

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energétique et Énergies renouvelables

Thème

**Simulation des performances thermiques d'une
cheminée Solaire**

Devant le jury composé de :

Présenté par :

ATIA ABD ELMALEK

Président

- GHERNOUG Med-Selama

GHERBI MOHAMMED TAHER

Examineur

MAGDOUD SOUFYANE

Examineur

MENECEUR Nouredine

Encadreur

2016-2017

Remerciement

Je remercie avant tout, le dieu de m'avoir gardé en bonne santé de mener à bien ce modeste travail

Un grand mercier s'adresse particulièrement à mes parents qui m'a soutenu pour réaliser mes études et qui m'a toujours encouragé pour que je les termine.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur **MENECEUR Noureddine** pour l'élaboration de ce mémoire, ses aides précieuses, conseils, son soutien permanent et pour tous ses efforts.

Je tiens à remercier tous les enseignants et les travailleurs de **Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued** sans exception, et ne pas oublier le professeur caché de la Faculté d'électricité M. **Talal Bin Rashid Ghuai** et le Dr **Omar mokran d'université de Kasdi Merbah Ouargla**

Sans oublier tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicace

Tout d'abord je remercie الله de m'avoir donné la force d'accomplir ce travail

Je dédie ce modeste travail a :

** En Premier Lieu A Mes Parents Qui Ont Consenté Beaucoup De Sacrifices Pour Me Permettre De Réaliser Mes Objectifs. Qu'ils Trouvent Ici Toute Ma Reconnaissance Et Ma Gratitude. A Celui Qui M'a Indiqué La Bonne Voie En Me Rappelant Que La Volonté Fait Toujours Les Grands Hommes...A Celle Qui A Attendu Avec Patience Les Fruits De Sa Bonne Education,...*

**A Mon Encadreur*

** A mes sœurs MENECEUR Noured et Talal Bin Rashid Ghuai et OMAR MOKRAN*

** Mes Grands Père et Mères, A Mes Oncles Et Tantes Et Mes Cousins*

**A Toutes La Famille GHERNOUG et BEN AICHA et HASSI*

** A Tous Mes Ami(e)s Particulièrement : Med Sallah Berhouma, Ayoub changel, Abd Erazag AOUN, Khames, Farid, Ayoub, Adel, Taib, Yssin, FAICAL, et Toutes les filles qui me ont aidé*

**A Toutes Les Enstipiste*

**A Tous Qui Me Connu*

**A Tout La Promotion 2017 de : Energétique et Énergies renouvelables*

Merci mes chers parents ...

Introduction générale

Il est clair que l'énergie est de loin celle qui permet un véritable confort, l'une des causes du développement d'un pays. Ainsi, lorsque les énergies prédominantes sont le pétrole et le nucléaire, la recherche, tant publique que privée, retourne vers des énergies plus renouvelables, sur tout avec l'augmentation brutale du prix du pétrole,

De nos jours, la production mondiale d'énergie est réalisée à 74 % à partir de combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz). Alors que nous mesurons les conséquences de cette surexploitation, elles sont à la hauteur de cette démesure : risque d'épuisement des ressources fossiles, pollution atmosphérique et du sol ainsi que l'eau menaçant la santé publique et effet de serre additionnel qui réchauffe la planète. Cette évolution du monde occidental, dévoreuse d'énergie est continue et nourrit une croissance permanente, elle-même d'autant plus sollicitée qu'il est légitime que ses bien faits s'étendent à l'ensemble de la planète dont une grande partie bénéficie peu, voire ne bénéficie pas du tout.

Comment à la fois résoudre le problème de l'épuisement des carburants fossiles, combattre l'effet de serre et diminuer la pollution ? En agissant simultanément dans plusieurs domaines : réduire les consommations d'énergie par des actions « d'utilisation rationnelle » améliorer les efficacités énergétiques de toutes les installations consommatrices (chauffage, équipements industriels, véhicules automobiles... etc.) ; poursuivre l'utilisation de l'énergie nucléaire en souhaitant un jour pouvoir disposer de la fusion, dont on doit reconnaître qu'à l'heure actuelle elle tient encore de la partie scientifique ; faire appel à des énergies renouvelables ; et avoir recours à l'hydrogène.

Les ressources renouvelables sont variées et inépuisables. Leur conversion en énergie thermique, chimique ou électrique présente peu de dangers humains et écologiques. Elles se présentent sous de nombreuses formes, certaines étant naturellement stockables (comme la biomasse ou les barrages hydroélectriques), d'autres non, en particulier celles qui transforment les énergies renouvelables, intermittentes, aléatoires et non contrôlables : c'est particulièrement les cas des sources éoliennes et photovoltaïques. Or, ce sont précisément celles qui sont les plus prometteuses en termes de potentialité pour le futur.

Le sud algérien présente un gisement solaire important, la conversion d'énergie solaire à la forme électrique se présente sous différentes formes : photovoltaïque, cheminée solaire ...etc.

Le travail de notre mémoire est partagé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous avons présenté une recherche bibliographique détaillée sur les travaux de recherche existant sur les cheminées solaires et leur évolution au niveau mondiale, et aussi nous présenté un historique sur les projets réalisés à travers le monde.

Le deuxième chapitre représente un aperçu global sur les cheminées solaires et leurs avantages d'utilisations, ainsi qu'un aperçu global des différents composants de la cheminée . On décrit quelques indications relatives aux différentes cheminées existants à travers le monde et de présenté les travaux récents, et aussi dans ce chapitre nous avons indiqué les éléments principaux de la cheminée : comme le collecteur, l'espace de stockage de chaleur, l'espace d'échange de chaleur et la forme de la cheminée.

Dans le troisième chapitre nous avons exposé d'une façon détaillée les équations mathématiques employées pour le calcul des performances thermiques au sein d'une cheminée solaire. En utilisant un Logiciel CFD pour simplifier la complexité du phénomène thermique et de réduire significativement le temps des calculs.

Au quatrième chapitre nous avons présenté le Logiciel de simulation COMSOL Multiphysics, aussi les différents modules utilisant dans notre géométrie d'étude. A la fin de ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation, ces résultats sont représentés sous forme des tableaux et des courbes, ont été analysés et discutés.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale sur le problème étudié et sur les perspectives de cette étude.

LISTE DE FIGURE :

Chapitre I :

Figure (I.1) : Cheminée Solaire	03
Figure (I.2) : Représentative représentation de Leonardo-da Vinci	04
Figure (I.3) : Projet de moteur solaire par Isodoro Cabanyes	04
Figure (I.4) : Principe de la centrale électrique du professeur Dubos	05
Figure (I.5) : Schématique des équipements expérimentaux	08
Figure (I.6) : des schémas de certains prototypes.	09
Figure (I.7) : Le system complet de CCS.	14

Chapitre II :

Figure (II.1) : Schéma d'une centrale à cheminée solaire	15
Figure (II.2) : Principe de la cheminée solaire	16
Figure (II.3) : Le collecteur	18
Figure (II. 4) : Principe du stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des tubes noirs emplis d'eau	20
Figure (II. 5) : Principe du stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des tubes noirs emplis d'eau	20
Figure (II.6) : La cheminée	21
Figure (II.7) : Turbine pour Cheminée Solaire de large diamètre	22
Figure (II-8) : Toit transparent de la serre	23
Figure (II-9) : Schéma illustrant le fonctionnement de la cheminée solaire	23
Figure (II. 10) : Composants essentiels d'une cheminé	26

Chapitre III :

Figure (III-1) : Effet de serre au niveau du collecteur	29
Figure(III-2) : schéma explicatif des apports énergétiques	29
Figure (III-3) : Ascendance thermique par effet de cheminée	30
Figure(III-4) : Mouvement de l'air dans la cheminée	30
Figure(III-5) : Schéma des transferts dans la cheminée	31
Figure(III-6) : Echange thermique au niveau de la cheminée	34
Figure(III-7) : Echange thermique par conduction	35
Figure(III-8) : Echange par rayonnement au niveau de collecteur	36
Figure(III-9) : Echange thermique par conduction	37
Figure(III-10) : Echange par convection	37
Figure(III-11) : Les échanges thermiques par rayonnement	38
Figure(III-12) : Bilan massique	39
Figure(III-13) : Bilan énergétique	41

Chapitre IV :

Figure (IV.1) Différents modules physiques existent sous COMSOL	52
Figure (IV.2) Exemple de simulation d'un système thermique traité par COMSOL	53
Figure (IV.3) Exemple équations transferts chaleur dans les fluides	53
Figure (IV.4) la géométrie de cheminée	55
Figure (IV.5) Interface graphique de Logiciel de simulation	
Figure (IV.6) le maillage et les différentes faces de la géométrie de cheminée dans d'espace de travail	56
Figure (IV.7) distribution de la température de l'air en 2D à géométrie axisymétrique le long de la cheminée, dans la période de la matinée	58

Figure (IV.8) distribution de champ de température en 3D (ht) de période de la matinée 59

Figure (IV.9) distribution de la température de l'air en 2D à géométrie axisymétrique le long de la cheminée, dans la période de la sieste 59

Figure (IV.10) distribution de champ de température en 3D (ht) dans de période de la sieste. 60

LISTE DE TABLEAU :

Chapitre II :

Tableau (II.1) : Comparaison entre les coûts de production d'énergie	25
Tableau (II -2) : Comparaison avec Puissance	26
Tableau (II-3) : Comparaison avec Prix du kWh	27

Chapitre III :

Tableau(III-1) : Coefficient de transfert de chaleur par convection	32
--	----

Chapitre I :

Tableau (IV.1) : Caractéristique de paramètres lors d'essai d'une cheminée solaire	57
Tableau (IV-2) : les résultats de température de chaque période	58

NOMENCLATURE

Symbole	Définition	Unité
η_{turb}	Rendement de turbine	
E	Eclairement solaire	W/m ²
D_{coll}	Diamètre de collecteur	m
H_c	Hauteur de cheminée	m
η_c	L'efficacité de la cheminée	
n_{coll}	Efficacité du collecteur	
$\dot{Q}$	Quantité de chaleur	(J)
A_{coll}	Surface du collecteur	(m ²)
G	Radiation solaire	(w/m ²)
m	Débit massique	(Kg/s)
C_p	Capacité calorifique spécifique de l'air	(J/Kg.K)
ΔT	Différence de température entre le collecteur et l'air sortant	(K)
V_c	Vitesse de l'air à la sortie du collecteur (entrée de la cheminée)	(m/s)
A	Surface d'une coupe de la cheminée	(m ²)
h_{ift}	Représente le coefficient de convection de l'eau chaude	(W/m ² .K)
D_{int}	Représente le diamètre intérieur du tuyau	(m)
T_e	représente la température de l'eau chaude	(K)
$T_{p\text{int}}$	représente la température du tube interne	(K)
D_{ext}	représente le diamètre extérieur du tuyau	(m)
$T_{p\text{ext}}$	représente la température du tube externe	(K)
λ	représente la conductivité thermique du tube	(W/mK)
h_{ext}	représente le coefficient de convection de l'air	(W/m ² K)
T_a	représente la température de l'air	(K)
D_0	le diamètre hydraulique	(m)
λ_e	représente la conductivité thermique de l'eau chaude du tube	(W/mK)
μ_e	viscosité dynamiques de l'eau chaude	(Kg/m.s)
v_e	vitesse de l'eau chaude	(m/s)
ρ_e	la masse volumique de l'eau chaude	(Kg/m ³)
Re_a	le nombre de Reynolds de l'air	
v_a	la vitesse de l'air	(m/s)
ρ_a	la masse volumique de l'aire	(Kg/m ³)
H'	représente la hauteur du collecteur	(m)

H	représente la distance entre deux tubes	(m)
h_{ext1}	représente le coefficient de convection externe de l'air convection	
h_{ext2}	représente le coefficient de convection externe de l'air convection forcée	
h_{ext3}	représente le coefficient de convection externe de l'air convection mixte	
U	représente ce coefficient d'échange global	(W/m ² .K)
$\dot{m}_e$	représente le débit massique de l'eau chaude	(Kg/s)
$\dot{m}_a$	représente le débit massique de l'air frais	(Kg/s)
c_{pe}	représente la chaleur spécifique de l'eau chaude	(J/Kg.K)
c_{pa}	représente la chaleur spécifique de l'air frais	(J/Kg.K)
T_{ee}	représente la température de l'eau chaude d'entrée	(K)
T_{es}	représente la température de l'eau chaude d' sortie	(K)
T_{as}	représente la température de l'air d'entrée	(K)
T_{ae}	représente la température de l'air d' sortie	(K)
η_{turb}	le rendement global de la turbine	
ϕ	Densité du flux	(W/m ²)

φ

Densité du flux

(W/m²)

Chapitre I :

Etude bibliographique

I.1 Introduction :

La croissance significative du taux d'épuisement des sources d'énergie fossiles, ainsi que les difficultés environnementales infligées par le déploiement incontrôlé de ces sources à travers le monde, ont initié un mouvement mondial vers des sources d'énergie plus durables et plus propres. L'énergie solaire est sans doute la plus abondante dans les sources d'énergie renouvelables tandis que les autres rencontrent généralement des obstacles tels que la disponibilité discontinue et a également commencé à fournir une quantité considérable d'énergie pour diverses sections consommateurs d'énergie. La centrale à cheminée solaire (CCS) est une centrale thermique solaire simple capable de convertir l'énergie solaire en électricité. La cheminée solaire est une méthode relativement nouvelle pour produire l'électricité et a été améliorée et étudiée ces dernières années ceci est présenté par le chapitre.



Figure (I.1) : Cheminée Solaire

I.2 Développement de cheminée solaire et les résultats des articles scientifiques et des chercheurs :

Une tour solaire est une centrale à énergie renouvelable construite de manière à ce que de l'air d'une serre chauffée par le soleil soit à canaliser dans une cheminée, afin d'actionner des turbines pour produire de l'électricité. [1]

En 1896, M. Alfred Rosling Bennett a publié le premier brevet décrivant un « moulin à convection ». Même si, dans le titre du brevet et dans les revendications, le mot « jouet » apparaît clairement et même si, dans la description générale faite à l'intérieur du brevet, Un

modèle de ce « moulin à convection », construit en 1919 par Albert H. Holmes & Son (Londres) Pour démontrer le phénomène des courants de convection, est exposé au Science Museum de Londres.[1]

Léonard de Vinci a fait un croquis d'une tour solaire appelée fumée comme le montre la Figure I.1 Plus tard dans l'année de 1903, Isodoro Cabanyes, un ingénieur espagnol a été le premier à proposer l'idée d'utiliser une cheminée solaire pour produire de l'électricité. FigureI.2

1903 "La Energia Eléctrica",intitulé -Project de moteur Solaire. Dans cet engin bizarre, un collecteur ressemblant à une grande jupe chauffe l'air, et le porte vers le haut vers un ventilateur pentagonal dans une structure rectangulaire en brique vaguement ressemblant à une cheminée (sans feu). L'air chauffé fait tourner le ventilateur et génère de l'électricité 1

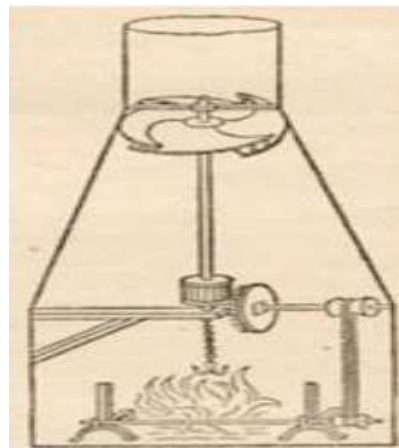


Figure (I.2) : représentation de Leonardo-da Vinci.



Figure (I.3) : Projet de moteur solaire par Isodoro Cabanyes.

Mountainside Solar Draft Tower - En 1926, le Professeur Bernard Dubos a proposé à l'Académie des Sciences française la construction d'une centrale solaire aéro-électrique en

Afrique du Nord avec sa cheminée solaire sur la pente d'une grande montagne. Une tour montante ascendante peut également fonctionner comme une serre verticale Figure (I.4).

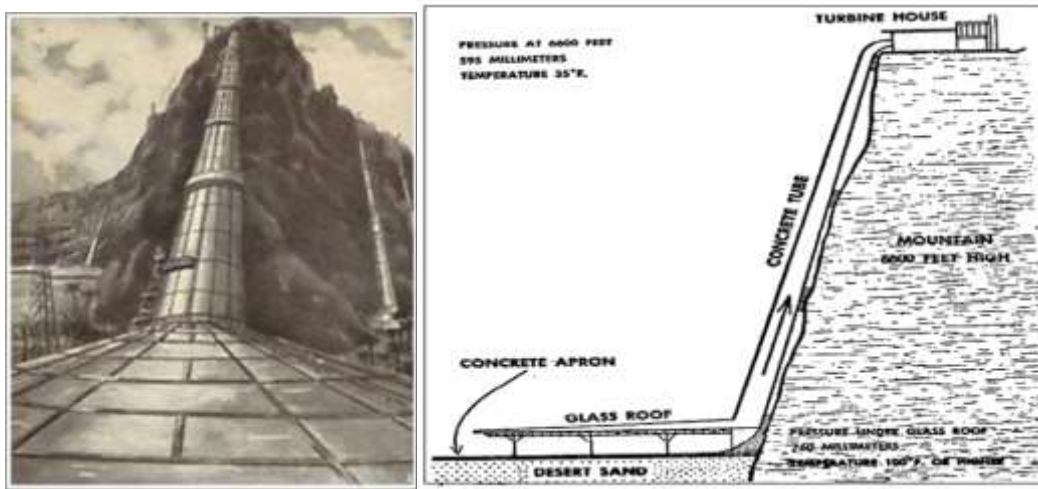


Figure (I.4) : Principe de la centrale électrique du professeur Dubos[1]

En 1956, un concept similaire à celui de la centrale de la cheminée solaire moderne se trouve dans un brevet de Ridley (1956). L'inventeur propose de créer un grand vortex en ajoutant tourbillon à l'écoulement d'air dans le collecteur et l'injection d'un courant d'air froid dans le centre de la cheminée. On espère que, avec l'aide des forces de Coriolis, le vortex créé peut être maintenue même bien au-delà de l'échappement de la cheminée et que cela conduira à une bonne performance du système sans la nécessité d'une cheminée très grand.

L'idée de la centrale solaire a été proposée par les ingénieurs allemands Jorg Schlaich et Rudolf Bergermann en 1976. La cheminée solaire se compose de trois éléments essentiels : un collecteur de toiture solaire, une cheminée et une turbine, qui ont été connus depuis des temps immémoriaux, Mais dans ce cas, combiné d'une nouvelle façon. Les efforts de recherche sur la cheminée solaire sont caractérisés par un certain nombre d'études théoriques, mais avec un travail expérimental insuffisant. Les essais effectués sur le premier prototype à Manzanares, en Espagne, avec une puissance maximale de 50 kW, ont montré que le concept est techniquement viable.

