarmants [11]. Les pays concernés par la réduction de l'émission des gaz à effet de serre, dans le cadre du protocole de Kyoto, investissent des sommes énormes pour le développement de nouvelles technologies et des centrales électriques qui fonctionnent avec des énergies renouvelables.

L'utilisation d'une source d'énergie renouvelable est tributaire de sa disponibilité et de son potentiel énergétique. L'énergie éolienne qui utilise le vent pour la génération d'énergie électrique et qui est développée dans les régions ventées et l'énergie solaire qui se localise dans les régions les plus ensoleillées sont actuellement les sources d'énergies renouvelables les plus prometteuses. Plusieurs technologies ont été développées afin d'utiliser l'énergie solaire pour la production d'énergie électrique. La centrale cheminée solaire est la dernière expérience de ce genre.

Dans le but de démontrer la fonctionnalité et la fiabilité de la centrale cheminée solaire, un premier prototype a été construit en Espagne. Sa puissance a atteint 50 KW. Les différentes expériences ont permis le lancement d'un projet en Australie d'une centrale cheminée solaire de 200 MW [5]. Les centrales cheminées solaires sont mieux adaptées pour les régions arides, où des immenses surfaces sont disponibles et où le rayonnement solaire est très important. La construction des cheminées solaires ne nécessite pas une technologie très avancée. De plus les principaux matériaux de construction sont le verre et le béton. L'utilisation des cheminées solaires pour la production d'énergie électrique représente une solution bien adaptée pour les pays en voie de développement. Sa construction permet la création de nouveaux postes d'emplois ainsi que la réduction des dépenses en devise.

La production énergétique d'une centrale cheminée solaire dépend essentiellement de l'intensité du rayonnement solaire et de ses dimensions géométriques principalement le rayon du collecteur et la hauteur de la cheminée. Le but de notre étude est, dans un premier temps, la modélisation de l'écoulement dans une cheminée solaire à l'aide d'un logiciel de mécanique de fluide industriel FLUENT. Ensuite, l'utilisation de ce modèle pour l'étude de l'impact des principaux paramètres cités ci-dessus sur le comportement de l'écoulement et sur la puissance

générée par une cheminée solaire. Nous avons pour cela entrepris une étude répartie sur 5 chapitres :

Le premier chapitre présente l'état actuel de la demande mondiale en énergie et les principaux problèmes générés par la consommation des énergies fossiles, ainsi qu'une introduction sur les énergies renouvelables. On a ensuite introduit le principe de fonctionnement d'une centrale cheminée solaire. Puis on a décrit le prototype et présenté les perspectives pour une centrale cheminée solaire commerciale ainsi que les principaux travaux réalisés dans ce domaine. Dans le deuxième chapitre, on a présenté une étude théorique simple de la centrale cheminée solaire. Elle vise à mieux comprendre son principe de fonctionnement et elle met en évidence l'interaction entre les différentes variables de l'écoulement dans la cheminée solaire à travers des relations analytiques simples.

Le troisième chapitre traite la formulation mathématique du problème. On a présenté les équations générales de transport ainsi que le modèle de turbulence utilisé.

Le quatrième chapitre a été consacré à la modélisation numérique de la centrale cheminée solaire avec le code de calcul FLUENT. Celle-ci nous a mené à la considération de la géométrie, du maillage, des conditions aux limites et des hypothèses retenues. L'adaptation du code de calcul nous a permis de l'exploiter pour les simulations de la centrale cheminée solaire.

Finalement, dans le dernier chapitre 5, on a présenté et discuté les résultats des simulations numériques en trois parties. Dans la première partie, on a visualisé le comportement de l'écoulement dans la centrale cheminée solaire. Dans la seconde partie on a présenté l'influence du rayonnement solaire, l'épaisseur du mur de la cheminée, le rayon du collecteur et la hauteur de la cheminée sur le comportement de l'écoulement dans la centrale cheminée solaire, sans le couplage du système avec une turbine. En dernier lieu, on a présenté les résultats d'un système couplé avec une turbine où on a étudié l'influence du rayonnement solaire et de la hauteur de la cheminée sur la puissance électrique générée par la centrale cheminée solaire.

# I. Généralités

La demande mondiale en énergie augmente, alors que le réchauffement climatique causé par les émissions de gaz à effet de serre a atteint des niveaux alarmants.

### 1.1 Énergie : Consommation et disponibilité

Une étude faite par U.S.A. Energy Information Administration en 2001 [16], montre que la consommation mondiale d'énergie, et spécialement les énergies fossiles augmente constamment (figure 1.1). En 2001 une étude du même organisme révèle que 86% de l'énergie consommée dans le monde est à base de carburant fossile, un peu plus de 13% provient de l'énergie nucléaire et de l'hydroélectrique, alors que la part des énergies renouvelables ne dépasse pas les 0.8% (figure 1.2). Il est donc clair que la plus grande partie des besoins en énergie est satisfaite par l'utilisation des carburants fossiles. Bien que l'énergie nucléaire affiche une bonne participation, elle reste néanmoins considérée comme un moyen à haut risque à cause des problèmes liés aux déchets nucléaires, les risques d'accidents et de contamination des populations, les dangers de prolifération et de radioactivité. En gros on craint les catastrophes majeures de type Tchernobyl. Quand à l'énergie hydroélectrique, actuellement les sites les plus favorables sont déjà équipés.

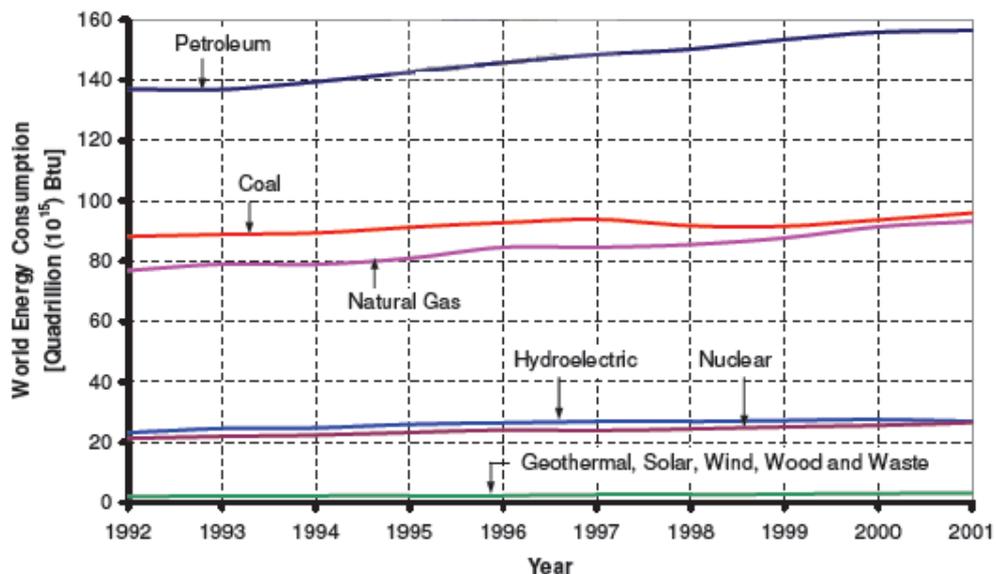


Figure 1.1: Consommation mondiale d'énergie, classée par source (U.S.A. Energy Information Administration 2001) [17]

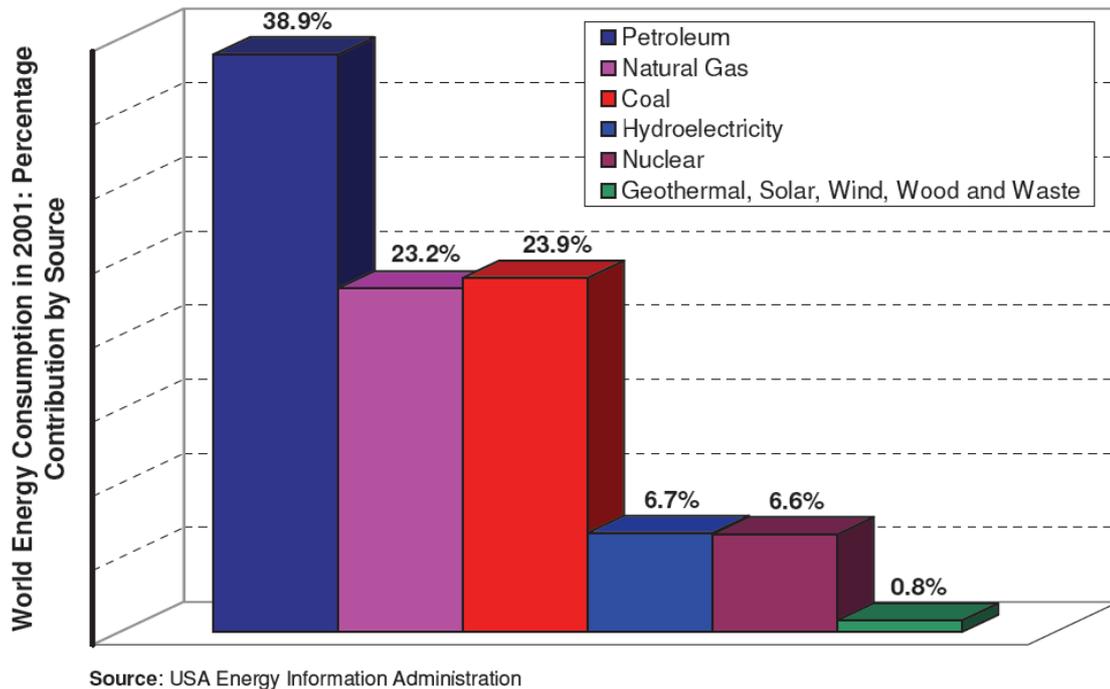


Figure 1.2 : Sources d'énergie : Participation à la consommation mondiale d'énergie [17]

## 1.2 Le réchauffement climatique :

Depuis la parution au printemps 2007 du dernier rapport du groupe expert intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) [11], la participation du dioxyde de carbone au réchauffement planétaire n'est plus à mettre en doute. Le dioxyde de carbone, le méthane, le protoxyde d'azote... sont des gaz à effet de serre qui contribuent au réchauffement de la terre, l'emmenant vers un dangereux déséquilibre. Ces gaz ne sont pas arrivés dans l'atmosphère par hasard, c'est l'homme ou plutôt ses activités, qui les émettent.

La température moyenne de l'atmosphère a augmenté d'environ 0.3 à 0.6 degré depuis 1900, avec des records sur le plan mondial en 1990, 1991, 1994, 1995 et 1997. Si cette tendance se maintient, la température moyenne pourrait augmenter de 1 à 3.5° d'ici 2100. Les répercussions de ce réchauffement climatique sont déjà présentes :

- Elévation du niveau de la mer sous l'effet de la fonte des glaciers. Les côtes japonaises pourraient être menacées, certaines îles (comme les Bahamas, les Maldives, les îles Marshall, Kiribati) pourraient être inondées, voire même disparaître ;

- Des sécheresses plus fréquentes, essentiellement dans l'hémisphère sud. Le sud de l'Europe serait également concerné. (renforcement des zones arides, feux de forêts plus fréquents dans l'hémisphère nord).
- Des écosystèmes et une végétation modifiés : multiplication des mauvaises herbes (c'est le dioxyde de carbone qui permet la croissance des plantes, y compris des mauvaises herbes) ;
- Risque de recrudescence de certaines maladies infectieuses comme le paludisme ou la fièvre jaune qui se transmettent par des insectes vecteurs.

### 1.3 Le protocole de Kyoto :

Le Protocole de Kyoto vise à lutter contre le changement climatique en réduisant les émissions de gaz carbonique à effet de serre. Les états les plus riches, pour lesquels une baisse de croissance ne semblait pas supportable et qui étaient en outre responsables des émissions les plus importantes, y avaient pris l'engagement de stabiliser en 2000 leurs émissions de gaz par rapport au niveau de 1990. C'est le Protocole de Kyoto, en 1997, qui traduit en engagements quantitatifs juridiquement contraignants cette volonté.

Les participants sont parvenus à s'entendre sur l'objectif de réduire entre 2008 et 2012, les émissions de six gaz à effet de serre de 5,2 % par rapport aux niveaux de 1990. Les trois gaz les plus importants ( $CO_2$ ,  $CH_4$  et le  $N_2O$ ) sont mesurés par rapport aux niveaux de 1990, tandis que les gaz ayant une durée de vie plus longue (hydro fluocarbures, perfluorocarbones et hexafluorures de soufre) le sont par rapport aux niveaux de 1990 ou de 1995. Les États-Unis doivent réduire leurs émissions de 7 %, le Canada, de 6 %, et l'Union européenne de 8 %.

L'accord doit entrer en vigueur après ratification par au moins 55 pays dont les émissions combinées représentent 55 % du total des émissions de 1990 par les pays développés.

Le protocole de Kyoto laisse cependant aux pays une certaine marge de manœuvre en ce qui concerne les moyens d'atteindre ces objectifs. C'est pourquoi certaines mesures dérogatoires ont été prévues, notamment :

- Un mécanisme de développement propre : les pays industrialisés pourront obtenir des crédits d'émissions s'ils financent des projets de réduction d'émissions dans les pays en

développement. Par exemple, une aciérie américaine devant réduire de 1000 tonnes ses rejets de carbone d'ici 2012 pourra payer une vieille aciérie indienne ou russe pour effectuer la même réduction, mais à un coût beaucoup moins élevé. Lors de la conférence de La Haye, le Canada a proposé que l'énergie nucléaire soit incluse dans ce mécanisme, car l'électricité produite à partir du nucléaire est une source d'énergie qui produit peu de GES (Gaz à effet de serre).

- Un programme d'échange de droits d'émissions : les pays ayant développé une technologie permettant de réduire les émissions pourront vendre un permis, équivalent à cette réduction, aux pays intéressés à se procurer des droits d'émissions supplémentaires.

Contrairement à la Convention de Rio, le protocole de Kyoto prévoit aussi des sanctions contre les États qui ne respecteraient pas les dispositions de l'accord. Cependant, le texte de l'accord ne précise pas les contraintes qui pourraient être imposées dans ce cas.

Par ailleurs les U.S.A et l'Australie n'ont pas ratifié le protocole de Kyoto, Les américains appliquent la logique suivante : même s'ils sont les plus grands producteurs d'émissions de gaz à effet de serre du monde (20 tonnes de  $CO_2$  par habitant par an, contre 10 tonnes par Allemand et 2,3 tonnes par Chinois), ils font davantage preuve d'efficacité énergétique que les autres. Un Américain est en effet beaucoup moins polluant que son homologue chinois quand on raisonne en tonnes de  $CO_2$  par unité de produit national brut (PNB) : selon les statistiques de l'Agence internationale de l'énergie, l'Américain émet 0,77 tonne de  $CO_2$  pour 90 dollars de PNB, alors qu'un Chinois en émet 3,54 tonnes pour le même montant. Autrement dit, les Américains font valoir que c'est l'inefficacité énergétique de certains pays qui met en péril l'atmosphère de la Terre, et non leur propre mode de vie.

Depuis la ratification du protocole de Kyoto, et dans l'obligation de respecter leurs engagements, tous les pays membres se sont dirigés vers l'utilisation et le développement des énergies renouvelables, surtout pour la production de l'énergie électrique.

#### **1.4 Les énergies renouvelables :**

Ce sont des énergies inépuisables, fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la Terre, les chutes d'eau, les marées ou encore les végétaux. Leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir. Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel.

L'utilisation des énergies renouvelables permet de lutter contre l'effet de serre en réduisant notamment les rejets de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Elle permet aussi une gestion intelligente des ressources locales ainsi que la création de nouveaux postes d'emplois.

On qualifie les énergies renouvelables d'énergies "flux" par opposition aux énergies "stock", qui sont constituées de gisements limités de combustibles fossiles : pétrole, charbon, gaz et uranium.

Les énergies renouvelables peuvent être classées en 5 grandes catégories :

- La biomasse ;
- L'éolien ;
- Le solaire ;
- Le géothermique ;
- L'hydraulique.

Chacune de ces catégories englobe plusieurs technologies de conversion d'énergie. Dans l'Annexe.1 sont présentées les différentes technologies de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Une comparaison assez globale entre les coûts de production d'électricité solaire est présentée à la fin de cette annexe. Parmi ces technologies on peut citer les centrales à tour, les centrales à capteurs cylindro-paraboliques, les panneaux photovoltaïques et les centrales cheminées solaires.

Nous allons à présent faire une description de la centrale cheminée solaire, qui est une nouvelle technologie de production d'électricité à base d'énergie solaire et qui fait l'objet de notre étude.

## **1.5 La cheminée solaire :**

### **1.5.1 Description de la centrale cheminée solaire :**

Une centrale cheminée solaire est une installation de production d'énergie électrique, par la conversion de l'énergie solaire en énergie mécanique. Une cheminée solaire (Figure 1.3) est constituée d'un collecteur solaire, une cheminée au centre du collecteur, et une ou plusieurs turbines à air couplées à des générateurs électriques.

Son principe de fonctionnement est assez simple ; l'air à la température ambiante entre dans le collecteur et se chauffe par effet de serre au fur et à mesure qu'il avance vers le centre

du collecteur. L'air atteint une température maximale à la base de la cheminée (sortie collecteur). La différence de température entre l'air à l'intérieur de la cheminée et l'air ambiant à l'extérieur de la cheminée génère une poussée de l'air vers le haut. Cette énergie est utilisée d'une part pour accélérer le fluide dans toute la structure, et d'autre part comme une chute de pression statique à travers les turbines à air. Les turbines couplées à des générateurs électriques transforment l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique.

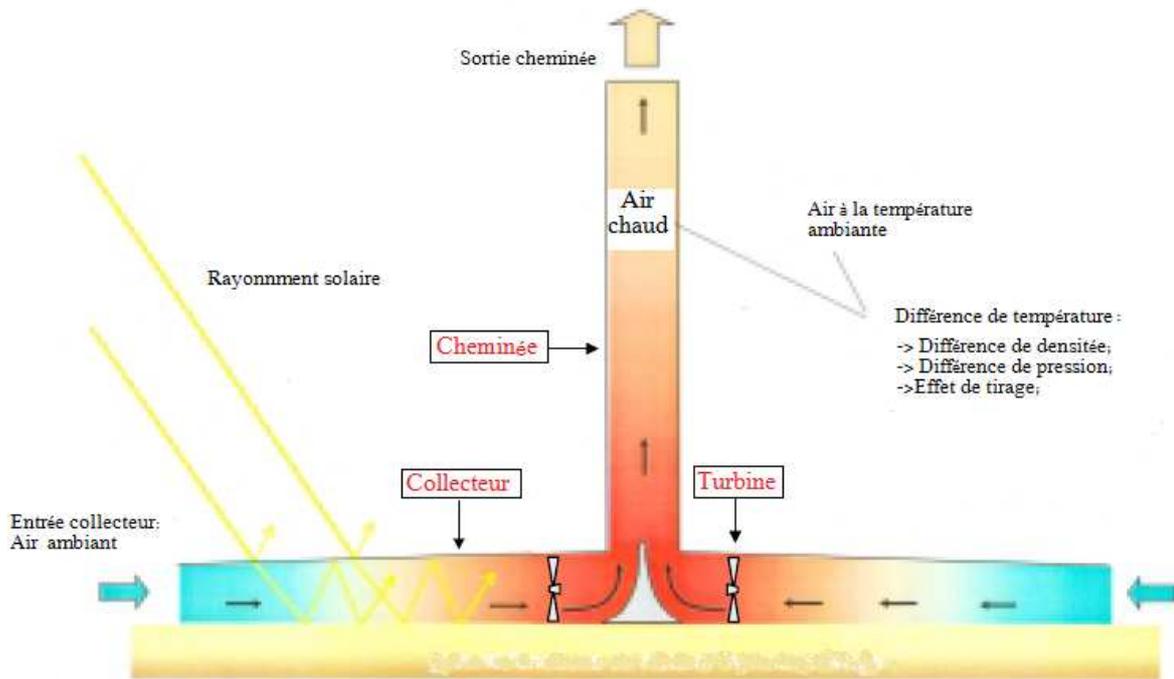


Figure 1.3 : Principe de fonctionnement d'une cheminée solaire

### 1.5.2 Le prototype :

Une étude théorique détaillée et plusieurs tests en soufflerie ont conduit à la construction d'un prototype d'une centrale cheminée solaire pouvant atteindre un pic de production électrique de 50 KW. Le prototype a été construit dans les années 1981/1982, sur un site rendu disponible par la société « Spanish Utility Union Electrica Fenosa » à Manzanares, à 150 Km de Madrid, en Espagne (Figure 1.4). Le projet a été financé par le ministère allemand de la recherche et de la technologie « BMFT ».



Figure 1.4 : Vue du prototype de la centrale cheminée solaire à Manzanares, Espagne

Le but de ce projet de recherche était de vérifier à travers des données expérimentales prélevées sur le prototype, les performances du système établies par le modèle théorique, et d'examiner l'influence des différents composants sur l'énergie générée et l'efficacité du système, sous des conditions de fonctionnements techniques et météorologiques réelles.

Les principales dimensions et données techniques du prototype sont données dans le Tableau 1.1.

La tour a été construite avec des tubes de guidages couverts par des plaques trapézoïdales d'une épaisseur de 1.25mm. Elle repose sur une base circulaire surélevée de 10m par rapport au niveau du sol. Cette base est supportée par 8 poutres très fines pour ne pas gêner la circulation de l'air. La zone de transition entre la sortie du collecteur et l'entrée de la cheminée est faite avec une membrane en plastique renforcé avec du tissu. Cette membrane a été profilée de telle manière à assurer une transition douce de l'air chaud. La tour est maintenue sur 4 niveaux et dans 3 directions, avec des câbles raccordés au sol.

tower height:	194.6 m
tower radius:	5.08 m
mean collector radius:	122.0 m
mean roof height:	1.85 m
number of turbine blades:	4
turbine blade profile:	FX W-151-A
blade tip speed to air transport velocity ratio:	1 : 10
operation modes:	stand-alone or grid connected mode
typical collector air temp. increase:	$\Delta T = 20 \text{ K}$
nominal output:	50 kW
coll. covered with plastic membrane:	40'000 m <sup>2</sup>
coll. covered with glass:	6'000 m <sup>2</sup>

Tableau 1.1: Principales dimensions et données techniques du prototype Manzanares [5]

La turbine utilisée est posée sur une structure métallique à 9 m du niveau du sol. Elle a 4 pales ajustables en fonction de la vitesse de l'air atteinte dans la structure. L'ajustement des pales permet de régler la chute de pression à travers la turbine, afin de pouvoir obtenir une puissance électrique optimale.

Le couvert du collecteur est transparent et permet une bonne circulation de l'air. De plus il doit aussi avoir une longue durée de vie et un prix raisonnable. Plusieurs types de plastic et de verre ont été sélectionnés afin de déterminer le meilleur matériau destiné à cette fonction. Le verre présente une meilleure résistance aux tempêtes, une longue durée de vie, en plus les pluies occasionnelles assurent son nettoyage.

Les membranes en plastic utilisées sur le prototype de Manzanares présentent un coût initial relativement bas par rapport au verre, mais après un certain temps, les membranes se sont dilatées puis se sont déchirées.

Après la construction de la tour en 1982, l'étape expérimentale a commencé. Les principaux buts de cette étape étaient de :

- Collecter des données sur le rendement de cette nouvelle technologie ;
- Démontrer le fonctionnement complètement autonome et fiable ;
- Enregistrer et analyser le comportement opératoire à long terme.

Le prototype a montré que l'énergie électrique produite est étroitement liée au rayonnement solaire. Cependant, il reste une quantité de chaleur emmagasinée dans le sol

pendant les premières heures de la nuit permettant une génération de l'électricité pendant quelques heures de plus.

Dans l'intérêt de mieux comprendre la relation entre les différents paramètres physiques, et afin d'identifier les possibilités pour une éventuelle amélioration, un code de simulation numérique a été développé. Il permet de décrire toutes les composantes de la centrale, leurs performances et leurs interactions dynamiques. Le programme a été validé sur la base des données expérimentales prélevées sur Manzanares. Actuellement, ce logiciel est utilisé pour étudier le comportement thermodynamique de centrales commerciales de plus grandes dimensions, sous des conditions météorologiques de fonctionnement de la centrale bien déterminées.

### **1.5.3 Etude des travaux antérieurs :**

Dans le but de démontrer que la cheminée solaire est une technologie alternative fiable et bien adaptée dans les régions à climat chaud, pour la production d'énergie électrique, Pasumarthi et Shérif ont établi une étude en deux parties.

Dans la première partie [1], ils ont développé un modèle mathématique capable de prédire les performances d'une cheminée solaire. Le modèle établi est capable d'estimer la température et la puissance fournie par une cheminée solaire, ainsi que de déterminer l'influence des différentes conditions ambiantes et les dimensions de la structure sur la puissance produite.

Dans la deuxième partie [2], Pasumarthi et Sherif ont présenté les résultats théoriques du modèle mathématique développé dans la première partie, ainsi que les résultats expérimentaux prélevés sur un prototype de petite échelle construit à Gainesville, Floride, USA. Ils ont aussi établi une comparaison entre les deux modes. Ils ont démontré que la puissance développée par une cheminée solaire est directement proportionnelle à l'élévation de la température dans le collecteur et le débit massique de l'air à l'intérieur de la cheminée. L'élévation de la température à l'intérieur de la cheminée peut être améliorée en augmentant le rayon du collecteur ou en augmentant son rendement. Quand à l'amélioration du débit massique, elle est généralement obtenue par l'augmentation de la hauteur de la cheminée. Cependant, la construction d'une cheminée très haute coûte très cher d'un point de vue financier, en plus des problèmes liés à sa construction. Le modèle mathématique développé a été capable de prédire les performances du prototype construit à Manzanares avec une erreur de 20% sur la vitesse, et de 5 à 9% sur l'énergie électrique développée.

Padki et Sherif [3], ont développé un modèle analytique simple pour la prédiction des performances d'une cheminée solaire. Ce modèle permet facilement de voir l'influence des dimensions de la structure et des conditions environnementales sur les performances d'une cheminée solaire. Les résultats donnés par ce modèle sont en accord avec ceux donnés par le modèle différentiel développé en [1], avec des prédictions sur les performances dans une marge d'erreur de 4-6%.

Dans l'étude menée par Bernardes et Weinrebe [4], et dans l'objectif d'évaluer théoriquement les performances d'une cheminée solaire, un modèle mathématique a été développé pour estimer la température et la puissance générée ainsi que l'influence des différentes conditions de construction sur la production d'énergie d'une cheminée solaire. Le modèle développé a été ensuite validé par les données expérimentales prélevées sur le prototype de Manzanares, où il a affiché des divergences de plus de 1.7% sur la puissance produite. Ils ont conclu que la puissance générée augmente avec l'augmentation de la hauteur de la tour et la surface de captation du collecteur. Un facteur de chute de pression à travers la turbine a été fixé à 0.97, pour avoir une production optimale de puissance électrique.

Schlaich & al. [5] ont présenté dans une première étape une théorie simple qui permet de comprendre le fonctionnement d'une cheminée solaire. Ensuite ils ont présenté les différentes étapes de construction du prototype de Manzanares et les résultats obtenus, où ils ont analysé la vitesse de l'air dans le système et la puissance générée en fonction du rayonnement solaire au cours de la journée. Ils ont aussi analysé les problèmes techniques de la construction de la tour, ainsi qu'une étude économique pour des centrales cheminée solaire commerciales. Ils ont conclu que le rendement de la cheminée solaire augmente avec l'augmentation de la hauteur de la tour et que ce genre de centrale doit être de larges dimensions pour être compétitive avec les technologies de production d'énergie électrique actuelle. Les auteurs ont également proposé des solutions aux contraintes qui peuvent opposer la construction d'une centrale cheminée solaire, tout en précisant les avantages d'une telle technologie.

Dai, Huang et Wang [6] ont analysé les performances d'une cheminée solaire susceptible d'être implémentée dans les 3 régions les plus ensoleillées au nord-est de la Chine. Dans cette analyse, les auteurs ont adopté un modèle simple qui tient compte de la captation solaire, du gain utile de fonctionnement et de la puissance électrique à la sortie de la turbine. Ils ont conclu que l'implémentation d'une cheminée solaire de 200 m de hauteur et de 10m

de diamètre, avec un collecteur de 500m de diamètre sera capable de produire une énergie électrique moyenne sur un mois de 110 à 190 KW pendant toute l'année. L'énergie produite dépend du rayonnement solaire, de la température ambiante, etc. la performance du système est fortement influencée par la hauteur de la cheminée, le rendement du collecteur et l'efficacité de la turbine. Pour les mêmes conditions de fonctionnement, ils concluent qu'une plus haute cheminée et un collecteur de rayon plus grand permettent de générer plus d'énergie électrique.

On remarque aussi que, plus le rayonnement solaire est important, plus le rendement des composantes de la cheminée solaire est meilleur et plus l'énergie produite est grande, par ailleurs la température ambiante affecte peu la puissance électrique produite.

Dans le but de mieux comprendre le fonctionnement d'une cheminée solaire et l'interaction entre ses différents paramètres, Pastohr & al.[7] ont modélisé une cheminée solaire à l'aide d'un logiciel de CFD. Leur modèle comporte le couplage des 3 composantes : collecteur, cheminée, et turbine. Ils présentent les résultats concernant l'écoulement dans le collecteur à savoir le profil de température, vitesse, pression, et le coefficient d'échange thermique au niveau du sol. Ils ont aussi établi un modèle mathématique simple à une dimension qui décrit le mouvement d'air dans le système. Cependant ils affirment que l'interaction entre les différents paramètres ne peut être déterminé que numériquement. Ils concluent que ce modèle simple développé donne de bons résultats comparé avec les résultats obtenus par les simulations numériques, et les deux modèles peuvent être utilisés pour une étude paramétrique. Cependant le modèle numérique utilisé doit être raffiné en utilisant les résultats prélevés sur des projets de plus grandes dimensions, afin de se rapprocher le plus possible de la réalité.

Le principal but de l'étude faite par Ming & al. [8], est d'étudier le champ de pression à l'intérieur de la structure et son influence sur les performances de la cheminée solaire. Ils ont analysé la relation entre la pression relative statique et la force de poussée, et ont établi une prédiction sur la puissance générée et l'efficacité du système. Ils ont pu établir des expressions détaillées de la pression relative statique, la force motrice, la puissance générée et l'efficacité du système, en fonction de la hauteur, du diamètre de la cheminée, du rayon du collecteur et du rayonnement solaire et d'autres paramètres de fonctionnement. Ils montrent que les résultats présentés par Pastohr & al.[7], concernant le champ de pression statique le long du collecteur contredit la théorie d'écoulement de base et le principe de fonctionnement

de la cheminée solaire. En effet, le profil de pression statique dans le collecteur présenté par Pastohr & al. [7] affiche des pressions relatives statique positives alors qu'en réalité la pression statique relative décroît de l'entrée du collecteur à la pression atmosphérique jusqu'à la base de la cheminée, pour prendre les valeurs les plus basses, mais croît dans la direction d'écoulement dans la cheminée. Ils montrent aussi que la force motrice dépend de la hauteur de la cheminée et du rayonnement solaire et des autres dimensions du système.

L'analyse portant sur la hauteur maximale de la cheminée ainsi que sur une hauteur optimale pour une puissance maximale développée par une cheminée solaire, a été réalisée par Xinping & al.[9]. Dans leur étude, ils ont établi une étude énergétique de la cheminée en considérant les pertes de chaleur au niveau du mur de la cheminée vers le milieu ambiant. Ils ont pu développer à travers cette analyse un modèle théorique exprimant la puissance générée par la cheminée solaire, en fonction des différents paramètres du milieu ambiant et des dimensions de la structure. Le modèle théorique développé est validé par rapport aux résultats prélevés sur le prototype de Manzanares. Les auteurs ont conclu que :

- L'influence de la pression ambiante sur la hauteur maximale de la tour est négligeable.
- Les résultats donnés par ce modèle montrent qu'un maximum de puissance de 102.2 KW est obtenu pour une hauteur optimale de la cheminée de 615m, qui est inférieur au maximum de la hauteur de cheminée avec une production de 92.3 KW.
- L'analyse effectuée pour différents coefficients de chute de température atmosphérique montre que la hauteur maximale de la cheminée augmente avec l'augmentation de ce coefficient.
- L'analyse faite pour les centrales de très grandes dimensions montre que le maximum de hauteur de la cheminée et l'optimum de hauteur pour une puissance maximale augmentent pour une augmentation du rayon du collecteur.

Dans le but d'étudier le champ de température dans une cheminée solaire et afin de déterminer son comportement à différents moments de la journée, une cheminée solaire à échelle réduite a été construite à HUST, en CHINE [10]. Le collecteur de 10m de diamètre, est construit sur une plate forme en béton, et toute sa structure est en acier. La cheminée est construite en PVC. Elle mesure 8m de haut et 0.3 m de diamètre. Les prises expérimentales de la température montrent que l'élévation de température dans cette structure atteint 24.1°C, entre l'entrée et la sortie du collecteur. Les auteurs ont remarqué que les températures

atteintes dans la structure sont plus importante lorsque le rayonnement solaire atteint son maximum au milieu de la journée.

#### 1.5.4 Centrales cheminée solaire commerciales :

Plusieurs autres expériences menées en soufflerie, ont montré que les calculs thermodynamiques effectués pour le collecteur, la cheminée et la turbine restent valables pour des centrales de plus grandes dimensions.

De ce fait, le logiciel de simulation numérique développé sur la base des données collectées sur le prototype de Manzanares est utilisé pour le design de centrales beaucoup plus larges, avec des puissances générées de l'ordre du MW.

Le tableau 1.2 présente les dimensions des différents constituants, pour des cheminées solaires de différentes puissances.

Capacity	MW	5	30	100	200
tower height	m	550	750	1000	1000
tower diameter	m	45	70	110	120
collector diameter	m	1250	2900	4300	7000
electricity output <sup>A</sup>	GWh/a	14	99	320	680
<sup>A</sup> at a site with an annual global solar radiation of 2300 kWh/(m <sup>2</sup> a)					

Tableau 1.2 : Dimensions typiques et production électrique des centrales cheminée solaire [5]

##### 1.5.4.1 Technologie :

Le design structurel de centrale cheminée solaire de grandes dimensions a montré que le design d'un collecteur en verre similaire à celui utilisé pour le prototype de Manzanares peut être utilisé sans modifications majeures. Ce design a prouvé sa robustesse et son prix raisonnable. De plus, l'expérience Manzanares a fourni des données pour le calcul du prix de la construction du collecteur.