En 1982, un modèle expérimental à petite échelle d'une tour de tir solaire a été construit à Manzanares, Ciudad Real, à 150 km au sud de Madrid, en Espagne. La centrale a fonctionné pendant environ huit ans. Les torches de la tour ascendante, qui n'étaient pas protégées

contre la corrosion, ont échoué à cause de la rouille et ont échoué lors d'une tempête. Cela a causé la chute de la tour, et l'usine a été désarmée en 1989.[2].

Des matériaux peu coûteux ont été utilisés pour évaluer leur performance. La tour solaire a été construite en plaques de fer avec 1,25 mm d'épaisseur sous la direction d'un ingénieur allemand, Jörg Schlaich, financé par le gouvernement allemand. La cheminée avait une hauteur de 195 mètres et un diamètre de 10 mètres avec une zone de collection (pour effet de serre) de 46 000 m² (soit 45 000 m²), soit 244 m de diamètre, pour une puissance maximale d'environ 50 kW. Différents matériaux ont été utilisés pour les essais, tels que le simple ou double vitrage ou de plastique (qui s'est avéré ne pas être assez durable), et une section a été utilisée comme une serre réelle, la croissance des plantes sous le verre. Durant son fonctionnement, les données d'optimisation ont été collectées une seconde par seconde avec 180 capteurs mesurant la température intérieure et extérieure, l'humidité et la vitesse du vent. Il s'agissait d'une installation expérimentale qui ne vendait pas d'énergie pour produire des revenus.

ETATS-UNIS. Kulunk (1985) a été démontré une puissance électrique à micro-échelle à Izmit, en Turquie. Une installation avec un diffuseur à cônes multiples sur le dessus de la cheminée a été suggérée par Sampayo (1986) pour réaliser un flux d'air à grande vitesse. La dérivation de l'efficacité globale a été effectuée analytiquement par Mullet (1987). Padki et Sherif (1988) ont modifié les équations différentielles régissant le débit d'air dans la cheminée solaire afin d'expliquer la performance de la cheminée. Après un an, Padki et Sherif (1989a, b) ont mené une étude sur la viabilité des cheminées solaires pour la production d'électricité dans les zones rurales.

L'étude à grande échelle des résultats expérimentaux de Manzanares aux grandes centrales solaires a été réalisée par Schlaich et al. (1990).

Yan et al. (1991) ont exploité des corrélations pratiques utilisées pour dériver des équations de caractéristiques d'écoulement d'air, pour faire un modèle analytique modifié d'une cheminée solaire.

Padki et Sherif (1992) ont expliqué l'influence des dimensions et des conditions de fonctionnement sur la performance de la cheminée solaire. Pour la première fois, Kreetz (1997) a présenté une modélisation numérique de la centrale avec un collecteur équipé d'un

système de stockage d'eau qui a indiqué qu'une cheminée solaire pouvait fonctionner 24 heures sur 24, même la nuit. Pasumarthi et Sherif (1998 a, b) ont effectué une analyse expérimentale et théorique sur une plante pilote construite dans un collège.

Cheminée Structure : D'après Schlaich (1995), la cheminée d'un CCS économiquement viable à une hauteur de 950 m et un diamètre de 115 m. La plus grande structure autonome sur terre à ce jour est la tour CN à Toronto et mesure 553 m. Cela montre bien que la structure de la cheminée est un défi technique.

Schlaich (1995) discute de plusieurs façons de construire la cheminée et propose d'utiliser un tube en béton armé pour les grandes usines. Pour l'usine pilote de Manzanares, on a utilisé un tube métallique en tôle.[2]

Le prototype expérimental pilote a été construit en décembre 2002 X Jinping Zhou, et al.[3] se reconstruit à plusieurs reprises à des fins différentes. Afin d'effectuer une étude sur les performances des systèmes de cheminée solaire de différentes dimensions, l'équipement a été reconstruit. L'équipement reconstruit construit comme indiqué sur la Figure I.5 consistait en une cheminée à hauteur variable et un collecteur à rayon variable. Compte tenu des effets du coût et de la résistance, huit cheminées de PVC mesurant 0,35 m de rayon de 1 m de hauteur ont été utilisées comme cheminée. La hauteur de la cheminée peut varier de 1 à 8 m comme le montre la Figure I.5 (a). Le cadre sous le collecteur a été séparé en 35 parties comme montré à la Figure I.5 (b), Qui peuvent être déplacés librement si nécessaire. Ils ont été soudés par angle de fer pour assurer une résistance suffisante pour résister à un fort vent extérieur ou une forte pluie et être déplacés en toute sécurité. Par conséquent, le rayon du collecteur peut varier de 1 à 5 m. Un isolant thermique a été utilisé pour emballer la structure de cadre en acier du collecteur pour éviter de diffuser de la chaleur à travers elle. Afin de permettre l'effet de serre, un matériau transparent a été utilisé pour couvrir le collecteur sur le support. Généralement, il existe trois types de matériaux de couverture : le verre, le bardeau en plastique de verre-acier et le film de plastique de PVC. Nous choisissons le film en plastique de PVC parce qu'il n'est pas fragile et assez fort pour résister aux mouvements sévères pendant des expériences. L'absorbeur au sol se compose de cinq composants principaux, comme le montre schématiquement la Figure I.5 (c). La fonction de l'absorbeur sous le collecteur était l'absorption et le stockage de l'énergie solaire. L'eau dans les tuyaux (2) (6 cm de diamètre) a été choisie comme corps de stockage. Le stockage de la chaleur avec de l'eau a fonctionné

plus efficacement qu'avec le sol seul puisque la capacité calorifique de l'eau est environ cinq fois plus élevée que celle du sol. Par conséquent, il est avantageux de générer de l'électricité en continu pendant la nuit par l'eau libérant la chaleur stockée.

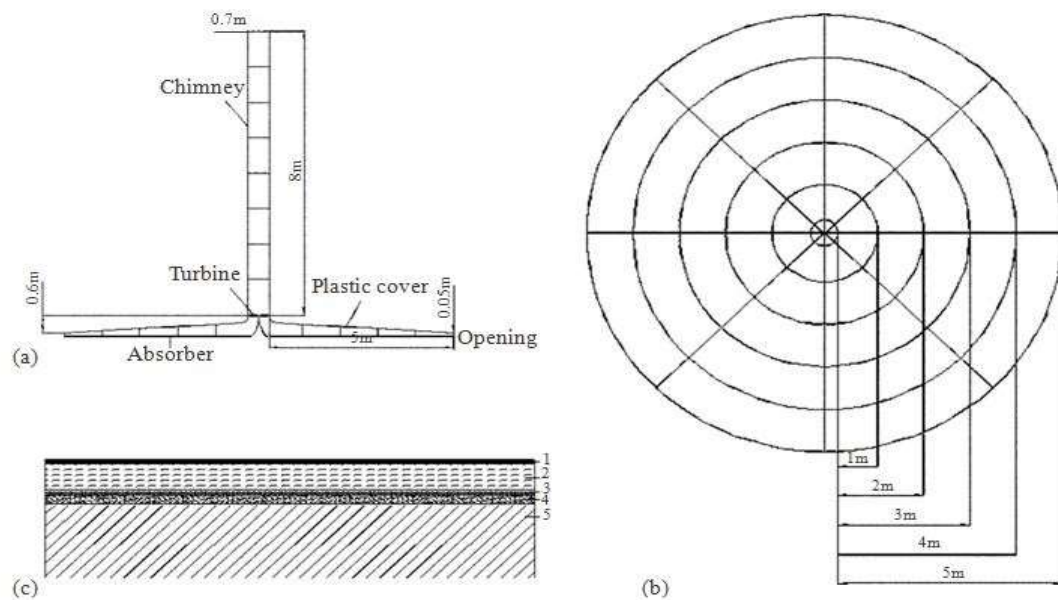


Figure (I.5) : Schématique des équipements expérimentaux : (a) vue latérale du matériel expérimental, (b) vue de dessus du support du capteur solaire, (c) vue latérale détaillée de l'absorbeur. [3]

En 2002, une installation pilote d'une CCS (Figure I.6.b) composée d'un collecteur d'air de 10 m de diamètre et d'une tour de 8 m de hauteur a été construite à Wuhan en Chine par (XP. Zhou et al), puis elle a été modifiée en plusieurs reprises. La toute dernière structure est composée d'un collecteur de couvercle en verre de 4.8 millimètres d'épaisseur et d'une tour en PVC. Basé sur le besoin d'installations pour des stratégies d'énergie à long terme, le ministère de la science et la technologie de Botswana a conçu et réalisé une installation, pour la recherche, une centrale CCS. La tour, de 22 m de hauteur et de 2 m de diamètre, était fabriquée de polyester renforcé par le verre, soutenu par une structure en acier, le toit du collecteur, de 160 m de diamètre et de 5 mm d'épaisseur, a été fabriqué par du verre clair. Une CCS d'une tour de 11 m de hauteur et d'un collecteur d'un mètre de diamètre (Figure I.6.d) a été construit dans le campus universitaire d'Universiade Federal de Minas Gerais, à Belo Horizonte à Brasil. Sa tour est un ensemble de 05 modules en bois de forme cylindrique de 2.2 m de hauteur chacun, couverts intérieurement et extérieurement de fibres de verre. Son collecteur de 25 m de diamètre et de 0.5 m fabriqué en utilisant un film de plastique soutenue

par une structure tubulaire en acier. Une autre installation pilote d'une CCS de 15 m de hauteur et d'un collecteur de 16 m de diamètre a été également montée dans le campus de l'université de Suleyman Demirel, à Isparta en Turquie. Un petit prototype faisant la combinaison d'un bassin solaire d'approximativement 4.2 m de diamètre et de 1.85 m de profondeur et d'une CCS d'une tour de 8 m de hauteur et de 0.35 m de diamètre (Figure I.6 f). Cela a été construit par Golder dans le campus de l'université de RMIT, à Bundoora en Australie en 2002.

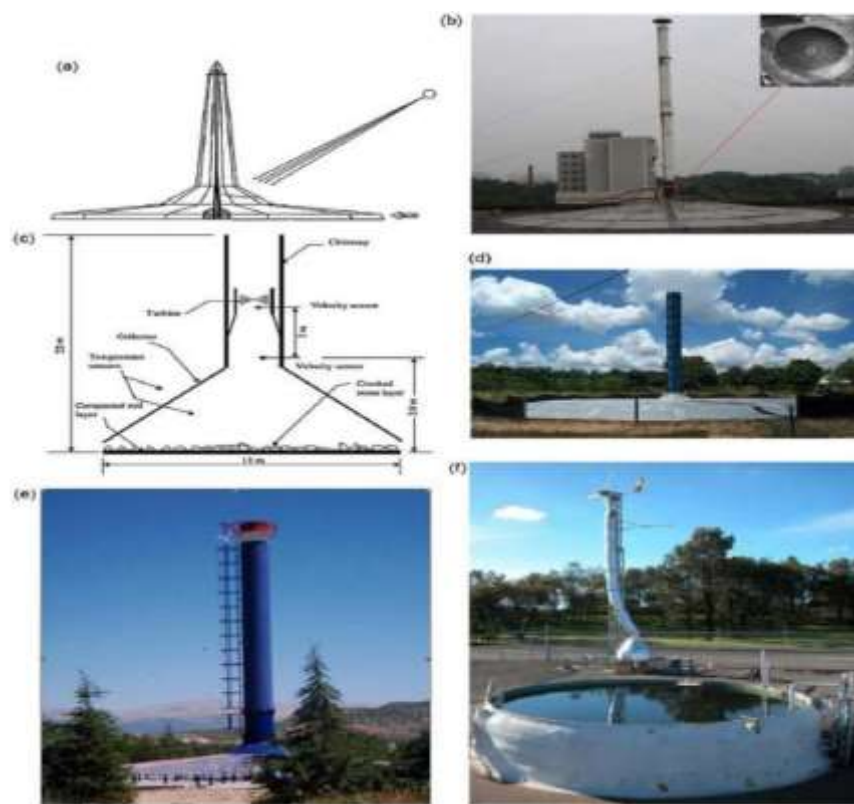


Figure (I.6) : des schémas de certains prototypes. [3, 4]

Une centrale de cheminée solaire, qui est destinée à être utilisée dans le nord-ouest de la Chine, a été publiée en 2002 par (Y.J. Dai H.B. Huang, R.Z. Wang). Cette cheminée a été conçue et analysée, à l'égard de trois comtés typiques dans la région autonome de Ningxia Hui. Ils ont été conclu les principaux points suivants :

1. La centrale de cheminée solaire est capable de produire 110-190 kW d'énergie électrique avec le soleil à la moyenne mensuelle toute l'année, et est suffisante pour répondre aux besoins des villages voisins. Le capteur solaire de l'usine peut également servir de serre à des fins agricoles.

2. La capacité de production d'énergie dépend de l'irradiance solaire, de la température ambiante, etc. De plus, la hauteur de la cheminée solaire, l'efficacité du collecteur, l'efficacité de la turbine et la rugosité de surface à l'intérieur de la cheminée sont également importantes pour la performance du système. Dans des conditions données, la capacité de production augmente avec l'augmentation de la hauteur de la cheminée solaire et de la zone du collecteur solaire. Il est également constaté que plus l'irradiance solaire est élevée, plus l'efficacité des composants est grande et plus la production d'électricité sera importante. La température ambiante, toutefois, joue un rôle mineur dans la production d'énergie pour la centrale solaire.[5]

En 2004 Pastohr et al. Ont présenté un résultat de simulation numérique dans lequel la couche de stockage a été considérée comme solide. Dans leur papier, des simulations numériques conjuguées de la couche de stockage d'énergie, du collecteur et de la cheminée ont été réalisées, et les caractéristiques du système de stockage de chaleur ainsi que le flux et le transfert de chaleur dans l'ensemble du système ont été étudiés [6]

En 2006 Pretorius et Kröger. Ont évalué l'influence d'une équation de transfert de chaleur convective développée, d'un coefficient de perte d'admission de turbine plus précis, d'un verre de toit de collecteur de qualité et de divers types de sol sur la performance d'une centrale à grande échelle de cheminée solaire. [7]

Dans la même année Ming et al. Ont présenté un modèle mathématique pour évaluer la pression statique relative et la force motrice du système de la centrale solaire et vérifié le modèle avec des simulations numériques. [8]

Une année plus tard Zhou, et al. Ont effectué une étude expérimentale dans une cheminée solaire. Une installation expérimentale pilote de cheminée solaire constituée d'un collecteur d'air de 10 m de diamètre et d'une cheminée de 8 m de hauteur a été construite. Les auteurs ont noté que la différence de la température entre la sortie du collecteur et celle de milieu ambiante peut atteindre jusqu'à 24,1 ° C, ce qui génère la force motrice du flux d'air dans le

montage. Leur analyse des données a montré une inversion de la température de l'air dans la dernière cheminée après le lever du soleil et cela est dû à l'augmentation du rayonnement solaire à partir du minimum. Le phénomène disparaît une fois qu'une force motrice est générée par une température suffisamment élevée pour la surmonter.[6]

Koonsrisuk et Chitsomboon. Ont proposé des variables sans dimension pour guider l'étude expérimentale du débit dans une petite cheminée solaire : une centrale solaire pour produire de l'électricité. La méthodologie de la dynamique computationnelle des fluides (CFD) a été utilisée pour obtenir des résultats qui sont utilisés pour prouver la similarité des variables proposées sans dimension.[6]

En 2009 Maia et al. Ont présenté une analyse théorique d'un écoulement turbulent à l'intérieur d'une cheminée solaire. Ils ont montré que les éléments physiques les plus importants dans un système de cheminée solaire sont les dimensions de la tour car ils provoquent la variation la plus significative du comportement d'écoulement. Une augmentation de la hauteur et du diamètre de la tour produit l'augmentation du débit massique et le décrétement de la température d'écoulement. [6]

Koonsrisuk & Chitsomboon. Ont étudié l'efficacité de la Ventilation de la cheminée solaire en comparant entre cinq des simulations mathématiques et cinq de la simulation CFD à la fois des recherches précédentes[6]

Un autre travail a été réalisé dans la même année par Koonsrisuk et al. Ces chercheurs ont décrit la recherche de construction théorique de la géométrie d'une cheminée solaire.[6]

En 2010 Chergui et al. Ont présenté une étude portant sur le processus de transfert de chaleur et l'écoulement du fluide dans le collecteur et la cheminée dans certaines conditions imposées. Ont été évalué la différence de température à travers le nombre de Rayleigh, le champ de vitesse et la distribution de température à travers le système. Les résultats obtenus ont montré que les caractéristiques de débit local il semble pour la plupart des nombres de Rayleigh, et l'écoulement semble laminaire sauf pour le nombre de Raleigh de 108 où il y a quelques perturbations.[6]

Sangi et al. Ont développé un modèle mathématique pour décrire avec précision le mécanisme de la centrale électrique de la cheminée solaire. Des profils numériques pour la

température, la vitesse et la pression dans le collecteur de la centrale solaire ont été présentés pour trois différents rayonnements solaires. [9]

Asnaghi, S.M. Ladjevardi en 2012. Ils ont écrit un article sur la performance des centrales solaires de cheminée en Iran. Dans ce travail un modèle numérique a été développé pour simuler la performance CCS dans les différentes régions de l'Iran. La cheminée solaire est considérée comme fournissant la demande électrique des villages hors-réseau et pour être utilisée comme serre agricole. Les résultats obtenus montrent que la production d'énergie d'une cheminée solaire dans les régions centrales et méridionales est plus élevée que dans les autres régions d'Iran, en raison de l'augmentation de l'irradiation solaire annuelle et des durées d'ensoleillement plus élevée.[10]

Récemment en 2012 dans le centre des énergies renouvelable Ghardaïa T. Chergui, et al. Ils ont écrit un article sur la Technologie de la cheminée solaire pour la production de l'énergie ils ont publié une étude détaillée sur la dynamique des fluides et de comment utiliser cette technologie est plus rentable. [11]

En 2013 (Fei Cao, Huashan Li, Liang Zhao, Tianjin Bao, Liejin Guo). Ils ont écrit un article sur la conception et la simulation de cheminée solaire d'un centrale électrique, la construction de ce programme est développée avec TRNSYS, dans cette étude ont évalué la performance de la CCS. Les tailles de configuration des CCS commerciaux sont conçues et les LEC de celles-ci sont analysées pour les régions ayant une abondance d'irradiation solaire différente. Ont été constaté que la production d'énergie par CCS est très pertinente par rapport à l'irradiation solaire locale et que le CCS à capacité de puissance plus élevée présente de meilleures caractéristiques coût-bénéfice. Ces chercheurs ont pensé que TRNSYS c'est un outil efficace et conventionnel pour évaluer à la fois les performances passagères et les moyennes du CCS. [12]

Plus récemment (Ehsan Shabahang Nia, M. Ghazi khani) en 2015 ; ont fait une numérique sur les caractéristiques de transfert de chaleur Amélioration d'une centrale de cheminée solaire grâce à une approche de contrôle de flux passif

Dans cette étude, le transfert de chaleur et la manipulation du flux de fluide dans un CCS

Via trois PFCD (passif contrôle du flux dynamique) différents est étudié numériquement. La portée de la recherche comprend la validation de l'approche CFD (contrôle du flux dynamique) employée par la simulation d'un prototype de cas contre les données expérimentales sur la répartition de la température le long du collecteur, après quoi l'approche validée de CFD est utilisée pour étudier le flux et les champs thermiques résultant de la mise en œuvre du contrôle du flux dispositifs. Les points suivants se distinguent par les résultats de cette étude :

Il est démontré que, dans tous les cas, le nombre de Nusselt augmente à mesure que les PFCD sont placés dans le collecteur en raison de l'amélioration de la synergie entre les champs de vitesse et de température en comparaison avec le cas de base.

L'amélioration du mélange de fluide chaud et froid par des fluides secondaires et des vortices peut être considérée comme un facteur contribuant à l'amélioration du transfert de chaleur dans la cheminée solaire.

L'agitation dans l'épaississement et le développement de la couche limite thermique, causée par la présence de PFCD, est considérée comme le facteur qui maintient un nombre moyen de Nusselt de surface absorbant plus élevé.[13]

L'étude sur la forme des obstacles montre que toutes les différentes formes fournissent l'agitation de la couche limite et le mélange de fluide ; Cependant, l'obstacle avec le profil triangulaire offre plus d'amélioration de la performance thermique, car non seulement le motif de flux dans la cheminée n'est pas bloqué, mais aussi le guidage vers la cheminée est fourni au débit.[13]

L'évaluation des grandeurs de vitesse à l'entrée de la cheminée révèle que les améliorations apportées aux caractéristiques de transfert de chaleur du collecteur entraînent des vitesses de vitesse d'air plus élevées comme prévu ; Puisque dans la sous-étude, le transfert de chaleur par convection sans CCS sert d'initiative pour le processus de conversion de l'énergie.[13]

Les stratégies de contrôle de flux passif ou actif semblent posséder la capacité d'améliorer la production d'énergie des CCS (obtenus jusqu'à 41,2% dans cette étude) et de réduire de façon définitive le coût de la production d'énergie, ce qui rend plus abordable par rapport aux technologies énergétiques conventionnelles [13]

En 2016, une étude expérimentale d'une cheminée solaire est faite par Mohamed Ramzi Jemli, Nabih Naili, Abdelhamid Farhat, Amen Allah Guizani. Au laboratoire des procédés

énergétiques et des énergies renouvelables dans le Centre de Recherches et des Technologies de l'Énergie (CRTEn) Borj-Cédria àTunisie. Ce prototype est le premier en Tunisie en termes d'implémentation est d'étude sur l'effet de cheminée des tours solaires, cette cheminée a été réalisé avec un collecteur de 8 m de diamètre et de 2 m de hauteur, la puissance électrique obtenus après le test est d'environ de 0.30 W/m^2 pendant l'été, et de 0.1 W/m^2 en hiver. Voir figure (I.7).



Figure (I.7) : Le system complet de CCS.

Ces chercheurs ont ressort que la production d'électricité est proportionnelle à la surface ensoleillée et la hauteur de la cheminée elle est influencée par la température ambiante.

Le système de stockage sera bénéfique pour couvrir la production de discontinuité pendant les périodes de nuit. L'optimisation du système de stockage et de la turbine peut améliorer la performance du prototype.[14]

I.3. Conclusion :

Nous avons suivi le travail des scientifiques et des chercheurs depuis la naissance de ce projet ,Le début des idées différentes par les membres de l'armée et des chercheurs et par l'application du professeur allemand (Jörg Schlaich,)et la transition vers des programmes d'application Et nous avons suivi quelques-uns des programmes utilisés dans les études et simulations théoriques ,après avoir recueilli toutes ses conclusions de ces scientifiques faire pour parvenir à un succès dans l'exploration de chaleur plus efficace à l'intérieur de la cheminée solaire ,tiger d'abord, certaines des stations qui nous rapprochent de ce projet et de l'identifier bien c'est le rôle du deuxième chapitre, qui affiche les aboutissants sur la cheminée solaire

1. Too, J.H. and C.N. Azwadi, A brief review on solar updraft power plant. J. Adv. Rev. Sci. Res, 2016. **18**: p. 1-25.
2. Fluri, T.P., Turbine layout for and optimization of solar chimney power conversion units. 2008, Stellenbosch: Stellenbosch University.
3. Zhou, X., et al., Simulation of a pilot solar chimney thermal power generating equipment. Renewable Energy, 2007. **32**(10): p. 1637-1644.
4. Zhou, X., et al., Experimental study of temperature field in a solar chimney power setup. Applied Thermal Engineering, 2007. **27**(11): p. 2044-2050.

5. Dai, Y., H. Huang, and R. Wang, Case study of solar chimney power plants in Northwestern regions of China. *Renewable Energy*, 2003. **28**(8): p. 1295-1304.
6. Tayebi, T. and M. Djezzar, Numerical Analysis of Flows in a Solar Chimney Power Plant with a Curved Junction. *International Journal of Energy Science*, 2013. **3**(4).
7. Chekirou, W., N. Boukheit, and T. Kerbach, Différents modes de transfert de chaleur dans un absorbeur d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique. *Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen*, 2007: p. 21-28.
8. Beneke, L., C. Fourie, and Z. Huan, Investigation of an octagon-shaped chimney solar power plant. *Journal of Energy in Southern Africa*, 2016. **27**(4): p. 38-52.
9. Sangi, R., M. Amidpour, and B. Hosseinzadeh, Modeling and numerical simulation of solar chimney power plants. *Solar Energy*, 2011. **85**(5): p. 829-838.
10. Asnaghi, A. and S. Ladjevardi, Solar chimney power plant performance in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012. **16**(5): p. 3383-3390.
11. Chergui, T., et al., Technologie de la cheminée solaire pour la production de l'énergie.
12. Cao, F., et al., Design and simulation of the solar chimney power plants with TRNSYS. *Solar Energy*, 2013. **98**: p. 23-33.
13. Nia, E.S. and M. Ghazikhani, Numerical investigation on heat transfer characteristics amelioration of a solar chimney power plant through passive flow control approach. *Energy Conversion and Management*, 2015. **105**: p. 588-595.
14. Jemli, M.R., et al., Experimental investigation of solar tower with chimney effect installed in CRTEn, Tunisia. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016.

Chapitre II :
*Généralisation sur les
cheminées solaires*

II.1 Introduction :

La technologie de la cheminée solaire est bien acceptée comme l'une des méthodes qui peuvent utiliser l'énergie solaire à grande échelle. Comme le montre la Figure (II.1), une centrale à cheminée solaire (CCS) se compose de trois composants : un collecteur solaire, une cheminée et un générateur de turbine. La lumière du soleil se transmet à travers le couvercle du collecteur solaire transparent et chauffe le sol ci-dessous. L'air ambiant (froid) entre dans les collecteurs de la périphérie et est chauffé alors qu'il s'écoule le long du collecteur vers le centre. En raison de la pression créée par la densité entre le flux d'air chaud et l'air ambiant, le flux d'air entre dans la cheminée et, avec le générateur de turbine, l'énergie cinétique du flux d'air est transférée

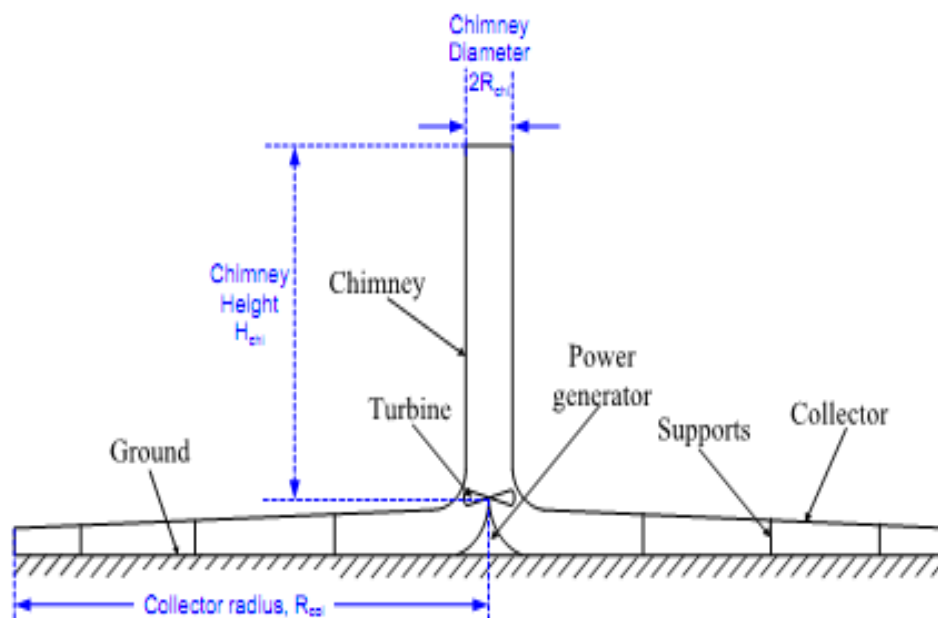
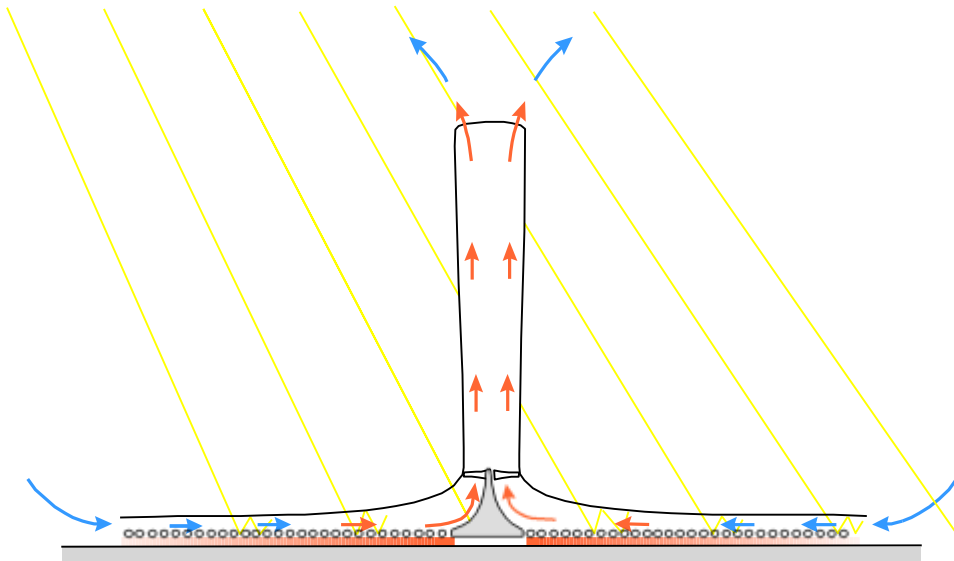


Figure (II.1) : Schéma d'une centrale à cheminée solaire

II.2 L'utilisation de trois anciennes technologies

L'homme a appris à utiliser activement l'énergie solaire à un stade précoce : les serres ont aidé à cultiver des aliments, des installations d'aspiration et de refroidissement de la cheminée et des moulins à vent broyé et de l'eau pompée.[1]

Les trois éléments essentiels de la cheminée solaire - le collecteur de toit en verre, la cheminée et les éoliennes - ont donc été familiers depuis des temps immémoriaux.



Une cheminée solaire-thermique les combine simplement d'une manière nouvelle (Fig.2)

Figure (II.2) : Principe de la cheminée solaire

Collecteur de toit en verre, tube de cheminée, éoliennes. L'air est chauffé par rayonnement solaire sous un toit de verre circulaire peu ouvert à la périphérie ; ce Et le sol naturel ci-dessous forme un collecteur d'air chaud. Une opération continue de 24 heures est garantie en plaçant des tubes étanches à l'eau sous le toit. L'eau se réchauffe pendant la journée et émet sa chaleur la nuit. Ces tubes ne sont remplis qu'une fois, aucune autre eau n'est nécessaire. Au milieu du toit se trouve une cheminée verticale avec de grandes entrées d'air à sa base. L'articulation entre le toit et la base de la cheminée est étanche à l'air. Comme l'air chaud est plus léger puis l'air froid, il monte la cheminée. L'aspiration de la cheminée attire ensuite plus d'air chaud du collecteur, et de l'air froid vient du périmètre extérieur. Ainsi, le rayonnement solaire provoque une augmentation constante de la cheminée. L'énergie qu'elle contient est convertie en énergie mécanique par des éoliennes à pression à la base de la cheminée,

Et dans l'énergie électrique par des générateurs conventionnels.

Une seule cheminée solaire avec une surface de toits glacés convenablement grande et une cheminée élevée peuvent être conçues pour générer de 100 à 200 MW en permanence 24 heures par jour. Ainsi, même un petit nombre de cheminées solaires peuvent remplacer une grande centrale nucléaire.

Les cheminées solaires fonctionnent tout simplement et présentent d'autres avantages :

- Le collecteur peut utiliser tout rayonnement solaire, direct et diffusé. Ceci est crucial pour les pays tropicaux où le ciel est souvent couvert. Les autres grandes centrales solaires thermiques à grande échelle, les systèmes paraboliques et les systèmes récepteurs centraux, qui appliquent des concentrateurs et ne peuvent donc utiliser que des rayonnements directs, sont à l'origine d'une détérioration.

- En raison du système de stockage de chaleur, la cheminée solaire fonctionnera 24h sur énergie solaire pure. Les tubes d'eau placés sous le toit de verre absorbent une partie de l'énergie rayonnée pendant la journée et la relâchent dans le collecteur la nuit. Ainsi, les cheminées solaires produisent de l'électricité aussi la nuit.

- Les cheminées solaires sont particulièrement fiables et ne risquent pas de se décomposer par rapport à d'autres centrales solaires. Les turbines, les transmissions et le générateur - soumis à un flux constant d'air - sont les seules pièces mobiles de l'usine. Cette structure simple et robuste garantit une opération qui nécessite peu de maintenance et bien sûr aucune combustion

Carburant.

- Contrairement aux centrales électriques traditionnelles (et aussi aux autres types de centrales solaires thermiques), les cheminées solaires n'ont pas besoin d'eau de refroidissement. C'est un avantage clé dans les nombreux pays ensoleillés qui ont déjà des problèmes majeurs avec l'eau potable.

- Les matériaux de construction nécessaires pour les cheminées solaires, principalement le béton et le verre, sont disponibles partout en quantité suffisante. En effet, avec l'énergie tirée de la cheminée solaire elle-même et la pierre et le sable disponibles dans le désert, ils peuvent être reproduits sur place.

- Des cheminées solaires peuvent être construites maintenant, même dans des pays industrialisés moins développés. L'industrie déjà disponible dans la plupart des pays est entièrement adaptée à leurs besoins. Aucun investissement dans une usine de haute technologie n'est nécessaire.

- Même dans les pays pauvres, il est possible de construire une grande usine sans dépenses élevées en monnaie étrangère en utilisant leurs propres ressources et leur force de travail ;

Cela crée un grand nombre d'emplois et réduit considérablement l'exigence d'investissement en capital et le coût de la production d'électricité.

Les cheminées solaires ne peuvent convertir qu'une faible proportion de la chaleur solaire collectée en électricité et ont donc un « faible niveau d'efficacité ». Mais ils compensent cet inconvénient par leur construction peu coûteuse et robuste, et leurs coûts de maintenance faibles. Les cheminées solaires ont besoin de grandes zones de collecte. Étant donné que l'exploitation économiquement viable des usines de production d'électricité solaire se limite à des régions où le rayonnement solaire est élevé, ce n'est pas un inconvénient fondamental, car de telles régions ont généralement d'énormes déserts et zones non cultivées. Et donc, « l'utilisation des terres » n'est pas un facteur particulièrement important, bien que, bien sûr, les déserts soient également des biotopes complexes qui doivent être protégés.

II.3. La technologie :

II.3.1. Le collecteur :



Figure (II.3) : Le collecteur

L'air chaud pour la cheminée solaire est produit par l'effet de serre dans un simple collecteur d'air composé uniquement d'un revêtement en verre ou en film plastique s'étendant horizontalement de deux à six mètres au-dessus du sol. La hauteur de la couverture augmente adjacente à la base de la cheminée, de sorte que l'air est détourné vers un mouvement vertical avec une perte minimale de frottement. Ce revêtement admet le composant de rayonnement solaire à ondes courtes et conserve le rayonnement à ondes longues à partir du sol chauffé.

Ainsi, le sol sous le toit se réchauffe et transfère sa chaleur à l'air qui coule radialement au-dessus de l'extérieur de la cheminée.

II.3.2. Le stockage d'énergie :

On a appris que la cheminée solaire fonctionne en présence du rayonnement solaire c'est à dire qu'il fonctionne pendant le jour.

L'absence du rayonnement (la nuit), va créer un arrêt de la cheminée c'est pour cela qu'on utilise le rayonnement du jour pour faire fonctionner la cheminée pendant la nuit par la méthode du stockage d'énergie. [2]

II.3.3. Les différentes méthodes de stockage :

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

II.3.3.1 Par chauffage du sable :

Le sable chauffe et absorbe la chaleur du soleil, le flux d'air chaud transmis à la cheminée assure la production d'électricité en faisant tourner la turbine à l'intérieur de la tour. [6]

Le sable est chauffé par le soleil pendant la journée et de l'énergie est stockée, puis la chaleur est libérée pendant la nuit et continue à faire fonctionner la turbine.

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

II.3.3.2 Par chauffage d'eau :

Comme les collecteurs produisent de l'air chaud par effet de serre, pour produire de l'électricité durant la nuit, des réservoirs noirs tubulaires emplis d'eau sont placés sous la serre comme montré dans la *Figure (II. 3)*.