La construction d'une tour de 1000m de hauteur est un défi à relever, vu qu'il n'existe aucune expérience similaire. Mais leurs concepteurs affirment que sa construction est possible.

Il existe plusieurs méthodes pour la construction de la tour : une tour libre en béton armé ou tubes de guidages couverts par des plaques métalliques. Ces techniques de construction sont bien connues dans le domaine des tours de refroidissement, et ils n'exigent aucun développement technologique.

Différentes procédures pour la construction des tours de différentes dimensions ont été élaborées en collaboration avec plusieurs entreprises spécialisées dans la construction des tours de refroidissement et de gratte-ciel. Le prix de construction de la tour ainsi que la méthode utilisée dépend étroitement du site de construction. On opte souvent pour une tour en béton, pour les sites arides qui sont les mieux placés pour la construction de telle centrale.

L'utilisation d'une seule turbine à axe vertical disposé à la base de la cheminée parait la solution la plus simple. Mais afin de pouvoir utiliser des turbines de tailles disponibles sur le marché et dans le but d'assurer la redondance du système, on a opté pour plusieurs turbines avec un axe horizontal, disposées en périphérie à la base de la cheminée. Le design de la partie d'entrée de la cheminée et de la partie turbine se fait à l'aide des logiciels CFD [5].

#### 1.5.4.2 Etude Technico-économique :

Le coût d'investissement dans une centrale cheminée solaire a été calculé pour des centrales de différentes puissances. Cette étude a été fondée sur les données du Tableau 1.2.

Le calcul du LEC (Levelized Electricity Costs) (voir Annexe B), est basé sur un taux d'intérêt de 6% sur une durée d'amortissement de 30 ans (Tableau 1.3)

Capacity	MW	5	30	100	200
tower cost	Mio. €	19	49	156	170
collector cost <sup>A</sup>	Mio. €	10	48	107	261
turbine cost	Mio. €	8	32	75	133
engineering, tests, misc.	Mio. €	5	16	40	42
<b>total</b>	<b>Mio. €</b>	<b>42</b>	<b>145</b>	<b>378</b>	<b>606</b>
annuity on investment	Mio. €/a	2.7	10.2	27.1	43.7
annual operation & maintenance cost	Mio. €/a	0.2	0.6	1.7	2.8
<b>levelized electricity cost (LEC) <sup>B</sup></b>	<b>€/kWh</b>	<b>0.21</b>	<b>0.11</b>	<b>0.09</b>	<b>0.07</b>
<sup>A</sup> cost for unskilled labor assumed to be 5 €/h <sup>B</sup> at an interest rate of 6 % and a depreciation time of 30 years					

Tableau 1.3 : Coûts d'investissement et LEC [5]

L'influence de la variation des paramètres financiers (le taux d'intérêt et la durée d'amortissement) sur le LEC est présentée sur la figure 1.5. Pour des centrales d'une puissance allant de 5MW à 200 MW. La limite supérieure de chaque bande a été calculée pour une durée d'amortissement de 20 ans, et la limite inférieure pour une période d'amortissement de 40 ans.

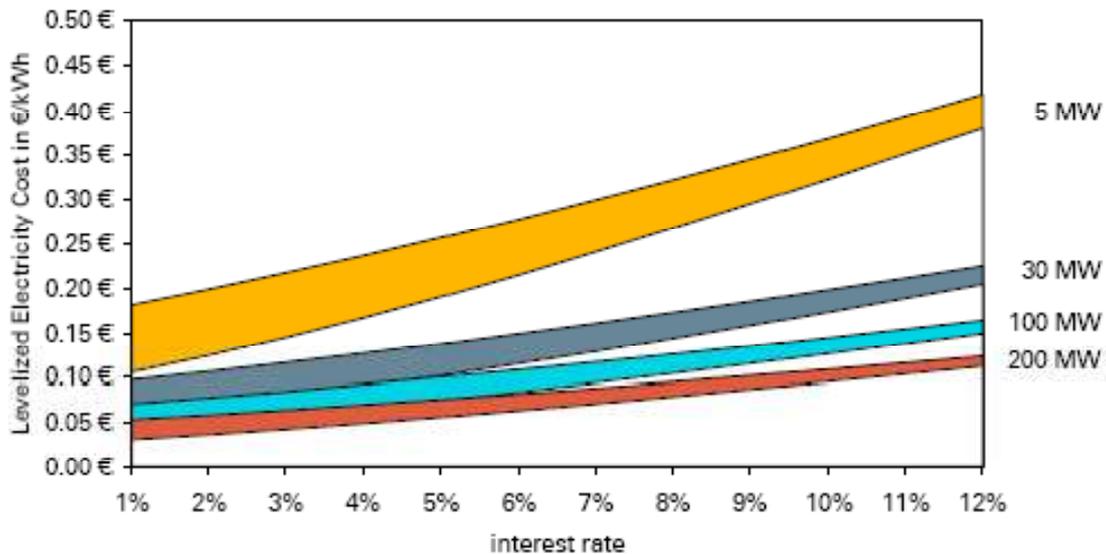


Figure 1.5: LEC pour différents taux d'intérêts, pour des centrales de différentes puissances [5]

Comme on pouvait s'y attendre, le coût de production du kWh électrique d'une centrale cheminée solaire est dominé par le taux d'intérêt. Le temps d'amortissement a aussi une influence significative. Si on considère par exemple un taux d'intérêt de 12% sur un temps d'amortissement de 20 ans, le LEC revient à 0.12 €/KWh pour une cheminée de 200MW, contre un LEC de 0.06 €/KWh pour un taux d'intérêt de 6% sur un temps d'amortissement de 40 ans.

La figure 1.6 représente une comparaison schématique et assez générale entre une centrale à charbon et une centrale cheminée solaire. Sur cet exemple le LEC est plus élevé pour une centrale cheminée solaire pendant les premières années de fonctionnement. L'écart entre le coût de l'énergie obtenue par les deux centrales s'atténue avec l'augmentation du prix du carburant fossile. Après 20 ans d'exploitation le coût de l'énergie est identique pour les deux centrales, et les deux centrales sont entièrement amorties. À ce moment, le coût d'électricité produite par une centrale cheminée solaire est très faible car il n'est dû qu'aux

dépenses de maintenance et de fonctionnement, contrairement au coût de l'électricité des centrales à charbon qui reste relativement élevé, car il est régi par le coût de carburant fossile utilisé.

Dans cet exemple, au bout de 30 ans de fonctionnement, la centrale à charbon atteint sa durée de vie maximale et une nouvelle centrale doit être construite, alors que la centrale cheminée solaire reste dans sa configuration d'origine et elle ne nécessite aucun changement. Ceci reflète la différence entre la durée de vie technique entre les deux installations.

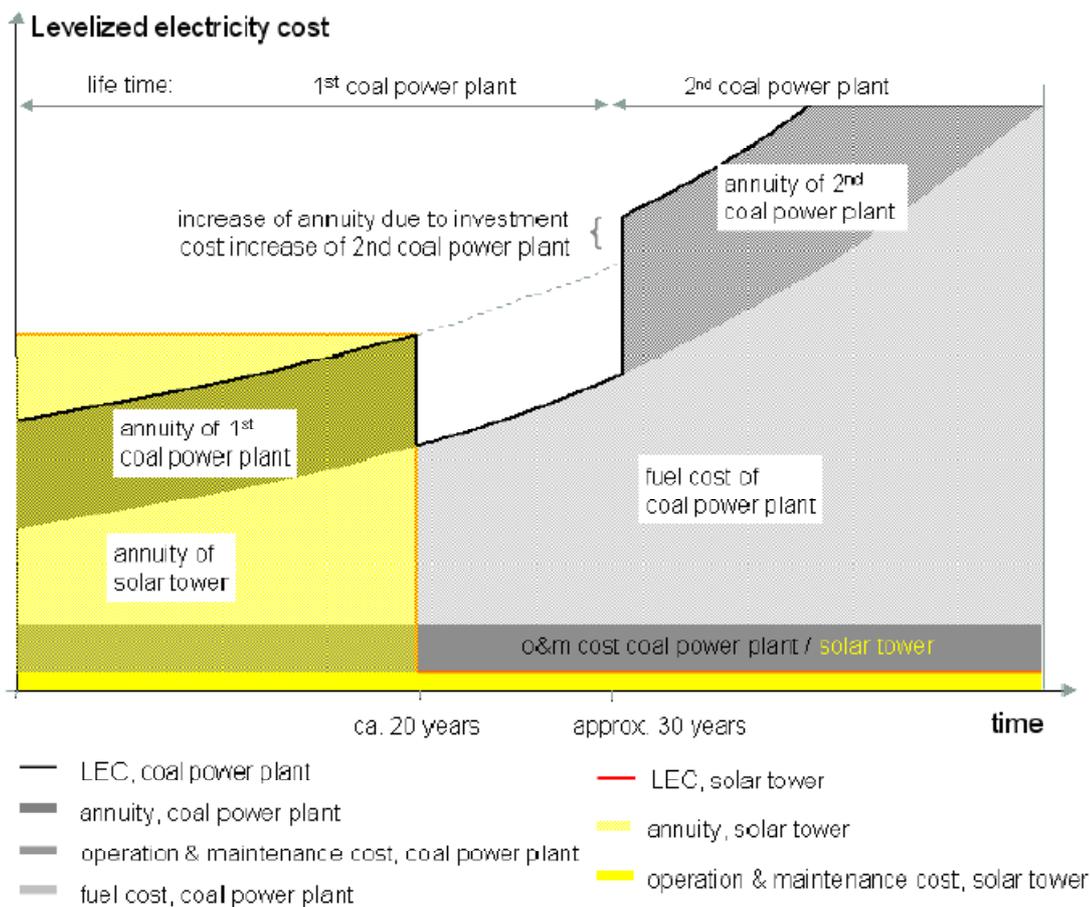


Figure 1.6 : Comparaison générale entre le coût d'électricité d'une centrale cheminée solaire et une centrale au charbon [5]

### 1.5.4.3 Projet australien :

Un projet d'une centrale cheminée solaire est actuellement en développement en Australie par la société EnviroMission [12]. La cheminée aurait 990 mètres de hauteur et 70 mètres de diamètre. La centrale fournirait 200 mégawatts de puissance électrique.

Il présente l'un des projets les plus ambitieux de la planète pour la production d'énergie alternative.

Ce projet peut paraître trop ambitieux mais ses concepteurs disent qu'il est réalisable. Les études de faisabilité par le bureau d'ingénieurs allemand SBP (*Schlaich Bergermann und Partner*), basé à Stuttgart, arrivent à leur terme. Cette tour solaire serait donc construite par l'entreprise EnviroMission dans le désert de la province australienne du New South Wales, dans le comté de Wentworth. L'énergie fournie par cette centrale revient, près d'un tiers moins cher que celle fournie par les panneaux photovoltaïques.

Le projet peut répondre à certaines autres activités telles que le tourisme ou la production agricole.

#### **Spécifications du projet :**

- Une cheminée de 990 m de haut, en béton haute résistance précontraint, pesant plus d'une mégatonne ;
- Un collecteur de 7 km de diamètre, soit  $38,5 \text{ km}^2$  de verre et de plastique ;
- Température de l'air chauffé dans la cheminée :  $70^\circ\text{C}$  ;
- Vitesse de l'air dans la cheminée : 15 m/s ;
- 32 turbines ;
- Puissance développée : 200 mégawatts.

Récemment, EnviroMission s'est lancé dans le développement d'une première version plus petite (50 MW).

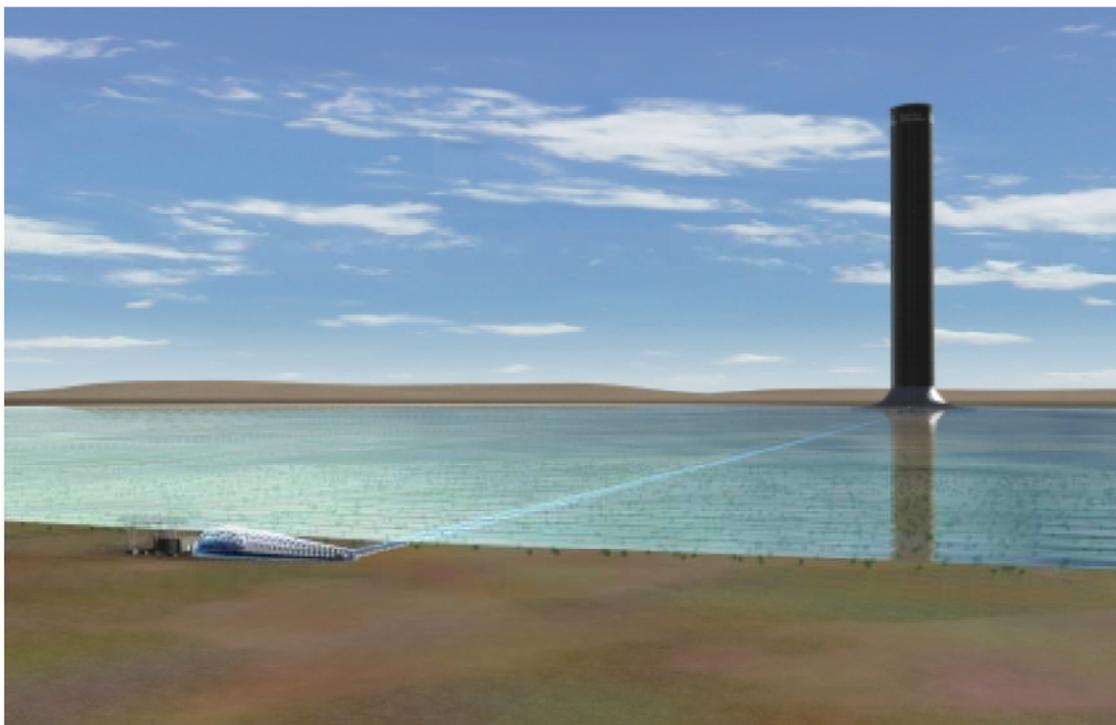


Figure 1.7 : Vue artistique du projet australien

## **1.6 Avantages et inconvénients des centrales cheminées solaire :**

### **1.6.1 Avantage de centrales cheminées solaires :**

- Le collecteur de la centrale cheminée solaire utilise les deux composantes du rayonnement solaire, direct et diffus. Donc la cheminée solaire produit de l'énergie électrique même par temps couvert.
- Grâce au sol sous le collecteur qui agit comme un système naturel de stockage de chaleur, la centrale cheminée solaire peut opérer sans interruption, avec une production réduite pendant la nuit. On peut aussi doper le système avec des matériaux posés dans le collecteur sur le sol, pour stocker la chaleur.
- Les cheminées solaires sont particulièrement fiables et ne sont pas sujet de pannes, contrairement à plusieurs autres centrales. Les turbines et les générateurs sont les seuls composants en mouvement dans toute la structure. Ils garantissent un fonctionnement fiable avec un minimum d'entretien.
- Contrairement à plusieurs autres centrales conventionnelles ou même des centrales thermiques solaires, les cheminées solaires n'ont pas besoin d'eau pour leurs fonctionnements.
- Les principaux matériaux de construction d'une cheminée solaire sont le béton et le verre. Ces matériaux sont disponibles dans la plupart des régions en quantité suffisante.
- La construction des cheminées solaires utilise une technologie maîtrisée, et elles peuvent être construites avec les moyens disponibles dans la plupart des pays en voie de développement.
- Même dans les pays pauvres, il est possible de construire une cheminée solaire de grande dimension, sans trop de dépenses de monnaie étrangère, en utilisant les ressources disponibles et la force physique locales. Cela crée un nombre important de postes d'emplois et réduit d'une manière significative le coût de construction de la cheminée solaire.

### **1.6.2 Inconvénients des centrales cheminées solaires :**

- Les cheminées solaires nécessitent une surface d'installation importante.
- Les cheminées solaires ne peuvent pas être construites dans des régions affectées par les tremblements de terre, sinon le coût de construction de la centrale peut atteindre des coûts exorbitants.

- Il faut aussi éviter les zones avec des tempêtes de sable fréquentes, car cela réduit non seulement la performance du collecteur mais augmente aussi le coût d'entretien et de fonctionnement de la centrale.

## II. Etude théorique de la centrale cheminée solaire

## **Introduction :**

On présente dans ce chapitre une étude théorique simple de la centrale cheminée solaire qui vise à comprendre son principe de fonctionnement. On commence par une discussion des principaux paramètres qui influencent le fonctionnement d'une centrale cheminée solaire. On présente ensuite une étude théorique de chacun de ces trois composants à savoir, le collecteur solaire, la cheminée et la turbine à air.

### **2.1 Paramètres de fonctionnement :**

Plusieurs facteurs, comme les matériaux utilisés pour la construction de la cheminée et le collecteur solaire, la hauteur de la cheminée et le rayon du collecteur, la nature du sol sous le couvert du collecteur et plusieurs autres paramètres environnementaux influencent le fonctionnement d'une centrale cheminée solaire. La puissance électrique générée est aussi influencée par la turbine à air utilisée et le système de contrôle de l'orientation des pales de la turbine. La figure 2.1 schématise les différents paramètres qui influencent le fonctionnement d'une cheminée solaire :

- Le site choisi pour l'implantation de la cheminée solaire permet de fixer un très grand nombre de paramètres environnementaux ainsi que la nature du sol sous le couvert du collecteur. L'intensité du rayonnement solaire qui est la source d'énergie pour le fonctionnement de la cheminée solaire représente un paramètre décisif pour le choix du site de construction. Les cheminées solaires sont destinées pour les zones arides (désert) où la température ambiante est très élevée et des immenses surfaces libres sont disponibles.
- Les dimensions de la cheminée et principalement sa hauteur, jouent un rôle très important sur la puissance générée par une cheminée solaire. Ils vont d'ailleurs faire l'objet d'une étude paramétrique dans ce travail.
- Le choix des matériaux de construction est imposé par la disponibilité dans la région de construction de la centrale cheminée solaire. Les pertes de chaleur à travers le mur de la cheminée, diminue les performances de la centrale mais des murs très épais conduisent à des coûts de construction exorbitants.
- Le collecteur solaire peut être construit avec un nombre allant de 1 à 4 couverts, selon la nécessité. Un nombre de couvert plus important réduit les pertes de chaleur vers le milieu ambiant mais augmente aussi le coût de construction. Vu les dimensions du collecteur dans le cas des cheminées solaires, on conseille souvent d'utiliser un

collecteur avec un seul couvert. Pour les cheminées solaires commerciales, les températures atteintes à la base de la cheminée sont élevées. Donc et dans le but de diminuer les pertes thermiques vers le milieu ambiant, on double le couvert du collecteur autour de la base de la cheminée.

Les matériaux de construction du collecteur et surtout pour le couvert, jouent un rôle très important. On conseille d'utiliser un couvert en verre pour ses propriétés optiques et sa durée de vie.

- Les turbines utilisées pour la conversion d'énergie sont des turbines à étage de pression. L'inclinaison des pales de ces turbines est commandée par un système automatique.

## **2.2 Le collecteur solaire :**

Le collecteur solaire utilise le principe de la captation par effet de serre pour le chauffage de l'air. Le fonctionnement de tout collecteur à basse température par effet de serre, s'explique par le fait que le verre est un matériau quasiment transparent au rayonnement solaire alors qu'il est presque opaque au rayonnement infrarouge. Un flux solaire traversant une vitre et venant chauffer un corps derrière cette vitre (l'absorbeur) se trouve donc piégé, puisque le rayonnement émis par ce corps ne peut traverser la vitre.

Dans le cas de l'application du collecteur pour une centrale cheminée solaire, le sol joue le rôle de l'absorbeur. La périphérie du collecteur est connectée avec le milieu ambiant, alors que sa partie centrale est directement connectée avec la base de la cheminée.

### **2.2.1 Bilan thermique du collecteur :**

Le bilan énergétique par unité de surface du capteur s'écrit :

$$S = Q_u + Q_p + Q_s \dots \dots \dots (2.1)$$

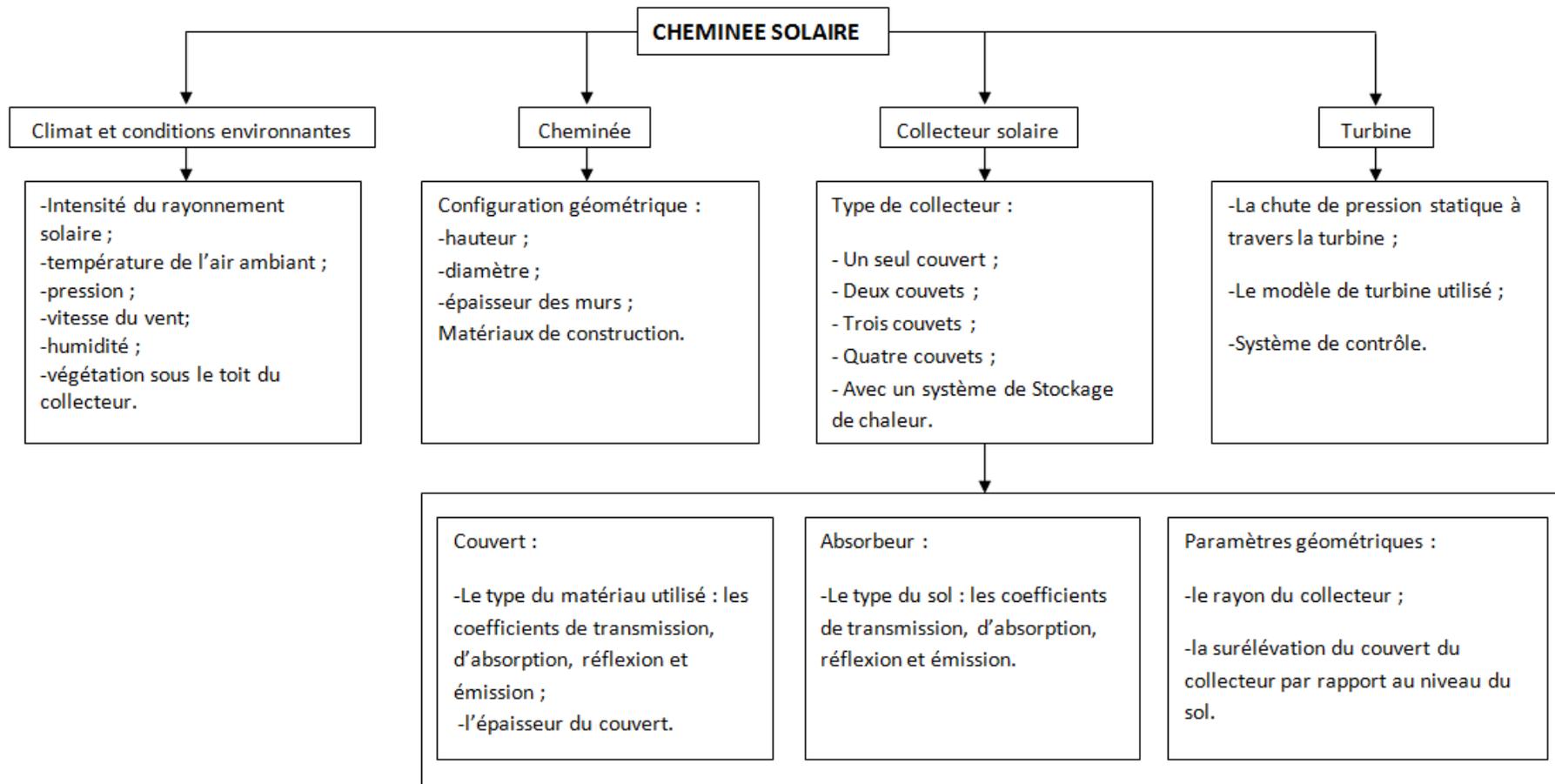
Où  $S$  désigne le flux solaire absorbé à la surface de l'absorbeur ;

$Q_u$  la puissance utile récupérée par l'air ;

$Q_p$  la puissance perdue dans le sol et vers le milieu ambiant à travers le couvert ;

$Q_s$  la puissance stockée sous forme de chaleur vive dans les différents éléments du collecteur lorsque le régime thermique est variable ;

Figure 2.1 : Inventaire des différents paramètres de fonctionnement



Le rendement instantané d'un absorbeur s'écrit [15] :

$$\eta_{absor} = \frac{Q_u}{S} \dots \dots \dots (2.2)$$

Pour un capteur à inertie thermique négligeable, ou dans le cas d'un régime permanent  $Q_s = 0$ , et le rendement de l'absorbeur devient :

$$\eta_{absor} = 1 - \frac{Q_p}{S} \dots \dots \dots (2.3)$$

Cette simple relation montre que dans la conception d'un capteur, on aura toujours intérêt à :

- Diminuer la puissance perdue  $Q_p$  ;
- Augmenter la puissance absorbée  $S$ .

### 2.2.2 Rendement optique du capteur :

Le rendement optique du capteur est défini par :

$$\eta_0 = \frac{S}{G} \dots \dots \dots (2.4)$$

Où  $G$  représente le rayonnement solaire global sur le plan du capteur.

Le rendement optique du capteur peut être aussi donné par la formule ci-dessous [15] :

$$\eta_0 = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho_d} \dots \dots \dots (2.5)$$

Où :

$\tau$  représente le facteur de transmission du couvert au rayonnement solaire;

$\alpha$  est le coefficient d'absorption de l'absorbeur pour les longueurs d'onde correspondant au rayonnement solaire ;

$\rho_d$  représente le coefficient de réflexion hémisphérique du vitrage ;

**2.2.3 Rendement thermique du collecteur :**

Le rendement thermique du collecteur est donné par la relation suivante :

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{Q}}{A_{coll}G} \dots \dots \dots (2.6)$$

Où  $\dot{Q}$  représente la puissance thermique gagnée par l'air, et  $A_{coll}$  représente la surface du collecteur.

Le bilan énergétique établi entre l'entrée et la sortie du collecteur permet d'écrire :

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p\Delta T_{coll} = \eta_{coll}A_{coll}G \dots \dots \dots (2.7)$$

Où  $\Delta T_{coll}$  représente l'élévation de la température entre l'entrée et la sortie du collecteur, et  $\dot{m}$  le débit massique d'air à l'intérieur de la cheminée, il peut être calculé par la formule suivante :

$$\dot{m} = \rho_{coll}A_{chem}V_{chem} \dots \dots \dots (2.8)$$

Où  $\rho_{coll}$  est la densité de l'air à la sortie du collecteur,  $A_{chem}$  représente la section perpendiculaire à l'axe de la cheminée et  $V_{chem}$  est la vitesse de l'air à l'entrée de la cheminée.

**2.2.4 Puissance utile récupérée par l'air :**

Considérons un capteur solaire à un seul couvert comme illustré sur la figure 2.2

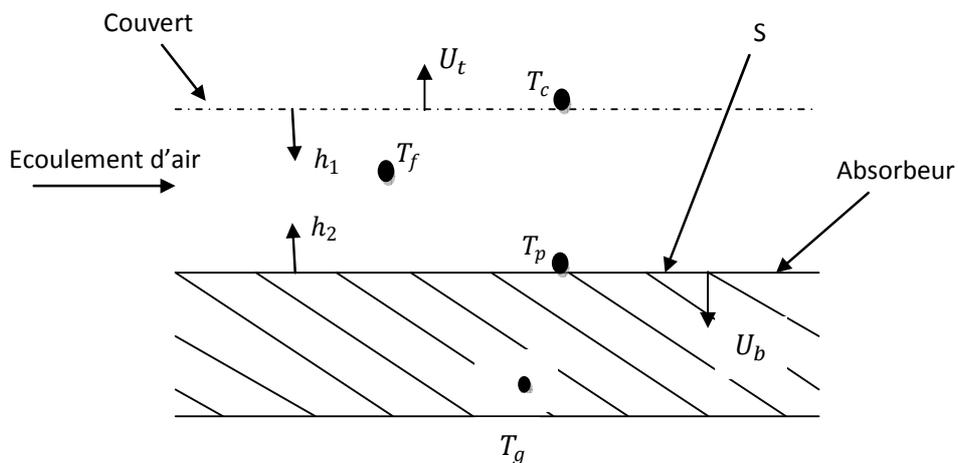


Figure 2.2 : Collecteur solaire à air avec un seul couvert

La visualisation des flux thermiques dans le collecteur est donnée par l'analogie électrique représentée sur la figure 2.3.

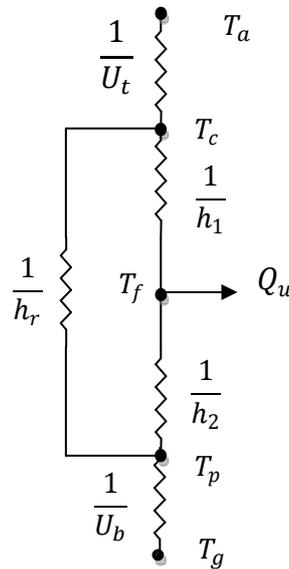


Figure 2.3 : Analogie électrique pour un capteur solaire à un seul couvert

Le rayonnement solaire  $S$  absorbé par le collecteur chauffe l'absorbeur à une température  $T_p$ . Le transfert thermique entre le fluide en écoulement à la température  $T_f$  et l'absorbeur se fait par convection, avec un coefficient de transfert thermique  $h_2$ . De l'énergie est transférée par convection entre le couvert et le fluide et par rayonnement entre le couvert et l'absorbeur avec les coefficients  $h_1$  et  $h_r$  respectivement. Le sol est à la température  $T_g$ . Enfin on caractérise la perte de chaleur entre l'absorbeur et le milieu ambiant par un coefficient d'échange thermique  $U_t$ .

Les équations de conservation d'énergie pour le couvert, l'absorbeur et le fluide s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} U_t (T_a - T_c) + h_r (T_p - T_c) + h_1 (T_f - T_c) = 0 \dots \dots \dots (2.9) \\ S + h_2 (T_f - T_p) + h_r (T_c - T_p) + U_b (T_g - T_p) = 0 \dots \dots \dots (2.10) \\ h_1 (T_c - T_f) + h_2 (T_p - T_f) = Q_u \dots \dots \dots (2.11) \end{cases}$$

Ce système doit être résolu pour exprimer le gain en puissance thermique en fonction de  $U_t$ ,  $h_1$ ,  $h_r$ ,  $h_2$ ,  $T_f$ ,  $T_a$  et  $T_g$ , donc en d'autres mots  $T_p$  et  $T_c$  doivent être éliminés.

La résolution des deux premières équations du système pour  $(T_p - T_f)$  et  $(T_c - T_f)$  donne :

$$(T_p - T_f) = \frac{S(U_t + h_r + h_1) - (U_b U_t + U_b h_r + U_b h_1)(T_f - T_g) - (U_t h_r)(T_f - T_a)}{(U_t + h_r + h_1)(h_r + U_b + h_2) - h_2^2} \dots \dots \dots (2.12)$$

$$(T_c - T_f) = \frac{S h_r - (h_2 U_t + U_b U_t + U_t h_r)(T_f - T_a) - (U_b h_r)(T_f - T_g)}{(U_t + h_r + h_1)(h_r + U_b + h_2) - h_r^2} \dots \dots \dots (2.13)$$

En remplaçant ces valeurs dans l'équation (2.11) on obtient après réarrangement :

$$Q_u = F' (S - U_{fa}(T_f - T_a) - U_{fg}(T_f - T_g)) \dots \dots \dots (2.14)$$

Avec

$$\left\{ \begin{array}{l} F' = \frac{h_r h_1 + h_2 U_t + h_r h_2 + h_2 h_1}{(U_t + h_r + h_1)(h_r + U_b + h_2) - h_r^2} \dots \dots \dots (2.15) \\ U_{fa} = \frac{U_t (h_r h_2 + h_r h_1 + U_b h_1 + h_1 h_2)}{h_r h_1 + h_2 U_t + h_r h_2 + h_2 h_1} \dots \dots \dots (2.16) \\ U_{fg} = \frac{U_b (h_r h_2 + h_r h_1 + U_t h_1 + h_1 h_2)}{h_r h_1 + h_2 U_t + h_r h_2 + h_2 h_1} \dots \dots \dots (2.17) \end{array} \right.$$

Où  $U_{fa}$  représente le coefficient d'échange thermique globale entre le fluide et l'air ;

$U_{fg}$  représente le coefficient d'échange thermique global entre le fluide et le sol ;

$F'$  le rapport des résistances thermiques entre l'absorbeur et l'ambient et entre l'air à l'intérieur du collecteur et l'ambiance.

### 2.3 La cheminée :

La cheminée est l'élément moteur de la centrale cheminée solaire. C'est un tube de pression avec des pertes par frottements négligeables.

La cheminée a le rôle de convertir l'énergie thermique donnée à l'air dans le collecteur en énergie cinétique (mouvement de l'air dans le système).

La colonne d'air chaud présente dans toute la structure est connectée avec le milieu ambient par le collecteur à l'entrée et par la cheminée à la sortie. Le poids de cette colonne

qui est plus léger que celui normalement occupé par l'air ambiant, provoque une élévation de cette colonne d'air chaud (Effet de tirage de la cheminée). En effet l'air chaud à l'intérieur de la cheminée est poussé vers le milieu ambiant à la sortie de la cheminée, et comme conséquence, un appel d'air se fait par l'entrée du collecteur.

Afin de bien comprendre l'effet de tirage de la cheminée, nous présentons une étude de la distribution de pression statique relative dans la cheminée. Puis sa relation avec la force motrice et l'énergie cinétique de l'air. Ensuite, on établit une étude énergétique de la cheminée en considérant dans un premier cas un mur de cheminée adiabatique, et dans un deuxième cas une cheminée avec des pertes de chaleur vers le milieu ambiant.

### 2.3.1 Pression relative statique :

Considérant que l'air est à une pression statique ( $p_i$ ) à l'intérieur de la cheminée, et ( $p_o$ ) à l'extérieur de la cheminée comme il est montré sur la figure 2.4.