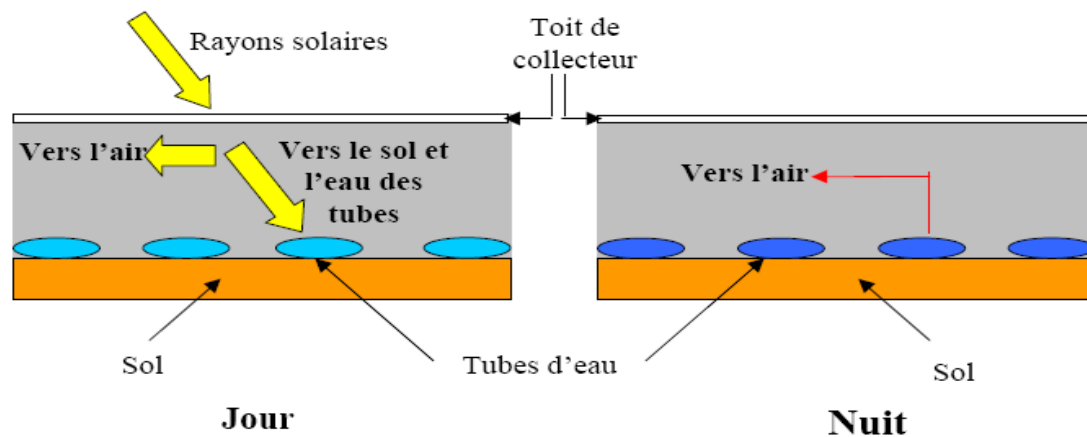


Figure (II. 4) : Principe du stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des tubes noirs remplis d'eau

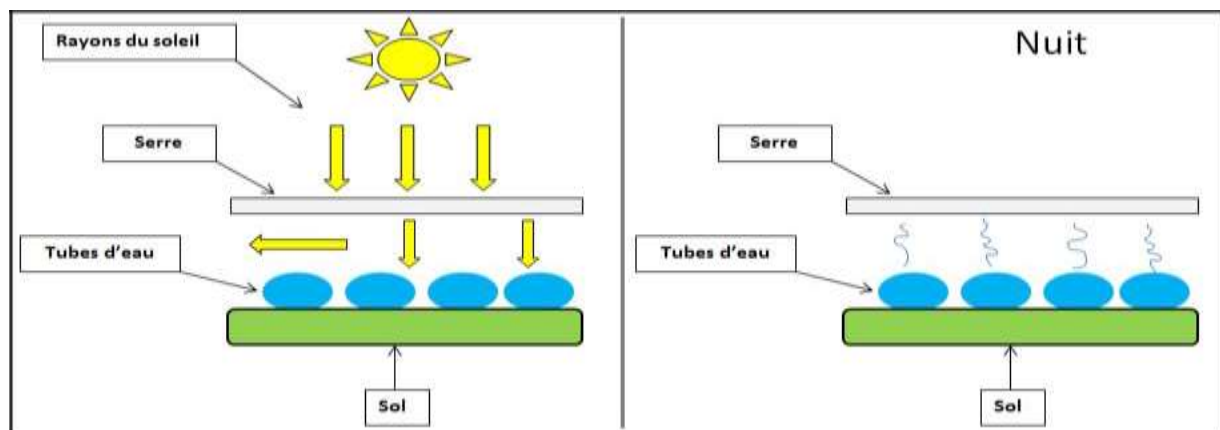
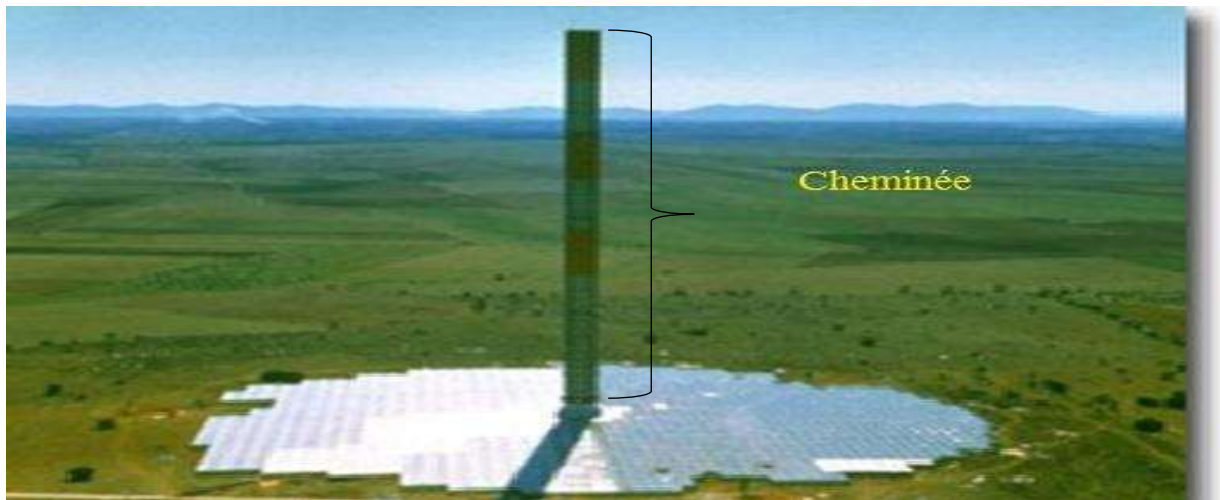


Figure (II. 5) : Principe du stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des tubes noirs remplis d'eau

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

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

l'électricité se vend 3 à 10 fois plus cher qu'aux heures creuses, améliorant ainsi la rentabilité.



II.3.4. La cheminée :

Figure (II.6) : *La cheminée*

La cheminée elle-même est le moteur thermique réel de la plante. Il s'agit d'un tube de pression avec une faible perte de frottement (comme un tube de pression hydroélectrique ou une conduite forcée) en raison de son rapport surface-volume optimal. Le soulèvement de l'air chauffé dans le collecteur est approximativement proportionnel à l'élévation de la température de l'air dans le collecteur et le volume (c'est-à-dire la hauteur H_c multipliée par le diamètre D_c) de la cheminée. Dans une grande cheminée solaire, le collecteur augmente la température de l'air d'environ 35 K. Cela produit une vitesse de rafraîchissement dans la cheminée d'environ 15 m / s. Il est donc possible d'entrer dans une usine de cheminée solaire opérationnelle pour maintenance sans difficulté.

Des cheminées de 1000 m de hauteur peuvent être construites sans difficulté. La tour de télévision à Toronto, au Canada, a presque 600 m de haut et des plans sérieux sont réalisés pour des racloirs de 2 000 mètres dans le Japon sismique. Mais tout ce qui est nécessaire pour une cheminée solaire est un cylindre creux simple et de grand diamètre, pas particulièrement mince, et soumis à très peu de requêtes par rapport aux bâtiments habités.

Il existe de nombreuses façons différentes de construire ce type de cheminée. Ils sont les mieux construits sans solde, en béton armé. Mais les tubes garnis, leur peau en tôle ondulée, ainsi que des modèles de câbles avec revêtement ou membranes sont également possibles.

Toutes les approches structurales sont bien connues et ont été utilisées dans les tours de refroidissement. Aucun développement spécial n'est nécessaire.

II.3.5. Les turbines :



Figure (II.7) : Turbine pour Cheminée Solaire de large diamètre

En utilisant des turbines, la sortie mécanique sous forme d'énergie de rotation peut être dérivée du courant d'air dans la cheminée. Les turbines dans une cheminée solaire ne fonctionnent pas avec une vitesse étagée comme un convertisseur d'énergie éolienne à courant libre, mais comme un turbogénérateur à vent sous pression monté en pression, dans lequel, de manière similaire à une centrale hydroélectrique, la pression statique est convertie en énergie rotative en utilisant une turbine encastrée - dans cette application installée dans un tuyau. La puissance de sortie d'une turbine sous pression enroulée sous pression de ce type est environ huit fois supérieure à celle d'une turbine à air libre à gradient de vitesse du même diamètre. La vitesse de l'air avant et après la turbine est à peu près la même. La production obtenue est proportionnelle

Par rapport au produit du débit volumique et à la chute de la pression à la turbine. Dans le but de maximiser le rendement énergétique, le but du système de régulation de la turbine est de maximiser ce produit dans toutes les conditions d'utilisation.

II.4. Principe de fonctionnement d'une tour solaire :

Le toit transparent de la serre, qu'on voit sur la **Figure (II.2)**, laisse passer les faibles longueurs d'onde de la radiation solaire et retient le rayonnement de grandes longueurs d'onde. Donc une partie du rayonnement solaire chauffe directement l'air sous la serre et l'autre partie est absorbée par le sol qui la restitue ensuite sous forme de chaleur.

Comme l'air est “chauffé” il se dilate et commence à monter et à se déplacer sous la serre vers la cheminée comme illustré sur la **Figure (II-9)**. Il acquiert aussi progressivement de la vitesse.



Figure (II-8) : Toit transparent de la serre

L'air chauffé sous la serre pénètre dans la cheminée placée en son centre et crée un courant d'air ascendant. Au pied de la cheminée des turbines équipées de générateurs produisent de l'électricité.

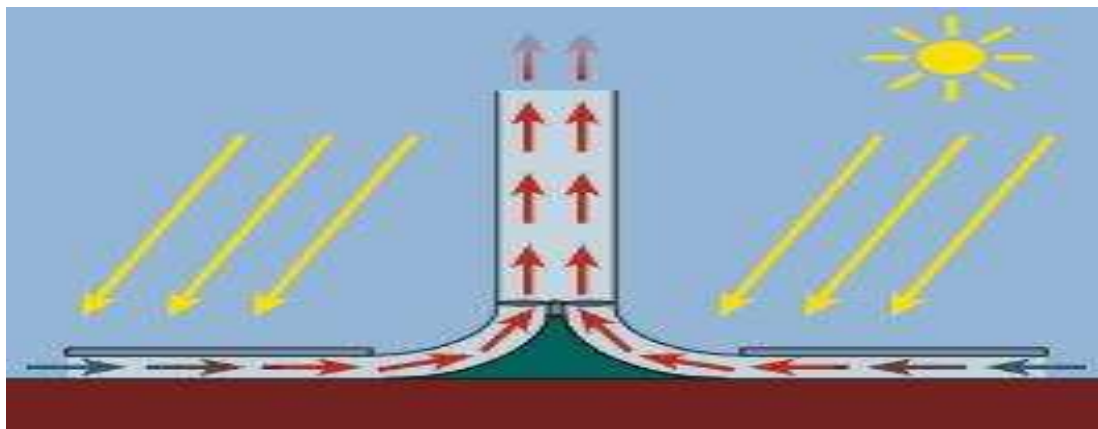


Figure (II-9) : Schéma illustrant le fonctionnement de la cheminée solaire

II.5. Avantages et Inconvénients d'une tour solaire :

Nous représentons les avantages et les inconvénients comme suit :

II.5.1 Avantages :

- ☐ les cheminées solaires sont particulièrement adaptées à la production d'électricité dans les déserts et les terres arides sans valeur, mais riches en soleil.
- ☐ Elles produisent de l'électricité 24 heures par jour à partir d'énergie solaire uniquement.
- ☐ Aucun carburant n'est nécessaire.
- ☐ Elles ne nécessitent pas d'eau de refroidissement et sont adaptées à des régions où règne une sécheresse extrême (pour mémoire, même les centrales solaires à concentration CSP ont besoin d'eau comme source froide!).
- ☐ La Tour Solaire est particulièrement fiable et nécessite peu de maintenances comparativement aux autres usines de production d'électricité.
- ☐ Les matériaux nécessaires à la construction d'une Cheminée Solaire: béton, verre et acier, sont disponibles en quantités suffisantes partout dans le monde.
- ☐ Leur construction ne provoque pas de dommages écologiques et peut employer la main d'œuvre locale.
- ☐ Leur fonctionnement ne consomme pas de ressources.

II.5.2 Inconvénients :

- ☐ Quelques estimations disent que les coûts d'investissement pour la production d'électricité à partir de Cheminées Solaires est 5 fois plus important que celui à partir d'une turbine à Gaz. Bien qu'aucun carburant fossile ne soit nécessaire les investissements nécessaires pour une Tour Solaire sont importants.
- ☐ La structure elle-même est massive et requiert beaucoup d'expertise en ingénierie et de matériaux pour sa construction.

II.6. Coûts de production énergétique :

Avec le soutien des entreprises de construction, l'industrie du verre et les fabricants de turbines, une estimation des coûts plutôt exacte pour une cheminée solaire de 200 MW pourrait être compilée. Nous avons demandé à une grande utilité « Energie Baden-Württemberg » (anciennement EVS / BW) de déterminer les coûts de production d'énergie par rapport aux centrales à cycle combiné et combiné selon des méthodes égales et commun

Tableau (II.1) : Comparaison entre les coûts de production d'énergie d'une cheminée solaire (2 cheminées solaires à 200 MW chacune) et des centrales à 400 et à 400 cycles de centrales à cycle combiné selon les calculs actuels de gestion commerciale

Proportion of	Cheminée solaire Pf/kWh	Charbon Pf/kWh	2 x C.C. Pf/kWh
Investissement	11,32	3,89	2,12
Carburant	0,00	3,87	6,57
Personnel	0,10	0,78	0,31
Réparation	0,52	0,92	0,83
Assurance	0,01	0,27	0,12
Autres coûts de fonctionnement	0,00	1,16	0,03
Impôt	2,10	0,69	0,37
Total	14,05	11,58	10,35
Mise en service en 2001 Puissance : 400 MW Heures de service : 7445 h / a Énergie annuelle: 2978 GWh	Investissements propres 1/3 à 13,5% Investissement externe 2/3 à 8% Taux d'intérêt total : 10,67% Taux d'imposition: 30%		

Sur le plan purement commercial, avec un taux d'intérêt brut d'environ 11% et une période de construction de 4 ans au cours de laquelle les coûts d'investissement augmentent déjà de 30% (!) L'électricité provenant des cheminées solaires est seulement 20% plus coûteuse que celle du charbon.

Dans le cas de la cheminée solaire, l'intérêt sur l'investissement fixe régit le prix de l'électricité, alors que, dans le cas des centrales à combustibles fossiles, les coûts variables du carburant sont le facteur décisif

En réduisant simplement le taux d'intérêt à 8% d'électricité provenant des cheminées solaires, deviendrait compétitif aujourd'hui. Dans les pays à faibles salaires, les coûts diminuent davantage, en particulier ceux du collecteur de toit en verre, qui représente à eux seuls 50% des coûts globaux.

En revanche, il existe plusieurs avantages :

Aucun dommage écologique et aucune consommation de ressources, pas même pour la construction. Les cheminées solaires sont principalement constituées de béton et de verre qui sont fabriqués à partir de sable et de pierre, plus l'énergie auto générée. Par conséquent, Dans

les zones désertiques - avec du sable et de la pierre inépuisables - les cheminées solaires peuvent se reproduire.

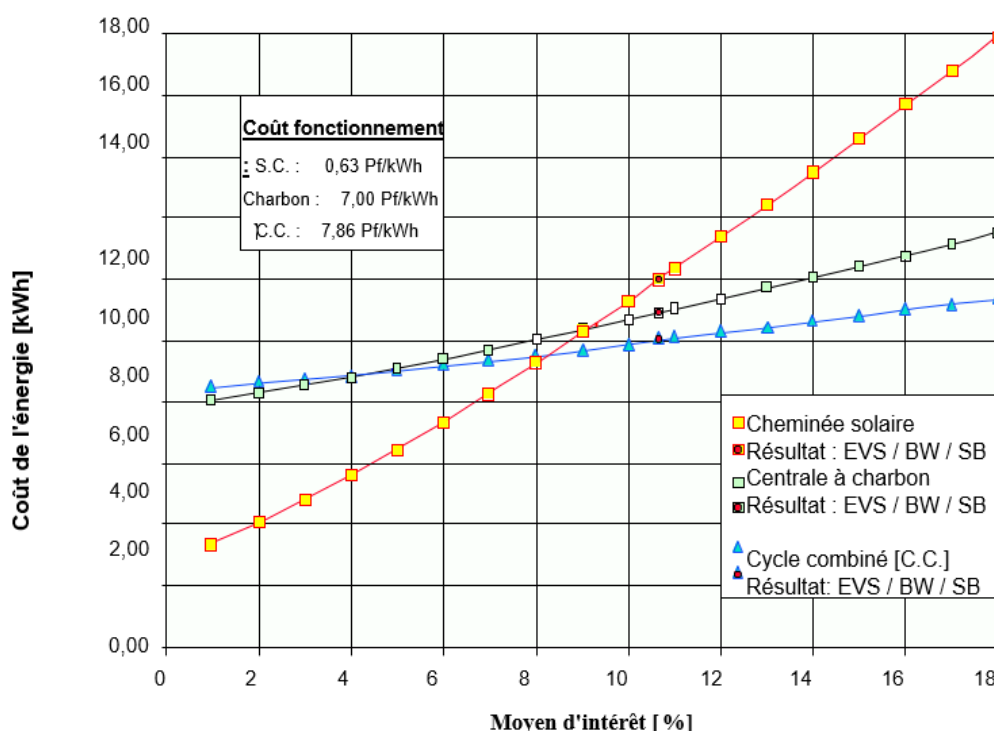


Figure (II.10) : Coûts de production d'énergie provenant des cheminées solaires, du charbon et des centrales à cycle combiné en fonction du Moyen d'intérêt [4]

II.7. Comparaisons avec d'autres types de centrales :

II.7.1. Comparaison avec Puissance :

C'est une comparaison avec le photovoltaïque et le nucléaire qui, indique un avantage au profit du nucléaire (Tableau II -2)

Tableau (II -2) : Comparaison avec Puissance entre (Tour solaire, Photovoltaïque, Nucléaire)

Tour solaire	Photovoltaïque	Nucléaire
Manzanares : 50 kW	Ordinaire : 5 MW	Ordinaire : 1000 MW par réacteur
Ciudad Real : 40 MW	Les plus grandes : 60 MW	Civaux : 2*1450 MW
Australie : 200 MW	Andosol 1, 2, 3 : 3*50 MW	EPR : (Européen Pressurise Recto) 1600 MW
Namibie : 400 MW		

II.7.2. Comparaison avec Prix du kWh :

Cet autre niveau de comparaison avec le photovoltaïque et le nucléaire sur le plan prix du kWh produit indique un avantage au profit des Tours solaire **Tableau (II. -3) :**

Tableau (II-3) Comparaison avec Prix du kWh (Tour solaire, Photovoltaïque, Nucléaire) [3]

Tour solaire	Photovoltaïque	Nucléaire
Estimations : 7 € cents pour une centrale de 200 MW 20 € cents pour une centrale de 5 MW Green Tower : 2 € cents	Amarelle (Portugal) : 28 € cents (46 MW) Andosol (Espagne) : 27 € cents (50 MW) Mildura (Australie) : 9 € cents (154 MW)	Plus vague : 11 € cents, sans compter le prix de l'élimination des déchets, des assurances accidents, et du démantèlement des centrales.

II.9. Conclusion :

Les coûts d'investissement (élevés) sont presque exclusivement attribuables aux coûts de main-d'œuvre.

Cela crée des emplois et un produit net élevé pour le pays avec des recettes fiscales accrues et des revenus sociaux réduits

Les coûts (= la dignité humaine, l'harmonie sociale) et, en plus, les importations coûteuses de charbon, de pétrole, de gaz qui est particulièrement bénéfique pour les pays en développement qui libèrent des moyens pour leur développement.

Nous n'avons d'autre choix que de faire quelque chose pour le consentement énergétique, l'environnement et surtout pour les milliards de personnes défavorisées dans le troisième monde.

Mais nous ne devrions pas leur proposer des livraisons, dont un multiple nous retrouve de manière trompeuse en imposant un taux d'intérêt élevé sur leur dette. Au lieu de cela, nous devrions opter pour le partage d'emplois à l'échelle mondiale. Si nous achetons de l'énergie solaire dans les pays du tiers monde, ils peuvent se procurer nos produits. Un marché mondial de l'énergie avec une production d'énergie solaire à grande échelle, complétant

essentiellement l'énergie hydroélectrique, les combustibles fossiles et nucléaires, n'est pas un rêve utopique !

Par conséquent, il est absolument essentiel de construire et d'exploiter une grande cheminée solaire

Dans le chapitre suivant sera une étude mathématique des phénomènes qui se produisent à l'intérieur de la cheminée solaire, une modélisation de l'échange de chaleur

Références

- [1] Meza, E.G., *Schlaich Bergermann und Partner*. El domo del Palacio de los Deportes de la ciudad de México se convirtió en la estructura olímpica para deportes bajo techo de mayores dimensiones construidas hasta esa fecha.: p. 443.
- [2] Schlaich, J. *Das Aufwindkraftwerk: Strom aus der Sonne*. Stuttgart: Deutsche Verlagsanstalt, 1994, ISBN 3-421-03074-X.
- [3] Schlaich, J.; Schiel, W.; Friedrich, K. Abschlussbericht Aufwindkraftwerk: Übertragbarkeit der Ergebnisse von Manzanares auf größere Anlagen. BMFT-Förderkennzeichen 03242490. Schlaich Bergermann und Partner 1990.
- [4] Becker, M.; Meinecke, W. *Solarthermische Anlagen-Technologien im Vergleich*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1992.
- [5] VDEW Vereinigung deutscher Elektrizitätswerke:
Stromerzeugungskostenvergleich 1990 in Betrieb gehender großer Kern- und Steinkohlekraftwerksblöcke.
- [6] Heise, O. Schadensvermeidung. Ein Weg zur Abschätzung der externen Kosten der Energieversorgung. BWK, Band 45, 1993, Nr. 3.

Chapitre III

*modélisation d'échange
thermique dans la chemine
solaire*

III.1. Phénomènes énergétiques régissant les tours solaires :

III.1.1 Effet de serre :

L'effet de serre est provoqué par une paroi transparente (ou translucide) disposée sur une enceinte close. La paroi transparente permet une bonne pénétration du rayonnement solaire mais présente un barrage aux rayonnements infrarouges induits.

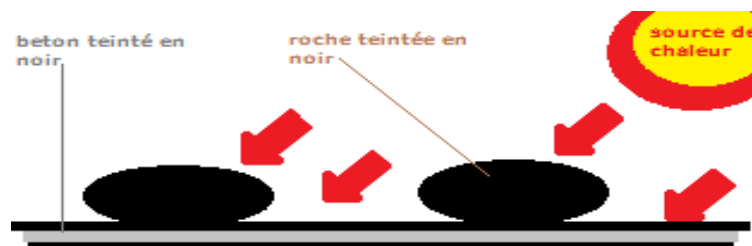
Plus précisément, l'air extérieur s'engouffre sous la verrière, il est réchauffé par le phénomène d'effet de serre. En effet, les rayons du soleil traversent les capteurs solaires, puis une partie de ces rayons est absorbée par le sol, l'autre partie est réfléchiée en direction des capteurs qui vont réitérer ce phénomène. Les rayonnements dégagés par le sol et l'effet de serre permettent de réchauffer l'atmosphère, entre le sol et la verrière. [1]



Figure (III-1) : Effet de serre au niveau du collecteur

III.1.2. Apports solaires

Les apports solaires indirects proviennent d'une paroi accumulatrice (absorbeur stockeur) interposée entre le soleil et le volume d'air à chauffer. Elle absorbe le rayonnement solaire, transformé aussitôt en chaleur et elle transmet naturellement cette énergie thermique dans l'air.



Figure(III-2) : schéma explicatif des apports énergétiques

III.1.3. Effet de la cheminée

L'effet de cheminée est la tendance d'un fluide de s'élever quand il s'échauffe, en raison de la diminution de sa densité. On utilise ce phénomène thermique naturel pour évacuer la surchauffe de l'intérieur d'une construction en facilitant la sortie de l'air tiède ou chaud à travers l'ouverture située au sommet de la cheminée. Ce tirage thermique peut induire une dépression intérieure susceptible d'aspirer l'air plus frais du dehors à travers des ouvertures en partie basse du collecteur.

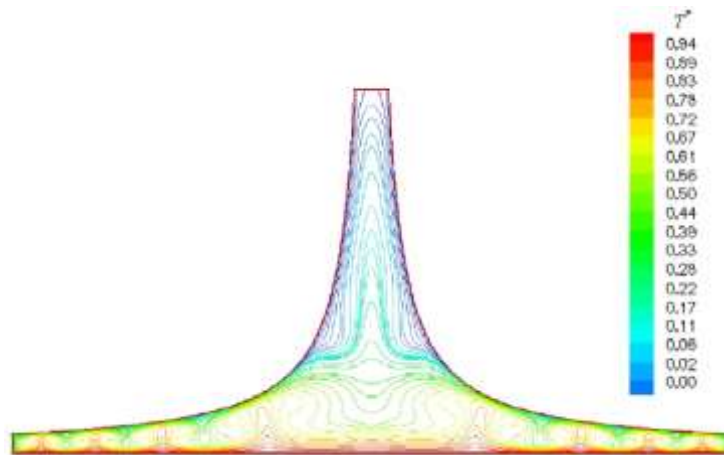
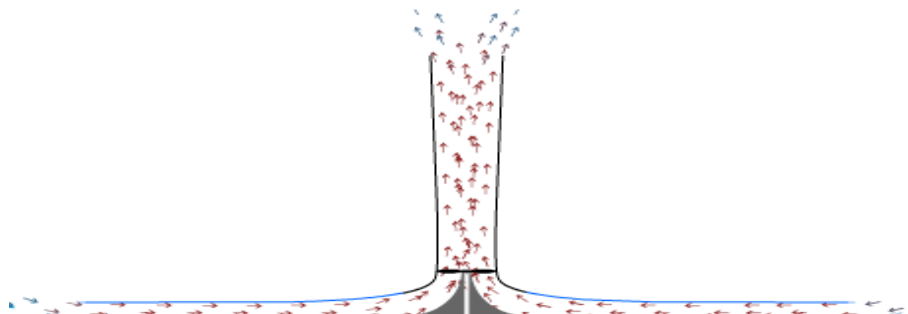


Figure (III-3) : *Ascendance thermique par effet de cheminée*

III.1.4. La convection

La convection est le déplacement de chaleur au sein d'un fluide par le mouvement de l'ensemble de ses molécules. C'est un mouvement convectif.

La thermo-circulation est un mouvement convectif d'un fluide qui se produit lorsqu'une source de chaleur (soleil) entretient l'ascendance de l'air chaud, remplacé aussitôt par l'air plus frais, dans une boucle permanente de circulation.



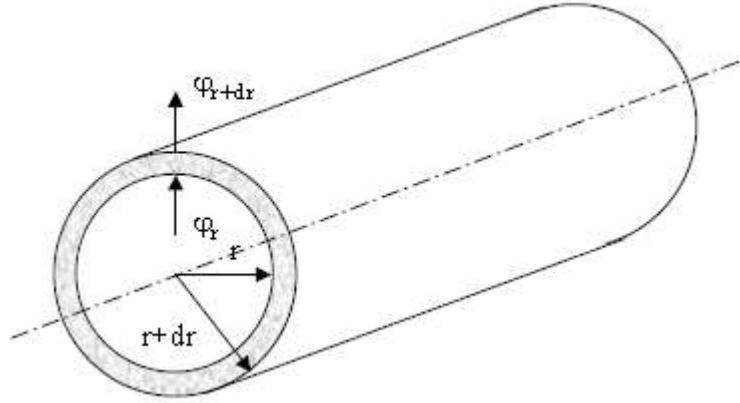
Figure(III-4) : *Mouvement de l'air dans la cheminée [1]*

III.2. Echanges thermiques dans une tour solaire :

III.2.1. La cheminée

III.2.1.1. Echange thermique par conduction

On considère la cheminée comme un cylindre creux de conductivité thermique λ , de rayon intérieur r_1 , de rayon extérieur r_2 , de longueur L , les températures des faces internes et externes étant respectivement T_1 et T_2 . On suppose que le gradient longitudinal de température est négligeable devant le gradient radial.



Figure(III-5) : Schéma des transferts dans la cheminée

Effectuons le bilan thermique du système constitué par la partie de cylindre comprise entre les rayons r et $(r+dr)$:

$$\varphi_r = \varphi_{r+dr} \quad (\text{III. 1})$$

$$\text{Avec} \quad \varphi_r = -\lambda 2\pi r L \left(\frac{dT}{dr} \right)_r \quad (\text{III. 2})$$

$$\text{Et} \quad \varphi_{r+dr} = -\lambda 2\pi (r + dr) L \left(\frac{dT}{dr} \right)_{r+dr} \quad (\text{III.3})$$

$$\text{Soit} \quad -\lambda 2\pi r L \left(\frac{dT}{dr} \right)_r = -\lambda 2\pi (r + dr) L \left(\frac{dT}{dr} \right)_{(r+dr)} \quad (\text{III. 4})$$

$$\text{D'où} \quad r \frac{dT}{dr} = c \quad (\text{III. 3)f}$$

Avec les conditions aux limites : $T(r_1) = T_1$ et $T(r_2) = T_2$

$$T(r) = \frac{T_2 \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) + T_1 \ln\left(\frac{r_2}{r}\right)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (\text{III. 5})$$

D'où

Et par application de la relation (III.5), on obtient :

$$\varphi = \frac{\lambda 2\pi L (T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (\text{III. 6})$$

III.2.1.2. Echange thermique par convection

- **Loi de Newton**

Quelle que soit le type de convection (libre ou forcée) et quelle que soit le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent), le flux de chaleur φ est donné par la relation dite loi de Newton :

$$\varphi = hS\Delta T \quad (\text{III. 7})$$

Le problème majeur à résoudre avant le calcul du flux de chaleur consiste à déterminer le coefficient de transfert de chaleur par convection h qui dépend d'un nombre important de paramètres : caractéristiques du fluide, de l'écoulement, de la température, de la forme de la surface d'échange, ... [2]

On trouvera dans le tableau (III-1) l'ordre de grandeur du coefficient de transfert de chaleur par convection pour différentes configurations.

Tableau(III-1) : Coefficient de transfert de chaleur par convection

Convection naturelle	
Dans un gaz	02 (k)
Dans un liquide	100-1000 (k)
Convection forcée	
Avec un gaz	10-200 (k)
Avec un liquide	100-5000 (k)
Ebullition de l'eau	
Dans un récipient	2500-35000 (k)
En écoulement dans un tube	5000-100000 (k)
Condensation de l'eau sous 1 atm	
Sur une surface verticale	1000-11000 (k)
A l'extérieur de tubes horizontaux	10000-25000 (k)

Dans les cas plus complexes (forcée) où une solution analytique ne peut pas être établie, on utilise des corrélations déduites d'expérimentations.

L'application de l'analyse dimensionnelle montre que la relation liant le flux de chaleur transféré par convection aux variables dont il dépend peut-être recherchée sous la forme d'une relation entre trois nombres adimensionnels :

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} \quad \text{Nombre de Nusselt}$$

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad \text{Nombre de Reynolds}$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} \quad \text{Nombre de Prandtl}$$

Où D est la dimension caractéristique de la géométrie considérée qui sera par exemple le

$$Dh = \frac{4 \times \text{Section} \cdot \text{de} \cdot \text{passage}}{\text{périmètre}}$$

Diamètre hydraulique pour un écoulement dans un conduit (égal au diamètre intérieur pour un conduit cylindrique), le diamètre extérieur pour un écoulement extérieur perpendiculaire à un tube, la longueur pour un écoulement à surface libre sur une plaque...

Le calcul d'un flux de chaleur transmis par convection forcée s'effectue donc de la manière suivante :

1. Calcul des nombres adimensionnels de Reynolds et de Prandtl.
2. Suivant la valeur de Re et la configuration → choix de la corrélation
3. Calcul de Nu par application de cette corrélation.

$$4. \text{ Calcul de } h = \frac{\lambda Nu}{D} \text{ et de } \varphi = hS(T_p - T_\infty)$$

Pour la cheminée de la tour on a deux applications de convection (naturelle et forcée)

$$\bullet \text{ Naturelle : } \varphi_{\text{ext}} = h_{\text{naturelle}} S (T_2 - T_{\text{ambient}}) \quad (\text{III. 8})$$

III.2.1.3. Echange thermique par rayonnement

Quand un rayon incident d'énergie φ_λ frappe un corps à la température T, une partie ($\varphi_\lambda \cdot \rho_{\lambda T}$) de l'énergie incidente est réfléchiée par la surface S, une autre partie ($\varphi_\lambda \alpha_{\lambda T}$) est absorbée par le corps qui s'échauffe et le reste $\varphi_\lambda \tau_{\lambda T}$ est transmis et continue son chemin :



Figure(III-6) : Echange thermique au niveau de la cheminée

$$\text{On a évidemment : } \varphi_{\lambda} = \varphi_{\lambda}\tau_{\lambda T} + \varphi_{\lambda}\rho_{\lambda T} + \varphi_{\lambda}\alpha_{\lambda T} \quad (\text{III. 9})$$

$$\text{D'où } \tau_{\lambda T} + \rho_{\lambda T} + \alpha_{\lambda T} = 1 \quad (\text{III. 10})$$

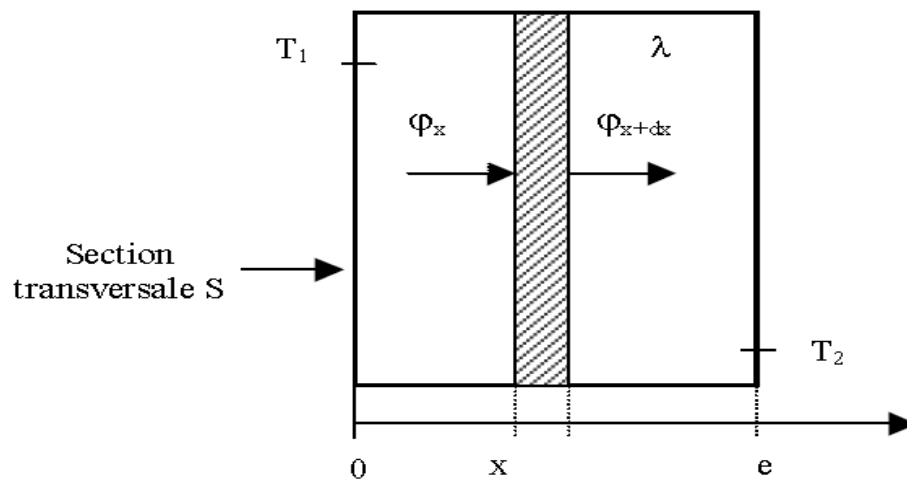
On définit ainsi les pouvoirs monochromatiques réfléchissant $\varphi_{\lambda}\rho_{\lambda T}$, absorbant $\varphi_{\lambda}\alpha_{\lambda T}$ et filtrant $\varphi_{\lambda}\tau_{\lambda T}$ qui sont fonction de la nature du corps, de son épaisseur, de sa température T, de la longueur d'onde λ du rayonnement incident et de l'angle d'incidence.

III.2.2. Collecteur

III.2.2.1. Echange thermique par conduction

On se placera dans le cas où le transfert de chaleur est unidirectionnel et où il n'y a pas de génération ni de stockage d'énergie.

On considère une vitre d'épaisseur e, de conductivité thermique λ et de grandes dimensions transversales dont les faces extrêmes sont à des températures T_1 et T_2 :



Figure(III-7) : Echange thermique par conduction

$$\varphi_x = \varphi_{x+dx} \Rightarrow -\lambda S \left(\frac{dT}{dx} \right)_x = -\lambda S \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x+dx} \quad (\text{III.11})$$

D'où : $\frac{dT}{dx} = A$ et $T(x) = Ax + B$

Avec les conditions aux limites : $T(x=0) = T_1$ et $T(e=0) = T_2$

$$\text{D'où : } T = T_1 - \frac{x}{e}(T_1 - T_2) \quad (\text{III. 12})$$

Le profil de température est donc linéaire. La densité de flux de chaleur traversant le collecteur

s'en déduit par la relation : $\phi = -\lambda \frac{dT}{dx}$, d'où :

$$\phi = \frac{\lambda(T_1 - T_2)}{e} \quad (\text{III. 13})$$

III.2.2.2. Echange thermique par convection

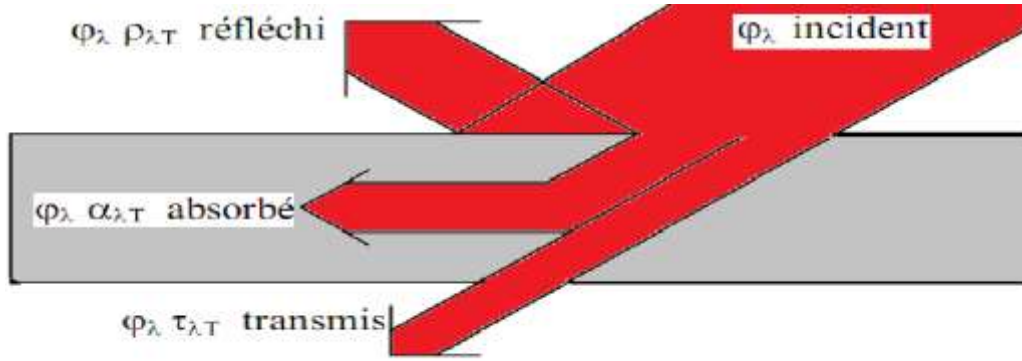
Pour le collecteur on a aussi deux applications de convection :

- Forcée : $\varphi_{\text{int}} = h_{\text{forcée}} s(T_1 - T_{\text{airch}})$ (III. 4)

- Naturelle : $\varphi_{\text{ext}} = h_{\text{naturelle}} s(T_2 - T_{\text{ambient}})$ (III. 5)

II.2.2.3. Echange thermique par rayonnement

Quand un rayon incident d'énergie φ_λ frappe un corps à la température T , une partie $\varphi_\lambda \rho_{\lambda T}$ de l'énergie incidente est réfléchi par la surface S , une autre partie $\varphi_\lambda \alpha_{\lambda T}$ est absorbée par le corps qui s'échauffe et le reste $\varphi_\lambda \tau_{\lambda T}$ est transmis et continue son chemin :



Figure(III-8) : Echange par rayonnement au niveau de collecteur [2]

On a évidemment : $\varphi_\lambda = \varphi_\lambda \tau_{\lambda T} + \varphi_\lambda \rho_{\lambda T} + \varphi_\lambda \alpha_{\lambda T}$ d'où $\tau_{\lambda T} + \rho_{\lambda T} + \alpha_{\lambda T} = 1$

On définit ainsi les pouvoirs monochromatiques réfléchissant $\varphi_\lambda \rho_{\lambda T}$, absorbant $\varphi_\lambda \alpha_{\lambda T}$ et filtrant $\varphi_\lambda \tau_{\lambda T}$ qui sont fonction de la nature du corps, de son épaisseur, de sa température T, de la longueur d'onde λ du rayonnement incident et de l'angle d'incidence.