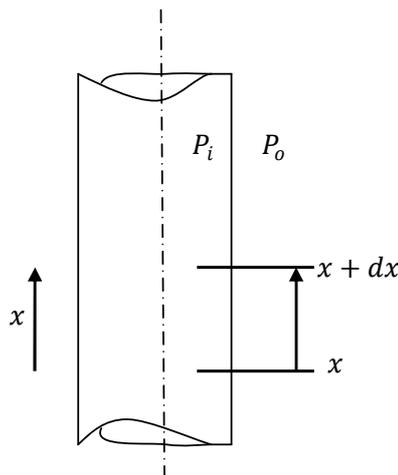


Figure 2.4 : Pression statique à l'intérieur et à l'extérieur de la cheminée

On note par  $S_p$  la différence de pression statique entre l'intérieur de la cheminée et le milieu ambiant à la même hauteur :

$$S_p = p_i - p_o \dots \dots \dots (2.18)$$

Donc d'après cette définition  $S_p$  représente la pression relative statique.

$S_p$  à la position  $x$  et  $x + dx$  peut être donnée par :

$$S_{p,x} = p_{i,x} - p_{o,x} \dots \dots \dots (2.19)$$

$$S_{p,x+dx} = S_{p,x} + \frac{dS_{p,x}}{dx} dx \dots \dots \dots (2.20)$$

D'après la définition de  $S_p$  et les deux équations donnée ci-dessus on peut écrire :

$$\frac{dS_{p,x}}{dx} = \frac{dp_{i,x}}{dx} - \frac{dp_{o,x}}{dx} \dots \dots \dots (2.21)$$

A l'air ambiant, la relation entre la pression statique et la densité peut être donnée par :

$$\frac{dp_{o,x}}{dx} = -\rho_{o,x}g \dots \dots \dots (2.22)$$

Considérant un écoulement en régime stationnaire et adiabatique sans frottement dans la cheminée, l'équation de conservation de la quantité de mouvement prend la forme suivante :

$$\frac{dp_{i,x}}{dx} = -\rho_{i,x}g \dots \dots \dots (2.23)$$

En remplaçant les équations (2.21)-(2.23) dans l'équation (2.20), on obtient :

$$dS_{p,x} = S_{p,x+dx} - S_{p,x} = (\rho_{o,x} - \rho_{i,x})gdx \dots \dots \dots (2.24)$$

Intégrant maintenant l'équation (2.24), entre 0 et x :

$$S_{p,x} - S_{p,0} = \int_0^x (\rho_{o,x} - \rho_{i,x})g dx \dots \dots \dots (2.25)$$

À la sortie de la cheminée, la pression statique doit être égale à la pression statique ambiante atmosphérique à cette hauteur, donc on peut écrire que :

$$S_{p,H} = 0$$

Où H représente la hauteur de la cheminée.

En utilisant ce résultat et en intégrant l'équation (2.3.7) entre les positions 0 et H on obtient :

$$S_{p,0} = - \int_0^H (\rho_{o,x} - \rho_{i,x})g dx \dots \dots \dots (2.26)$$

Pour les cheminées solaires de petites dimensions, la densité à l'intérieur et à l'extérieur de la cheminée peut être considérée comme constante. Donc l'équation (2.26) peut être écrite sous la forme :

$$S_{p,0} = -(\rho_o - \rho)gH \dots \dots \dots (2.27)$$

Remplaçant maintenant l'équation (2.27) dans l'équation (2.25), on obtient :

$$S_{p,x} = -(\rho_o - \rho)g(H - x) \dots \dots \dots (2.28)$$

Les équations (2.27) et (2.28), montrent que  $S_p$  prend des valeurs négatives dans la cheminée. De plus l'équation (2.28) montre que  $S_p$  varie linéairement avec la hauteur, et que le minimum de S est obtenu à la base de la cheminée.

Si la hauteur de la cheminée est grande, la densité de l'air à l'intérieur et à l'extérieur de la cheminée ne peut pas être prise comme constantes. De ce fait on introduit les densités d'air moyennes, qui sont définis par :

$$\rho_o = \frac{\int_0^H \rho_{o,x} dx}{\int_0^H dx} \dots \dots \dots (2.29)$$

$$\rho = \frac{\int_0^H \rho_{i,x} dx}{\int_0^H dx} \dots \dots \dots (2.30)$$

En utilisant les valeurs moyennes des densités dans la déduction établie précédemment, on aboutit aux mêmes équations (2.27) et (2.28).

### 2.3.2 La force motrice :

D'après l'analyse présentée précédemment, le minimum de  $S_p$  est obtenu en intégrant la différence de pression statique depuis la base et jusqu'à la sortie de la cheminée.

Comme le système est connecté avec le milieu ambiant par le collecteur à l'entrée, et par la cheminée à la sortie, la pression relative statique définie précédemment devient la force motrice qui entraîne l'air à travers tout le système, d'après l'équation (2.26) on peut donc écrire :

$$\Delta P_{tot} = |S_{p,min}| = |S_{p,0}| = \int_0^H (\rho_o - \rho)g dx \dots \dots \dots (2.31)$$

Avec  $\rho_o$  et  $\rho$  sont données par les équations (2.29) et (2.30) définis ci-dessus.

### 2.3.3 Pression totale et énergie cinétique de l'air :

On remarque que la différence de pression totale  $\Delta P_{tot}$  définie précédemment et qui est donnée par la formule ci-dessous, augmente avec la hauteur de la cheminée.

$$\Delta P_{tot} = \int_0^H (\rho_o - \rho)g dx \dots \dots \dots (2.32)$$

Si on néglige les pertes par frottement, cette différence de pression totale peut être écrite sous la forme suivante :

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_{stat} + \Delta P_{dyn} \dots \dots \dots (2.33)$$

La différence de pression statique représente la chute de pression à travers la turbine, et la différence de pression dynamique décrit l'énergie cinétique de l'air.

Dans le cas d'absence de turbine, toute la différence de pression est utilisée pour accélérer l'air, et elle est donc convertie en énergie cinétique.

### 2.3.4 Etude énergétique de la cheminée :

On considère dans cette étude que l'air ambiant est chauffé dans le collecteur jusqu'à une température  $T(0)$  à l'entrée de la cheminée, et que la température de l'air à l'intérieur de la cheminée varie en fonction de la hauteur et prend une valeur  $T(x)$  à une hauteur  $x$  donnée de la cheminée.

On considère aussi que la température atmosphérique diminue en fonction de l'altitude en suivant la loi [9] :

$$T_o(x) = T_o(0) - \gamma_{\infty}x \dots \dots \dots (2.34)$$

Où  $T_o$  représente la température de l'air ambiant, et  $\gamma_{\infty}$  le rapport de chute de température atmosphérique.

Dans ce qui suit, on considérera un cas adiabatique c'est-à-dire les pertes de chaleur par les murs de la cheminée sont négligeables et le cas où il y a perte de chaleur au niveau du mur de la cheminée.

• **1<sup>er</sup> cas : Perte de chaleur au niveau du mur de la cheminée :**

En appliquant un bilan énergétique sur un volume de contrôle différentiel de la cheminée d'épaisseur  $dx$ , on obtient :

$$-C_p \dot{m} \cdot dT(x) = U(T(x) - T_o(x))\pi D_{chem} dx + \dot{m} g dx \dots \dots \dots (2.35)$$

Où  $D_{chem}$  représente le diamètre de la cheminée, et  $U$  le coefficient d'échange thermique global entre l'air chaud à l'intérieur de la cheminée et l'air ambiant, et il est donné par la relation :

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{U_f} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{U_\infty}\right)} \dots \dots \dots (2.36)$$

Où  $\delta$  représente l'épaisseur du mur de la cheminée ;

$\lambda$  est la Conductivité thermique du matériau de construction de la cheminée ;

$U_\infty$  le Coefficient de convection thermique entre la face extérieure du mur de la cheminée et l'air ambiant ;

$U_f$  le Coefficient de convection thermique entre la face intérieure du mur de la cheminée et l'air chaud en écoulement à l'intérieur de la cheminée.

En introduisant la valeur de  $T_o(x)$ , donnée par l'équation (2.34), l'équation (2.35) devient :

$$-C_p \dot{m} \cdot dT(x) = \pi D_{chem} U T(x) + \pi D_{chem} U \gamma_\infty x dx + (\dot{m} - \pi D_{chem} U T_o(0)) \dots \dots \dots (2.37)$$

On remarque que pour établir la relation (2.35), on a considéré que la variation de l'énergie cinétique est négligeable. Ceci est une hypothèse raisonnable dans le cas où la cheminée a un diamètre constant et que la variation de la densité d'air à l'intérieur de la cheminée est insignifiante.

Le débit massique  $\dot{m}$  peut être donné par la relation :

$$\dot{m} = \rho(0) A_{chem} V_{chem} \dots \dots \dots (2.38)$$

Où :  $A_{chem}$ , représente la section perpendiculaire à l'axe de la cheminée,  $V_{chem}$  la vitesse de l'air chaud à l'intérieur de la cheminée et  $\rho(0)$  la densité de l'air à la sortie du collecteur et l'entrée de la cheminée.

La température de l'air à l'entrée de la cheminée (sortie du collecteur) peut être tirée à partir de l'étude faite précédemment sur le collecteur à la section 2.2.3.

Rappelons l'équation établie :

$$\dot{m}C_p\Delta T_{coll} = \eta_{coll}A_{coll}G$$

Avec :

$$\Delta T_{coll} = T(0) - T_o(0) \dots \dots \dots (2.39)$$

En remplaçant l'expression de  $\Delta T_{coll}$  dans l'équation (2.7) on aboutit à :

$$T(0) = T_o(0) + \frac{\eta_{coll} \cdot A_{coll} \cdot G}{\dot{m}C_p} \dots \dots \dots (2.40)$$

En combinant maintenant les équations (2.37)-(2.40), on obtient après développement et intégration entre la base de la cheminée et une position x [9] :

$$T(x) = T_o(0) - \gamma_{\infty}x - \frac{\dot{m}(g - \gamma_{\infty}C_p)}{\pi \cdot U \cdot D_{chem}} + e^{-\frac{\pi \cdot U \cdot D_{chem} \cdot h}{\dot{m}C_p}} \cdot \left( \frac{\pi \cdot \eta_{coll} \cdot R_{coll}^2 \cdot G}{\dot{m}C_p} + \frac{\dot{m}(g - \gamma_{\infty}C_p)}{\pi \cdot U \cdot D_{chem}} \right) \dots \dots \dots (2.41)$$

$$\text{Où } \begin{cases} A_{coll} = \pi \cdot R_{coll}^2 ; \\ R_{coll} : \text{Rayon du collecteur.} \end{cases}$$

Cette formule ne permet pas de voir clairement l'influence des différents paramètres sur la température à l'intérieur de la cheminée, donc et dans le but d'avoir une formule plus simple on considère un cas où on ne prend pas considération des pertes thermique au niveau du mur de la cheminée (mur adiabatique).

• **2<sup>ème</sup> cas : mur adiabatique de la cheminée**

En considérant la même analyse que pour la dernière section, avec dans ce cas un mur adiabatique, on obtient :

$$C_p \dot{m} \cdot dT = \dot{m} g dx \dots \dots \dots (2.42)$$

En combinant les équations (2.3.40), (2.42) et en intégrant entre la base de la cheminée et une position h donnée on obtient :

$$T(x) = T_o(0) - \frac{g}{C_p} x + \frac{\pi \cdot \eta_{coll} \cdot R_{coll}^2 \cdot G}{\dot{m} C_p} \dots \dots \dots (2.43)$$

Donc  $T(H)$ , la température de l'air à la sortie de la cheminée devient :

$$T(H) = T_o(0) - \frac{g}{C_p} H + \frac{\pi \cdot \eta_{coll} \cdot R_{coll}^2 \cdot I_0}{\dot{m} C_p} \dots \dots \dots (2.44)$$

Cette formule montre que l'air entre à la température ambiante au niveau du sol dans le collecteur, ensuite sa température augmente du fait de l'énergie fournie à l'air dans le collecteur. L'air atteint une température maximale à la sortie du collecteur (entrée cheminée). C'est à partir de cette position que la température de l'air va diminuer du fait de la conversion de l'énergie thermique disponible dans le fluide en énergie potentielle (le déplacement de la particule d'air verticalement d'une position  $x=0$  à une position  $x=H$ ), et aussi du fait des pertes de chaleur au niveau du mur de la cheminée qui ne sont pas considéré sur ce modèle.

**2.3.5 Rendement de la cheminée :**

Le rôle de la cheminée comme a été précisé précédemment est la conversion de l'énergie thermique en énergie cinétique. Cette conversion a un rendement très bas. Ceci est dû au fait du passage direct de l'énergie de bas niveau (thermique), à une énergie de haut niveau (cinétique).

Avec la différence de pression totale disponible (2.32), la puissance totale contenue dans l'écoulement est :

$$P_{tot} = \Delta P_{tot} \cdot V_{chem,max} \cdot A_{chem} \dots \dots \dots (2.45)$$

Le rendement de la cheminée est défini par [5], [6] sous la forme suivante :

$$\eta_{chem} = \frac{P_{tot}}{\dot{Q}} \dots \dots \dots (2.46)$$

Avec  $\dot{Q}$  qui est donné par la relation (2.7).

Si maintenant on considère que le système n'est pas couplé avec une turbine  $\Delta P_{stat} = 0$ , donc toute la différence de pression totale est utilisée pour accélérer l'air. Donc elle est convertie en énergie cinétique, alors on peut écrire :

$$P_{tot} = \frac{1}{2} \dot{m} v_{chem,max}^2 \dots \dots \dots (2.47)$$

En utilisant dans ce cas l'approximation de Boussinesq et en combinant les équations (2.32) et (2.33) on trouve:

$$v_{chem,max} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H \cdot \frac{\Delta T_{coll}}{T_0}} \dots \dots \dots (2.48)$$

Finalement En combinant les 4 dernières équations établies on aboutit à :

$$\eta_{chem} = \frac{g \cdot H}{C_p \cdot T_0} \dots \dots \dots (2.49)$$

Cette représentation simple montre l'une des caractéristiques de la cheminée solaire, qui énonce que le rendement de la cheminée dépend principalement de sa hauteur.

Toute fois, il faut noter que le modèle établi est un modèle simple qui ne prend pas en considération les différentes pertes de chaleurs au niveau de la cheminée.

## 2.4 La turbine à air :

Les turbines sont souvent positionnées à la base de la cheminée. L'utilisation des turbines permet d'extraire une quantité d'énergie disponible dans l'air en écoulement sous forme d'énergie mécanique de rotation. Des générateurs couplés aux turbines permettent la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Les turbines utilisées dans les centrales cheminées solaires sont des turbines à étage de pression. La puissance générée par la turbine est proportionnelle au produit du débit volumique et la différence de pression à travers la turbine. Dans le but de maximiser ce produit, un système de contrôle est nécessaire pour le réglage de l'angle d'inclinaison des pales de la turbine.

La puissance électrique générée par la turbine est donnée par la formule ci-dessous :

$$P_{elec} = \Delta p_{stat} \cdot Q_v \cdot \eta_{tur} \dots \dots \dots (2.50)$$

Où  $\Delta p_{stat}$  représente la chute de pression statique à travers la turbine,  $Q_v$  le débit volumique et  $\eta_{tur}$  le rendement de la turbine et du générateur électrique.

Cependant Schlaich & al. [5] ont déterminé un optimum de chute de pression à travers la turbine qui correspond à 80% de la pression totale disponible. Donc on peut écrire que :

$$P_{elec} = 0.8 \cdot \Delta p_{tot} \cdot Q_v \cdot \eta_{tur} \dots \dots \dots (2.51)$$

En introduisant dans cette équation les rendements du collecteur et de la cheminée données par les équations (2.6) et (2.49) respectivement on aboutit à :

$$P_{elec} = 0.8 \cdot \eta_{col} \cdot \eta_{chem} \cdot \eta_{tur} \cdot A_{coll} \cdot S \dots \dots \dots (2.52)$$

On peut finalement écrire que :

$$P_{elec} = \eta_C \cdot A_{coll} \cdot S \dots \dots \dots (2.53)$$

### **Conclusion :**

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude théorique des différents composants de la centrale cheminée solaire. Nous avons défini pour le collecteur le rendement de l'absorbeur et le rendement optique ainsi que son rendement thermique global. On a aussi établi une étude thermique du collecteur qui nous a permis d'exprimer la puissance utile récupérée par l'air en fonction des coefficients d'échange thermique et des températures de l'air et de l'absorbeur. Nous avons ensuite établi l'expression de la différence de pression totale, ainsi qu'une étude énergétique qui a permis d'établir une relation analytique simple qui lie principalement les températures d'entrée et de sortie de la cheminée, le débit massique et la hauteur de la cheminée. Nous avons aussi présenté l'expression du rendement de la cheminée et le modèle de la turbine utilisé ainsi que la puissance électrique générée.

### III. Modélisation mathématique

**Introduction :**

Dans ce chapitre on s'intéresse à la formulation des équations générales de transport de la mécanique des fluides. Dans un premier lieu, nous rappelons les équations exactes (ouvertes) qui régissent l'écoulement, puis les équations de Navier-Stokes moyennées qui régissent les écoulements turbulents, puis la méthodologie pour la fermeture des équations afin de résoudre le problème numériquement.

**3.1 Equations générales :**

**3.1.1 Equation de la conservation de la masse :**

Pour un écoulement de fluide, compressible, l'équation de conservation de la masse s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \dots \dots \dots (3.1)$$

Avec  $i=1, 2, 3$

Cette équation traduit le fait que le taux de variation de la masse contenue dans un volume donné est égal à la différence des débits massiques entrant et sortant du volume.

Pour notre problème on suppose que la masse volumique est constante, ce qui donne :

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \dots \dots \dots (3.2)$$

Avec  $i=1, 2, 3$

**3.1.2 Equation de conservation de la quantité de mouvement :**

L'équation de bilan de la quantité de mouvement s'écrit sous la forme :

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + u_j \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j}(p) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij}) + \rho f_i \dots \dots \dots (3.3)$$

Avec  $i, j = 1, 2, 3$

Avec :

$p$  : Pression de fluide ;

$f_i$  : Forces volumiques ;

$\tau_{ij}$  : Tenseur des contraintes visqueuses qui s'écrit sous la forme suivante :

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} + \frac{2}{3}\mu \frac{\partial \mu_m}{\partial x_m} \delta_{ij} \dots \dots \dots (3.4) \quad (m=i \text{ et } m=j)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \dots \dots \dots (3.5) \quad \text{: Tenseur des vitesses de déformation.}$$

$\mu$  : viscosité dynamique du fluide.

$$\delta_{ij} : \text{est le symbole de Kronecker} \begin{cases} \delta_{ij} = 1 & \text{si } i = j \\ \delta_{ij} = 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}$$

En introduisant les relations (3.4) dans l'équation (3.3), on obtient :

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + u_j \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} (p) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_m}{\partial x_m} \delta_{ij} \right] + \rho f_i \dots \dots \dots (3.6)$$

Si on considère un fluide incompressible avec des propriétés thermodynamiques constantes, l'équation (3.6) devient :

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + u_j \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] + \rho f_i \dots \dots \dots (3.7)$$

### 3.1.3 Equation de conservation de l'énergie :

L'équation de conservation de l'énergie s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j c_p T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\delta T}{\delta x_j} \right) + T \beta \frac{\partial P}{\partial t} + \Phi \dots \dots \dots (3.8)$$

Où

$c_p$  : Chaleur spécifique massique du fluide.

$\lambda$  : Conductivité thermique du fluide.

$\Phi$  : Sources internes dissipation d'énergie.

$$\Phi = 2\mu S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \mu \left( \frac{\partial u_m}{\partial x_m} \right)^2 \delta_{ij} \dots \dots \dots (3.9)$$

En considérant la relation (3.2) et la condition du symbole de Kronecker,  $\Phi$  devient :

$$\Phi = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \dots \dots \dots (3.10)$$

Si on considère un écoulement de fluide incompressible avec des propriétés thermodynamiques constantes, et si on tient compte de l'équation (3.1), l'équation (3.8) devient :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{T \beta}{\rho c_p} \left( \frac{\partial P}{\partial t} \right) + \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\mu}{\rho c_p} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \dots \dots \dots (3.11)$$

Avec,  $(\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p})$ , la diffusivité thermique du fluide.

### 3.2 Equations moyennes du mouvement :

La résolution des équations de conservation de la quantité du mouvement et de l'énergie est très compliquée dans le cas turbulent. En effet, les fluctuations spatiales et temporelles sont d'autant plus irrégulières que la vitesse est élevée. La turbulence est difficilement prévisible car une faible variation des conditions aux limites de l'écoulement peut provoquer des modifications importantes du champ des diverses grandeurs. Devant cet aspect désordonné des évolutions turbulentes et cette apparente complexité du phénomène, l'attitude naturelle - et la plus utilisée - a été d'introduire des méthodes statistiques utilisant différentes moyennes : moyenne temporelle, moyenne spatiale, moyenne stochastique (calcul de probabilité), moyenne statistique ou moyenne d'ensemble.

#### 3.2.1 Décomposition de Reynolds :

Une composante quelconque  $x_i$  peut se décomposer comme suit :

$$x_i = \bar{x}_i + x'_i \quad \text{C'est la décomposition de Reynolds.}$$

Où  $\bar{x}_i$  traduit une valeur moyenne de  $x_i$  et  $x'_i$  une partie fluctuante superposée à  $\bar{x}_i$ .  
Donc, en adaptant l'approche statique et particulièrement en utilisant la décomposition de Reynolds, on obtient les équations générales moyennées de l'écoulement turbulent.

#### 3.2.2 Moyenne de l'équation de la conservation de la masse :

Si on applique la moyenne à l'équation (3.2), on obtient :

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \dots \dots \dots (3.12)$$

#### 3.2.3 Equation de conservation de la quantité de mouvement moyennée :

La moyenne de l'équation (3.7) est donnée par :

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( v \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) \dots \dots \dots (3.13)$$

Avec :  $v \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$  : Contrainte visqueuse.

$\overline{u'_i u'_j}$  : Contrainte turbulente appelée aussi tension de Reynolds ( $R_{ij}$ )

### 3.2.4 Equation de conservation de l'énergie moyennée :

L'application de la décomposition de Reynolds à l'équation (3.8) en supposant que la pression est constante et la dissipation négligeable nous donne l'équation de transport de l'énergie moyennée suivante :

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \overline{u'_j T'} \right) + \frac{1}{\rho C_p} \left( \frac{\partial \bar{P}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} \right) \dots \dots \dots (3.14)$$

Les flux de chaleur turbulents sont représentés par les corrélations doubles des fluctuations de vitesse et de la température :  $\overline{u'_j T'}$ .

Le système d'équations (3.12) et (3.14) comporte plus d'inconnues que d'équations, donc c'est un système ouvert. Le fait de prendre une moyenne d'une équation instantanée conduit à une perte d'informations qu'il faut compenser par des hypothèses physiques, appelées hypothèses de fermeture, ce qui nous permet d'avoir un nombre d'équations égal au nombre d'inconnues.

Schématiquement, la fermeture est réalisée par des relations entre les tensions de Reynolds ( $\overline{u'_i u'_j}$ ) et les flux de chaleur turbulents ( $\overline{u'_j T'}$ ), avec les champs moyens de vitesse et de température.

### 3.3 Méthodologie pour la fermeture des équations :

Les équations moyennées décrivant les écoulements turbulents font apparaître de nouvelles inconnues qui sont les composantes des tenseurs de Reynolds ( $\overline{u'_i u'_j}$ ) et des flux de chaleurs turbulents ( $\overline{u'_i T'}$ ). Afin de décrire un mouvement turbulent, la résolution du problème nécessitera donc des hypothèses physiques supplémentaires qui permettent la fermeture des équations générales.

Les principales méthodes de fermeture utilisées sont :

- la fermeture en un point qui est la plus utilisée.
- La deuxième consiste à considérer les équations différentielles régissant les corrélations en deux points, où les variables sont définies dans le plan spectral : cette approche nécessite une grande capacité de calcul.
- La troisième approche est la prise en compte des grandes structures de la turbulence : cette technique consiste à prendre la moyenne des équations de Navier -Stokes sur un temps  $t_e$  plus petit que l'échelle du temps des grandes structures de turbulence de l'écoulement. Seuls les mouvements ayant une échelle de temps plus petite que  $T_e$  sont modélisés. Cette méthode nécessite aussi une grande capacité de calcul.

Dans notre étude on considère la méthode de la fermeture en un point, et on s'intéresse au modèle k- $\epsilon$  qu'est utilisé pour la résolution numérique du problème.

### 3.3.1 Méthodologie pour la fermeture en un point :

La fermeture en un point consiste à déterminer une corrélation du terme inconnu (tension de Reynolds ou flux de chaleur turbulent), par une relation algébrique ou par une ou plusieurs équations aux dérivées partielles.

Cette méthode introduit souvent des constantes numériques très nombreuses difficiles à déterminer expérimentalement, fautes de mesures adaptées. Pratiquement on utilise souvent des versions simplifiées de ces formulations.

La fermeture est réalisée par des relations entre champs connus et champs inconnus. Les termes des modèles représentant les corrélations inconnues doivent avoir la dimension physique et les propriétés tensorielles du terme inconnu qu'ils remplacent. Ils doivent aussi respecter les propriétés de la conservation et d'invariance. Par exemple la condition d'incompressibilité

$$\text{div}(u_i) = 0 \text{ etc.}$$

On supposera, en générale, dans les simplifications possibles, que les moments d'ordre élevé ont une influence moindre que les moments d'ordre inférieur.

On définit quelques paramètres caractérisant notre écoulement turbulent avant d'entamer la procédure à la formulation mathématique:

$u'_i$  : La vitesse fluctuante ;

$R_{ij}$  : Tension de Reynolds ;

$k$ : Énergie cinétique de turbulence  $k = \frac{1}{2} R_{ij}$  ;

$\varepsilon$  : Taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence  $\varepsilon = \left[ \nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right]$  ;

### 3.3.2 Equations du mouvement fluctuant:

#### 3.3.2.1 Equation de la vitesse fluctuante:

L'équation de la vitesse fluctuante est obtenue par différence des équations (3.7) et (3.13), elle est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{\partial u'_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} = -u'_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - u'_j \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (p') + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) \dots \dots \dots (3.15)$$

**Equation de corrélation double  $\overline{u'_i u'_j}$  :**

En général, la turbulence n'étant pas isotrope, il est utile d'étudier non seulement l'énergie cinétique mais aussi les produits  $\overline{u'_i u'_j}$  du tenseur de Reynolds.

L'équation des tenseurs de Reynolds est obtenue de la façon suivante :

$\overline{u'_i \times \text{Equation}(u'_j) + u'_j \times \text{Equation}(u'_i)}$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial t} + \bar{u}_m \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_m} &= -\overline{u'_i u'_m} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_m} - \overline{u'_j u'_m} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_m} + \frac{p'}{\rho} \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_m} \overline{u'_i u'_j u'_m} \\ &- \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_m} \left( \overline{p'(u'_i \delta_{jm} + u'_j \delta_{im})} \right) - 2\nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_m} \frac{\partial u'_j}{\partial x_m} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_m \partial x_m} \dots \dots \dots (3.16) \end{aligned}$$

Schématiquement on peut écrire :

$$\frac{\partial R_{ij}}{\partial t} + \bar{u}_m \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_m} = P_{ij} - \varepsilon_{ij} + \Pi_{ij} - \frac{\partial d_{ijm}}{\partial x_m} \dots \dots \dots (3.17)$$

Avec :

$$R_{ij} = \overline{u'_i u'_j}$$

$$P_{ij} = R_{im} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_m} - R_{jm} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_m}$$

$$\varepsilon_{ij} = 2\nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_m} \frac{\partial u'_j}{\partial x_m}$$

$$\Pi_{ij} = \frac{p'}{\rho} \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)$$

$$d_{ijm} = \left( \overline{u'_i u'_j u'_m} \right) + \frac{1}{\rho} \left( \overline{p'(u'_i \delta_{jm} + u'_j \delta_{im})} \right) - \nu \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_m}$$

Ces différents termes peuvent être interprétés de la façon suivante :

$\frac{\partial R_{ij}}{\partial t} + \bar{u}_m \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_m}$  : Action des gradients de vitesse moyenne sur le champ turbulent ;

$P_{ij}$  : Terme de production (transfert d'énergie entre le mouvement moyen et le mouvement turbulent) ;

$\varepsilon_{ij}$  : Terme de destruction (dissipation d'énergie du mouvement turbulent) ;

$\Pi_{ij}$  : Terme de corrélation pression – vitesse.

$d_{jm}$  : Terme de diffusion (redistribution spatiale de l'énergie).

### 3.3.2.2 Equation de fluctuation de la température :

L'équation de fluctuation de la température est obtenue par la différence des équations (3.11) et (3.2.3), elle est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{\partial T'}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial T'}{\partial x_j} = -u'_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - u'_j \frac{\partial T'}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha \frac{\partial T'}{\partial x_j} - \overline{u'_j T'} \right) \dots \dots \dots (3.18)$$

### 3.3.2.3 Equation des flux de chaleurs turbulents:

L'équation des flux de chaleurs turbulents est obtenue en effectuant l'opération :

$$\begin{aligned} & \overline{u'_i \times \text{Equation } (T')} + T' \times \overline{\text{Equation } (u'_i)} \\ & \frac{\partial \overline{u'_i T'}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \overline{u'_i T'}}{\partial x_j} \\ & = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \overline{u'_i T'} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \left( P' \frac{\partial \bar{T}'}{\partial x_i} \right) \\ & - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \overline{u'_i u'_j T'} + \frac{P' T'}{\rho} \delta_{ij} - v T' \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} - \alpha \overline{u'_i} \frac{\partial T'}{\partial x_j} \right) - (v + \alpha) \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} \frac{\partial T'}{\partial x_j} \dots \dots (3.19) \end{aligned}$$

### 3.3.3 Fermetures simplifiées :

Les modèles aux tensions de Reynolds représentent probablement le niveau optimal de fermeture pour les applications pratiques car ils semblent posséder potentiellement une universalité suffisante pour s'appliquer à une large gamme d'écoulements cisailés turbulents.

Cependant ils n'ont pas encore été suffisamment testés puisque leur développement n'est pas achevé et des améliorations peuvent être envisagées. Pour toutes ces raisons, les fermetures simplifiées sont si nombreuses que l'on ne pourra pas les citer toutes. On cite dans ce qui suit les plus utilisées.

#### i. Modèles à zéro équation de transport :

Dans les modèles à zéro équation, aucune équation de transport n'est résolue pour calculer les quantités turbulentes, les tensions de Reynolds étant directement rattachées aux valeurs moyennes.

On distingue essentiellement deux types de modèles à zéro équation :

- Les modèles à viscosité effective.
- Les modèles de longueur de mélange

**ii. Modèles à une équation de transport**

Ce modèle ne comporte qu'une seule équation de transport pour l'échelle de vitesse de la turbulence (k par exemple).

On distingue essentiellement deux types de modèles à une équation :

- Les modèles basés sur le concept de viscosité de turbulence.
- Le modèle de Brashaw.

**iii. Modèles à deux équations de transport Modèle k-ε :**

La classification usuelle se fait selon le nombre d'équations : Les modèles à deux équations faisant appel à un coefficient de viscosité isotrope de la turbulence et ceux utilisant une modélisation algébrique des tensions de Reynolds. Les modèles à deux équations de transport utilisent une équation de transport pour l'échelle de vitesse (k) et une équation de transport pour une échelle de turbulence.

**Modèle k-ε :**

C'est le modèle à deux équations de transport pour l'énergie cinétique de la turbulence k et le taux de dissipation de l'énergie cinétique de la turbulence ε . Ce modèle a été le plus largement utilisé pour l'étude des écoulements turbulents.

Le choix du taux de dissipation comme seconde fonction du modèle permet d'exprimer l'échelle de longueur l par :

$$l = C_D \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon} \dots \dots \dots (3.20)$$

Avec  $C_D$  est une constante pure.

L'équation de la viscosité turbulente est donnée par :

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \dots \dots \dots (3.21)$$

Equation du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente (  $\varepsilon = \nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}$  )

L'équation du taux de dissipation de l'énergie cinétique peut être obtenue de la façon suivante :

$$2\nu \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial x_j} (Equation de u'_i) \right)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = & -2\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_m} \left( \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_m}{\partial x_k}} + \overline{\frac{\partial u'_k}{\partial x_l} \frac{\partial u'_k}{\partial x_m}} \right) - 2\nu \left( \overline{u'_m \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}} \right) \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_m \partial x_k} \\ & - 2\nu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_m} \frac{\partial u'_l}{\partial x_k} \frac{\partial u'_m}{\partial x_k}} - \nu \frac{\partial}{\partial x_m} \left( \overline{u'_m \left( \frac{\partial u'_l}{\partial x_k} \right)^2} \right) - 2 \frac{\nu}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_m} \left( \overline{\frac{\partial u'_m}{\partial x_l} \frac{\partial P'}}{\partial x_l} \right) \\ & + \nu \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x_m \partial x_m} - 2\nu^2 \left( \overline{\frac{\partial^2 u'_l}{\partial x_k \partial x_m}} \right)^2 \dots \dots \dots (3.22) \end{aligned}$$

Une modélisation des différents termes de cette équation nous permet d'obtenir les équations modélisées pour les écoulements turbulents pleinement développés à grands nombres de Reynolds :

$$- u'_i u'_j = \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \dots \dots \dots (3.23)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} + \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \varepsilon \dots \dots \dots (3.24)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \nu_t \frac{\varepsilon}{k} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \dots \dots \dots (3.3.25)$$

Avec :  $C_{\mu} = 0,09$        $C_{\varepsilon 1} = 1,44$        $C_{\varepsilon 2} = 1,92$        $\sigma_k = 1$        $\sigma_\varepsilon = 1,3$ .

Les valeurs des cinq constantes figurant ci-dessus seront qualifiées par la suite de « valeurs standards ». Elles ont été fixées, pour certaines d'entre elles par Jones et Launder. En conclusion de la schématisation (k-ε), nous pourrions retenir les avantages et les inconvénients suivants:

**Les avantages :**

- Modèle largement répandu ;
- Il prend en compte la variabilité spatiale de l'agitation turbulente ;
- Il est relativement simple pour la mise en œuvre ;
- Il a une bonne prédiction des écoulements cisailés simples ;

**Les inconvénients :**

- On trouve dans ce modèle la dépendance locale et linéaire des tensions turbulentes et du champ moyen;
- Il est peu adapté aux écoulements complexes (recirculation, anisotropie forte, production négative, ...).

## IV. Simulations numériques

## **Introduction :**

On s'intéresse dans ce chapitre à la modélisation de l'écoulement dans une cheminée solaire à l'aide d'un logiciel de mécanique de fluide industrielle FLUENT. En premier lieu, on présentera des généralités sur les codes CFD, puis nous développerons les différentes étapes de modélisation de la cheminée solaire, à savoir les dimensions de la structure et son maillage sur GAMBIT, les hypothèses, les conditions aux limites considérées et on termine par exposer le problème majeur que nous avons rencontré sur FLUENT et sa résolution. Ce qui a permis l'utilisation de ce logiciel pour les simulations numériques de la centrale cheminée solaire.

### **4.1 Logiciels CFD :**

CFD est un acronyme du mot anglais Computational Fluid Dynamics, le mot Computational fait référence aux mathématiques et aux calculs, et Fluid Dynamics à la dynamique des fluides.

Les logiciels CFD sont donc utilisés pour résoudre des problèmes de dynamique des fluides en écoulement. Avec ces logiciels on peut construire un modèle numérique du système étudié. Associé aux conditions limites, son exécution peut nous fournir une prédiction sur la dynamique du fluide et les phénomènes physiques engendrés.

#### **4.1.1 Historique :**

Dans les 18<sup>ème</sup> et 19<sup>ème</sup> siècles, la modélisation mathématique des mouvements de fluides a fait un très grand progrès. Daniel Bernoulli (1700-1782) a établi les équations connues de Bernoulli. Leonhard Euler (1707-1783) a proposé les équations d'Euler qui décrivent la conservation de la quantité de mouvement pour un fluide non visqueux et la conservation de la masse. Ce progrès n'aurait pas pu être accompli sans la participation de Claude Louis Marie Henry Navier (1785-1836) et George Gabriel Stokes (1819-1903) qui ont introduit le terme relatif à la viscosité dans les équations d'Euler, pour obtenir les équations très connues de Navier-Stokes. C'est cette forme d'équations mathématiques différentielles développée il y'a plus de 200 ans qui est à la base de la mécanique des fluides numérique moderne. Depuis, plusieurs travaux ont été réalisés dans les domaines de la turbulence, les couches limites, les mélanges et dans plusieurs autres domaines.

Ces équations sont fortement couplées et très difficiles à résoudre. Ce n'est donc que vers les années 1960s et 1970s avec l'avènement des ordinateurs que ces équations ont pu être résolues pour des problèmes d'écoulements réels et avec des temps de calculs raisonnables. Mais ce n'est que vers le début des années 1980s que la commercialisation des logiciels CFD a commencé et son utilisation devient acceptable par la majorité des entreprises à l'échelle mondiale. De plus, plusieurs sociétés ont commencé le développement de cet outil dans leurs propres bureaux d'études, chacun dans son domaine et pour ses propres applications.

#### **4.1.2 Avantage des codes CFD :**

Les logiciels CFD permettent de modéliser les écoulements des fluides, les transferts thermiques et massiques, le mouvement des corps, les réactions chimiques, les écoulements multi-espèces, les interactions fluide-solide et même l'acoustique.

De nos jours, des milliers d'entreprises à travers le monde bénéficient de l'utilisation de logiciels CFD dans leurs activités d'ingénierie de conception comme principal outil.

Il ya trois raisons impérieuses pour lesquelles l'utilisation des codes CFD est indispensable de nos jours :

- Ils permettent une très bonne visualisation de l'écoulement surtout dans le cas où on a un système difficile à construire ou bien à tester expérimentalement. Les logiciels CFD nous permettent de rentrer à l'intérieur du prototype créé et de voir en détails la structure de l'écoulement et les différents phénomènes physiques engendrés.
- Ces logiciels permettent de tester plusieurs designs sous différentes conditions de fonctionnements afin d'arriver à des résultats optimums de fonctionnement dans de très courts délais. Tout cela peut être fait avant même de construire le prototype réel.
- Grâce aux résultats de la prédiction, on obtient de meilleurs designs, dans des délais très courts et conformes aux réglementations industrielles et environnementales.

Grâce aux codes CFD les cycles de design coûtent beaucoup moins en temps et en argent. Ce qui permet au produit d'être mis sur le marché dans les plus brefs délais et avec le minimum de coût.

## 4.2 Fluent :

Fluent est le leader mondial en Simulation numérique des écoulements fluides (CFD). Il est utilisé dans plusieurs domaines : Aéronautique, défense, spatial, automobile, énergie, génie des procédés, environnement, aéraulique, thermique du bâtiment et biomécanique.

Comme tous logiciels CFD, Fluent est composé de 3 modules correspondant aux différentes étapes de déroulement d'une étude numérique :

- **Le préprocesseur (Gambit)** (figure 4.1): il permet de représenter la géométrie du système, et de discrétiser le domaine construit en utilisant plusieurs algorithmes de maillage en deux ou trois dimensions. Il est aussi utilisé pour fixer les conditions aux limites et le type de matériaux (Fluide, solide) dans le domaine. Il est conseillé d'utiliser un maillage structuré pour la discrétisation du domaine. Cela réduit énormément le temps de calcul et assure aussi une bonne convergence.

Une fois la géométrie définie sur Gambit, On peut l'exporter vers Fluent en format .msh. La géométrie et le maillage peuvent être visualisés, redimensionnés et vérifiées grâce au menu GRID qui apparait sur l'interface de FLUENT.

- **Le solveur (Fluent)** : il permet à partir des menus DEFINE et SOLVE qui apparaissent dans l'interface de FLUENT (figure 4.2) :

- Définir le modèle en introduisant principalement :
  - le modèle de turbulence utilisé s'il s'agit d'un écoulement visqueux ;
  - l'équation d'énergie si on prend en considération l'énergie thermique ;
  - le régime d'écoulement et le système de coordonnées considérée (2D, axisymétrique, 3D).
  - il permet aussi d'activer le rayonnement, les réactions chimiques et le modèle acoustique.
- Définir les conditions opératoires de pression, de température et de gravité ;
- Définir numériquement les conditions aux limites (pression, température, flux de chaleur, vitesse...);

- Introduire des USER DEFINE FUNCTION (UDF), qui permettent entre autres d'introduire des conditions aux limites complexes ou de modifier les variables de l'écoulement ;
- Choisir le processus itératif en proposant notamment plusieurs schémas numériques pour la discrétisation spatiale et temporelle ;

Il offre également une interface qui permet de contrôler à tout moment l'état d'avancement des calculs.

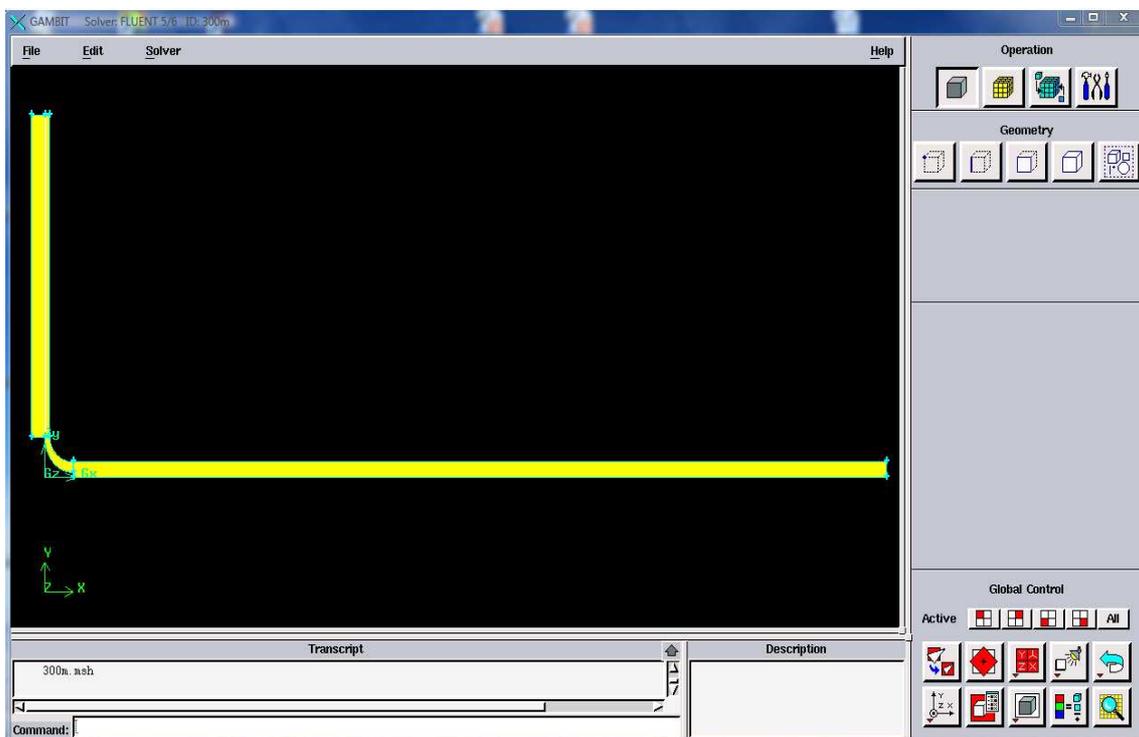


Figure 4.1: Interface du préprocesseur Gambit

- **Le post-processeur** : il permet grâce au menu DISPLAY de visualiser la géométrie et le maillage du domaine, et surtout d'afficher les résultats obtenus. Il est ainsi possible de visualiser les champs des vecteurs vitesses, de pression, de turbulence ainsi que toutes les autres grandeurs calculées dans un point du domaine, sur une droite, sur une section ou sur la totalité du domaine. le menu PLOT offre la possibilité de tracer des courbes et d'exporter les résultats sous d'autres formats pour un traitement plus approprié. Le menu REPORT permet de calculer et de récupérer les valeurs numériques des variables d'écoulement tels que la

vitesse, la pression, les flux de chaleur, les débits massiques et volumiques... sur les surfaces déjà définies.

Il est à noter que le post-processeur qu'on a utilisé est celui fourni avec Fluent, mais il existe d'autres post-processeur.



Figure 4.2 : Interface du préprocesseur FLUENT

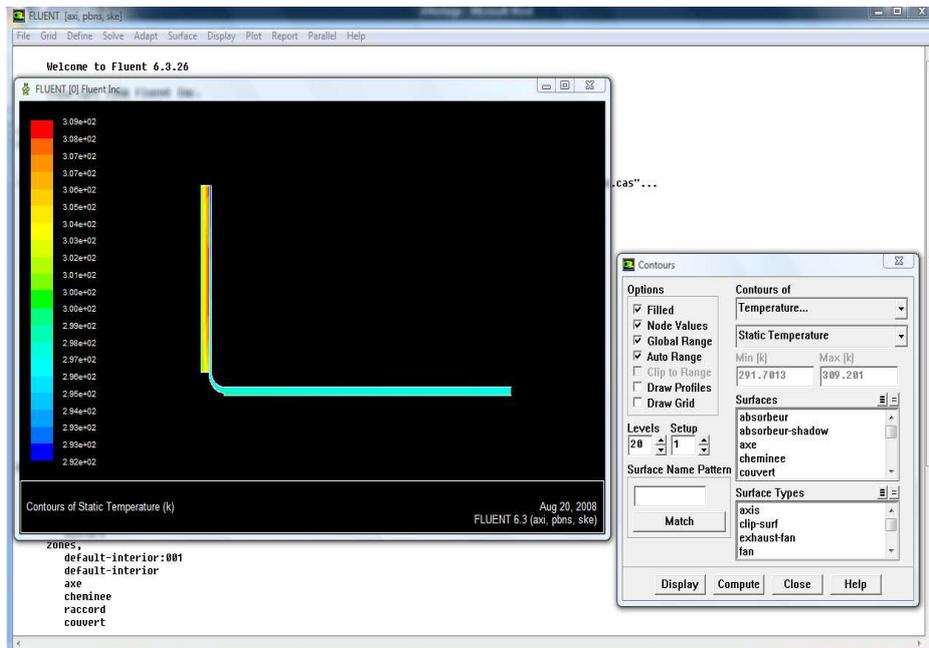


Figure 4.3: Le post processeur

### 4.3 Modélisation de la cheminée solaire:

#### 4.3.1 Dimensions de la structure :

Les dimensions présentées sur la figure 4.4 sont celles utilisées pour les simulations numériques sur FLUENT pour un cas typique aux dimensions de Manzanares. Afin d'étudier l'influence des différents paramètres géométriques sur la puissance électrique générée par la centrale cheminée solaire, on considérera, dans ce qui suit différentes hauteurs de la cheminée, et différents rayons du collecteur.

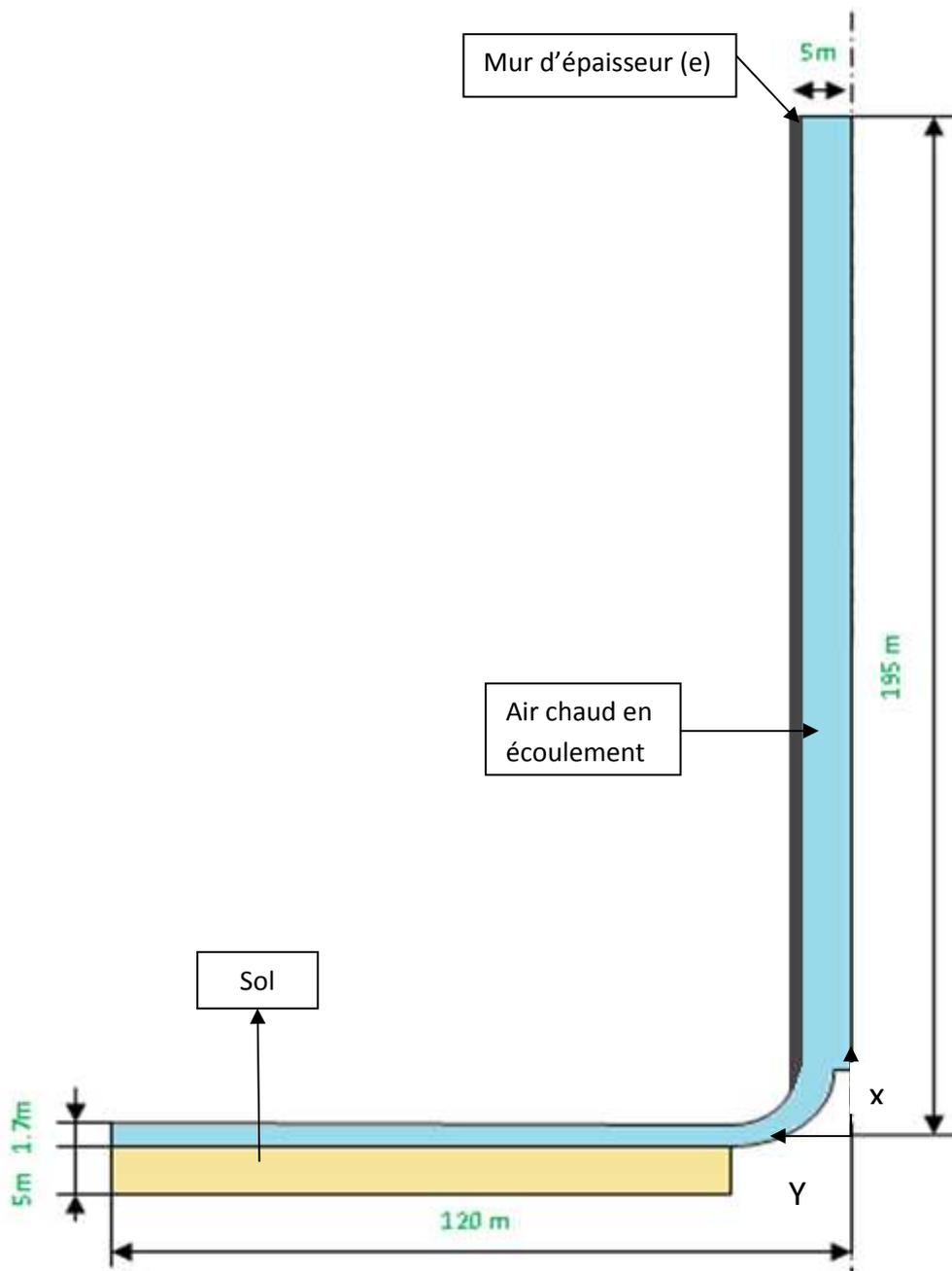


Figure 4.4 : Dimension de la structure de base utilisée pour les simulations sur FLUENT

### 4.3.2 Nomenclature :

La figure 4.5 présente la nomenclature des différentes parties de la cheminée solaire. C'est cette nomenclature qui va être utilisée dans tout le travail.

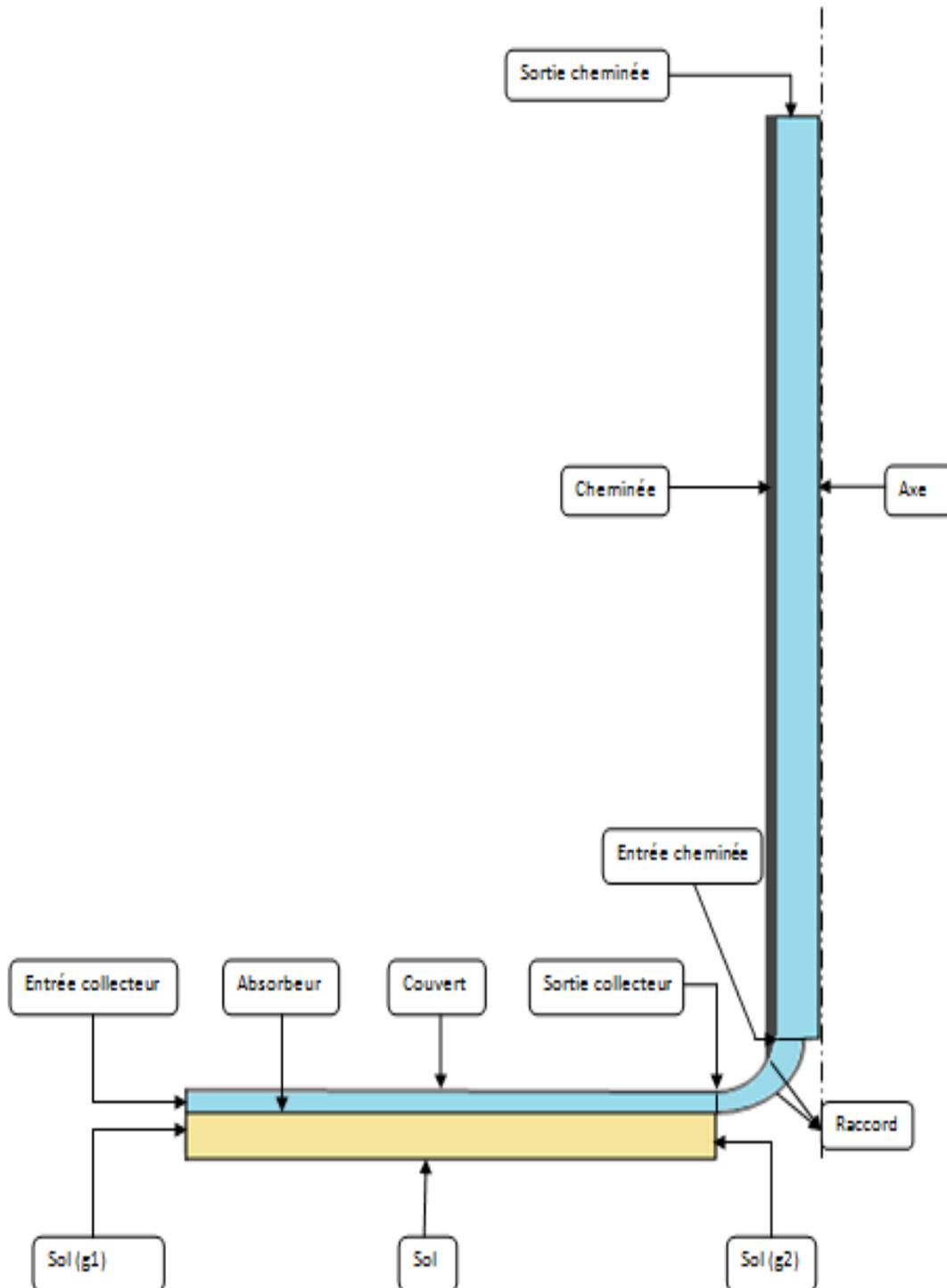


Figure 4.5 : Nomenclature des différentes parties de la centrale cheminée solaire

### 4.3.3 Maillage (GAMBIT) :

La figure 4.6 montre la structure de la cheminée dans un cas type aux dimensions de Manzanares, sur le logiciel de génération de maillage GAMBIT. Afin de mieux visualiser le maillage, on a prévu des agrandissements sur les parties les plus importantes de la structure.

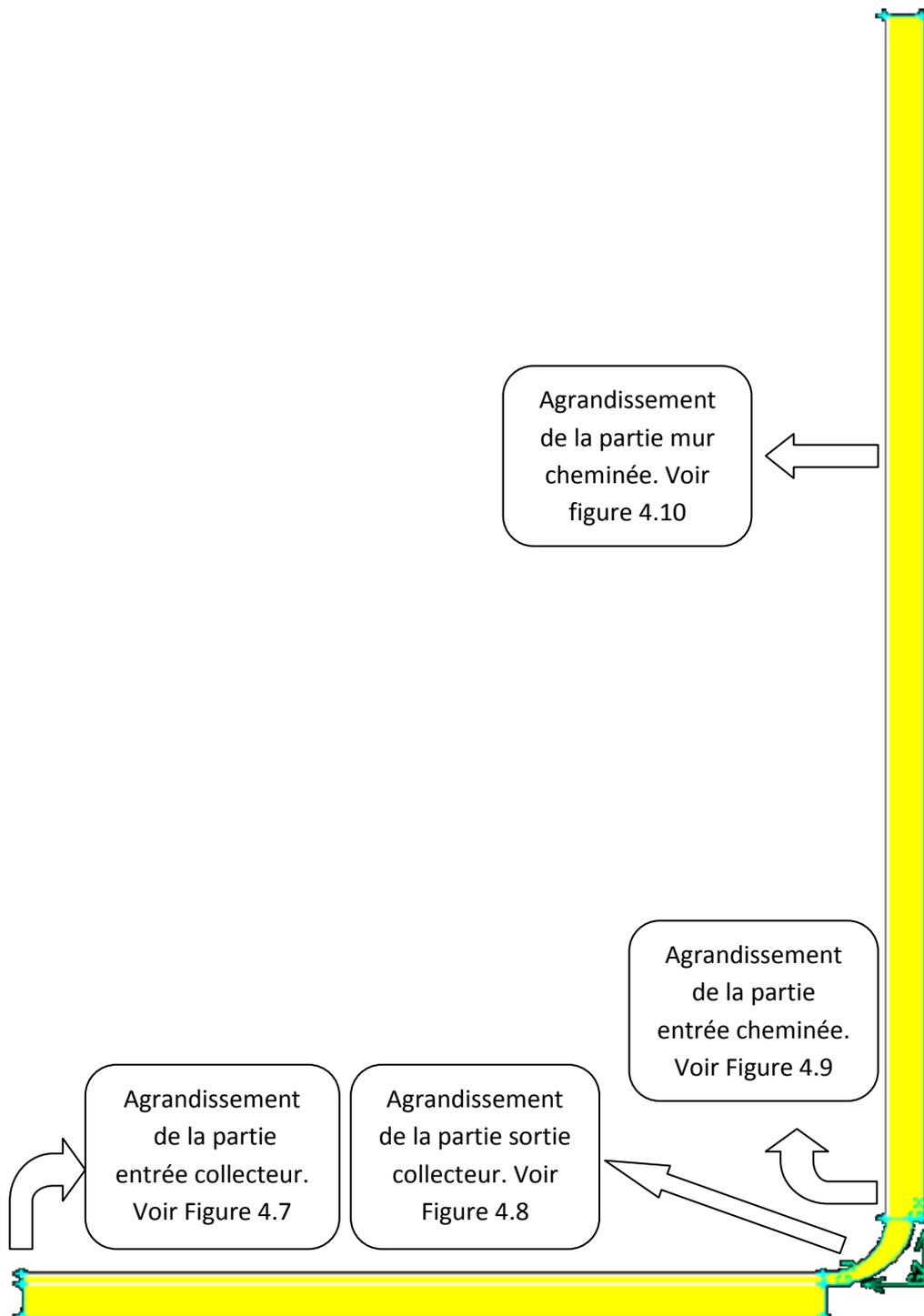


Figure 4.6 : Représentation du maillage sur GAMBIT

Les figures 4.7 et 4.8 illustrent le maillage d'une section prise à l'entrée et à la sortie du collecteur respectivement. Les échanges thermiques au niveau du couvert du collecteur avec le milieu ambiant et au niveau de l'absorbeur, imposent l'utilisation d'un maillage très serré au niveau des deux cotés. Donc et afin de ne pas perdre l'information sur le gradient de température dans ces deux régions, on a utilisé l'option BOUNDARY LAYER avec un pas initial de 0.01, un coefficient d'agrandissement de 1.2 et 10 couches de maillage. Pour toute la zone du collecteur restante, on a utilisé un pas de maillage de 0.1. Le nombre de mailles pour le collecteur le plus petit a atteint 27 000 mailles.

Pour le sol on a utilisé un espacement de 0.1 sur toute la longueur du collecteur, et 0.4 sur la profondeur, et on a obtenu un nombre de maille de 40 584 mailles, pour les plus petites dimensions.

Il est à noter que le nombre de mailles, pour la partie du collecteur et celle du sol a atteint 67 584 mailles, pour la plus petite structure, et on a atteint facilement le nombre de 120 219 mailles dans le cas de la variation du rayon du collecteur.

Les figures 4.8 et 4.9 montrent la structure du maillage à l'entrée du raccord (sortie collecteur) et à la sortie du raccord (entrée cheminée), respectivement. Il est souvent conseillé d'utiliser un maillage structuré comme celui qu'on a utilisé pour la partie du collecteur et du sol (QUAD MAP), car cela réduit énormément le temps de calcul. On a essayé au début de mailler le raccord en QUAD MAP mais vu sa forme complexe, on a obtenu un maillage trop espacé, ce qui influence négativement sur la précision des calculs. Donc, on a changé le maillage en TRI PAVE. Cela augmente le temps de calcul mais vu les dimensions de cette partie, l'augmentation du nombre de mailles est raisonnable. Le nombre de mailles minimal pour cette partie est de 18839 mailles.

La figure 4.10 représente la structure du maillage pour une section de la cheminée. L'air en écoulement à l'intérieur de la cheminée échange la chaleur avec le milieu ambiant à travers le mur de la cheminée, et il est aussi en frottement avec cette même partie. De ce fait et dans le but de ne pas perdre l'information sur le gradient de vitesse et le gradient de température dans cette région, on a choisi comme pour la partie collecteur un maillage très serré au niveau du mur de la cheminée. Pour cela on a utilisé le maillage BOUNDARY LAYER avec un pas initial de 0.01, un coefficient d'agrandissement de 1.4 et 7 couches de maillage. On a considéré un pas de maillage de 0.2 sur le rayon de la cheminée ; et vu les hauteurs trop importantes que peut atteindre la cheminée, on n'a pas pu serrer moins que 0.5 sur toute la

hauteur de la cheminée. Et même avec ça on obtient un maillage de 49 523 mailles pour la plus petite cheminée et on aborde facilement les 112 430 mailles, pour les hauteurs les plus importantes.

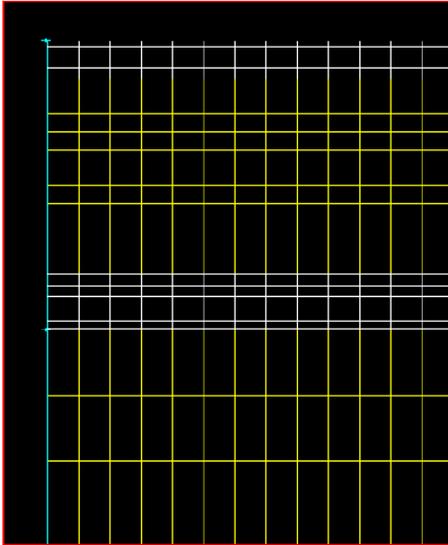


Figure 4.7 : Maillage de la partie entrée collecteur

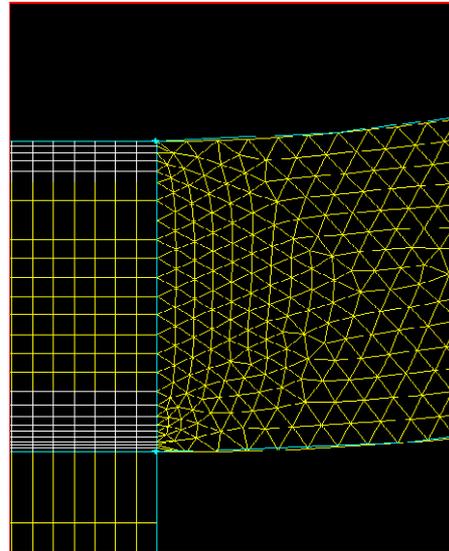


Figure 4.8 : Maillage de la partie sortie collecteur

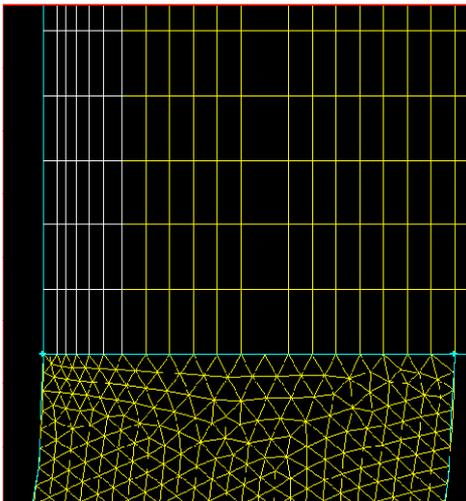


Figure 4.9 : Maillage de la partie entrée cheminée

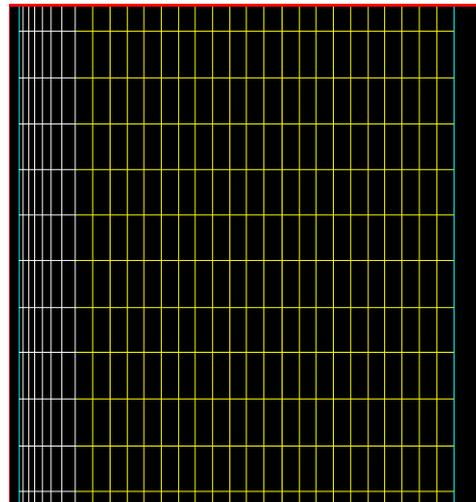


Figure 4.10 : Maillage de la partie mur cheminée

On atteint pour la plupart des structures un nombre de mailles supérieur à 170 000 mailles. A l'exécution, on a utilisé un ordinateur P4, ce qui fait un temps de calcul moyen de 5 heures par structure.

#### 4.3.4 Hypothèses :

Le modèle mathématique adopté est établi moyennant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'écoulement est axisymétrique ;
- Ecoulement est stationnaire ;
- L'écoulement est turbulent ;
- Le fluide considéré est supposé visqueux et newtonien et obéit à l'approximation de boussinesq. Cette approximation repose sur deux hypothèses :
  - La masse volumique est considérée comme constante sauf dans le terme  $(\rho \vec{g})$  ;
  - Les écarts de température sont suffisamment faibles pour que l'on puisse se contenter, dans l'évaluation de  $(\rho \vec{g})$ , du premier terme du développement de  $\rho$  en terme de température, à savoir :

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \dots \dots \dots (4.3.1)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_0 : \text{La masse volumique à la température de référence } T_0 ; \\ \beta : \text{Le coefficient de dilatation volumique à pression constante,} \end{array} \right.$$

Donnée par :  $\beta = -\frac{1}{\rho} \left[ \frac{\delta \rho}{\delta T} \right]_p$

- Les propriétés du fluide sont supposées constantes ;
- Pas de source de chaleur ;

Pour introduire ce modèle sur FLUENT, on a sélectionné les options suivantes :

1. Axisymétrique ;

Remarque : l'axe de symétrie de la structure doit être suivant l'axe des X afin que FLUENT le prenne comme axe de symétrie de l'écoulement.

2. Ecoulement stationnaire ;

3. Vu que notre modèle inclut des calculs de températures et de transferts thermiques, on a donc activé l'option ENERGY.
4. On a activé la turbulence et on a choisi le modèle  $k - \epsilon$  standard [7] ;
5. Pour le modèle considéré, on a utilisé trois matériaux :
  - Pour le fluide en écoulement, on a choisi les propriétés de l'air fourni par fluent ;
  - Vu que les cheminées solaires sont destinées pour les régions sahariennes, on a considéré les propriétés du sable pour le sol ;
  - On a choisi le béton comme matériaux de construction de la cheminée [5] ;
6. Pour les conditions opératoires de fonctionnement de la cheminée solaire, on a considéré une valeur de  $-9.81 \text{ m/s}^2$  suivant l'axe des X pour l'accélération gravitationnelle, une température ambiante de  $293^\circ\text{K}$  et une pression atmosphérique de  $1.013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ .
7. On a aussi considéré le modèle de Boussinesq.

#### 4.3.5 Conditions aux limites :

La figure 4.11 illustre les conditions aux limites utilisées pour les simulations sur FLUENT :

- Entrée collecteur -> PRESSURE INLET :

L'air à l'entrée du collecteur est supposé être à la température ambiante de  $293\text{K}$ , avec une différence de pression nulle à l'entrée.

- Sol -> WALL :

La température à 5m de profondeur est constante, et elle prend une valeur de  $300\text{K}$ .