III.2.3. Le système de stockage

III.2.3.1. Echange thermique par conduction

Le système de stockage se compose des roches et de bétons teintés en noir. Le flux de chaleur entre le béton et les roches s'écrit comme suit :

$$\varphi_x = \varphi_{x+dx} \Rightarrow -\lambda S \left(\frac{dT}{dx} \right)_x = -\lambda S \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x+dx} \quad (\text{III. 6})$$

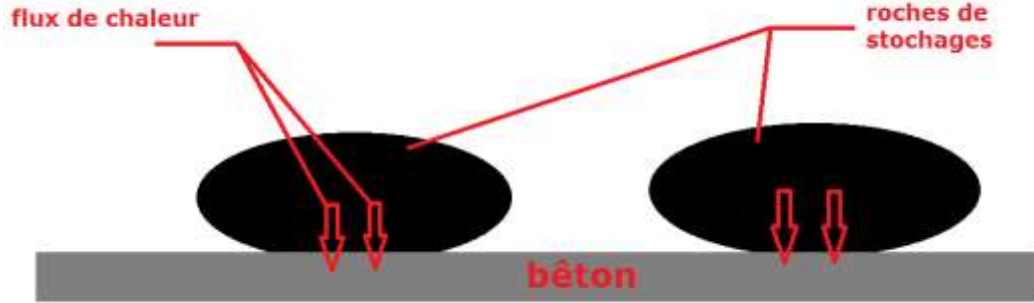
D'où : $\frac{dT}{dx} = A$ et $T(x) = Ax + B$

Avec les conditions aux limites : $T(x=0) = T_1$ et $T(e=0) = T_2$

$$\text{D'où : } T = T_1 - \frac{x}{e}(T_1 - T_2) \quad (\text{III. 7})$$

Le profil de température est donc linéaire. La densité de flux de chaleur traversant le collecteur s'en déduit par la relation : $\phi = -\lambda \frac{dT}{dx}$, d'où :

$$\phi = \frac{\lambda(T_1 - T_2)}{e} \quad (\text{III. 8})$$



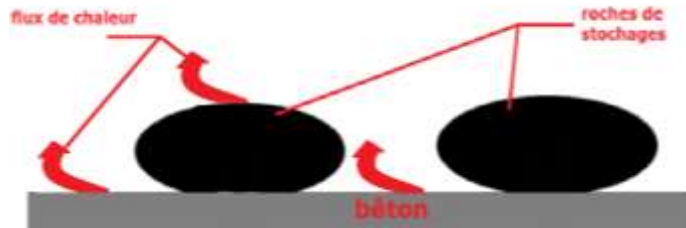
Figure(III-9) : Echange thermique par conduction

III.2.3.2. Echange thermique par convection

Le flux de chaleur transmis par convection forcée par le sol et par les roches est :

$$\varphi_{sol} = h_{sol} s_{sol} (T_{sol} - T_{airch}) \quad (\text{III. 9})$$

$$\varphi_{roche} = h_{roche} s_{roche} (T_{roche} - T_{airch}) \quad (\text{III. 20})$$



Figure(III-10) : Echange par convection

III.2.3.3. Echange thermique par rayonnement

- **Roche**

Quand un rayon incident d'énergie φ_λ frappe une roche à la température T , une partie $\varphi_\lambda \alpha_{\lambda T}$ est absorbée par le corps qui s'échauffe et le reste $\varphi_\lambda \tau_{\lambda T}$ est transmis et continue son chemin vers le sol :

On a évidemment :

$$\varphi_\lambda = \varphi_\lambda \tau_{\lambda T} + \varphi_\lambda \alpha_{\lambda T} \quad (\text{III. 21})$$

$$\text{d'où } \tau_{\lambda T} + \alpha_{\lambda T} = 1 \quad (\text{III. 22})$$

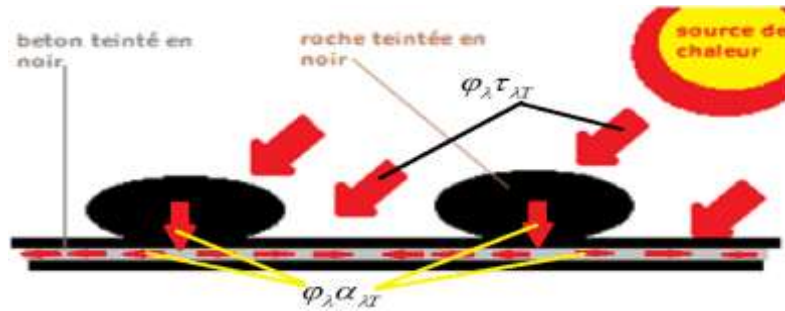
On définit ainsi les pouvoirs monochromatiques absorbants $\varphi_\lambda \alpha_{\lambda T}$ et filtrants $\varphi_\lambda \tau_{\lambda T}$ qui sont fonction de la nature du corps, de son épaisseur, de sa température T , de la longueur d'onde λ , du rayonnement incident et de l'angle d'incidence.

- **Béton**

Quand un rayon incident d'énergie φ_λ frappe une roche à la température T, une partie $\varphi_\lambda \alpha_{\lambda T}$ est absorbée par le corps qui s'échauffe et reste stocké.

On a évidemment : $\varphi_\lambda = \varphi_\lambda \alpha_{\lambda T}$ (III. 23)

d'où $\alpha_{\lambda T} = 1$ (III. 10)



Figure(III-11) : Les échanges thermiques par rayonnement [2]

III.2.4. Bilan énergétique et massique d'une tour solaire

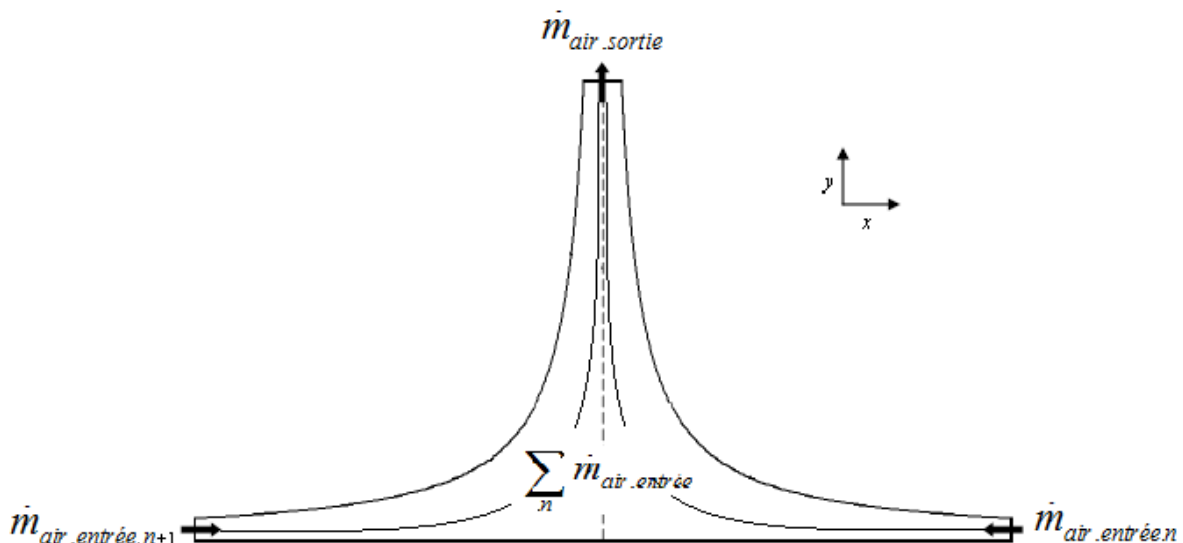
III.2.4.1. Bilan massique

Relation entre l'entrée et la sortie, c'est à dire un bilan, d'une substance donnée dans un système défini, par exemple dans un lac, une rivière, qui prend en compte la formation ou la décomposition de cette substance dans le système, en écrivant son bilan massique :

$$\text{Entrées} + \text{Production} = \text{Sorties} + \text{Accumulation}$$

Pour tout système (la cheminée solaire) il n'y a ni accumulation ni production, on néglige les pertes car on a un système à peu près fermé (il n'y a aucune fuite d'air) c.à.d.

$$\dot{m}_{\text{air.sortie}} = \sum_n \dot{m}_{\text{air.entree}} \quad (\text{III. 11})$$



Figure(III-12) : Bilan massique [2]

III.2.4.2. Bilan énergétique

Pour évaluer l'énergie absorbée par le collecteur, il faut théoriquement distinguer dans l'énergie incidente, les parts du rayonnement direct et du rayonnement diffus, en les affectant de coefficients de transmission et d'absorption appropriés. Toutefois, dans la pratique, on considère la composante normale au plan du collecteur, du rayonnement solaire global incident. En régime permanent de fonctionnement, on obtient l'équation caractéristique de collecteur en écrivant son bilan énergétique global.

$$Q_a = Q_u + Q_p + Q_s \quad (\text{III. 12})$$

Avec

- Q_a est la puissance solaire absorbée à la surface de l'absorbeur,
- Q_u est la puissance cédée au l'air a la sortie de la cheminée,
- Q_p est la puissance correspondant aux pertes thermiques et cinétique,
- Q_s est la puissance stockée sous forme de chaleur dans l'absorbeur.

La puissance absorbée est donnée par la relation :

$$Q_a = (\tau\alpha).S_c.G \quad (\text{III. 13})$$

Avec

- G est la puissance solaire en W.m^{-2} ,
- S_c est la surface captatrice en m^2 ,
- τ et α sont les valeurs moyennes des coefficients de transmission de la couverture transparente et d'absorption de l'absorbeur sur l'ensemble du spectre solaire,

La puissance utilisable Q_u est calculée par l'équation :

$$Q_u = \dot{m}_{air} . C_{air} . [T_{air,s} - T_{air,e}] \quad (\text{III. 14})$$

Avec

- $\dot{m}_{air}$ est le débit d'air dans l'échangeur, kg.h^{-1} ,
- C_{air} est la chaleur massique de l'air, $\text{J.kg}^{-1} . ^\circ\text{C}^{-1}$,
- $T_{air,s}$ est la température de l'air à la sortie de l'échangeur, $^\circ\text{C}$,
- $T_{air,e}$ est la température de l'air à l'entrée de l'échangeur $^\circ\text{C}$.

Pertes thermique

On a l'habitude de classer les pertes thermiques en trois catégories :

- Les pertes par conduction-convection et rayonnement à travers la paroi de la cheminée (P_{ch})
- Les pertes par convection-conduction et rayonnement à travers le collecteur (P_{coll}).
- Les pertes cinétiques au niveau de la couche limite (P_c)

Ces pertes s'écrivent respectivement sous la forme :

$$P_{coll} = S_{coll} \cdot U_{coll} \cdot (T_p - T_a) \quad (III. 15)$$

$$P_{ch} = S_{ch} \cdot U_{ch} \cdot (T_p - T_a) \quad (III. 30)$$

$$\text{On a } \varphi_p = P_{ch} + P_{coll} + P_c \quad (III. 31)$$

$$\text{Donc } P_c = \varphi_p - (P_{ch} + P_{coll}) \quad (III. 32)$$

Avec :

- S_{coll} : surface utile du capteur de collecteur
- S_{ch} : surface utile du capteur du la cheminé
- T_p : température moyenne de l'absorbeur
- T_a : température du milieu ambiant
- U_{coll} : coefficient d'échange à travers la face avant du capteur
- U_{ch} : coefficient d'échange à travers la face arrière du capteur

Rendement global

Le rendement instantané de la cheminée est donné par la relation suivante :

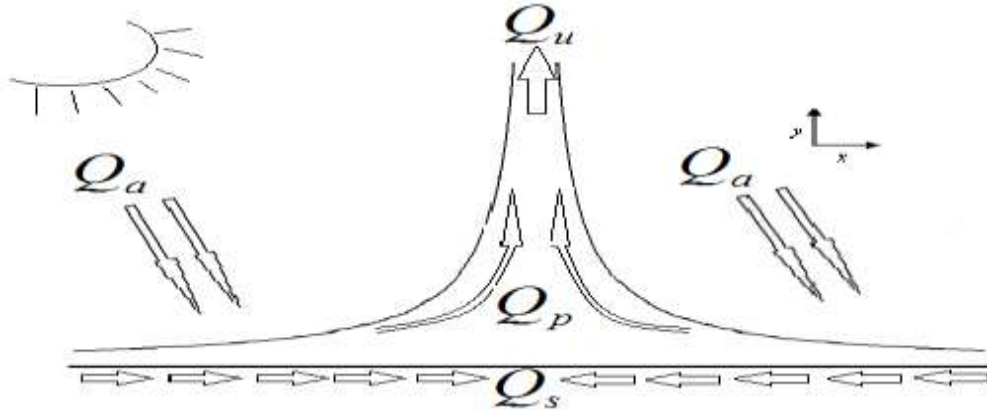
$$\eta = \frac{Q_u}{S_c \cdot G} \quad (III. 33)$$

En remplaçant Q_u par son expression, le rendement s'écrit :

$$\eta = \frac{\dot{m}_{air} \cdot C_{air} \cdot [T_{air,s} - T_{air,e}]}{S_c \cdot G} \quad (III. 16)$$

On peut aussi exprimer ce rendement à partir de l'équation fondamentale du bilan énergétique :

$$\eta = \frac{Q_a - Q_p}{S_c \cdot G} \quad (\text{III. 17})$$



Figure(III-13) : Bilan énergétique [3]

III.3. Mise en équations

Dans ce chapitre, nous allons étudier la conception de quelques modèles de tour solaire déjà réalisés au paravent afin de pouvoir s'en servir lors de la réalisation de notre maquette. [3]

III.3.1. Modèle mathématique de M. Le Sellin, E.Bilgen et J.Rheault

III.3.1.1. Modèle des radiations solaires

L'énergie solaire reçue par une surface inclinée est déterminée en employant la moyenne mensuelle du rayonnement quotidien total sur une surface horizontale, $\overline{H_0}$ qui est le rayonnement solaire avant qu'il atteigne la couche atmosphérique terrestre.

$$\overline{H_0} = \frac{243600 G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \cdot \left(\cos(\psi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin(\psi) \sin(\delta) \right) \right) \quad (\text{III. 18})$$

Avec :

G_{sc} : La constante solaire égale à 1367 W par m²

ω_s : L'angle horaire au coucher du soleil donné par :

$$\cos \omega_s = -\tan \psi \cdot \tan \delta \quad (\text{III. 19})$$

δ : La déclinaison Angle que fait le soleil au maximum de sa course par rapport au plan équatorial. Sa valeur est donnée, en degrés, par l'équation de Cooper :

$$\delta = 23.45 \sin \left(2\pi \frac{284 + n}{365} \right) \quad (\text{III. 20})$$

n : Le jour de l'année (de 1 pour le 1er janvier à 365).

ψ : La latitude.

III.3.1.2. Le rayonnement solaire sur un plan incliné du collecteur :

La valeur de la moyenne mensuelle du rayonnement quotidien absorbé par une surface inclinée d'angle est exprimée par :

$$\bar{S} = (\bar{\tau\alpha}) \bar{H}_T$$

(II. 21)

Sachant que :

$$\bar{H}_T = \bar{H}_b \bar{R}_b + \bar{H}_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \bar{H} \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (\text{III. 22})$$

Avec :

$\bar{H}_T$ = La moyenne mensuelle du rayonnement quotidien reçu par une surface inclinée :
KW.m-2par an.

$\bar{\tau\alpha}$: Le facteur de transmittance-absorbante.

$\bar{H}_b$: La moyenne mensuelle du rayonnement direct. ($\bar{H}_b = \bar{H} - \bar{H}_d$)

ρ_g : Le coefficient de réflexion de lumière diffuse du sol ou l'albédo.

β : L'inclinaison du collecteur.

Sachant que l'indice de clarté est l'atténuation du rayonnement par l'atmosphère, sa moyenne mensuelle est exprimée par :

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad (\text{III. 23})$$

Le coefficient $\bar{R}_b$ est un terme qui dépend de l'orientation du collecteur, du moment de m'année et de la latitude du lieu.

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\psi - \beta) \cos(\delta) \sin(\omega_s') + \frac{\pi \omega_s'}{180} \sin(\psi - \beta) \sin(\delta)}{\cos(\psi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin(\psi) \sin(\delta)} \quad (\text{III. 40})$$

Tel que

$$\omega_s' = \min \left\{ \cos^{-1}(-\tan \psi \tan \delta), \cos^{-1}(-\tan(\psi - \beta) \tan \delta) \right\} \quad (\text{III } 41)$$

La moyenne mensuelle du rayonnement diffus quotidien est calculée pour les formules suivantes :

Pour $0.3 < \overline{K_T} < 0.8$

Si $\omega_s < 81.4^\circ$

$$\overline{H_d} = \overline{H} \left(1.311 - 3.022 \overline{K_T} + 3.427 \overline{K_T}^2 - 1.82 \overline{K_T}^3 \right) \quad (\text{III. } 24)$$

Si $\omega_s > 81.4^\circ$

$$\overline{H_d} = \overline{H} \left(1.391 - 3.560 \overline{K_T} + 4.189 \overline{K_T}^2 - 2.137 \overline{K_T}^3 \right) \quad (\text{III. } 25)$$

III.3.1.3. Transmission à travers le collecteur :

L'énergie solaire reçue par le collecteur est transmise par une couverture transparente et absorbée par la terre. Une majeure partie de l'énergie absorbée est transférée par le sol à l'air ambiant entrant par les ouvertures et sortant par la cheminée. Une partie de l'énergie solaire est perdue par la couverture du collecteur et par la terre. Les principales relations sont comme suivies.