- Sol (g1), Sol (g2) -> Adiabatique :

On suppose qu'il n'y a pas de flux de chaleur à travers les deux cotés du sol ;

- Absorbeur-> Coupled :

Cette surface absorbe le rayonnement solaire, et elle le fait transmettre d'un coté par convection forcée avec l'air en écoulement, et par conduction de l'autre coté avec le sol.

On a imposé un flux surfacique qui correspond à 40% du rayonnement solaire (rendement optique du capteur).

- Raccord-> WALL :

Cette partie fait la liaison entre la sortie du collecteur et l'entrée de la cheminée. Elle a le rôle de changer la direction d'écoulement de l'air, d'un écoulement horizontal dans le collecteur vers un écoulement vertical dans la cheminée.

Cette partie occupe une position centrale de la cheminée où il n'y a pas de contact direct avec l'air ambiant, donc la condition adiabatique est tout à fait raisonnable.

- Couvert-> WALL :

Le rôle du couvert est de piéger le rayonnement solaire de grande longueur d'onde. Le couvert est en contact avec l'air chaud en écoulement à l'intérieur du collecteur. Il est aussi en contact avec le milieu ambiant. Le couvert est une paroi d'épaisseur très mince, souvent en verre ou en plastique. Donc on le modélise comme une paroi d'épaisseur négligeable en convection avec l'air ambiant qui est à une température de 293°K.

- Axe-> AXIS :

Puisqu'on est en présence d'un écoulement axisymétrique donc l'axe de la structure doit être spécifié comme AXIS sur fluent.

- Cheminée -> WALL :

La cheminée est un cylindre en convection forcée avec l'air ambiant. Donc et afin de se rapprocher le plus possible de la réalité, on considère qu'il y'a un échange thermique à travers le mur de la cheminée en présence d'un vent de 5m/s.

- Sortie cheminée-> PRESSURE OUTLET

L'air en écoulement vertical dans la cheminée s'échappe par la sortie de la cheminée à une pression égale à la pression atmosphérique d'où la condition  $\Delta P = 0$ . FLUENT n'exige pas une température de sortie pour la condition PRESSURE OUTLET.

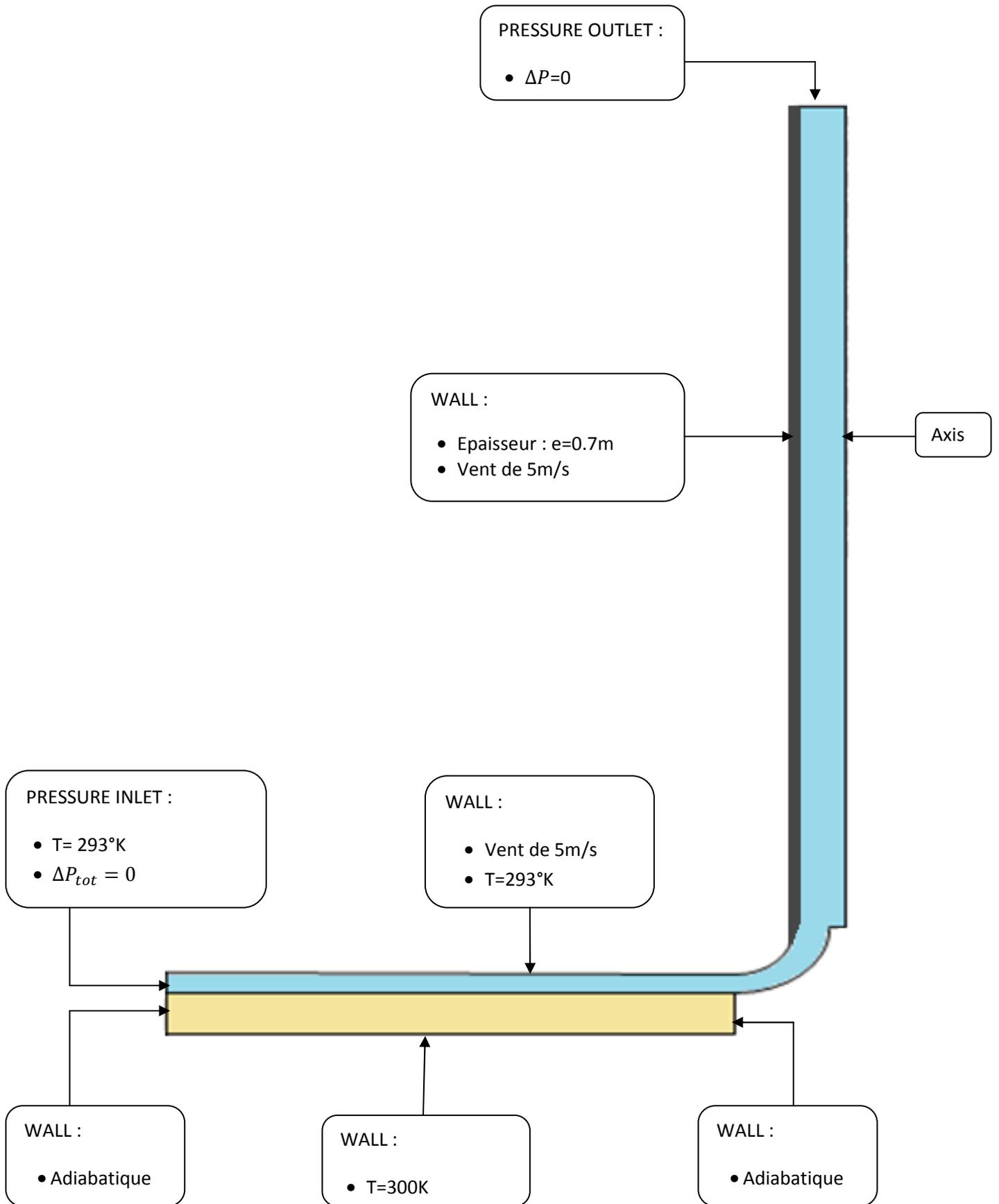


Figure 4.11 : Conditions aux limites

#### 4.4 Adaptation du code de calcul :

##### 4.4.1 Identification du problème :

Au cours de nos simulations numériques sur le code de calcul FLUENT, on s'est rendu compte qu'au niveau de l'écoulement dans la cheminée et dans le cas d'un mur adiabatique (pas d'échange de chaleur avec le milieu extérieur), la température ne diminuait pas avec l'augmentation de la hauteur (figure 4.12). Autrement dit, le code de calcul considère que l'énergie interne du fluide reste constante.

Or une analyse énergétique simple de la cheminée (Chapitre 2.3), montre que la température de l'air diminue au fur et à mesure que l'écoulement gagne en hauteur. Cette chute de température est estimée à  $0.0098 \text{ K m}^{-1}$  [9], dans le cas où les pertes thermiques au niveau de la cheminée sont négligeables. Cette valeur est d'autant plus importante que les pertes à travers le mur de la cheminée sont importantes.

La figure 4.12 montre la valeur de la température (moyenne sur chaque section), pour différentes positions verticales de la cheminée. (On a considéré dans cet exemple une cheminée de 800 m de hauteur). Cette courbe montre que la température reste constante lorsque le fluide gagne en altitude. Ce qui contredit le principe de conservation de l'énergie, en sachant qu'il n'y a pas de variation significative de l'énergie cinétique.

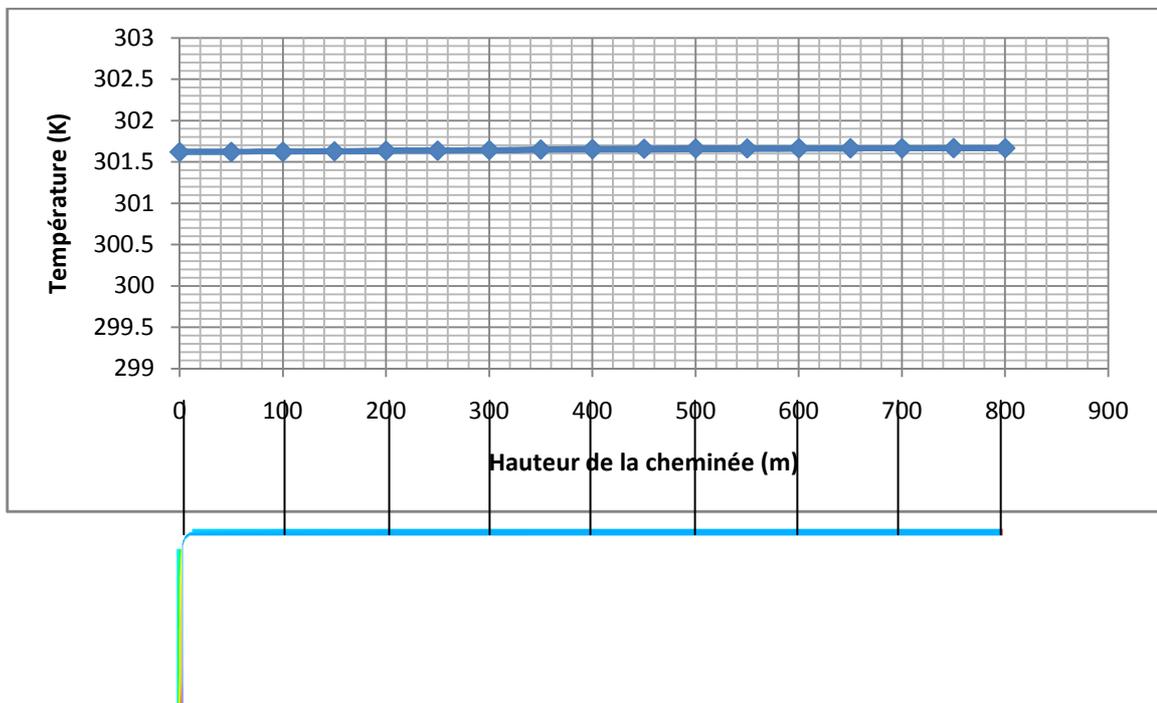


Figure 4.12 : Variation de la température en fonction de la hauteur pour une cheminée de 800m, avant l'adaptation du code de calcul.

La figure 4.13 donne les valeurs de chutes de température en fonction de la hauteur gagnée par le fluide. Ces résultats sont établis sur la base du modèle théorique développé dans la section 2.3.3 en supposant que les murs de la cheminée sont adiabatiques.

On voit que la diminution de température est petite dans le cas d'une cheminée de 200m de hauteur tel qu'on l'estime à 1.96K ce qui peut être négligé; mais dans le cas d'une cheminée de 1200m de hauteur, la chute de température est importante 11.76K. Cette valeur ne peut être considérée comme négligeable, et l'utilisation du code de calcul tel qu'il est, va donner des résultats imprécis, voire même erronés pour les hauteurs de cheminées les plus importantes. D'où la nécessité d'adapter le code de calcul FLUENT avant lancement de toute simulation.

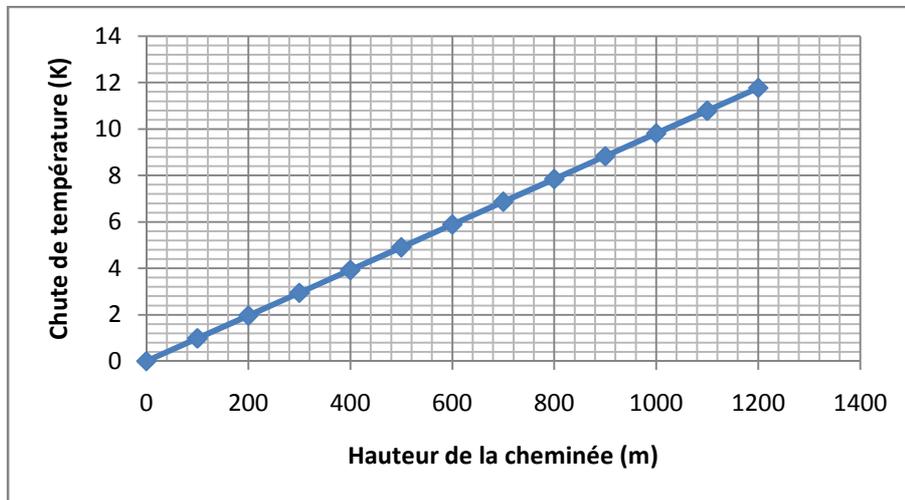


Figure 4.13 : Chute de température en fonction de la hauteur d'une cheminée adiabatique

#### 4.4.2 Source d'erreur et résolution du problème :

Une première analyse montre que le code ne tient pas compte de la variation de l'énergie potentielle, ce qui nous a poussé à analyser l'équation d'énergie résolue par fluent. Cette équation est donnée par la documentation fournie avec code sous la forme suivante [Fluent 6.3 User's Guide dans le Chapitre 13.2.1] :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \dots \dots \dots (4.1)$$

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \dots \dots \dots (4.2)$$

$$\text{Avec : } \left\{ \begin{array}{l} E : \text{L'énergie du système ;} \\ S_h : \text{Source thermique volumétrique.} \end{array} \right.$$

On remarque dans cette équation que le terme qui représente l'énergie potentielle n'est pas présent. Il est donc clair d'après cette expression que FLUENT ne tient pas compte de la variation de l'énergie potentiel du fluide.

Notre but est donc d'introduire dans l'équation d'énergie le terme représentatif de l'énergie potentielle. Ce qui n'est pas une tâche aisée, car FLUENT à la réputation d'être une « boîte noire », et ne donne aucun accès aux équations de conservations résolues.

De ce fait, on a eu recours aux fonctions UDF, et plus précisément à la MACRO DEFINE-ADJUST, [FLUENT 6.3 UDF Manual dans le chapitre 2.2.1], qui permet d'agir directement sur les variables de l'écoulement (vitesse, pression, etc.).

On a utilisé cette propriété pour agir sur l'une des variables de l'énergie du système  $E$  présentées dans l'équation (4.2), où on a introduit le terme représentatif de l'énergie potentielle  $gz$  variable en fonction de la position de chaque cellule par rapport au repère défini. La vitesse, la pression et toutes les autres variables étant déjà calculées à ce niveau de résolution d'équations, donc la seule variable dans cette étape de résolution et dans chaque cellule est la température.

Ainsi, on a introduit le terme relatif à l'énergie potentielle du fluide dans l'équation de conservation d'énergie (4.1).

#### 4.4.3 Résultats des simulations:

Après avoir injecté la fonction UDF dans le code de calcul FLUENT, les résultats pour le même modèle présenté ci-dessus, montrent que la température chute avec la hauteur de la cheminée, comme le montre la figure 4.14.

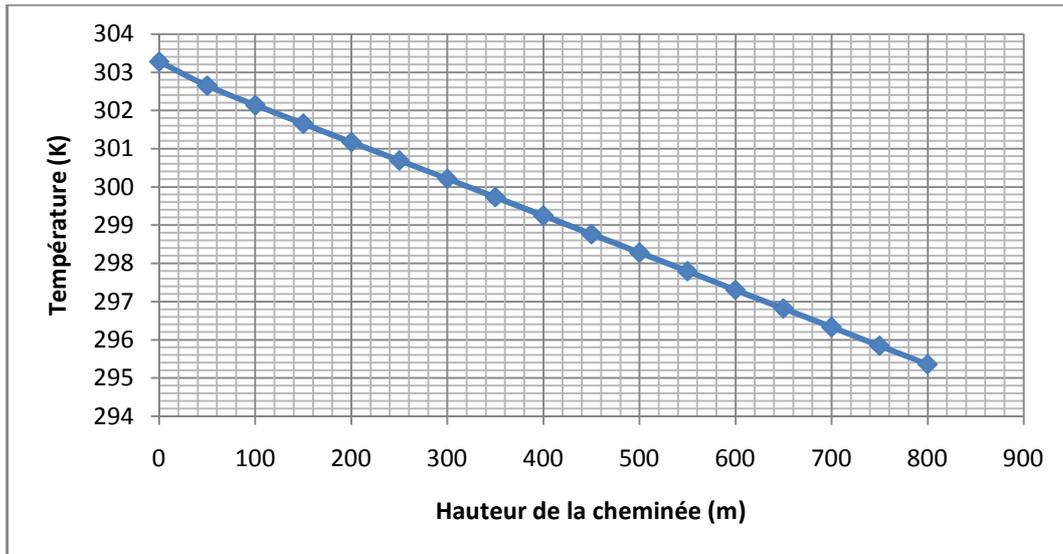


Figure 4.14 : Variation de la température en fonction de la hauteur pour une cheminée de 800m, après l'introduction de la correction

L'étude théorique ci-dessus donne une valeur de chute de température de 7.84 K. Les résultats des simulations effectuées sur fluent donnent une chute de 7.91K, ce qui est considéré comme une très bonne valeur.

Après avoir adapté le code de calcul à notre étude, où l'effet de l'énergie potentielle n'est plus négligé, on peut à présent commencer les simulations numériques pour les différents cas de figures.

#### 4.4.4 Energie potentielle <-> FLUENT:

La question qu'on doit se poser maintenant est : Pourquoi on n'a pas pris en considération l'énergie potentielle lors de la conception de FLUENT ?

Avant de pouvoir répondre à cette question, il faut d'abord connaître l'univers des codes de calcul CFD. Dans le but d'approcher le plus possible de la réalité et pour faciliter l'utilisation des codes CFD, la plupart des entreprises ont des codes de calcul propres à eux, chacun dans son domaine et pour ses propres applications. On prend comme exemple Ferrari qui a signé un accord avec ANSYS dans le but de développer un code de calcul spécialisé dans le domaine de la FORMULE 1.

Fluent n'a pas été conçu pour simuler des ouvrages de très grandes dimensions, donc il est normal que lors de la conception du logiciel, on n'ait pas pris en compte l'effet de l'énergie potentielle, dans le but d'alléger les modèles et réduire de ce fait les temps de calcul.

De plus dans la plupart des problèmes de génie, le changement de l'énergie potentielle est peu significatif par rapport aux autres quantités d'énergie.

Notre intervention sur le code de calcul a permis de résoudre le problème pour nos simulations, mais on ne peut en aucun cas considérer cette adaptation comme prise en considération finale de l'énergie potentielle dans le code de calcul FLUENT.

**Conclusion :**

Nous avons établi dans ce chapitre la modélisation de l'écoulement dans une cheminée solaire sur le code de calcul FLUENT. On a considéré les dimensions du prototype de Manzanares comme modèle de base. On a choisi pour ce modèle certaines conditions aux limites comme pour la température ambiante, la vitesse du vent et même la nature du sol pour les propriétés des matériaux utilisés. Ces paramètres sont principalement liés à la zone d'implémentation de la cheminée solaire. On a aussi adapté le code de calcul en introduisant le terme relatif à l'énergie potentielle dans l'équation d'énergie.

## V. Résultats et interprétations

## **Introduction :**

Nous présentons dans ce chapitre les résultats des simulations numériques établies sur le code de calcul FLUENT. Dans la première partie, nous présentons un cas type aux dimensions du prototype de Manzanares avec une valeur fixe du rayonnement solaire. Cette partie est surtout destinée à la visualisation des champs de température, de vitesse et de pression dans le collecteur et la cheminée. On étudie dans la deuxième partie l'impact du rayonnement solaire, l'épaisseur du mur de la cheminée, la hauteur de la cheminée et le rayon du collecteur sur le comportement de l'écoulement. Cette étude permet de bien comprendre l'interaction entre les différentes variables de l'écoulement et elle permet surtout d'établir les valeurs de la pression totale qui sont nécessaires pour le couplage du système avec une turbine à air. Enfin et dans la dernière partie, on couple le système avec une turbine, et on compare les résultats des simulations numériques aux résultats expérimentaux prélevés sur le prototype de Manzanares. Puis on étudie l'influence de la hauteur de la cheminée et du rayonnement solaire sur la puissance électrique générée.

### **5.1 Présentation d'un cas type aux dimensions du prototype de Manzanares :**

On considère, dans cette partie un cas dont les dimensions sont celles présentées sur la figure 4.4, le rayonnement solaire est fixé à une valeur de  $600 \text{ W/m}^2$ , l'épaisseur des murs de la cheminée est fixée à 0.7m.

#### **5.1.1 Traitement relatif au collecteur :**

##### **5.1.1.1 Champs de température :**

- **Elévation de température à travers le collecteur :**

La figure 5.1 représente le champ de température dans le collecteur et dans le sol. On remarque que l'air entre à une température  $T_o = 293 \text{ K}$ , puis sa température augmente au fur et à mesure qu'il avance vers le centre du collecteur, du fait du transfert thermique par convection forcée avec l'absorbeur. Il atteint une température moyenne à la sortie du collecteur de  $T_{f,s} = 305,6 \text{ K}$ . On note ici que la température moyenne à la sortie du collecteur est mesurée en moyennant les températures de toutes les cellules à la sortie du collecteur.

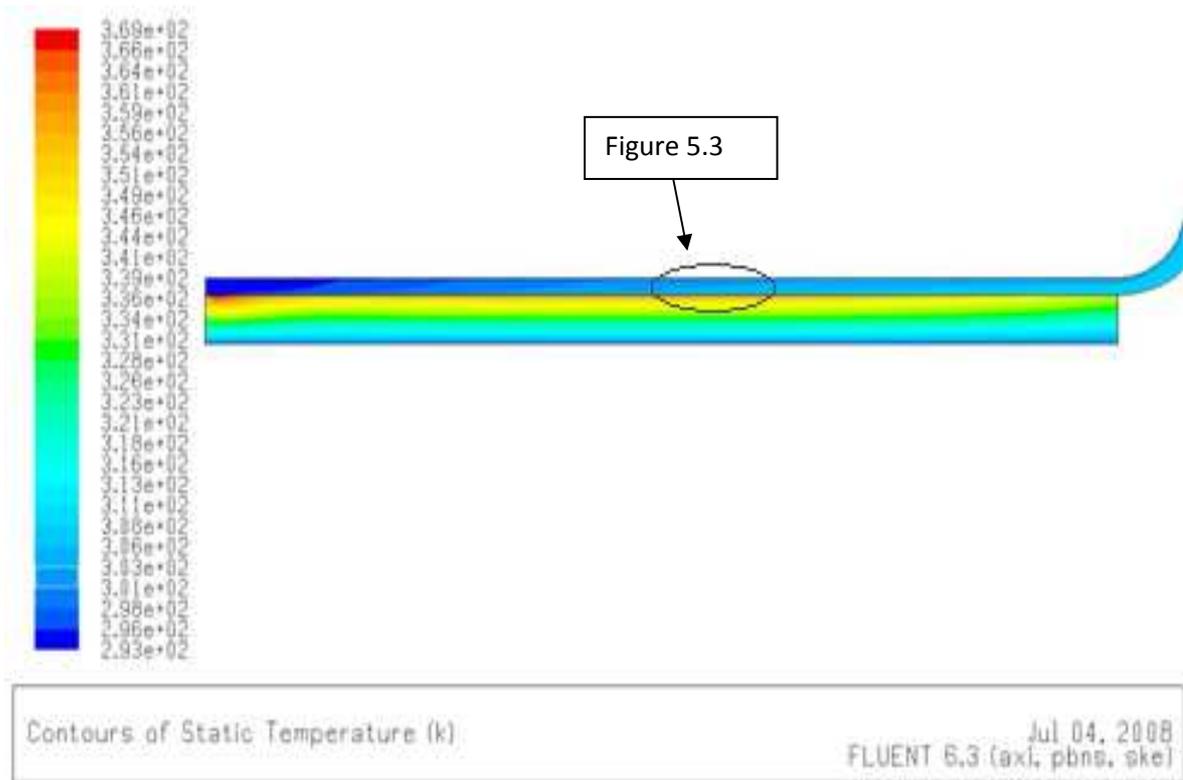


Figure 5.1 : Champs de température dans le collecteur

La figure 5.2 montre l'évolution de la température de l'air à mi-hauteur du collecteur. On voit que l'air entre à une température ambiante de  $293K$ , et se chauffe au fur et à mesure qu'il avance dans le collecteur.

On trouve dans ce cas une valeur  $\Delta T_{coll} = 12.6K$ .

L'agrandissement de la partie haute du collecteur (figure 5.3) permet de visualiser la température de l'air à différents niveaux du collecteur.

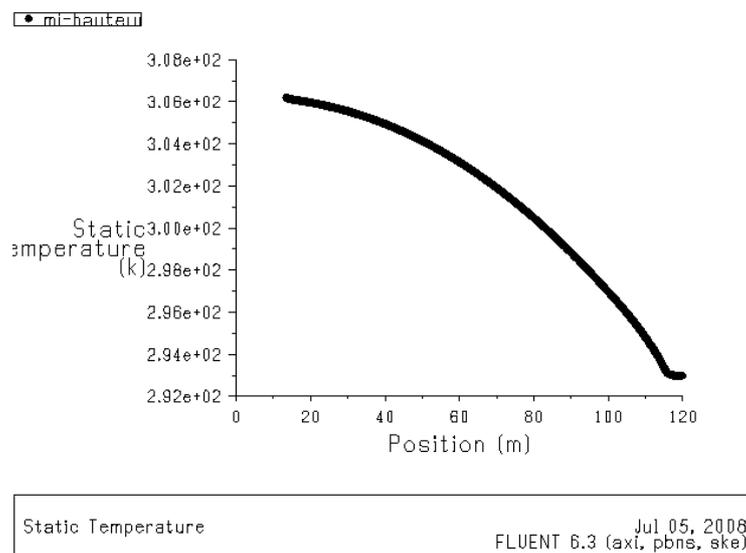


Figure 5.2 : Profil de température à mi-hauteur du collecteur

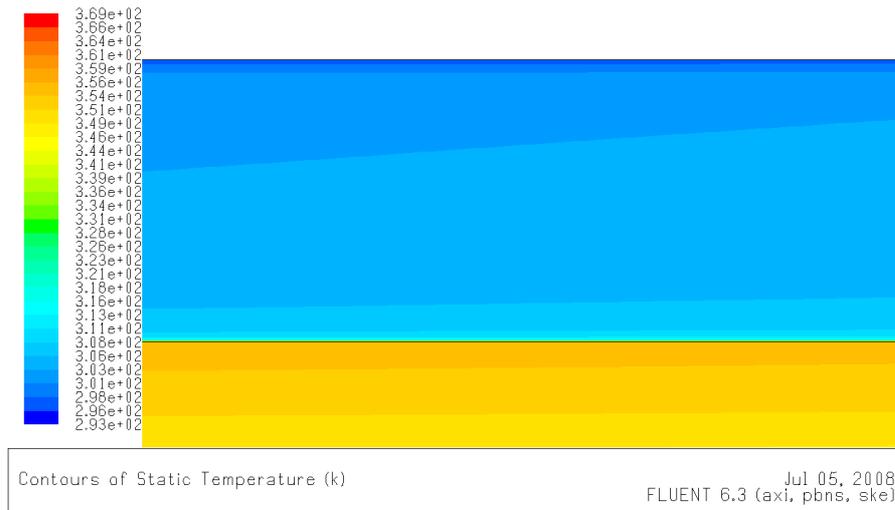


Figure 5.3: Température de l’air à différents niveau du collecteur

- **la puissance thermique utile récupérée par l’air :**

L’absorbeur qui est la source de chaleur pour tout le système, fournit à l’air en écoulement une puissance thermique  $Q_u$ . L’échange se fait par convection. Les figures 5.4 et 5.5 montrent le coefficient de transfert thermique par convection et le nombre de Nusselt. On remarque que ces deux nombres prennent des valeurs minimales à l’entrée du collecteur du fait de la vitesse très basse dans cette région, et ils augmentent de valeur au fur et à mesure que l’air avance vers le centre du collecteur du fait de l’accélération du fluide.

La figure 5.3 montre que l’air en contact avec l’absorbeur est à la température la plus élevée dans tout le domaine.

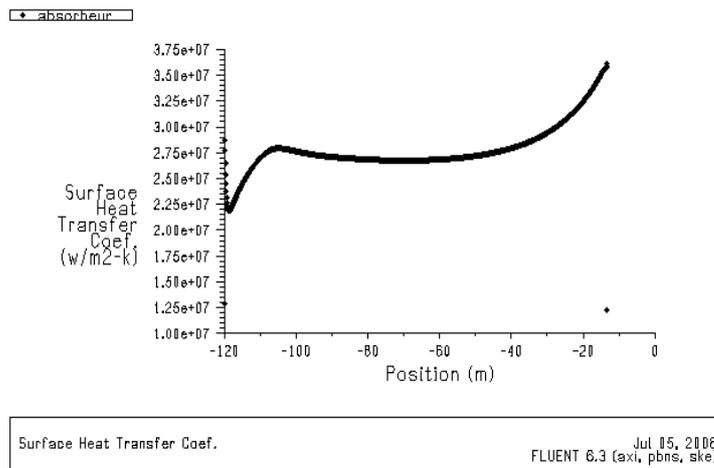


Figure 5.4 : coefficient de transfert thermique par convection au niveau de l’absorbeur

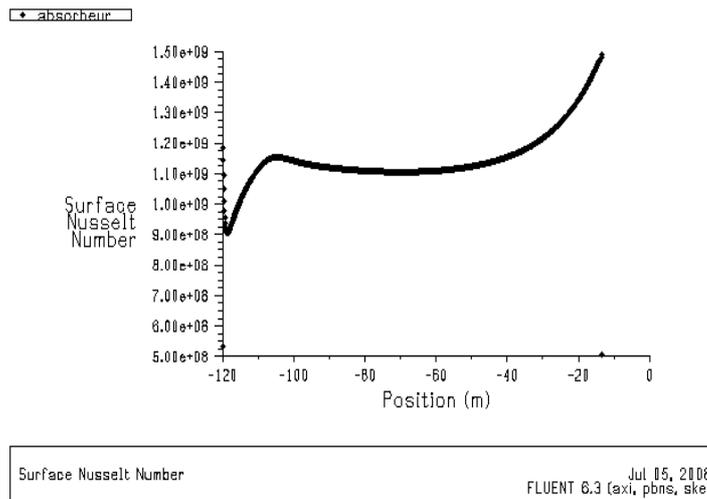


Figure 5.5 : le nombre de Nusselt, pour le transfert thermique au niveau de l'absorbeur

- **Puissance thermique perdue au niveau du collecteur :**

Les pertes thermiques du collecteur sont localisées au niveau du couvert et du sol. En effet, la chaleur est transférée de l'air chaud en écoulement vers le couvert qui échange la chaleur avec le milieu ambiant, comme le montre la figure 5.3. La chaleur est aussi transmise dans le sol.

On note par  $Q_p$  les pertes de chaleur au niveau du collecteur.

### 5.1.1.2 Champ de vitesse :

Les figures 5.6 et 5.7 permettent de visualiser le champ de vitesse à l'intérieur du collecteur. L'air entre dans le collecteur à des vitesses très basses, de l'ordre de  $0.4 \text{ m/s}$ , puis sa vitesse augmente au fur et à mesure qu'il avance vers le centre du collecteur du fait de sa forme circulaire. L'air atteint une vitesse moyenne de  $6.9 \text{ m/s}$  à la sortie du collecteur.

## 5.1.2 Traitement relatif à la cheminée :

### 5.1.2.1 Champ de température :

La figure 5.8, montre le champ de température dans la cheminée. On remarque que l'air qui est à une température élevée à la sortie du collecteur et l'entrée de la cheminée se refroidit au fur et à mesure qu'il gagne en hauteur. Ce refroidissement est dû à la conversion de l'énergie thermique disponible dans le fluide en énergie potentielle et aux pertes de chaleur au

niveau du mur de la cheminée. La figure 5.9 donne les valeurs que prend la température dans la cheminée.

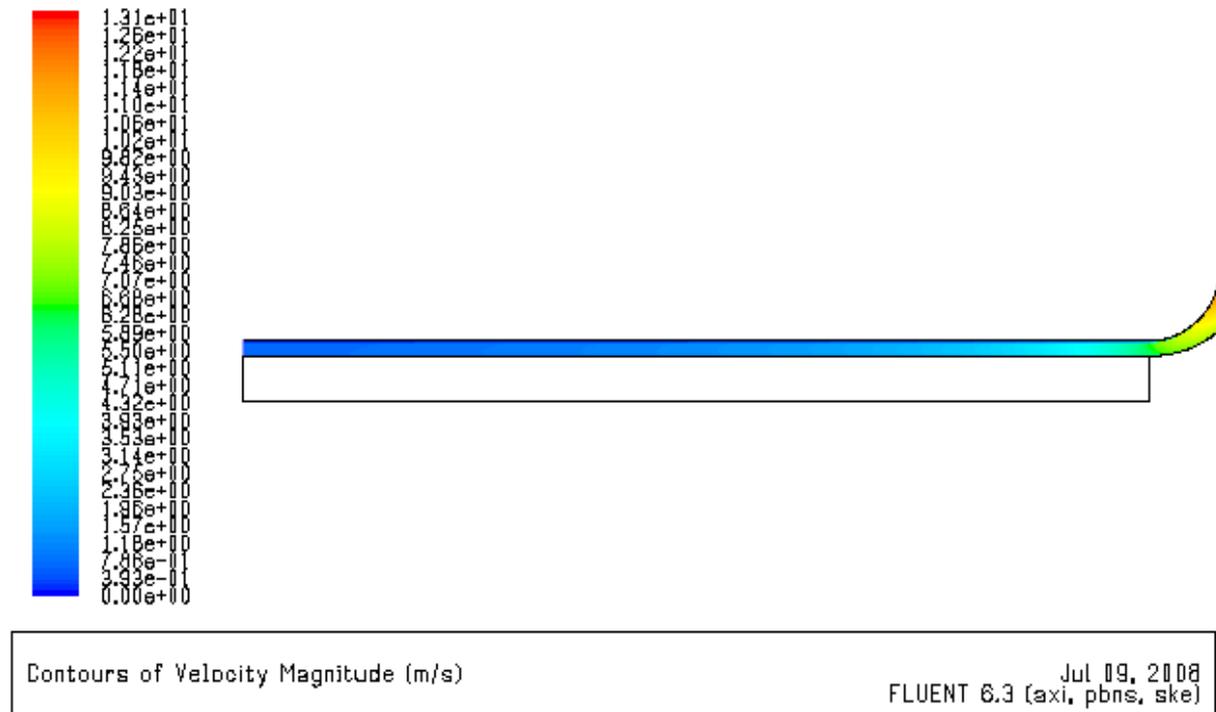


Figure 5.6 : Champ de vitesse dans le collecteur

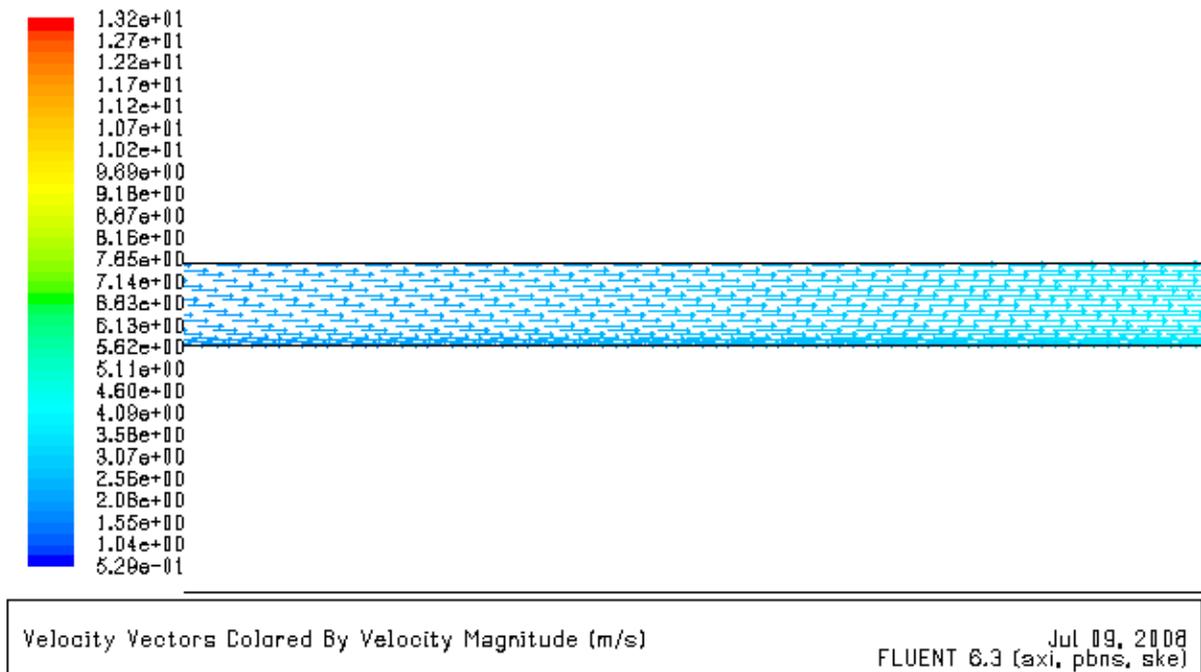


Figure 5.7 : Champ des vecteurs vitesse dans le collecteur

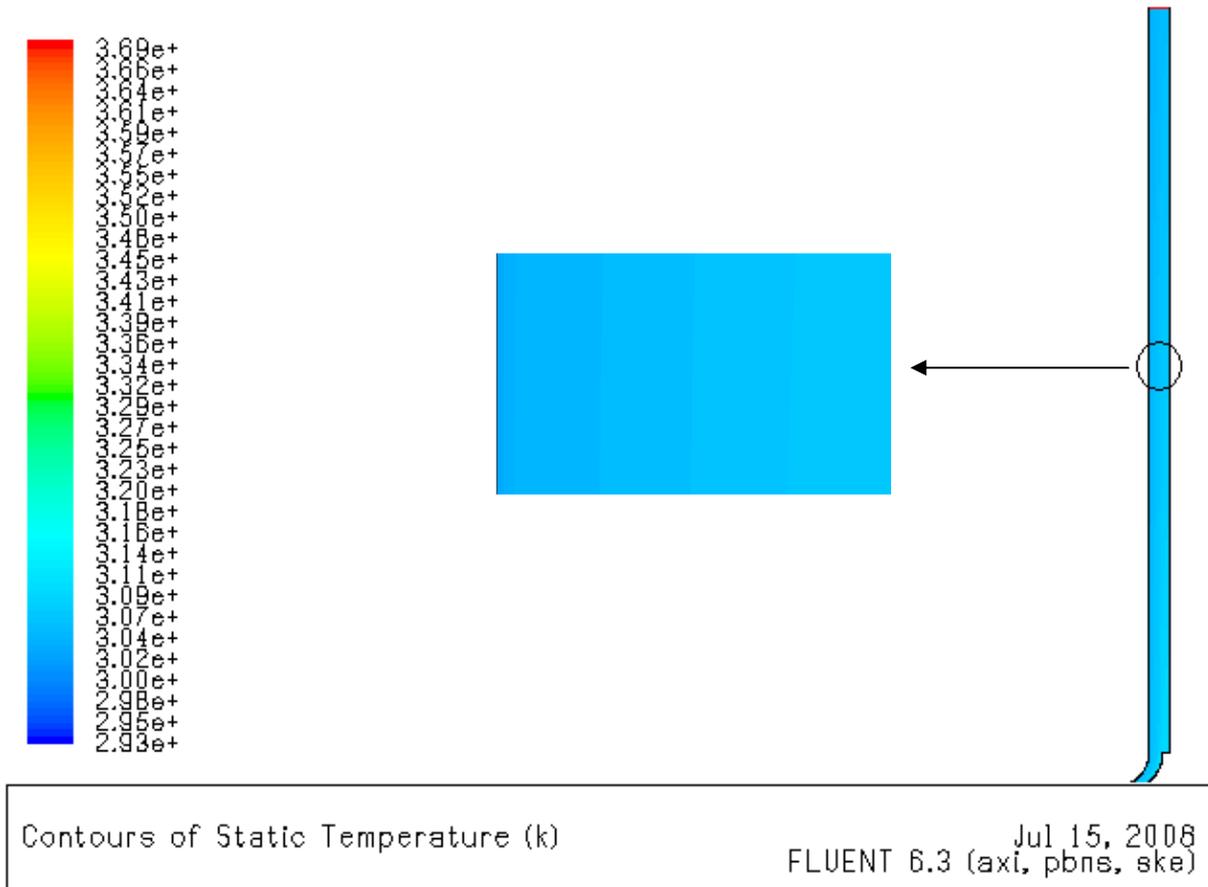


Figure 5.8 : Champ de température dans la cheminée

L'agrandissement fait sur la même figure 5.8 montre le refroidissement du fluide du côté du mur de la cheminée, du fait des pertes de chaleur vers le milieu ambiant.

Le raccord étant considéré comme adiabatique, donc la puissance utile récupérée par l'air est la même à la sortie du collecteur et l'entrée de la cheminée.

On note par  $P_{Ther,chem}$  la puissance thermique perdue au niveau de la cheminée vers le milieu ambiant

On définit le pourcentage de pertes de chaleur au niveau de la cheminée comme étant le rapport entre la puissance thermique perdue par la cheminée et la puissance thermique utile récupérée par l'air  $Q_u$ .

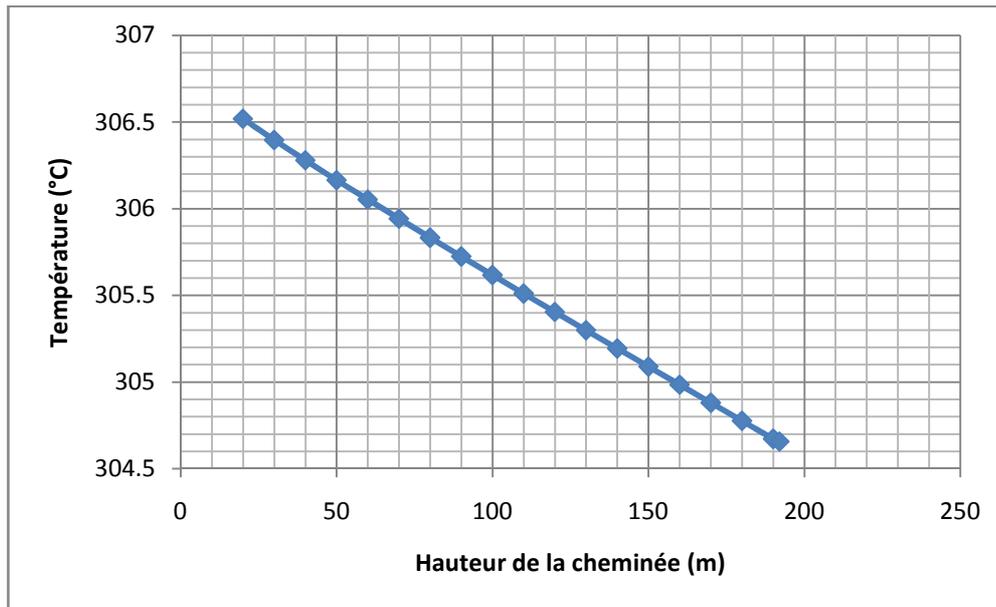


Figure 5.9 : Chute de la température dans la cheminée

### 5.1.2.2 Champ de vitesse :

La figure 5.10 montre le champ de vitesse dans la cheminée. On constate que le maximum de vitesse est atteint juste à l'entrée de la cheminée où la section est la plus petite. On remarque que la vitesse moyenne de l'air dans chaque section de la cheminée reste constante, comme le montre la figure 5.11. Ceci est parfaitement attendu, vu que l'air s'écoule à l'intérieur d'une cheminée avec une section de passage constante et une variation insignifiante de la masse volumique.

### 5.1.3 Champ de pression :

La figure 5.12 montre le champ de pression statique dans la structure. L'air entre à la pression atmosphérique et sa pression diminue au fur et à mesure qu'il avance vers le centre du collecteur. Comme on peut le voir sur la figure 5.13 qui donne la valeur de la pression statique à différentes positions du rayon du collecteur. Le minimum de pression statique est atteint juste à l'entrée de la cheminée, ce qui est en accord avec le modèle théorique présenté dans le chapitre 2.3. La pression statique augmente ensuite au fur et à mesure que l'air gagne en hauteur dans la cheminée pour atteindre une valeur égale à la pression atmosphérique à la sortie de la cheminée, comme l'illustre la figure 5.14 qui donne la valeur de la pression pour différentes hauteurs de la cheminée.

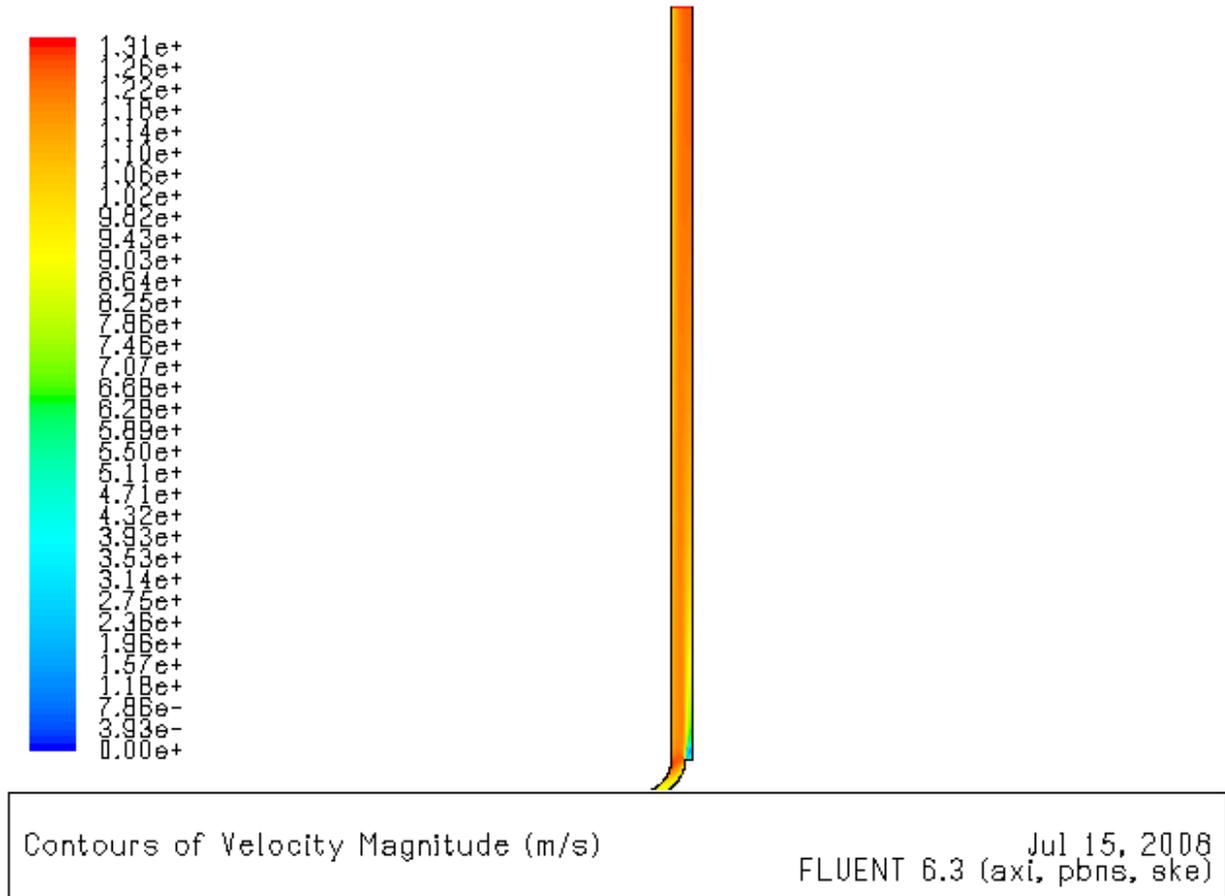


Figure 5.10 : Champ de vitesse dans la cheminée

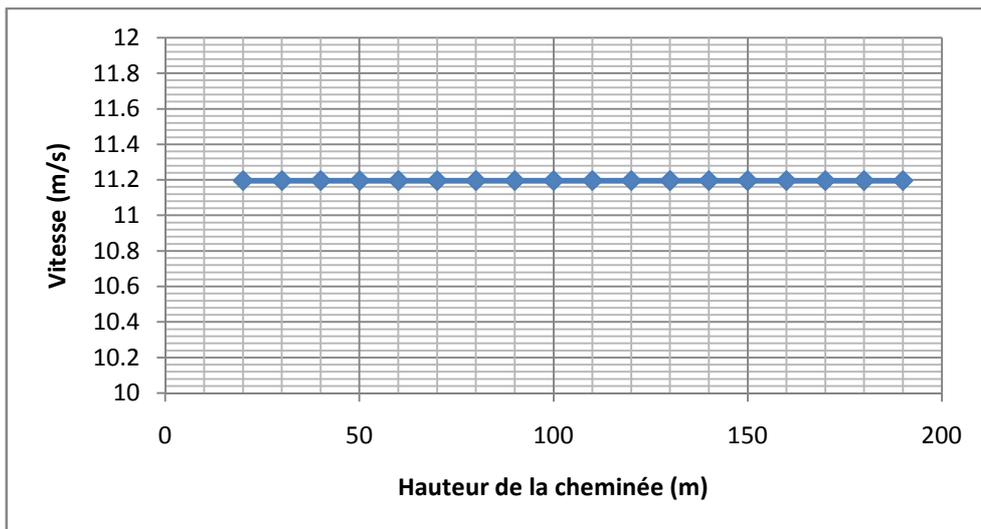


Figure 5.11: Valeur moyenne de la vitesse à différentes hauteur de la cheminée solaire

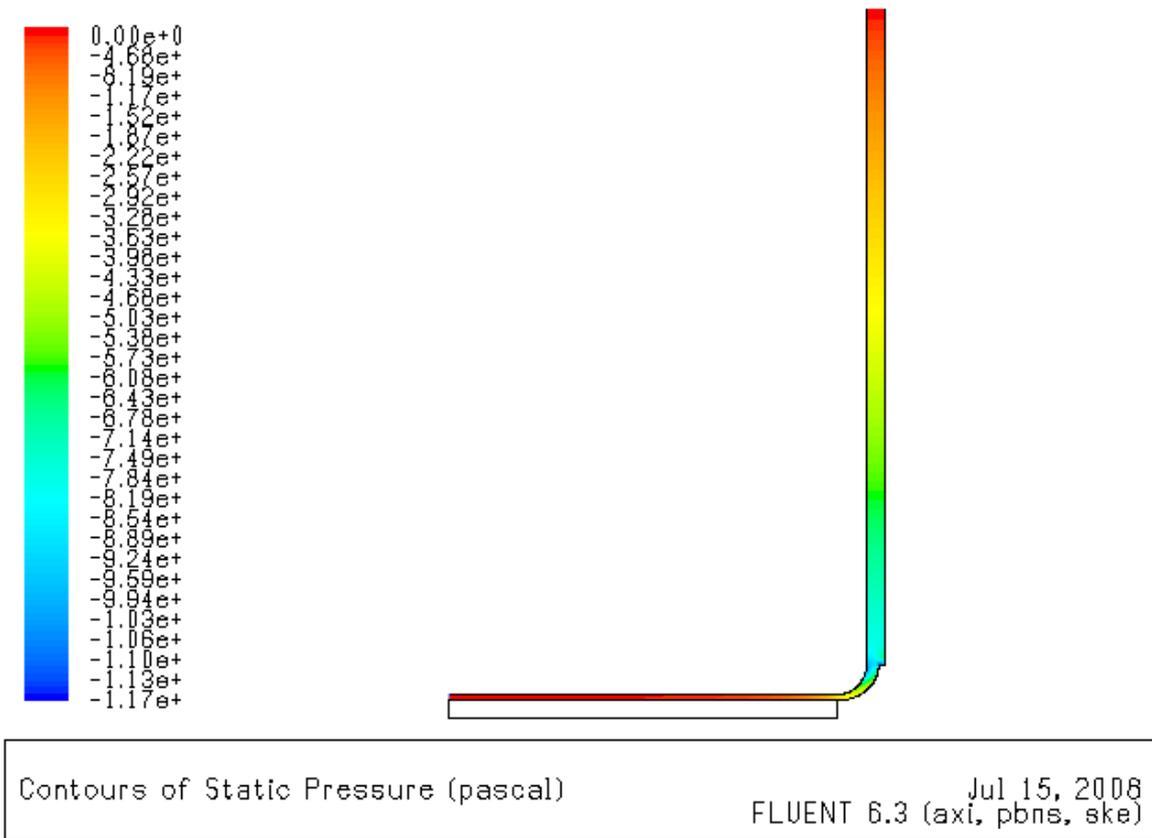


Figure 5.12 : Champ de pression statique dans la centrale cheminée solaire

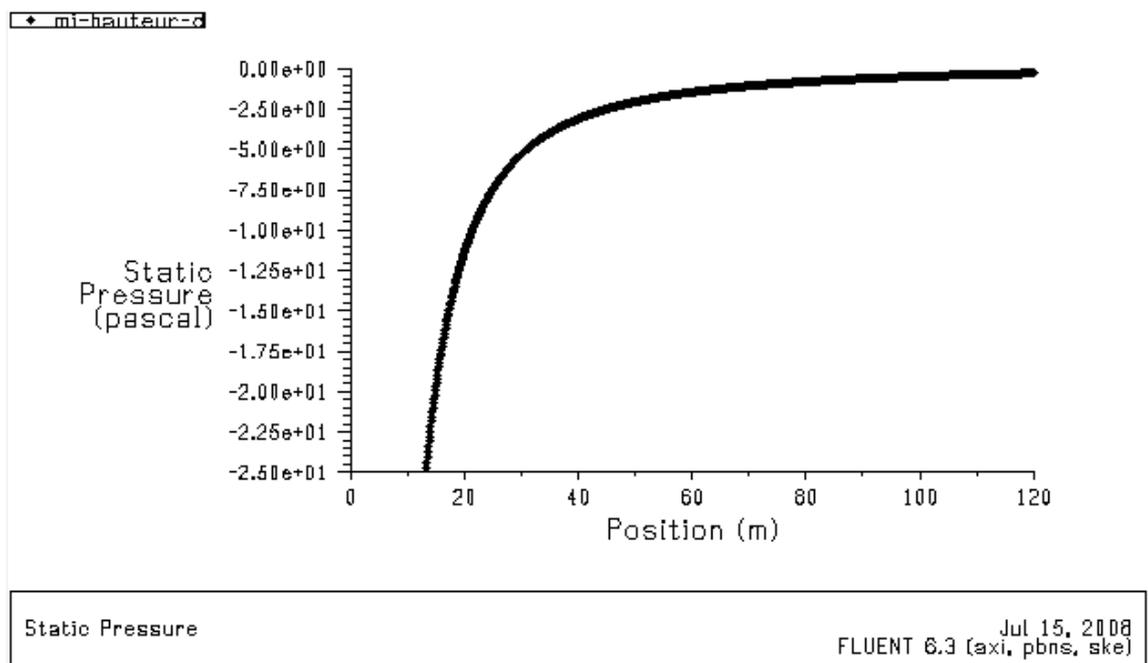


Figure 5.13 : Evolution de la pression statique dans le collecteur

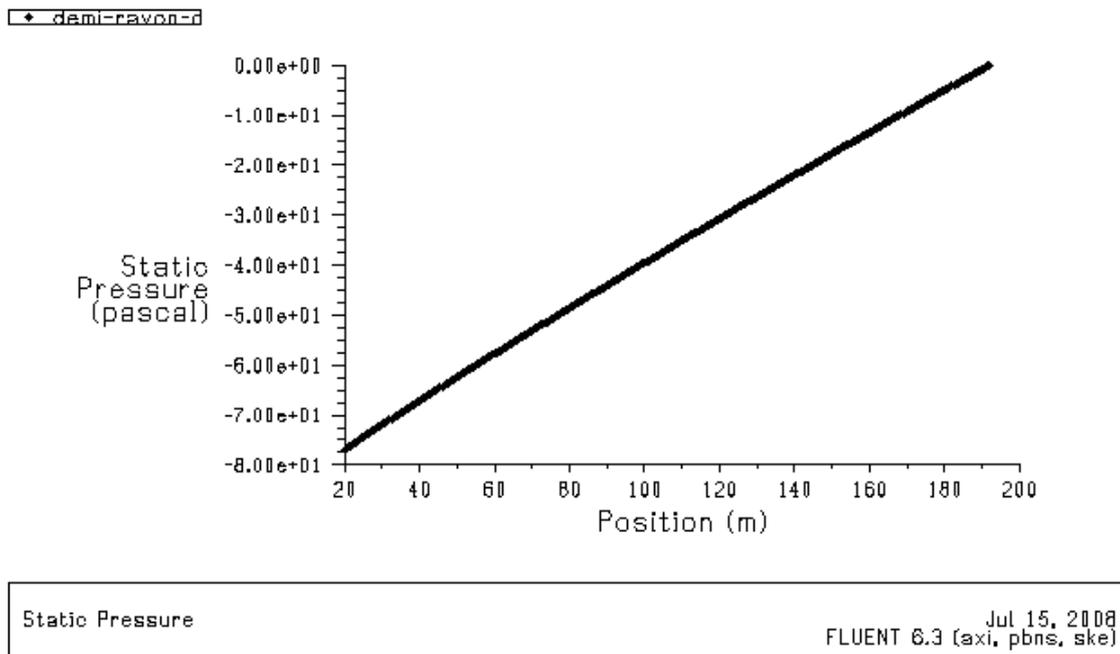


Figure 5.14 : Evolution de la pression statique dans la cheminée

## 5.2 Etude paramétrique de la centrale cheminée solaire sans couplage avec la turbine :

### 5.2.1 Etude de l'impact du rayonnement solaire sur le comportement de l'écoulement :

On considère dans cette section une structure aux dimensions du prototype de Manzanares (figure 4.4). Dans le but d'étudier l'impact du rayonnement solaire sur le comportement de l'écoulement, Nous avons considéré différentes valeurs du rayonnement solaire.

Nous avons étudié le comportement de l'écoulement en considérant l'élévation de la température à travers le collecteur, le débit massique, la vitesse d'écoulement dans la cheminée et la puissance cinétique de l'écoulement.

La figure 5.15 montre que l'élévation de la température de l'air dans le collecteur  $\Delta T_{coll}$ , est proportionnelle au rayonnement solaire  $G$ . La température du fluide augmente de  $0.5^{\circ}\text{C}$  pour un rayonnement solaire de  $100 \text{ W/m}^2$ , pour atteindre un maximum de  $17.94^{\circ}\text{C}$  pour un rayonnement solaire maximum de  $1200 \text{ W/m}^2$ .

On voit sur la courbe de la figure 5.16, que la vitesse moyenne de l'écoulement dans la cheminée augmente lorsque l'intensité du rayonnement solaire augmente. La vitesse de

l'écoulement augmente d'une valeur inférieure à 2 m/s pour un rayonnement de 100 W/m<sup>2</sup> pour atteindre une valeur de 13 m/s pour un rayonnement solaire de 1200 W/m<sup>2</sup>.

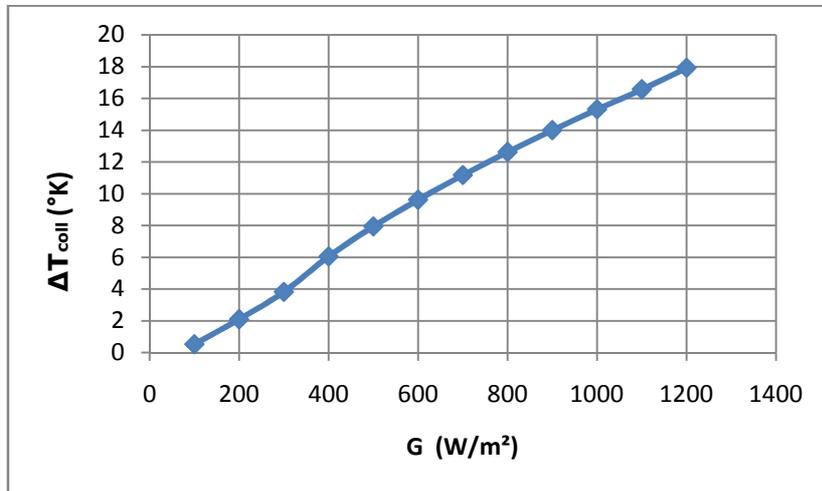


Figure 5.15 : Effet du rayonnement solaire sur l'élévation de la température dans le collecteur

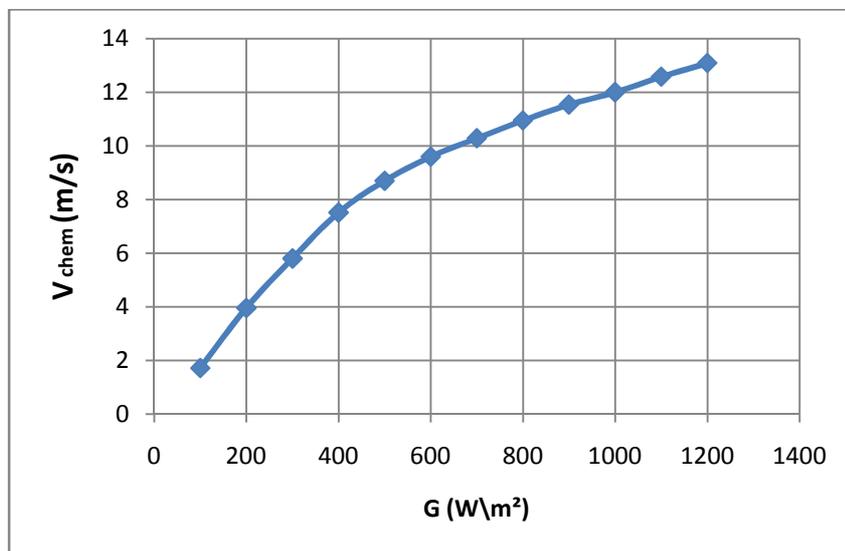


Figure 5.16 : Effet du rayonnement solaire sur la vitesse moyenne dans la cheminée

La figure 5.17 montre les valeurs que prend le débit massique pour différentes valeurs du rayonnement solaire. On voit d'après cette courbe que le débit massique prend une valeur

très basse, inférieur à 200 Kg/s pour un rayonnement solaire de 100 W/m<sup>2</sup>, et atteint une valeur maximale de 1267 Kg/s pour un rayonnement maximum de 1200 W/m<sup>2</sup>.

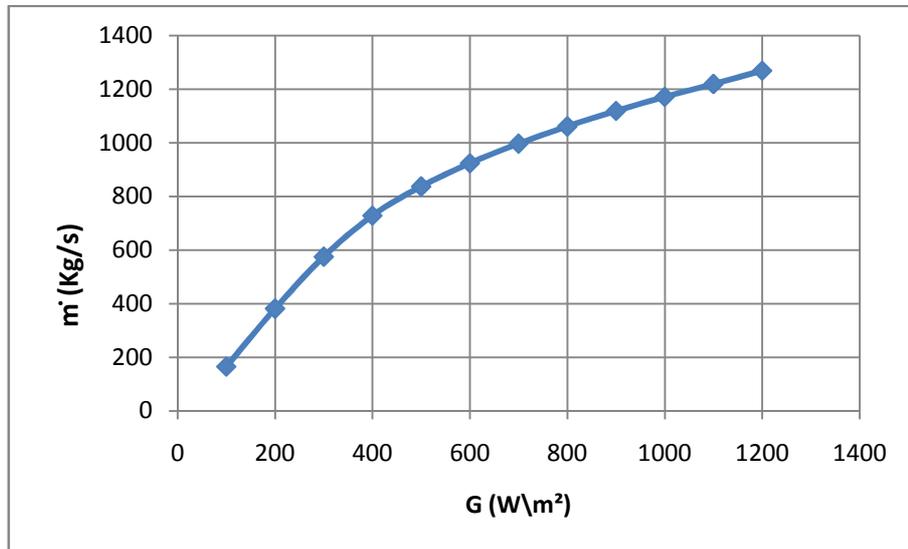


Figure 5.17 : Effet du rayonnement solaire sur le débit massique

La puissance cinétique de l'écoulement  $P_{tot}$  représentée sur la figure 5.18, prend des valeurs très basses pour les rayonnements solaires les plus faibles, puis augmente pour atteindre une valeur maximale de 108 KW pour un rayonnement solaire de 1200 W/m<sup>2</sup>.

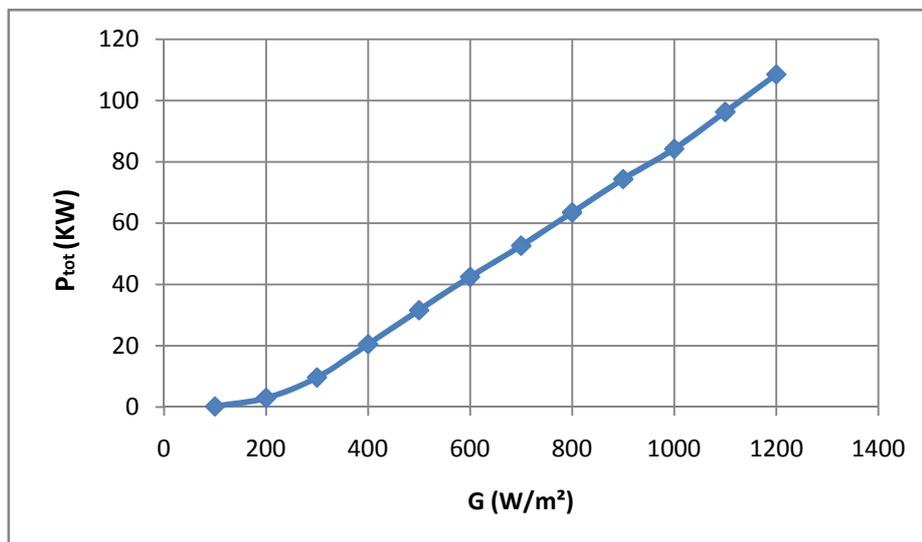


Figure 5.18 : Effet du rayonnement solaire sur la puissance cinétique de l'écoulement

L'analyse des résultats établis ci-dessus montre que le rayonnement solaire est le paramètre qui pilote tout le fonctionnement de la cheminée solaire. En effet la vitesse de l'écoulement et le débit massique qui sont deux paramètres liés, ainsi que la puissance cinétique de l'écoulement sont proportionnels au rayonnement solaire. D'autre part la température du fluide augmente aussi d'une manière significative. Ceci est attendu car la puissance thermique fournie au fluide est d'autant plus importante que le rayonnement solaire est important. 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. Et comme on l'a déjà expliqué dans ce cas le système n'est pas couplé avec une turbine à air, donc toute cette différence de pression totale va être utilisée pour accélérer le fluide.

### **5.2.2 Etude de l'impact de l'épaisseur du mur de la cheminée sur le comportement de l'écoulement :**

Afin d'étudier l'impact des pertes de chaleur au niveau de la cheminée vers le milieu ambiant, on a considéré différentes épaisseurs du mur de la cheminée ; 0.1, 0.7 et 1.2 m et aussi un cas adiabatique. Et nous avons lancé les simulations pour plusieurs valeurs du rayonnement solaire.

La figure 5.19 montre les valeurs de perte de chaleur au niveau de la cheminée en fonction de l'intensité du rayonnement solaire, pour différentes épaisseurs du mur de la cheminée. On constate que, pour les trois épaisseurs du mur, le pourcentage de perte de chaleur est important pour une intensité de rayonnement solaire la plus faible  $100 \text{ W/m}^2$ . On atteint 9% de perte pour une épaisseur de 0.1m, 5.6% pour une épaisseur de 0.7 m et 3.8 % pour une épaisseur de 1.2m. Ces valeurs diminuent rapidement pour un rayonnement solaire de plus grande intensité. Elles atteignent 3% pour un mur de 0.1 m, 0.87% pour un mur de 0.7m et 0.55 % pour une épaisseur de 1.2m.

Ces pertes s'accompagnent d'une chute de température du fluide entre l'entrée et la sortie de la cheminée. La figure 5.20 montre pour le cas adiabatique une chute de température de  $1.88^\circ\text{C}$ , et qui est due seulement à la conversion de l'énergie thermique en énergie potentielle. On voit que pour les autres cas la chute de température est plus importante du fait des pertes de chaleur au niveau de la cheminée. Pour toutes les épaisseurs on remarque que la chute de température augmente pour des rayonnements solaires plus importants. La chute de

température est de 2.28°C, 2.03°C et 1.98°C pour un rayonnement solaire de 100 W/m<sup>2</sup> et pour des épaisseurs de 0.1m, 0.7m, 1.2m respectivement. Ces valeurs atteignent 2.76°C, 2.26 °C et 2.17°C pour un rayonnement solaire de 1200W/m<sup>2</sup> et pour les mêmes épaisseurs respectivement.