Le coefficient d'absorption du sol en fonction de l'angle d'incidence et le facteur de transmittance-absorbante sont exprimés par :

$$\left. \begin{aligned} \overline{\alpha} &= \overline{\alpha_n} \left(1 + 2.0345 \times 10^{-3} \overline{\theta} - 1.990 \times 10^{-4} \overline{\theta}^2 + 5.324 \times 10^{-6} \overline{\theta}^3 - 4.799 \times 10^{-8} \overline{\theta}^4 \right) \\ (\tau \alpha) &= 1.01 \times \overline{\tau \alpha} \end{aligned} \right\} \quad (\text{III. } 26)$$

Les pertes du collecteur et du sol sont calculées d'après des relations bien établies, coefficient global des pertes thermiques est exprimé par :

$$U_L = U_t + U_b \quad (\text{III. } 27)$$

U_b est un coefficient des pertes thermiques moyen estimé sur une température de surface et de temps constant.

Selon (Duffie and Beckman, 1991), les pertes par le collecteur sont calculées par les relations suivantes :

$$\left. \begin{aligned}
 U_t &= \frac{q}{T_p - T_a} \\
 q_t &= \frac{T_p - T_a}{N_c^{-1} \left(\frac{T_p - T_a}{N + ff} \right)^{-0.25} + h_w^{-1}} + \frac{\sigma(T_p^4 - T_a^4)}{\varepsilon_p^{-1} + \frac{2N + ff - 1}{\varepsilon_p} - N} \\
 c &= 1.2529 - 0.00651\beta + 0.0000267\beta^2 \\
 ff &= 0.76 - 0.118V_w + 0.0066V_w^2 \\
 h_w &= 2.8 + 3.0V_w
 \end{aligned} \right\} \text{ (III. 28)}$$

Avec :

q_t : Les pertes.

C : le coefficient de convection du vent.

h_w : Le coefficient de convection du vent.

Selon (Ingersoll et al, 1954) les pertes par le sol sont exprimées par :

$$U_b = 2 \left(\frac{k \rho C_p}{\pi \tau} \right)^{0.5} \quad \text{(III. 29)}$$

Ou la période $\tau = 86400s$. Avec C_p : la capacité de chaleur.

On note que dans cette étude l'auteur s'est basé sur une revue qui fait la moyenne mensuelle des paramètres quotidiens U_b . [4]

Selon l'auteur, la simulation des cas périodiques et instables concernant le stockage et la récupération de la chaleur dus au transfert thermique périodique de la terre est au-delà des possibilités des modèles de simulation de moyennes mensuelles quotidiennes.

Cet aspect a été discuté par Haaf(1984), Haaf et al, (1983) et Bernardes et al (2003). Ils montrent que le stockage de la chaleur, ensuite la récupération et le fonctionnement du système après le coucher du soleil peut être un aspect avantageux pour la cheminée solaire si une conception appropriée est mise en application.

Le coefficient de transfert radiatif entre le collecteur et le sol si on suppose qu'ils sont presque parallèles s'écrit :

$$h_r = \frac{\sigma(T_2^2 + T_1^2)(T_2 + T_1)}{\varepsilon_2^{-1} + \varepsilon_1^{-1} - 1} \quad \text{(III. 30)}$$

L'efficacité du collecteur, de l'écoulement et le facteur de déplacement de la chaleur (ou facteur de conductance) sont respectivement :

$$\left. \begin{aligned} F' &= \frac{h_r h_2 + h_2 U_t + h_1 h_r + h_2 h_1}{((U_t + h_r) + h_1)(U_b + h_2 + h_r) - h_r^2} \\ F'' &= \frac{mc_p}{A_c U_L F'} \left(1 - \exp\left(\frac{-A_c U_L F'}{mc_p}\right) \right) \\ F_R &= F' F'' \end{aligned} \right\} \quad (\text{III. 31})$$

Avec h_1 et h_2 sont respectivement les coefficients de convection du collecteur et du sol avec l'air qui représente le fluide caloporteur.

L'énergie utile, la densité du flux utile et rendement thermique du collecteur sont calculés par les formules suivantes :

$$\left. \begin{aligned} Q_u &= A_c F_R (\bar{S} - U_L (T_i - T_a)) \\ \bar{q}_u &= F_R (\bar{S} - U_L (T_i - T_a)) \\ \eta_{col} &= \frac{\bar{q}_u}{H_T} \end{aligned} \right\} \quad (\text{III. 50})$$

III.3.1.4. La cheminée :

La pression développée en raison de la différence de densité de l'air entre l'entrée à T_2 et la sortie à $T_0 \approx T_1$ dans la cheminée est calculée par la formule suivante :

$$\Delta P = \int_1^2 g (\rho_0 - \rho(z)) dz \quad (\text{III. 51})$$

Pour une cheminée verticale adiabatique et en intégrant l'équation précédente entre l'entrée à T_2 et la sortie à $T_0 \approx T_1$ on obtient :

$$\Delta P_{ch} = (\rho_0 - \rho_2) g H_{ch} \quad (\text{III. 52})$$

L'auteur suppose que la variation de la densité de l'air est linéaire entre l'entrée et la sortie du collecteur incliné. En effet, cette hypothèse est justifiée parce que la différence de température entre la température de l'air à l'entrée et à la sortie du collecteur est faible, (environ 10-15K).

Ainsi, la variation de la densité de l'air peut être exprimé par :

$$\rho(z) = \rho_0 + \frac{\rho_2 - \rho_0}{H_{coll}} z \quad (\text{III. 32})$$

En intégrant entre l'entrée et la sortie du collecteur et en remplaçant $\rho(z)$ par sa valeur on obtient la différence de pression crée dans le collecteur :[4]

$$\Delta P_{coll} = \frac{\rho_0 - \rho_2}{2} g H_{coll} \quad (\text{III. 54})$$

La différence de pression totale du collecteur et de la cheminée en tenant compte que $T_0 \approx T_1$ est la somme des deux formules trouvées :

$$\Delta P_{tot} = (\rho_1 - \rho_2) g \left(H_{ch} + \frac{H_{coll}}{2} \right) \quad (\text{III. 33})$$

Toute la différence de pression aussi crée est dépensée en tant que des pertes de frottement dans le collecteur et la cheminée ΔP_f , également des pertes d'énergie cinétiques à la sortie de la cheminée ΔP_{KE} , le reste est utilisé pour faire fonctionner la turbine ΔP_t .

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_t + \Delta P_f + \Delta P_{KE} \quad (\text{III. 34})$$

Avec :

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{KE} &= \frac{1}{2} \rho V_{ch}^2 \\ \Delta P_f &= f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho V^2 \end{aligned} \right\} \quad (\text{III. 35})$$

Où f est le facteur de frottement calculé par la corrélation de Colebrook, L, D et V sont respectivement la longueur, le diamètre et la vitesse pour le collecteur et la cheminée.

Puissance et efficacité énergétique globale :

La puissance générée par la turbine P1 et le rendement thermique global η de l'installation s'écrivent :

$$P_t = \eta_t \Delta P_t V_{ch} A_{ch} \quad (\text{III. 36})$$

$$\eta = \frac{C P_t}{H_T} \quad (\text{III. 37})$$

Telque C est la durée de la production de l'énergie à une moyenne mensuelle quotidienne (journalière), exprimée en (secondes par jour)

III.3.2. Modèle mathématique de Y.Y Dai, H.B Hunang et R.Z. Wang

III.3.2.1. Pour ce qui concerne le collecteur solaire :

L'équation du bilan énergétique est donnée comme suit

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T = (\tau\alpha) A_{coll} G - \beta \Delta T_a A_{coll} = \eta_{coll} A_{coll} G \quad (III. 60)$$

Avec:

$\dot{m}$: le taux d'écoulement de la masse d'air chaud passant par la cheminée solaire, et peut être calculé avec l'équation suivante.[5]

$$\dot{m} = \rho_{coll} A_c V_c \quad (III. 61)$$

La vitesse d'air à la sortie du capteur solaire est exprimée par :

$$V_c = \frac{(\tau\alpha) A_{coll} G - \beta \Delta T_a A_{coll}}{\rho_{coll} A_c C_p \Delta T} \quad (III. 38)$$

L'efficacité du capteur solaire est donnée ci-dessous :

$$\eta_{sc} = \frac{P_{tot}}{\dot{Q}} = \frac{g H_{sc}}{C_p T_0} \quad (III. 39)$$

Avec :

A_c : La section de la cheminée solaire.

A_{coll} : La surface du collecteur pour recevoir le rayonnement solaire G .

$(\tau\alpha)$: représente le produit de l'absorbance et de la transmittance du capteur solaire.

β : Le coefficient de perte de la chaleur du capteur solaire.

ρ_{coll} : La densité d'air à la sortie du capteur solaire.

ΔT_a : La différence de la température entre la couche d'absorption de la chaleur et l'air ambiant.

Ici on suppose que la température de la couche d'absorption de la chaleur est égale à la température moyenne de l'air dans le capteur solaire.

ΔT : La différence de la température entre l'air de sortie du collecteur et de l'air ambiant. Elle pourrait être estimée avec la méthode suivante :

$$\Delta T = \frac{2\varphi}{A_c \beta F_R} (1 - F'') \quad (\text{III. 40})$$

Le facteur de déplacement de la chaleur :

$$F_R = \frac{1}{\frac{1}{F' + \frac{A_{coll} \beta}{2mC_p}}} \quad (\text{III. 41})$$

Avec :

F' : le facteur d'efficacité du capteur solaire.

F_R : Le facteur d'écoulement est donné par l'équation suivante :

$$F'' = \frac{F_R}{F'} \quad (\text{III. 42})$$

En outre, ΔT_a peut être exprimé par l'équation suivante:

$$\Delta T_a = \frac{1}{2} \Delta T \quad (\text{III. 43})$$

III.3.2.2. Pour ce qui concerne la cheminée solaire :

La cheminée est le moteur thermique réel de l'usine. L'efficacité de la cheminée c.-à-d. la conversion de la chaleur en énergie cinétique, est pratiquement indépendante de l'élévation de la température ambiante au niveau du sol et de la hauteur de la cheminée.

L'efficacité de la cheminée est exprimée par:

$$\eta_{sc} = \frac{P_{tot}}{Q} = \frac{gH_{sc}}{C_p T_0} \quad (\text{III. 44})$$

Avec:

H_{sc} : La hauteur de la cheminée

T_0 : La température ambiante.

P_{tot} : La puissance contenue dans l'écoulement peut être exprimée par l'équation suivante :

$$P_{tot} = \eta_{sc} Q = \frac{gH_{sc}}{T_a} \rho_{coll} V_c \Delta T_a \quad (\text{III. 45})$$

La différence de pression ΔP_{tot} , qui est produite entre l'environnement et la base de la cheminée, est exprimée par l'équation suivante:

$$\Delta P_{tot} = \rho_{coll} g h_{sc} \frac{\Delta T}{T_0} \quad (\text{III. 70})$$

III.3.2.3. Pour ce qui concerne la turbine

$$P_{wt,max} = \frac{2}{3} V_c A_c \Delta P_{tot} \quad (III. 71)$$

L'équation ci-dessus peut être exprimée également par :

$$P_{wt,max} = \frac{2}{3} \eta_{coll} \frac{g}{C_p T_0} H_{sc} A_{coll} G \quad (III. 72)$$

Si $P_{wt,max}$ est multipliée par l'efficacité du générateur, on obtient la P_e :

$$P_e = \frac{2}{3} \eta_{coll} \eta_{wt} \frac{g}{C_p T_0} H_{sc} A_{coll} G \quad (III. 73)$$

III.3.3. Modèle mathématique de Xingping Yhou, Jiakuan Yang, Bo Xiao et Guoxiang Hou.

III.3.3.1. Couverture en plastique :

L'équation du bilan énergétique pour la couverture en plastique :

$$S_1 + h_{rap}(T_a - T_p) + h_p(T_p - T_f) = U_t(T_p - T_\infty) \quad (III. 46) [5]$$

Avec :

S_1 : Le rayonnement solaire absorbé par la couverture en plastique.

h_{rap} : Le coefficient de transfert thermique du rayonnement entre l'amortisseur et la couverture en plastique.

h_p : Le coefficient de transfert de chaleur par convection entre la couverture en plastique et le flux d'air dans le capteur solaire.

U_t : Le coefficient global de perte de chaleur de la couverture en plastique vers l'extérieur compris par convection due au vent, par transfert thermique par rayonnement entre la couverture en plastique et le ciel et par conduction par le plastique.

T_a : La température ambiante.

T_p : La température d'effet de serre (produite par le capteur solaire).

T_∞ : La température d'air ambiante qui entre dans le collecteur.

T_f : La température moyenne dans le capteur solaire.

III.3.3.2. L'amortisseur

La fonction de l'amortisseur sous le collecteur est d'absorber et stocker l'énergie solaire. [6]

Le rayonnement solaire absorbé par l'amortisseur :

$$S_2 = h_a(T_a - T_f) + h_{rap}(T_a - T_p) + U_b(T_a - T_\infty) \quad (\text{III. 47})$$

Avec :

S_2 : Le rayonnement solaire absorbé par l'amortisseur.

h_a : Le coefficient de transfert de chaleur par convection entre le lit d'amortisseur et le flux d'air dans le capteur solaire.

U_b : Le coefficient global de transfert thermique de l'amortisseur vers le sol.

III.3.3.3. Le flux d'air :

Le flux d'air est estimé par :

$$h_a(T_a - T_f)A_{coll} = h_p(T_p - T_f)T_f + Q \quad (\text{III. 48})$$

Avec :

A_{coll} : La surface du collecteur ;

φ : La chaleur transférée par convection à l'air ;

$$T_f = \varepsilon T_\infty + (1 - \varepsilon)T_0 \quad (\text{III. 49})$$

Avec :

T_0 : La température de l'air de la sortie du collecteur.

ε : La température moyenne.

La chaleur transférée :

$$Q = C_p m(T_0 - T_\infty) = C_p m(T_f - T_\infty) / (1 - \varepsilon) \quad (\text{III. 50})$$

Avec :

C_p : La chaleur spécifique d'air.

m : Le débit de masse d'un flux d'air chaud dans le capteur solaire, peut être calculé par l'équation suivante:

$$m = \rho A_{ch} V \quad (\text{III. 51})$$

Avec :

ρ : La densité d'air à la sortie de capteur solaire.

A_{ch} : La section de la cheminée solaire.

V: La vitesse d'air chaud à la sortie du capteur solaire.

La vitesse V peut être exprimée :

$$V = \sqrt{2gH_{ch}(T_0 - T_\infty) / T_\infty} \quad (\text{III. 80})$$

Avec :

g : L'accélération de la pesanteur.

Hch : La hauteur de la cheminée.

Pour le système :

La puissance :

$$P_{out} = \frac{1}{3} \eta_w \rho A_{ch} V^3 \quad (\text{III. 81})$$

η_w : L'efficacité du générateur de la turbine, habituellement entre 50% et 90%.

[6]

ChapitreIV

Simulation des échanges thermiques à travers la cheminée

IV.1 Introduction :

La simulation numérique est devenue un élément indispensable dans les domaines des sciences et de l'ingénierie. Elle permet de comprendre et de modéliser le fonctionnement des systèmes réels. Aujourd'hui une large gamme d'outils numériques est disponible. Elle repose sur la mise en œuvre des modèles théoriques utilisant différents outils mathématiques dont la technique des éléments finis. La simulation numérique permet d'étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution.

Le présent chapitre est consacré à la modélisation des échanges thermiques dans une cheminée, cette tâche est basée sur un modèle CFD utilisé par le logiciel de simulation COMSOL Multiphysics. [1]

IV.2 Présentation de Logiciel de simulation :

Il est très intéressant d'avoir un environnement de simulation qui inclut la possibilité d'ajouter différents phénomènes physiques au modèle étudié. C'est dans cette philosophie que COMSOL Multiphysics a été développé. C'est un logiciel de calcul numérique par éléments finis modulaire permettant de modéliser une grande variété de phénomènes physiques caractérisant un problème réel. Il sera également un outil de conception grâce à son aptitude à gérer les géométries 3D complexes. [1]

Différents modules physiques existent sous COMSOL, parmi lesquels on trouve la mécanique des fluides, le transfert thermique, l'électricité, l'électromagnétisme, la chimie, la mécanique des structures... Il est possible de combiner plusieurs phénomènes physiques lors d'une même simulation numérique : c'est l'un des points forts de ce logiciel. Figure (IV.1)

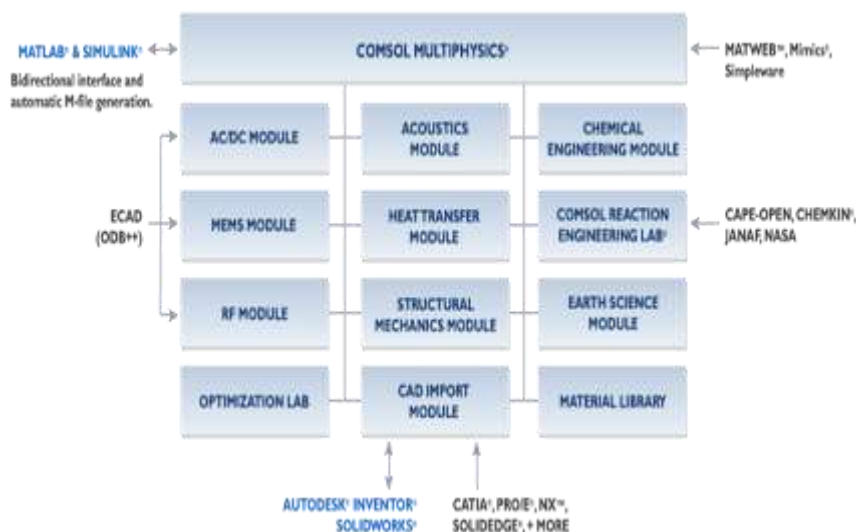


Figure (IV.1) Différents modules physiques existent sous COMSOL.