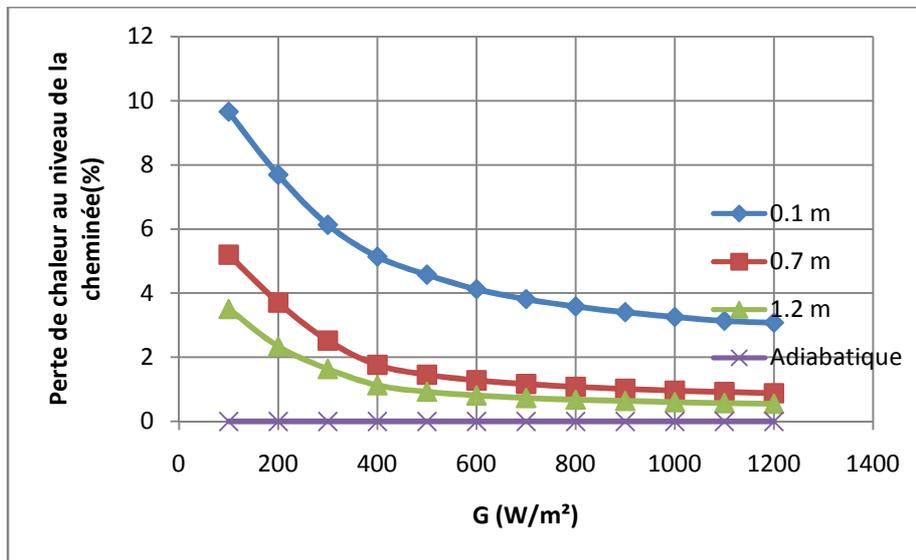


Figure 5.19 : Perte de chaleur au niveau de la cheminée en fonction du rayonnement solaire pour différentes épaisseurs du mur de la cheminée

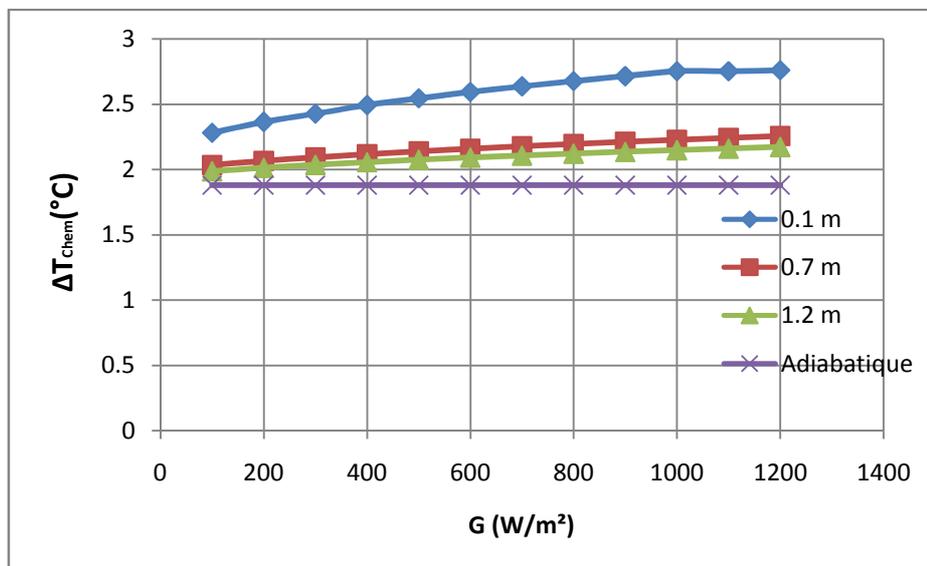


Figure 5.20 : Chute de température à travers la cheminée en fonction du rayonnement solaire pour différentes épaisseurs du mur de la cheminée

Comme on peut le voir sur la figure 5.21, l'élévation de la température dans le collecteur est d'autant plus importante que le rayonnement solaire est important. Mais l'élévation de la température est moins importante dans le cas où le mur est adiabatique, ceci s'explique par un léger ralentissement du fluide, lorsqu'il y a des pertes thermiques au niveau de la cheminée.

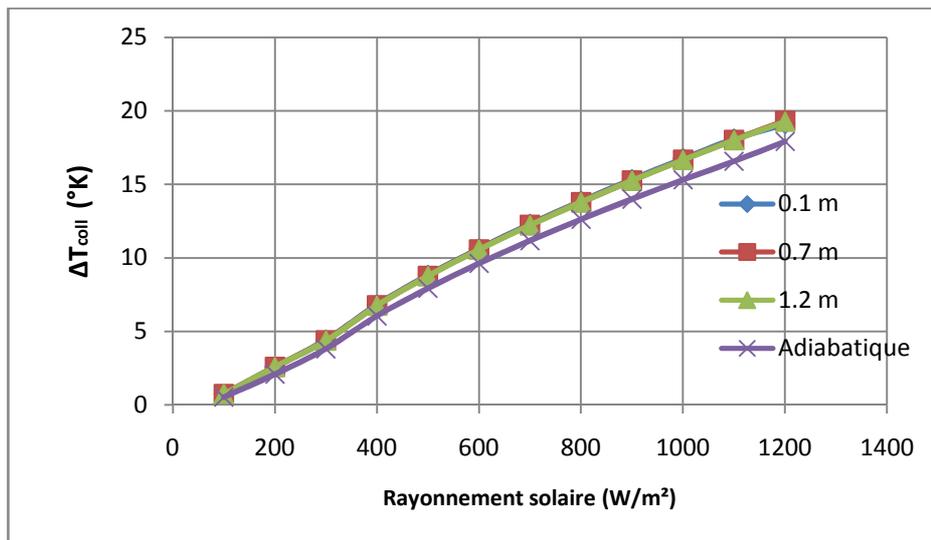


Figure 5.21 : Elévation de la température dans le collecteur en fonction du rayonnement solaire pour différentes épaisseurs de la cheminée

Les figures 5.22 et 5.23 représente la variation du débit massique et la puissance cinétique du fluide en fonction du rayonnement solaire et pour différentes épaisseurs du mur de la cheminée. On remarque que les courbes se superposent et il n'y a pas une très grande influence de la perte de chaleur au niveau du mur de la cheminée sur les principales variables d'écoulement à savoir le débit massique et la puissance cinétique du fluide.

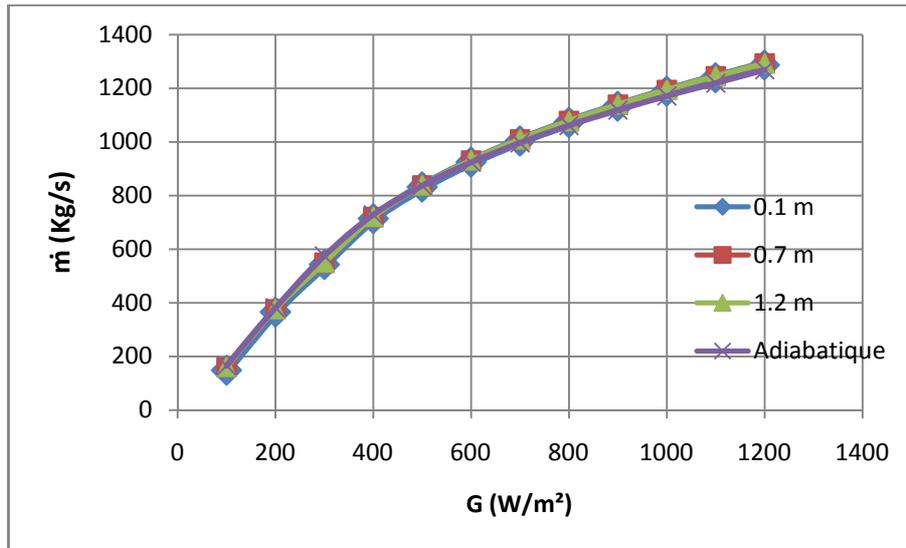


Figure 5.22 : Effet du rayonnement solaire sur le débit massique pour des murs de différentes épaisseurs

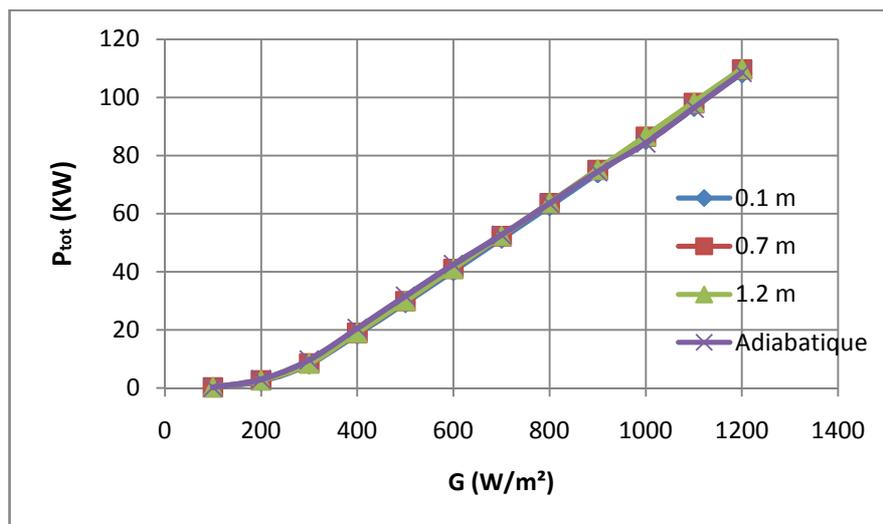


Figure 5.23: Puissance cinétique de l'écoulement en fonction du rayonnement solaire pour différentes épaisseurs du mur de la cheminée

### 5.2.3 Etude de l'impact du rayon du collecteur sur le comportement de l'écoulement :

Dans cette section nous allons étudier l'impact du rayon du collecteur sur le comportement de l'écoulement. Nous avons pris les mêmes dimensions de la figure 4.4 avec différents rayons du collecteur ; 180m, 240m et 300m en plus du rayon de base qui est de 192m et les résultats sont comme suit :

La figure 5.24 montre l'élévation de la température dans le collecteur en fonction du rayonnement solaire, pour différents rayons du collecteur. On remarque que l'élévation de la température est d'autant plus importante que le rayon du collecteur est important. Il atteint une élévation de température de 60°C pour un rayonnement solaire de 1200W/m<sup>2</sup> pour un collecteur de 300m de rayon contre une valeur de 17.9°C pour un rayon du collecteur de 120m et pour le même rayonnement solaire.

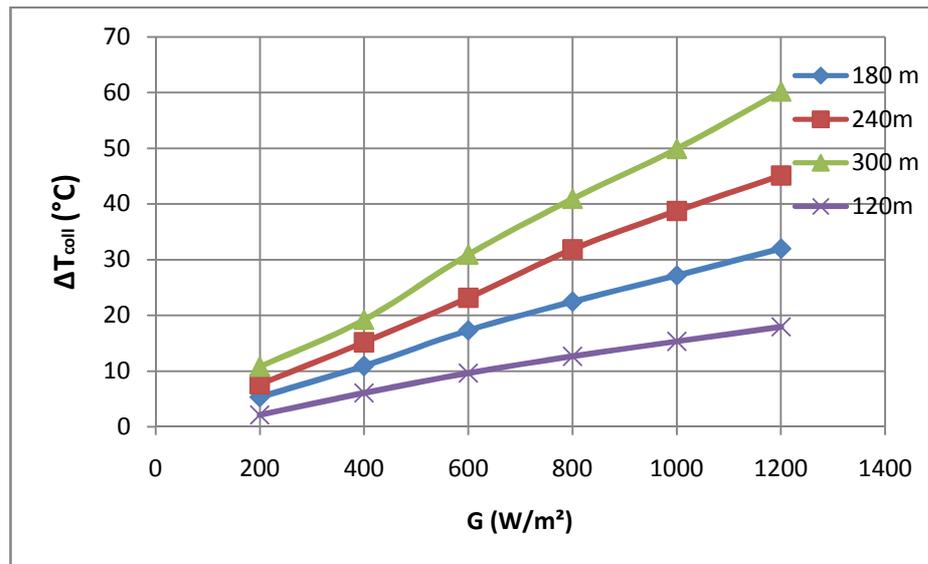


Figure 5.24 : Elévation de la température de l'air dans le collecteur en fonction du rayonnement solaire pour différents rayon du collecteur

Le débit massique représenté sur la figure 5.25 est d'autant plus important que le rayonnement solaire est important. Il atteint une valeur maximale de 2386 Kg/s pour un rayon du collecteur de 300m et un rayonnement solaire de 1200 W/m<sup>2</sup> contre une valeur de 1268 Kg/s pour un rayon de 120 m avec le même rayonnement solaire.

La puissance cinétique présentée sur la figure 5.26 est maximale pour un maximum de rayonnement solaire et pour un rayon maximum de 300m, elle prend une valeur de 671 KW contre une valeur de 108.50 KW pour le même rayonnement solaire et un rayon de 120m. La puissance cinétique est d'autant plus importante que le rayon du collecteur est important.

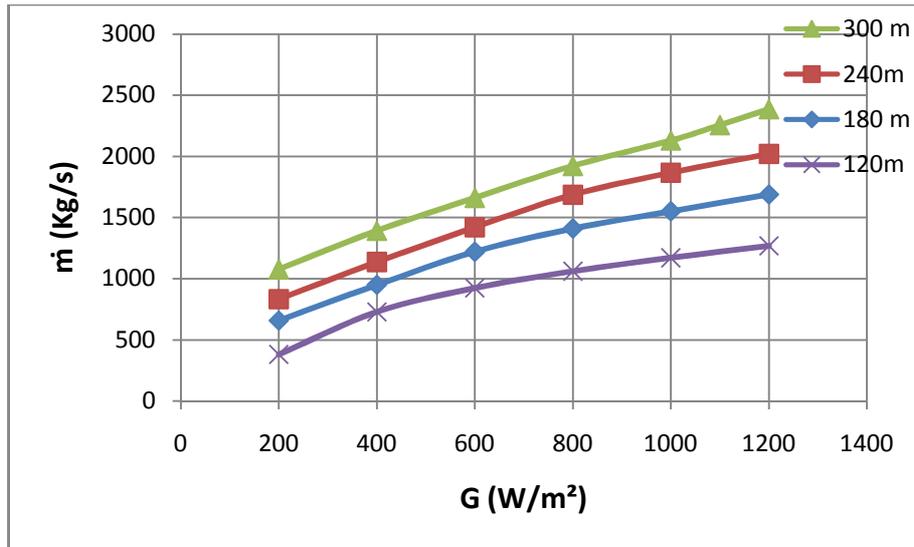


Figure 5.25 : Variation du débit massique en fonction du rayonnement solaire et pour différents rayons du collecteur

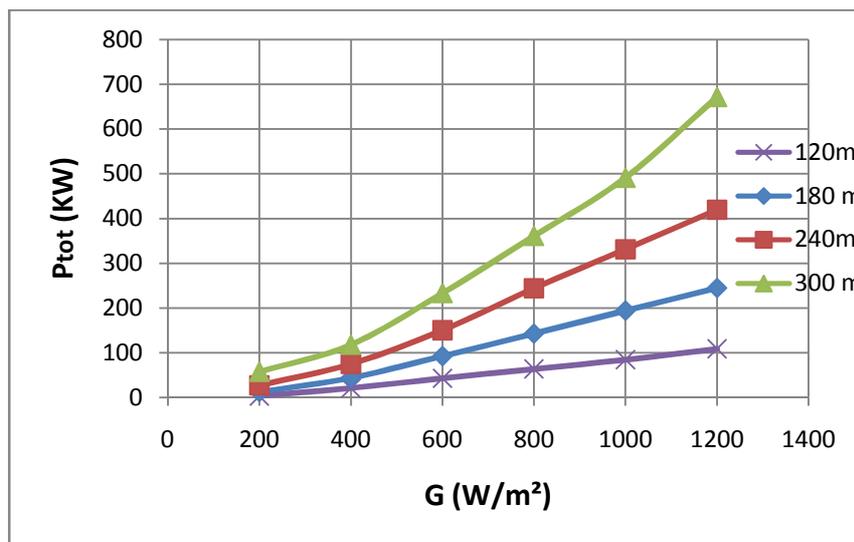


Figure 5.26 : Variation de la puissance cinétique en fonction du rayonnement solaire pour différents rayons du collecteur

Il est clair d'après l'analyse faite ci-dessus que le rayon du collecteur joue un rôle très important dans le fonctionnement d'une cheminée solaire. En effet, un rayon du collecteur plus important implique une surface de captation plus grande d'où une plus grande énergie thermique transférée au fluide.

### 5.2.4 Etude de l'impact de la hauteur de la cheminée sur le comportement de l'écoulement :

On étudie dans cette partie l'influence de la hauteur de la cheminée qui est l'un des principaux paramètres géométriques de construction de la centrale cheminée solaire, sur le comportement de l'écoulement. Nous avons considéré pour cette raison une cheminée solaire aux dimensions du prototype de Manzanares présenté sur la figure 4.4

La figure 5.27 représente l'élévation de la température dans le collecteur pour différentes hauteurs de la cheminée et pour différentes valeurs du rayonnement solaire. On voit sur cette courbe que pour n'importe qu'elle hauteur de la cheminée, l'élévation de la température dans le collecteur est d'autant plus importante que le rayonnement solaire est important. Pour un rayonnement solaire fixe on voit que l'élévation de la température prend des valeurs plus basses pour les hauteurs de cheminée les plus importantes. L'élévation de la température dans le collecteur atteint une valeur maximale de 23°C pour un rayonnement solaire de 1200 W/m<sup>2</sup>, et diminue pour atteindre un minimum de 14.5°C pour une cheminée de 1200m de hauteur et pour le même rayonnement solaire. On remarque que chaque courbe correspondant à un rayonnement solaire présente un minimum qui ne correspond pas à un maximum de la hauteur de la cheminée, mais à un niveau plus bas. On cite l'exemple d'un rayonnement solaire de 600 W/m<sup>2</sup>, l'élévation de la température est de 12.5°C pour une hauteur de cheminée de 100m, elle atteint un minimum de 8.70°C pour une hauteur de cheminée de 700m puis elle augmente pour atteindre une valeur de 9.26°C, pour une hauteur de 1200m.

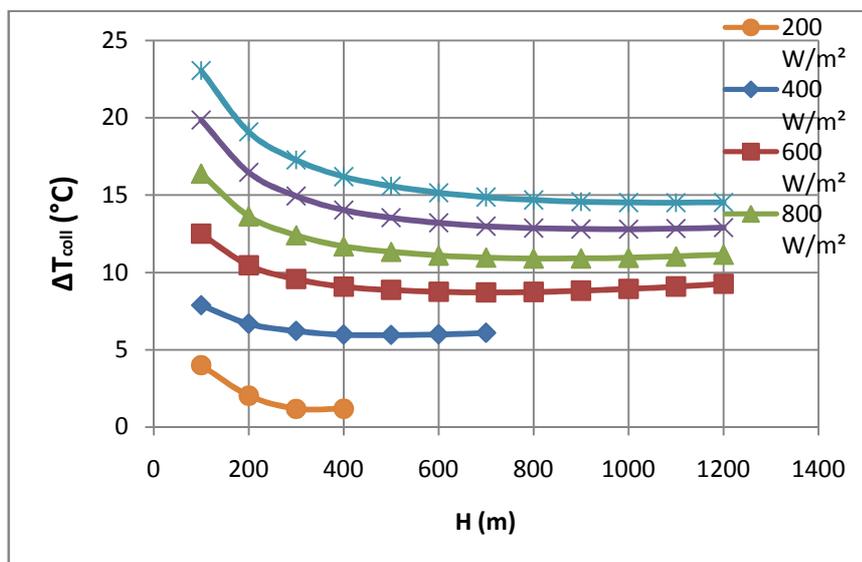


Figure 5.27 : Elévation de la température dans le collecteur pour différentes hauteurs de la cheminée, dans le cas de différents rayonnements solaires

Sur la figure 5.28 on peut voir la variation du débit massique en fonction des différentes hauteurs de la cheminée et pour différents valeurs du rayonnement solaire. On remarque que pour une hauteur donnée de la cheminée, le débit est d'autant plus important que, le rayonnement solaire est important. On remarque aussi que, pour un rayonnement solaire déterminé, le débit massique augmente pour des cheminées de hauteurs plus importantes. Le débit massique prend ces valeurs les plus élevées dans le cas d'un rayonnement solaire de  $1200 \text{ W/m}^2$ . Il prend une valeur de  $1067.64 \text{ Kg/s}$  pour une cheminée de  $100\text{m}$  de hauteur et il augmente pour atteindre une valeur de  $1760 \text{ Kg/s}$  pour une hauteur de cheminée de  $1200\text{m}$ . Il est à noter que chacune des courbes présentées sur cette figure, présente un maximum qui correspond à une hauteur inférieure à la hauteur maximale de la cheminée. Si on considère l'exemple d'un rayonnement solaire de  $600 \text{ W/m}^2$ , on voit que le débit massique augmente d'une valeur de  $776.19 \text{ Kg/m}^2$  pour une cheminée de  $100\text{m}$  de hauteur pour atteindre une valeur maximale de  $1154.21 \text{ Kg/s}$  puis il diminue après ça pour atteindre une valeur de  $1079.841 \text{ Kg/s}$  pour une hauteur de  $1200\text{m}$ . La hauteur optimale varie pour chaque valeur du rayonnement solaire, et elle est d'autant plus importante pour les valeurs de rayonnement solaire les plus importants. Les mêmes remarques sont à faire pour la puissance cinétique présentée sur la figure 5.29.

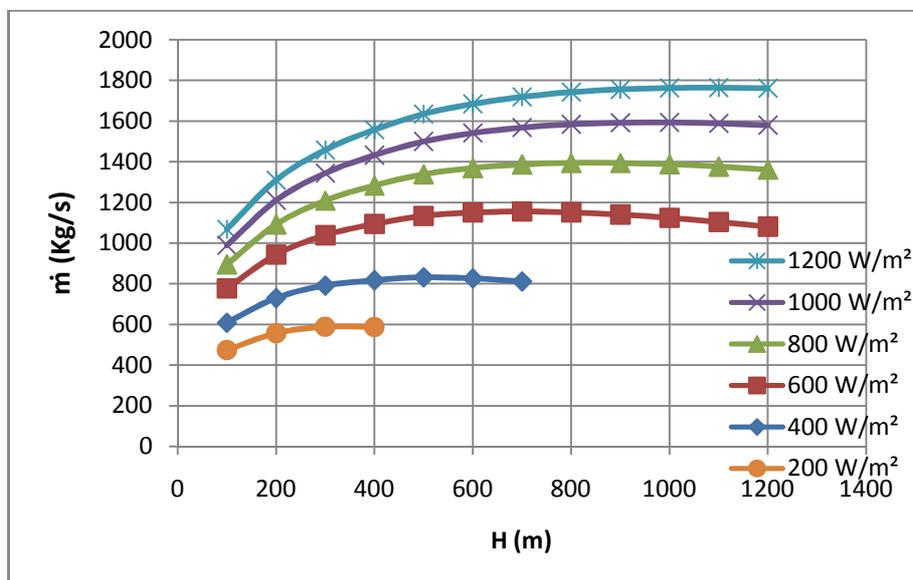


Figure 5.28 : Variation du débit massique pour des cheminées de différentes hauteurs et pour différents rayonnement solaire

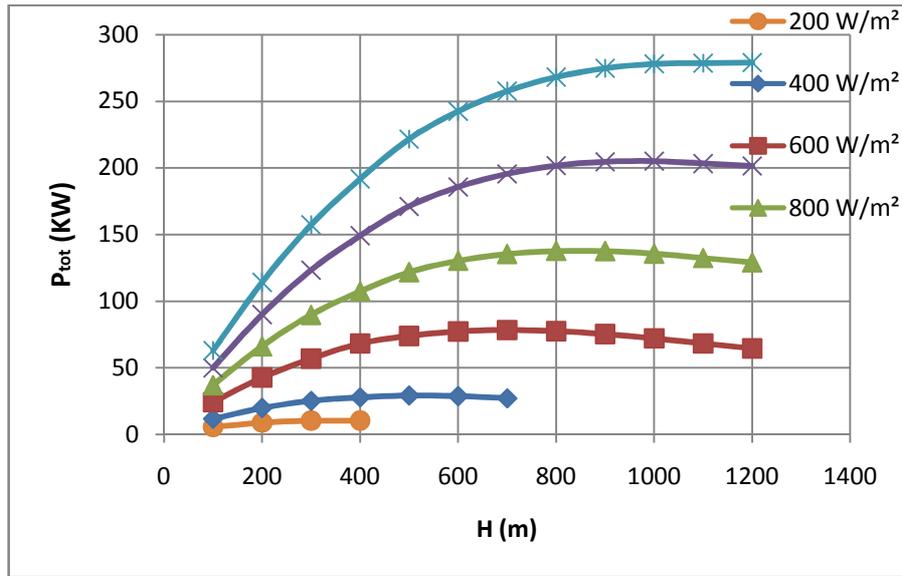


Figure 5.29 : Variation de la puissance cinétique en fonction de la hauteur de la cheminée, pour différents rayonnement solaire

La figure 5.30 montre la variation de la pression totale en fonction de la hauteur de la cheminée pour différentes valeurs du rayonnement solaire. On remarque que, pour une hauteur donnée de la cheminée, la pression totale est d'autant plus importante que le rayonnement solaire est important. Pour un rayonnement solaire fixe la pression totale est d'autant plus importante que la hauteur de la cheminée est importante, elle varie dans le cas d'un rayonnement solaire de 1200 W/m<sup>2</sup> entre 94.30 Pa et 253.68 Pa, pour des hauteurs de 100m et 1200m respectivement. Cependant et comme on le constate sur ces courbes, pour chaque rayonnement solaire la pression totale présente une hauteur optimale de la cheminée. Dans le cas d'un rayonnement solaire de 600 W/m<sup>2</sup> la pression totale varie d'une valeur de 50 Pa pour une cheminée de 100m, jusqu'à 108 Pa pour 700m de hauteur pour redescendre ensuite à une valeur de 95.5 Pa pour une hauteur de 1200m.

D'après l'analyse établie précédemment, il est clair que chacune des variables de l'écoulement présente une hauteur optimale. Ceci s'explique par le fait qu'en augmentant la hauteur de la cheminée pour un rayonnement solaire donnée, l'air dans la centrale cheminée solaire s'accélère comme le montre la courbe de la figure 5.28, donc il se réchauffe moins ce qui est montré sur la figure 5.27. Mais aussi la température du fluide dans la cheminée solaire diminue du fait de la conversion de l'énergie thermique en énergie potentielle et aussi à cause des pertes thermiques au niveau du mur de la cheminée, donc et comme conséquence de ce refroidissement, pour chaque rayonnement, il y a une hauteur optimale pour laquelle le débit

massique est maximum. Si on dépasse ce niveau l'écoulement ralentit et on perd sur la puissance produite par la centrale cheminée solaire.

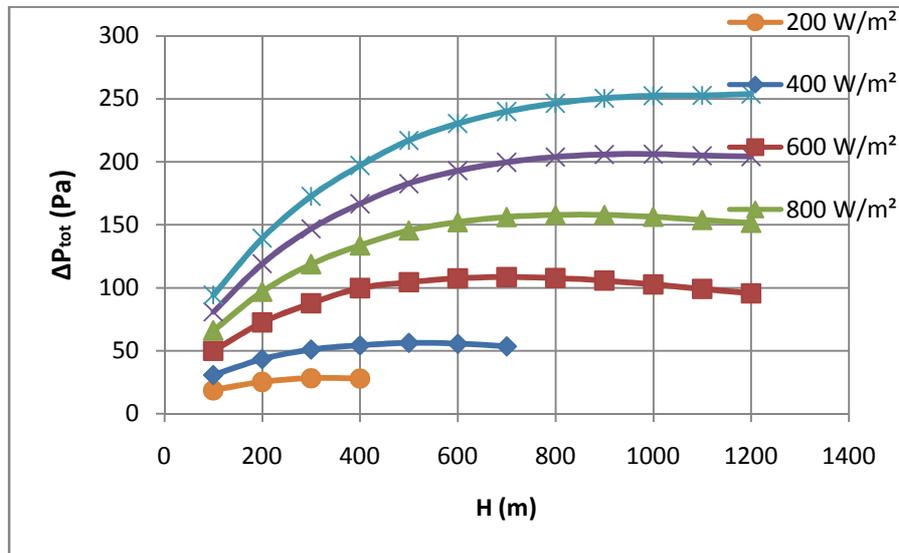


Figure 5.30: variation de la pression totale en fonction de la hauteur de la cheminée pour différents rayonnements solaires

### 5.3 Etude de l'impact de la hauteur de la cheminée sur la puissance électrique générée :

#### 5.3.1 Couplage de la centrale cheminée solaire avec une turbine à air :

Après avoir déterminé la pression totale dans l'étape précédente, nous allons à présent coupler le système avec une turbine à air.

La position de la turbine à air est montrée sur la figure 5.31. La turbine est modélisée par une chute de pression statique qui correspond à 80% de la pression totale disponible dans la structure [5].

#### 5.3.2 Validation de l'approche numérique :

Après le couplage du système avec la turbine, on a pu obtenir directement l'information sur la puissance électrique générée. Afin de valider les résultats obtenus numériquement, nous avons décidé de les comparer, à ceux prélevés sur le prototype de Manzanares dont on dispose. Pour cela, on a considéré les dimensions du prototype de Manzanares et on a lancé des simulations pour différents rayonnements solaires. Les résultats sont présentés sur la figure 5.32. Les points noirs représentent les résultats expérimentaux et les points rouges représentent les résultats des simulations numériques sur FLUENT.

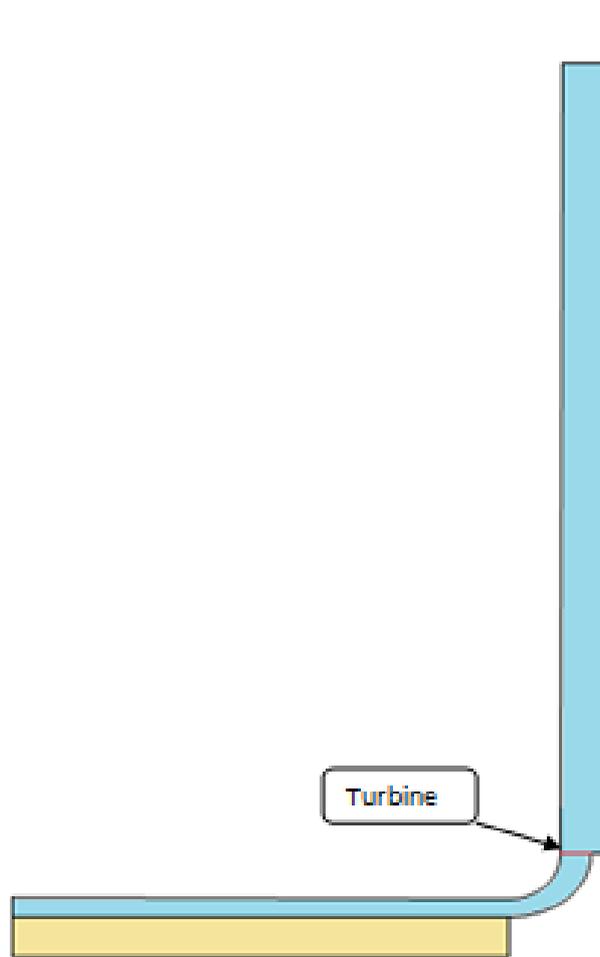


Figure 5.31: Position de la turbine à air

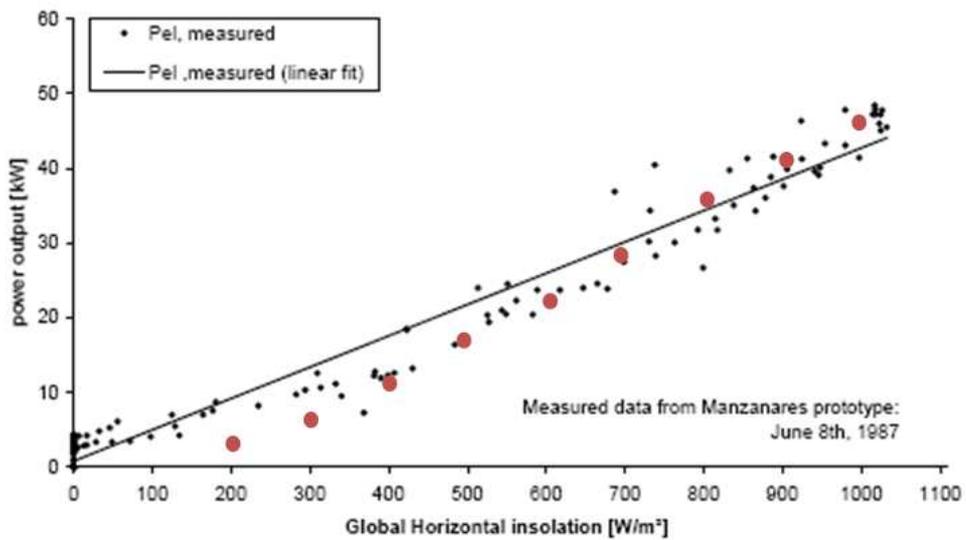


Figure 5.32 : Comparaison entre les résultats expérimentaux prélevés sur le prototype de Manzanares [5] et les résultats de l'approche numérique

On remarque que les résultats des simulations numériques sont proches des résultats expérimentaux. On constate aussi qu'il y a un léger écartement vers les rayonnements solaires les plus faibles.

### 5.3.3 Puissance électrique générée :

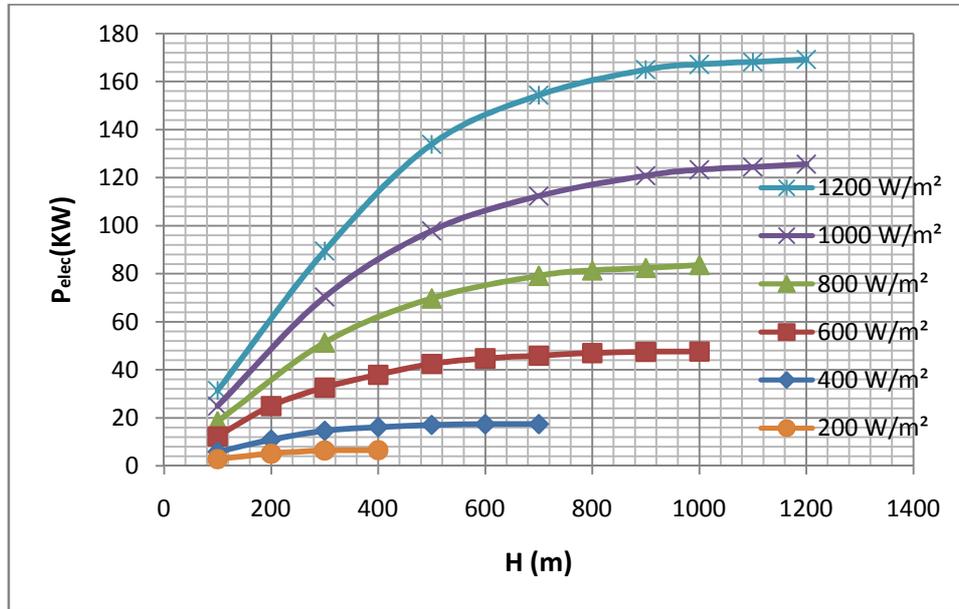


Figure 5.33 : Variation de la puissance électrique générée en fonction de la hauteur de la cheminée pour différents rayonnements solaires

La figure 5.33 montre la variation de l'énergie électrique produite par la centrale cheminée solaire en fonction de la hauteur de la cheminée pour plusieurs valeurs du rayonnement solaire. La puissance électrique, comme pour les autres variables d'écoulement, prend des valeurs plus importantes pour les rayonnements solaires les plus importants. Pour un rayonnement solaire donné la cheminée présente une hauteur optimale pour laquelle la puissance électrique générée est maximale. On voit que le prototype de Manzanares peut atteindre une production de 160 KW avec une cheminée de 800m de hauteur, contre une production de 50 KW pour une hauteur de 192m.

### Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats des simulations numériques établies sur le code de calcul FLUENT. On a vu que le rayonnement solaire pilote le fonctionnement d'une centrale cheminée solaire ; les valeurs que prend l'élévation de la température, la vitesse et la puissance cinétique de l'écoulement sont proportionnelles à l'intensité du

rayonnement solaire. Dans le but d'étudier l'impact des pertes de chaleurs au niveau de la cheminée vers le milieu ambiant, on a considéré plusieurs épaisseurs du mur de la cheminée et on a vu que les pertes n'ont pas une influence significative sur la puissance cinétique de l'écoulement. En ce qui concerne l'influence des différents paramètres géométriques, on a lancé des simulations avec différents rayons du collecteur et les résultats ont montré que c'est un paramètre très influençant. En effet un collecteur de rayon plus important implique une plus grande surface de captation donc une plus grande énergie thermique transféré au fluide. Nous avons aussi vu que, pour chaque rayonnement solaire, la hauteur de la cheminée présente un optimum pour lequel la puissance cinétique de l'écoulement est maximale. Ces simulations ont été réalisées sans le couplage du système avec une turbine à air. Leur principal but a été de comprendre la relation entre les différentes variables de l'écoulement, ainsi que de déterminer la pression totale qui représente une information indispensable pour la suite de l'étude et le couplage du système avec une turbine.

Après le couplage du système avec une turbine, on a validé les résultats de l'approche numérique par rapport aux résultats expérimentaux prélevés sur le prototype de Manzanares. Et on a conclu qu'il existe pour chaque rayonnement solaire une hauteur optimale pour laquelle la puissance électrique générée est maximale.

## **Conclusion Générale :**

Le réchauffement climatique de la terre a atteint des niveaux alarmants, et comme principale conséquence de ce danger vient le protocole de Kyoto, qui vise à lutter contre le réchauffement climatique en diminuant les émissions des gaz à effet de serre. Les principaux pays pollueurs, et dans l'obligation de respecter leurs engagements envers le protocole de Kyoto investissent des sommes importantes dans le développement de nouvelles technologies et dans la construction de nouvelles centrales électriques qui fonctionnent avec des énergies renouvelables. La centrale cheminée solaire est l'une de ces technologies.

Nous nous sommes intéressés, dans ce travail, à l'étude numérique de la centrale cheminée solaire. Afin de mieux aborder le problème, on a réalisé une étude bibliographique qui nous a permis de nous familiariser avec la centrale cheminée solaire et de comprendre son principe de fonctionnement. On a ensuite établi une étude théorique qui vise en premier lieu à mieux comprendre le principe de fonctionnement de la cheminée solaire et qui met en évidence les principaux paramètres qui influent sur le fonctionnement d'une centrale cheminée solaire. Nous avons ensuite établi une modélisation mathématique d'un fluide en écoulement laminaire puis turbulent.

La simulation numérique de l'écoulement a été faite sur le code de calcul FLUENT. Dans une première étape, on a considéré le système sans couplage avec une turbine à air où on a étudié l'impact du rayonnement solaire, du rayon du collecteur et la hauteur de la cheminée sur la puissance cinétique de l'écoulement. Dans un second lieu, le couplage du système avec une turbine a été établi et les résultats des simulations numériques ont été comparés aux résultats expérimentaux prélevés sur le prototype de Manzanares. On a ensuite étudié l'impact de la hauteur et du rayonnement sur la puissance électrique générée par une centrale cheminée solaire.

On a vu que la cheminée présente des hauteurs optimales pour lesquelles la puissance électrique générée est maximale ; donc la construction d'une cheminée solaire nécessite une étude de l'ensoleillement du site de construction, afin de pouvoir l'utiliser dans une étude technico économique qui vise à déterminer la hauteur la plus rentable de la cheminée.

## **Bibliographie :**

- [1] Pasumarthi, N., Sherif, S.A., 1998. Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney model— Part I: mathematical model development. *International Journal of Energy Research* 22, 277–288;
- [2] Pasumarthi N, Sherif SA. Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney model—Part II: experimental and theoretical results and economic analysis. *International Journal of Energy Research* 22, 443–61;
- [3] Padki, M. M., Sherif, S. A., 1999. On a Simple Analytical Model for Solar Chimneys. *Int. J. Energy Res.*, 23, 345-349;
- [4] Bernardes, M.A dos S., VoB, A., Weinrebe, G., 2003. Thermal and Technical Analyses of Solar Chimneys. *Solar Energy* 75, 511-524;
- [5] Schlaich, J., Bergermann, R., Schiel, W., Weinrebe, G., 2003. Design of commercial solar Updraft tower systems – utilization of solar induced convective flows for power generation, In: *Proceedings of the International Solar Energy Conference, Kohala Coast, United States*, pp. 573–581;
- [6] Dai, Y. J., Huang, H. B., Wang, R. Z., 2003. Case study of Solar Chimney Power Plants in Northwestern Regions of China. *Renewable Energy* 28, 1295-1304;
- [7] Pastohr H., Kornadt, O., Gürlebeck, K., 2004. Numerical and analytical calculations of the temperature and flow field in the upwind power plant *Int. J. Energy Res.* 28, 495–510;
- [8] Ming TZ, Liu W, Xu GL. Analytical and numerical simulation of the solar chimney power plant systems. *Int J Energy Res* 2006; 30:861–73;
- [9] Xinping Zhou, Jiakuan Yang, Bo Xiao, Guoxiang Hou, Fang Xing. Analysis of chimney height for solar chimney power plant. *Applied Thermal Engineering Res* 2008.02.014;
- [10] Xinping Zhou, Jiakuan Yang, Bo Xiao, Guoxiang Hou. (2007), Experimental study of temperature field in a solar chimney power setup. *Applied Thermal Engineering* 27 (2007) 20044-2050 ;
- [11] *Science et vie Hors-série N°240, Septembre 2007, Climat le dossier vérité ;*

- [12] <http://www.enviromission.com.au/index.htm>;
- [13] FRANZ TRIEB, OLE LANGNIB and HELMUT KLAIB, Solar electricity generation-a comparative view of technologies, costs and environmental impact, Solar energy Vol. 59, Nos, 1-3,pp, 89-99, 1997;
- [14] D. Saheb Koussa, M. Belhamel et B. Kazed, Système éolien pour l'alimentation d'une charge à usage domestique, Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°1 (2006) 127 – 138 ;
- [15] Duffie, J. and Beckman, R. (1980). Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley-Interscience, New York;
- [16] <http://www.eia.doe.gov/> ;
- [17] Optimization and Control of a Large-scale Solar Chimney Power Plant, Johannes Petrus Pretorius, 2007 University of Stellenbosch;
- [18] L.M. Michaud. (1995). Heat to work conversion during upward heat convection Part1: Carnot engine method. Atmospheric Research 39 (1995) 157-178;
- [19] Buoyancy Driven Solar Engine [http://www.globalwarmingsolutions.co.uk/buoyancy\\_driven\\_solar\\_engine.htm](http://www.globalwarmingsolutions.co.uk/buoyancy_driven_solar_engine.htm)
- [20] FLUENT 6.3 User's Guide;
- [21] FLUENT 6.3 UDF Manual.

## Liste des figures :

Figure 1.1: Consommation mondiale d'énergie, classée par source .....	4
Figure 1.2 : Sources d'énergie : Participation à la consommation mondiale d'énergie.....	5
Figure 1.3 : Principe de fonctionnement d'une cheminée solaire .....	9
Figure 1.4 : Vue du prototype de la centrale cheminée solaire à Manzanares, Espagne .....	10
Figure 1.5 : LEC pour différents taux d'intérêts, pour des centrales de différentes puissances.....	18
Figure 1.6 : Comparaison générale entre le cout d'électricité d'une centrale cheminée solaire et une centrale au charbon.....	19
Figure 1.7 : Vue artistique du projet australien .....	20
Figure 2.1 : Inventaire des différents paramètres de fonctionnement.....	26
Figure 2.2 : Collecteur solaire à air avec un seul couvert.....	28
Figure 2.3 : Analogie électrique pour un capteur solaire à un seul couvert .....	29
Figure 2.4 : Pression statique à l'intérieur et à l'extérieur de la cheminée .....	31
Figure 4.1: Interface du préprocesseur Gambit.....	54
Figure 4.2 : Interface du préprocesseur FLUENT.....	55
Figure 4.3: Le post processeur .....	55
Figure 4.4 : Dimension de la structure de base utilisée pour les simulations sur FLUENT .....	56
Figure 4.5 : Nomenclature des différentes parties de la centrale cheminée solaire .....	57
Figure 4.6 : Représentation du maillage sur GAMBIT .....	58
Figure 4.7 : Maillage de la partie entrée collecteur .....	60
Figure 4.8: Maillage de la partie sortie collecteur.....	60
Figure 4.9: Maillage de la partie mur cheminée .....	60
Figure 4.10 : Maillage de la partie entrée cheminée .....	60
Figure 4.11 : Conditions aux limites .....	64
Figure 4. 12 : Variation de la température en fonction de la hauteur pour une cheminée de 800m, avant l'adaptation du code de calcul. ....	65
Figure 4.13 : Chute de température en fonction de la hauteur d'une cheminée adiabatique.....	66
Figure 4.14 : Variation de la température en fonction de la hauteur pour une cheminée de 800m, Après l'introduction de la correction .....	68
Figure 5.1 : Champs de température dans le collecteur.....	72
Figure 5.2 : Profil de température à mi-hauteur du collecteur.....	72
Figure 5.3: Température de l'air à différents niveau du collecteur .....	73
Figure 5.4 : coefficient de transfert thermique par convection au niveau de l'absorbeur.....	73

Figure 5.5 : le nombre de Nusselt, pour le transfert thermique au niveau de l'absorbeur .....	74
Figure 5.6 : Champ de vitesse dans le collecteur .....	75
Figure 5.7 : Champ de vecteur vitesse dans le collecteur .....	75
Figure 5.8 : Champ de température dans la cheminée .....	76
Figure 5.9 : Chute de la température dans la cheminée .....	77
Figure 5.10 : Champ de vitesse dans la cheminée .....	78
Figure 5.11: Valeur moyenne de la vitesse à différentes hauteur de la cheminée solaire .....	78
Figure 5.12 : Champ de pression dans la centrale cheminée solaire .....	79
Figure 5.13 : Evolution de la pression dans le collecteur .....	79
Figure 5.14 : Evolution de la pression dans la cheminée .....	80
Figure 5. 15 : Effet du rayonnement solaire sur l'élévation de la température dans le collecteur .....	81
Figure 5.16 : Effet du rayonnement solaire sur la vitesse moyenne dans la cheminée.....	81
Figure 5.17 : Effet du rayonnement solaire sur le débit massique .....	82
Figure 5.18 : Effet du rayonnement solaire sur la puissance cinétique de l'écoulement.....	82
Figure 5.19 : Perte de chaleur au niveau de la cheminée en fonction du rayonnement solaire pour différentes épaisseurs du mur de la cheminée .....	84
Figure 5.20 : Chute de température à travers la cheminée en fonction du rayonnement solaire pour différentes épaisseurs du mur de la cheminée .....	84
Figure 5.21 : Elévation de la température dans le collecteur en fonction du rayonnement solaire pour différentes épaisseurs de la cheminée .....	85
Figure 5.22 : Effet du rayonnement solaire sur le débit massique pour des murs de différentes épaisseurs .....	86
Figure 5.23: Puissance cinétique de l'écoulement en fonction du rayonnement solaire pour différentes épaisseurs du mur de la cheminée .....	86
Figure 5.24 : Elévation de la température de l'air dans le collecteur en fonction du rayonnement solaire pour différents rayon du collecteur .....	87
Figure 5.25 : Variation du débit massique en fonction du rayonnement solaire et pour différents rayons du collecteur .....	88
Figure 5.26 : Variation de la puissance cinétique en fonction du rayonnement solaire pour différents rayon du collecteur .....	88
Figure 5.27 : Elévation de la température dans le collecteur pour différentes hauteurs de la cheminée, dans le cas de différents rayonnements solaires.....	89
Figure 5.28 : Variation du débit massique pour des cheminées de différentes hauteurs et pour différents rayonnement solaire .....	90

Figure 5.29 : Variation de la puissance cinétique en fonction de la hauteur de la cheminée, pour différents rayonnement solaire .....	91
Figure 5.30: variation de la pression totale en fonction de la hauteur de la cheminée pour différents rayonnements solaires.....	92
Figure 5.31: Position de la turbine à air .....	93
Figure 5.32 : Comparaison entre les résultats expérimentaux prélevés sur le prototype de Manzanares et les résultats de l'approche numérique .....	93
Figure 5.33 : Variation de la puissance électrique générée en fonction de la hauteur de la cheminée pour différents rayonnement solaire .....	94
Figure A.1 : Vue de la centrale SOLAR two avec 1926 héliostats autour de la tour.....	95
Figure A.2: Vue d'un héliostat de la centrale SOLAR two .....	95
Figure A.3: Capteur cylindro-parabolique de la centrale Californie.....	95
Figure A.4: Centrale solaire de Cramer Junction en Californie .....	95
Figure A.5 : Vue de capteurs paraboliques .....	95
Figure A.6 : Vue d'un panneau solaire .....	95
Figure A.7 : Etang solaire de l'université de Texas à El Paso .....	95

## Liste des tableaux :

Tableau 1.1: Principaux dimensions et données techniques du prototype Manzanares .....	11
Tableau 1.2 : Dimensions typique et production électrique.....	16
Tableau 1.3 : Coûts d'investissement et LEC.....	17
Tableau A.1 : Différents projet expérimentales de la centrale à tour.....	95
Tableau A.2 : Projets expérimentales de centrales à capteur cylindro-paraboliques .....	95
Tableau A.3: Comparaison entre les différentes technologies solaires utilisées pour la production électrique .....	95

# **ANNEXES**

## Annexe A : Electricité solaire

Il existe différentes technologies de production d'énergie électrique à base d'énergie solaire. Ces technologies sont classées en 2 grandes catégories : le thermique à basse température et le thermique à haute température. Le thermique à haute température englobe, la centrale à tour, la centrale à collecteurs cylindro paraboliques, et la centrale à collecteurs paraboliques. Tandis que pour le thermique à basse température on retrouve la cheminée solaire, l'étang solaire. Il existe aussi les panneaux photovoltaïques qui génèrent de l'électricité à partir de la lumière du soleil.

Nous présenterons dans ce qui suit le principe de chacune de ces technologies ainsi que les plus importantes réalisations, pour aboutir à une comparaison et enfin les conclusions générales que l'on peut en tirer.

### A.1 Centrale à tour :

Dans ce type de centrale, on utilise de nombreux miroirs qui concentrent le rayonnement solaire sur une chaudière placée en haut d'une tour (figure : A.1). Les miroirs ou "héliostats" sont conçus pour tourner avec le soleil (figure : A.2) et ainsi, réfléchir les rayons du soleil sur le foyer de la chaudière. Les héliostats n'utilisent que le rayonnement solaire direct. Le rayonnement solaire doit être dirigé vers le foyer en haut de la tour avec une grande précision afin de concentrer l'énergie thermique pour assurer des températures de près de 800°C. Différents fluides caloporteurs peuvent être utilisés : vapeur, sels fondus, air... Ils transportent cette chaleur vers un cycle aval (à vapeur, gaz ou cycle combiné).



Figure A.1 : Vue de la centrale SOLAR two avec 1926 héliostats autour de la tour



Figure A.2: Vue d'un héliostat de la centrale SOLAR two

Depuis 1980 et jusqu'à 1997, huit projets expérimentaux ont été réalisés (Tableau A.1). Le plus grand projet expérimental dans cette filiale est la centrale à tour SOLAR one, réalisée à Barstow, California. Avec 1800 héliostats, la production a atteint 10 MW, l'eau dans la chaudière était transformée directement en vapeur et utilisée dans une turbine.

Name/site	Power (MW)	Receiver coolant	Service period
Eurelios (Italy)	1	Water/steam	1980–1984
Sunshine (Japan)	1	Water/steam	1981–1984
IEA-CRS (Spain)	0.5	Sodium	1981–1985
Solar one (USA)	10	Water/steam	1982–1988
CESA 1 (Spain)	1.2	Water/steam	1983–1984
Themis (France)	2.5	Molten salt	1983–1986
MSEE (USA)	0.75	Molten salt	1984–1985
SES-5 (USSR)	5	Water/steam	1985–1989
PHOEBUS-TSA (Spain)	2.5	Air	1992–present
Solar two (USA)	10	Molten salt	Start in 1995

Tableau A.1 : Différents projet expérimentales de la centrale à tour

SOLAR two, est le résultat d'une rénovation complète de SOLAR one et l'introduction de la technologie de sel fondu comme fluide caloporteur. Cette centrale expérimentale du département d'énergie de l'entreprise Edison de Californie du Sud, a démarré en 1996. Les recherches sur ce site ont démontré que le système de stockage de la chaleur avec du sel de nitrate fondu est opérationnel. Ainsi, une partie de l'énergie thermique peut servir pour produire de l'électricité pendant les périodes nuageuses ou pendant la nuit. C'était une étape essentielle pour la commercialisation de la technologie.

Après une série de centrales expérimentales, la première centrale solaire à tour commerciale a vu le jour dans le début de 2007, et a commencé la production sur le site de Sanlúcar La Mayor en Espagne. PS 10 a été construite pour un investissement de 35 million d'Euro, Elle se présente sous la forme d'un vaste champ de près de 70 hectares, planté de 624 héliostats (miroirs orientables), d'une surface de 121 mètres carrés chacun, fixés sur des piliers de métal et disposés au pied d'une tour de 115 mètres.

Ces miroirs permettent de concentrer les rayons du soleil sur une chaudière en haut de la tour, afin d'obtenir une température entre 600°C et 1 000°C qui va chauffer le fluide et produire ainsi de la vapeur qui actionnera un système de turbines générant de l'électricité.

La première centrale d'une capacité de 11 MW a été inaugurée en mars 2007, elle doit produire 23 GWh d'électricité par an. Mais d'ici 2013, il est prévu de construire huit centrales à Sanlúcar La Mayor, pour porter la capacité du complexe à 302 MW, le cout totale de l'investissement est estimé à 1.2 milliards d'Euro. Actuellement les efforts se concentrent sur le stockage de la vapeur d'eau afin de s'en servir pour produire l'électricité pendant la nuit, et aussi sur l'hybridation du système avec d'autres énergies comme la biomasse ou les énergies fossiles.

## A.2 Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques :

Cette technologie appelée aussi SEGS pour Solar Electric Generating System, est utilisée dans l'une des plus grandes centrales thermiques solaires au monde, en Californie. Pour une production de 350MW.

Le système SEGS utilise de nombreuses rangées de capteurs cylindro-paraboliques réfléchissants, posés en rangées dans la direction est-ouest (figure A.3), d'une centaine de mètres de long. Les capteurs suivent le mouvement du soleil dans le sens de la hauteur et concentrent le soleil, de 30 à 100 fois, au point focal du miroir parabolique. L'énergie thermique reçue au point focal est absorbée par un tuyau métallique à l'intérieur d'un tube en verre sous vide (figure A.4). Le fluide (huile synthétique) qui circule à l'intérieur du tuyau, est chauffé à 400°C. Ce fluide est ensuite pompé à travers des échangeurs conventionnels afin de produire la vapeur surchauffée qui fait fonctionner une turbine/générateur électrique. Le cycle recommence lorsque le fluide refroidi dans les échangeurs et retourne au circuit des capteurs.



Figure A.4: Centrale solaire de Cramer Junction en Californie



Figure A.3: Capteur cylindro-parabolique de la centrale Californie

Avant 1984, plus de 10 tests et stations expérimentales ont été réalisés, dans le but de d'étudier l'utilisation de la thermique solaire à base de capteur cylindro-paraboliques dans la production d'énergie électrique (Tableau A.2).

Name/site	Power (MW)	Operation mode	On the grid
Coolidge (USA)	0.15	Solar	1980-1982
Sunshine (Japan)	1.0	Solar	1981-1984
IEA-DCS (Spain)	0.5	Solar	1981-1985
STEP-100 (Australia)	0.1	Solar	1982-1985
SEGS I (USA)	14	Hybrid	1985-present
SEGS II (USA)	30	Hybrid	1986-present
SEGS III-IV (USA)	30	Hybrid	1987-present
SEGS V (USA)	30	Hybrid	1988-present
SEGS VI-VII (USA)	30	Hybrid	1989-present
SEGS VIII (USA)	80	Hybrid	1990-present
SEGS IX (USA)	80	Hybrid	1991-present

Tableau A.2 : Projets expérimentales de centrales à capteur cylindro-paraboliques

Ce n'est qu'après 1984, que la première centrale commerciale à capteur cylindro-parabolique à vu le jour, en Californie avec une capacité de production de 14 MW. Depuis et jusqu'à 1991 le site à connu l'implémentation de plusieurs unité SEGS d'une puissance allant de 30 MW à 80 MW chacune, pour atteindre une puissance maximale de 354MW en 1991. La centrale est conçue pour fonctionner avec l'énergie solaire. Cependant, un appoint de gaz est utilisé pendant les périodes nuageuses ou en fin de journée afin d'assurer une production contractuelle. Cette centrale à produit depuis sa construction et jusqu'à 1997 plus de 5000 GWh, et elle est toujours en service. Avec cette expérience, SEGS est à présent la technologie solaire la plus développée pour la production électrique.

À présent il y a des négociations pour l'installation de centrale SEGS, dans plusieurs pays : Maroc, Espagne, Iran, Nevada et l'Inde.

### A.3 Les centrales à capteurs paraboliques :

Le rayonnement solaire réfléchi par le miroir parabolique converge vers un seul point, le foyer de la parabole (figure A.5). Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils suivent le soleil sur 2 axes. Le rapport de concentration est souvent supérieur à 2000 avec une température de 750°C. Si un moteur "Stirling" est placé au foyer de la parabole, la chaleur du soleil peut faire travailler un fluide comprimé afin de générer de l'électricité.

Chaque capteur est une mini-centrale, qui peut atteindre une puissance de 25 KW, et en associant plusieurs on peut augmenter la puissance. Cependant et jusqu'à présent, il n'existe pas de grande centrales électrique qui utilisent ce système.



Figure A.5 : Vue de capteurs paraboliques

#### **A.4 Le solaire photovoltaïques :**

L'énergie solaire photovoltaïque – à distinguer de l'énergie solaire thermique – provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité. Les cellules solaires sont assemblées en panneaux solaires (figure A.6) capables de convertir directement la lumière en électricité : c'est l'effet photovoltaïque qui fut découvert par Edmond Becquerel en 1839. L'énergie des photons de la lumière est alors transformée en un courant électrique continu et recueilli par un matériau semi-conducteur. La majorité des cellules actuelles utilisent le silicium cristallin comme semi-conducteur. Lorsque le matériau est constitué d'un seul cristal, on parle de silicium monocristallin qui se présente sous un aspect uniforme de couleur gris-bleuté ou noire. Quand il est élaboré à partir de plusieurs cristaux assemblés, on l'appelle silicium poly cristallin reconnaissable par une couleur bleue présentant l'aspect d'une mosaïque.

La fabrication des cellules photovoltaïques se situe essentiellement dans les pays industrialisés. Le Japon qui a fortement soutenu cette industrie se trouve actuellement dans la

première position, suivi de l'Europe, principalement tirée par l'Allemagne, les pays bas et l'Espagne. Viennent ensuite les Etats Unis d'Amérique, et la chine.



Figure A.6 : Vue d'un panneau solaire

Aujourd'hui, la part de la photovoltaïque dans la production totale électrique est très basse, mais elle affiche des taux de croissance relativement hauts. Les installations mondiales en photovoltaïques ont passé de 350 MW en 2001, à 1450 MW en 2005.

Cependant le prix très élevé des installations photovoltaïques, réduit énormément la compétitivité des PV par rapport aux autres énergies renouvelables.

#### **A.5 Etang solaire :**

Dans un étang normal, l'eau chauffée par le soleil devient plus légère et monte à la surface où la chaleur se dégage dans l'air ambiant. Ainsi, l'eau de l'étang reste à la température moyenne de l'air. Dans un étang solaire la thermo-circulation de l'eau est empêchée par le sel dissous au fond du bassin (figure A.7). En effet, l'eau salée chauffée par le soleil est trop lourde pour monter à la surface avec l'augmentation de température.

Un étang solaire est un bassin d'eau salée, naturel ou artificiel, composé de trois zones :

- La partie haute est peu salée, l'eau réagit comme dans un étang normal et la température reste proche de l'air ambiant.

- La partie basse est très salée, exposée au rayonnement solaire, elle peut devenir très chaude (60 à 100°C).
- La partie intermédiaire, où la salinité augmente avec la profondeur crée un gradient de densité qui empêche la thermo-circulation. Cette zone réagit comme une isolation thermique transparente, elle est traversée par le rayonnement solaire qui est absorbé et piégé par l'eau très salée en partie basse.

La chaleur accumulée au fond de l'étang solaire peut être extraite au moyen d'un échangeur de chaleur et servir pour des besoins industriels ou pour la production d'électricité. Comme la quantité de chaleur accumulée est très importante, l'étang peut fonctionner comme source de chaleur jour et nuit sans interruption.



Figure A.7 : Etang solaire de l'université de Texas à El Paso

Actuellement, il existe deux expériences de génération électrique à partir d'un étang solaire :

- L'étang solaire de En Boqeq sur la Mer morte : L'étang solaire d'environ 7.500 m<sup>2</sup> avec une profondeur de près de 3 mètres est utilisé en liaison avec un générateur électrique d'une puissance nominale de 150 kW.
- L'étang solaire de l'Université de Texas à El Paso (figure A.7) : L'étang solaire artificiel de 3.350 m<sup>2</sup> avec une profondeur de 3 mètres réalisé avec une feuille de

caoutchouc comme étanchéité. L'installation est étudiée par l'Université de Texas afin d'améliorer les performances et le fonctionnement pratique.

#### **A.6 Comparaison entre les différentes technologies solaires utilisées pour la production électrique :**

Dans cette comparaison les différents systèmes solaire sont représentés par des centrales de références, qui sont considéré comme des centrales typiques et modernes. Les données fournies correspondent à des études de cas ou bien à des rapports de performances. Cela implique que les conditions météorologiques et opératoires sont différentes pour les systèmes considérés (tableau A.3) ce qui fait que la comparaison directe entre les différents systèmes est difficile. Néanmoins, quelques conclusions générales peuvent être tirées de ces données.

Le meilleur rendement annuel solaire-électrique est obtenu par les systèmes à concentration (thermique à haute température), Capteur parabolique 16%, Capteur cylindro parabolique SEGS 14.9%, la tour à concentration 14.1% avec des surfaces assez faibles pour le collecteur. Par contre, il n'y a que les deux centrales solaires hybrides, capteur cylindro parabolique et la tour à concentration, qui peuvent fournir de grandes puissances pour les heures de pointes.

Les étangs solaires ont une grande puissance disponible, du fait de leur grande capacité de stockage. L'hybridation de ce système est possible mais elle n'est pas rentable. Le problème majeur avec ces systèmes, c'est les quantités trop importantes d'eau et de sel nécessaires pour leurs fonctionnements.

La cheminée solaire a été calculée avec des prix du verre, de béton et du fer disponibles dans le sud de l'Europe. Dans les pays sous-développés et avec des prix encore plus bas pour ces matériaux et pour la main d'œuvre, le coût de la centrale cheminée solaire peut descendre d'une manière significative.

Les technologies les plus adéquates pour les petites applications sont les panneaux solaires, et les collecteurs paraboliques, qui fonctionnent normalement avec des batteries. Si ces systèmes sont décentralisés du réseau alors un système de réserve qui fonctionne avec l'énergie fossile doit être installé.

La comparaison a montrée que chaque technologie a ces points forts et ces points faibles, et la décision finale d'un investissement quelconque doit d'abord passer par des

considérations particulières pour chaque site. Dans le but de faire une décision finale d'investissement dans ce domaine, le chef du projet doit d'abord consulter les spécialistes de chaque technologie.

**Annexe B:** LEC (Levelized Electricity costs):

Chaque technologie utilisée pour la production d'électricité dépend de plusieurs caractéristiques :

- Temps de construction de la centrale ;
- Puissance électrique générée ;
- Durée de vie de la centrale ;
- Le coût d'investissement ;
- Le coût de la production et de la maintenance.

A cause de ces différences, il est très difficile de faire une comparaison entre ces différentes technologies. Cependant, il existe un moyen appelé LEC (Levelized Electricity costs), il permet de quantifier le prix unitaire de l'électricité (kWh) générée pendant toute la durée de vie de la centrale, il permet une comparaison immédiate entre toutes les technologies utilisées.

La méthodologie pour le calcul du LEC, considère la production totale en énergie électrique que peut générer une centrale sur toute sa période de vie, divisée par la somme des coûts de la construction avec les taux d'intérêts, le coût de la production, la maintenance et toutes autres dépenses qui assurent le fonctionnement de la centrale.

Performances techniques							
Type de centrale		SEGS	Centrale à tour	Cheminée solaire	Dish-stirling	Etang solaire	Photovoltaïque
Puissance typique	MW	80	30	30	1	5	0.385
Radiation horizontale annuel globale	kWh/m <sup>2</sup> a	2176	2276	2300	2165	1850	1807
Charge complète annuelle	h/a	4200	3760	2894	1753	4316	1977
Capacité de stockage	h	0	0	13	0	12	0
Surface du collecteur	m <sup>2</sup>	470.265	160.428	3.803.913	4.675	925.055	3.571
Type de carburant		Solaire+Gasoil	Solaire+Gaz naturelle	solaire	solaire	solaire	solaire
Consommation spécifique de carburant	kJ/kWh	6282	6185	0	0	0	0
Utilisation annuel du rayonnement solaire	%	49.5	50.2	100	100	100	100
Rendement Solaire/électrique annuel		0.149	0.141	0.01	0.160	0.013	0.140
Impact environnementale							
Surface de la terre	m <sup>2</sup>	1.316.741	641.711	3.994.109	14.960	971.308	7143
Eau nécessaire pour le fonctionnement	m <sup>3</sup> /j	3222	0	0	0	11507	0
Eau pour le nettoyage du collecteur	m <sup>3</sup> /j	1176	401	0	12	0	0
Emissions relative de CO2	%	44.3	33.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Coût d'investissement dans la structure							
Collecteur	Moi. €	1132.97436	28.7897436	49.1538462	6.86153846	5.52307692	3.06153846
Autre composants	Moi. €	16.8871795	20.5589744	70.2153846	0	1.74871795	0.62564103
Equipement de puissance	Moi. €	77.9487179	35.0769231	0	0	5.25641026	0
Total	Moi. €/a	222.379487	92.8666667	131.307692	7.54871795	13.7846154	4.05641026
Total relatif	€/kW	2780	3095.38462	4376.92308	7.54666667	2756.92308	10.5389744
Coût de la centrale							
Coût du capital	Moi. €/a	20.9897436	8.76410256	12.3948718	0.71282051	1.3025641	0.38461538
Personnelle	Moi. €/a	2.01025641	1.36410256	0.17948718	0.10769231	0.1025641	0.03589744
Maintenance	Moi. €/a	4.44615385	1.85641026	0.32820513	0.14871795	1.37948718	0.04102564
Assurances	Moi. €/a	0.44615385	0.18461538	0.26153846	0.01538462	0.02564103	0.01025641
Coût du fuel	Moi. €/a	7.35897436	3.22051282	0	0	0	0
Coût total de la production	Moi. €/a	35.2564103	15.3948718	13.1641026	0.98461538	2.81025641	0.46666667
Coût d'électricité LEC	€/kWh	0.10512821	0.13641026	0.15179487	0.5625641	0.13025641	0.61435897

Tableau A.3: Comparaison entre les différentes technologies solaires utilisées pour la production électrique