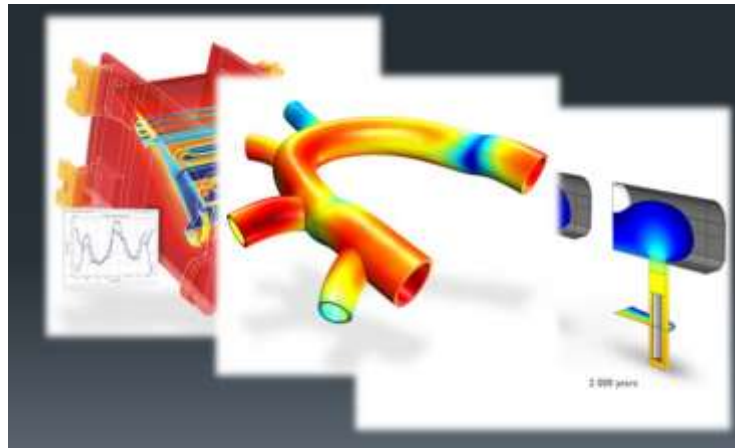


Figure (IV.2) Exemple de simulation d'un système thermique traité par COMSOL.

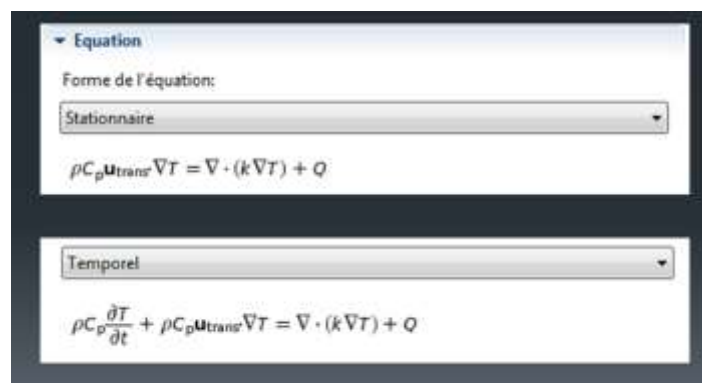


Figure (IV.3) Exemple des équations de transferts de chaleur dans les fluides, d'un module CFD intégré au COMSOL. [2]

IV.2.1 Prise en main du logiciel :

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

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

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

- ☞ Exécutez l'Assistant Modèle ce qui implique de choisir le système de coordonnées pour le modèle, la physique pertinente au problème, et le type d'études que l'on souhaite effectuer

(stationnaire ou en fonction du temps) ;

- ☞ Définir les paramètres, les équations et les variables pertinentes pour le modèle (dans le répertoire Définitions Globales) ;
- ☞ Définir la géométrie du modèle (*Geometry*) ;
- ☞ Sélectionnez le ou les matériaux adéquats du modèle dans le répertoire (*Materials*) ;
- ☞ Choisir les conditions initiales et aux limites de votre modèle pour chaque physique utilisée
- ☞ Choisir la taille des éléments à utiliser pour le maillage ainsi que les différents types de maillage qui existent.
- ☞ Régler les paramètres du solveur et lancer les calculs dans le répertoire études (*Study*) ;
- ☞ Afficher les résultats souhaités de la manière la plus significative dans le répertoire résultat (*Result*). [2]

IV.2.2 Les potentialités et les performances de COMSOL Multiphysics :

Les potentialités de COMSOL Multiphysics sont nombreuses et cela dépend du nombre d'application qui permet de résoudre grâce à son environnement complet pour le calcul scientifique. Il est capable de coupler et de résoudre des équations dans différents domaines tels que la mécanique des fluides et le transfert thermique, l'électromagnétisme, la dynamique des fluides et la chimie, MEMS et Mécanique des Structures. Il offre également plusieurs solveurs de très haut niveau de performance capable de traiter des problèmes avec des temps de résolution optimaux. Ceci et d'autres caractéristiques font de COMSOL un environnement inégalé de modélisation pour la conception industrielle, la recherche & développement et l'enseignement. [3]

Dans le cadre de notre travail, nous avons opté pour le logiciel COMSOL Multiphysics afin de pouvoir simuler numériquement des performances thermiques d'une cheminée solaire. Cette modélisation a pour but d'aller plus loin dans l'effet de la géométrie de l'échange de chaleur sur les performances du système étudié.

IV.3 Modélisation sous COMSOL :

Dans cette étude nous avons utilisé un modèle CFD axisymétrique bidimensionnel, permet d'évaluer la distribution de la température de l'air dans le collecteur, et aussi de simuler le processus d'écoulement de l'air à travers la cheminée. Ce modèle est basé sur les hypothèses suivantes [3] :

- On suppose que le régime d'écoulement de l'air à l'entrée de collecteur est laminaire.
- La répartition de flux solaire sur la surface de collecteur est uniforme.
- On néglige le stockage d'énergie thermique sur la surface interne de collecteur.

- On néglige les pertes thermiques le long de la cheminée.
- Les caractéristiques physiques de l'écoulement de l'air à travers le collecteur et la cheminée sont constantes.
- On suppose que la surface de symétrie de cheminée et de collecteur a une température constante.
- On suppose que l'échange de chaleur à travers de l'écoulement de l'air est en régime stationnaire.

IV.3.1 Représentation de la géométrie de cheminée :

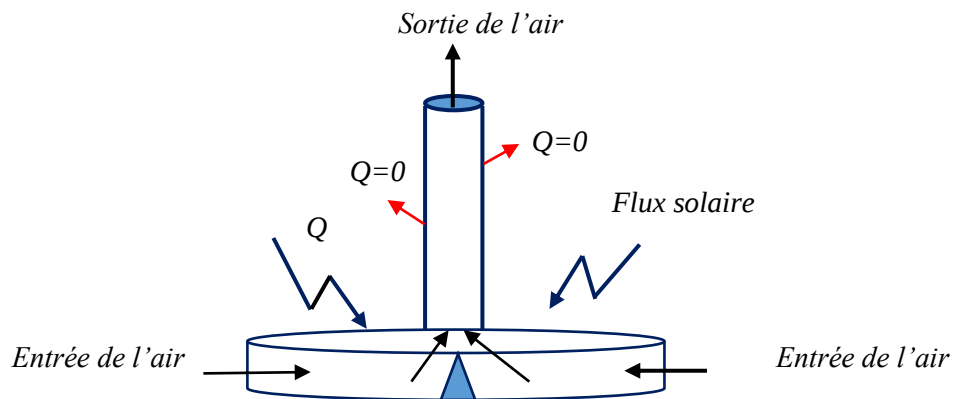


Figure (IV.4) la géométrie de cheminée

IV.3.2 Les étapes de simulation

1. *Choix de la dimension* : due à la complexité de la géométrie de modèle nous avons choisi la géométrie 2D axisymétrique, pour simplifier
2. *Choix des modules physiques* : notre étude thermique est basée sur deux modules CFD, le transfert de chaleur et l'écoulement de fluide.
3. *Construction de la géométrie* : à partir des outils de dessin intégré dans la bibliothèque de Logiciel COMSOL, on construit notre géométrie de cheminée.
4. *Choix des matériaux* : à la fin de la construction de chaque partie de dessin on choisit le type de matériaux, et d'introduire les caractéristiques physiques de chaque partie.
5. *Définitions des conditions aux limites* : on définit et d'introduit les entrées
6. *Paramétrage et calcul de maillage* : on choisit le type de maillage sous la forme triangulaire fine.
7. *Représentation graphique des résultats* : on exécute le programme de simulation et on choisit trois périodes avec des conditions climatiques différentes (matin, sieste et soir) de la région d'EL-Oued.

La figure IV.5 présente l'interface graphique de logiciel de simulation avec les étapes précédentes. Ainsi que la figure IV.6 représente le maillage et les différentes faces de la géométrie de cheminée dans d'espace de travail [3]

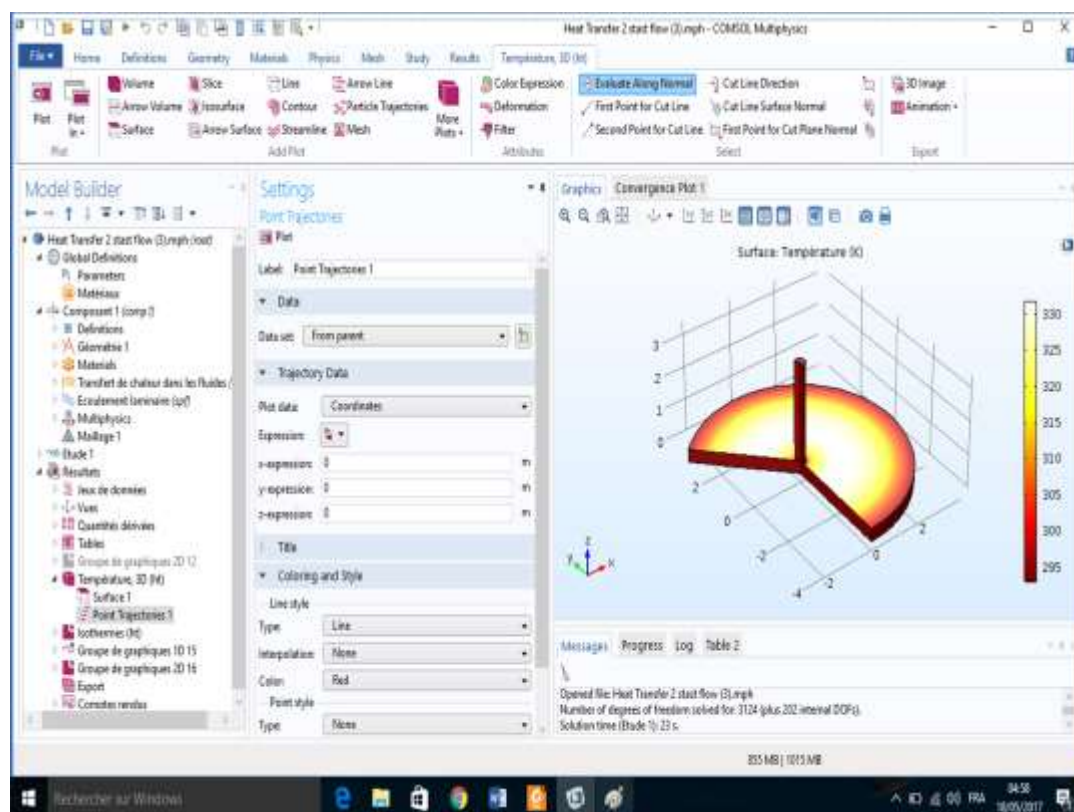


Figure (IV.5) Interface graphique de Logiciel de simulation

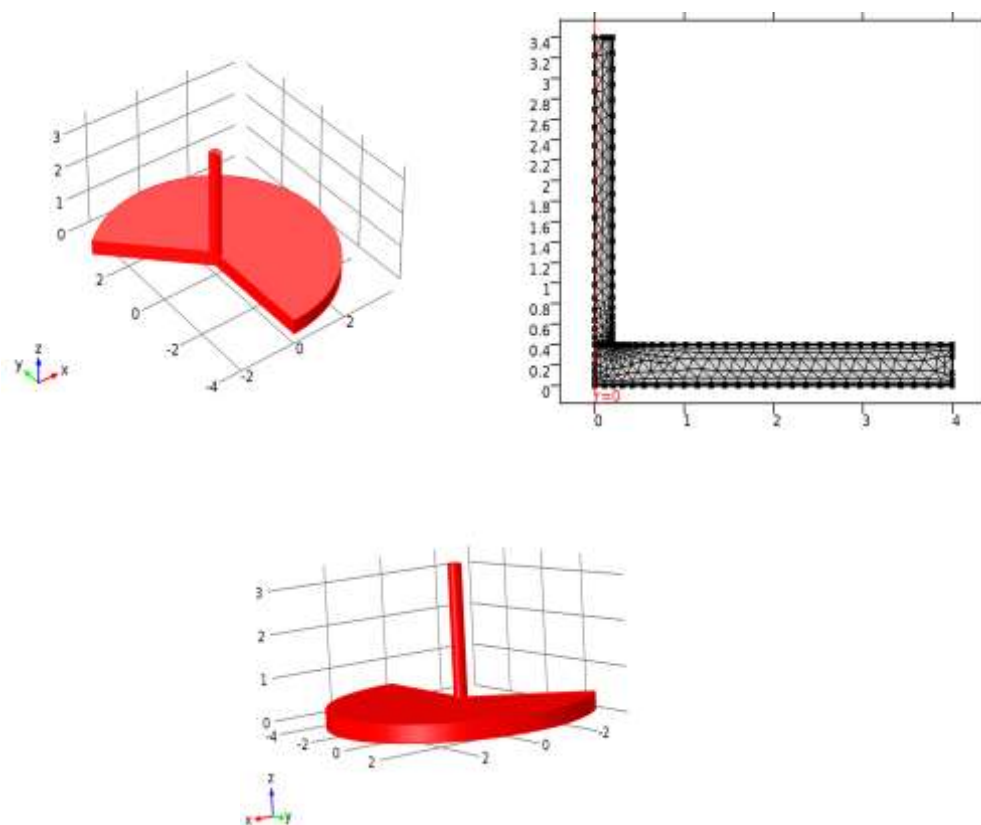


Figure (IV.6) le maillage et les différentes faces de la géométrie de cheminée dans d'espace de travail.

IV.4 Caractéristique de la cheminée :

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques physiques des matériaux et des paramètres et les dimensions d'une cheminée solaire.

Tableau (IV.1) : Caractéristique de quelques paramètres lors d'essai d'une cheminée solaire

Matériaux	λ 10. m ⁻¹ .K ⁻¹	C_p j.kg ⁻¹ .K ⁻¹	ρ kg.m ⁻³	a 10 ⁶ .m ² .s ⁻¹	Hauteur	Surface	Epaisseur
PVC	0,15	960	1380	0,11	3 m	ϕ 40 cm	5 mm
L'air	0,026	1006	1,24		/	/	/

IV.4.1. Les conditions climatiques de la région pour une journée :

Température ambiante : 25 °C.

Vitesse de l'air à l'entrée : 5 m/s.

Température de l'air à l'entrée : 25 °C

Humidité relative : 45%

Le coefficient de convection de l'air est calculé d'après la vitesse d'écoulement. h

IV.4. 2. Caractéristique de collecteur :

Emetteur récepteur	0,27
Réflexion miroir	0.93
Absorption du récepteur	0,96
Efficacité optique [%]	0.77
Ratio de concentration	36 : 1
Hauteur d'ouverture [m]	35 cm
Surface [m ²]	12
Epaisseur de bâche	1.5 mm

IV.4.3 Flux de chaleur de la région :

Le soleil se lève progressivement à mesure que le soleil s'élève au sommet augmente la température et augmente également le courant à la surface de la terre. La quantité de la chaleur rayonnée chaque instant avec une température différente en termes de temps, sachant qu'il y a une valeur marginale chaque jour et c'est pourquoi nous avons sélectionné trois cas dans un jour c'est-à-dire trois période de flux solaire différents ; du matin, la sieste et de soir. L'échange de chaleur est efficace dans chaque période, ce qui rend le mouvement de l'air.

IV.5. Résultats de la simulation :

Les résultats de simulation sont divisés en deux parties, au cours de la journée on choisit deux période avec température différente, car le flux de chaleur le matin et à la sieste, il n'y a pas de disparité uniforme entre les deux périodes, le tableau (IV-2) ci-dessous représente les caractéristiques et les paramètres de chaque période et les résultats de température obtenus dans chaque cas.

Tableau (IV-2) : les résultats de température de chaque période

Caractéristiques	Résultats	
	période de la matinée (les valeurs)	période de Siesta (les valeurs)
Flux de chaleur	200 W/m ²	800 W/m ²
Temperature resultant	314 K	330 K
Le temps	Du lever jusqu'à 11h00	Du lever jusqu'à 11h00
Température de l'air à l'entrée	25 °C ou 398 K	25 °C ou 398 K
Vitesse de l'air à l'entrée	5 m/s	5 m/s

IV.5.1. Résultats de période de la matinée :

Nous commençons la première présentation des résultats du matin est prolongée du lever jusqu'à à 11 heures pour être à ce stade, le soleil n'est pas performante avec un débit de chaleur moyenne estimée de 200 Watt mètres carrés et à la température moyenne de 25 ° C, ce qui équivaut à 398 Kelvin. La vitesse moyenne du vent estimé dans cette période est de 5 mètres par seconde.

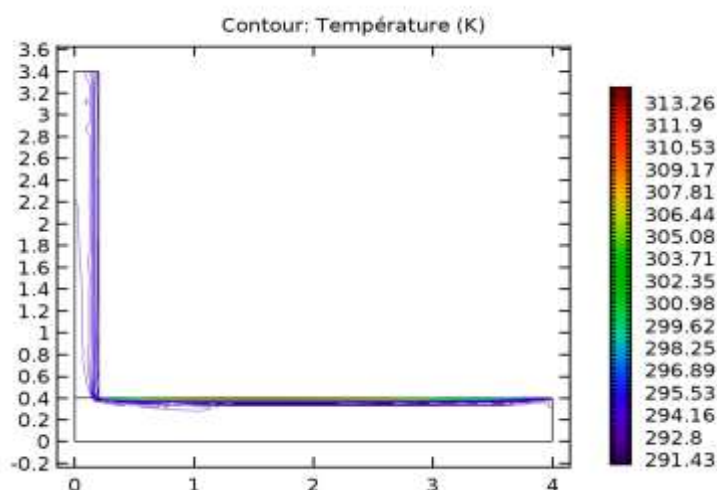
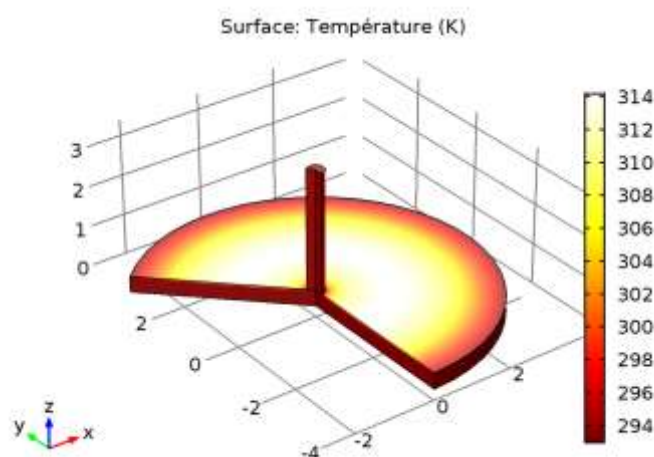


Figure (IV.7) distribution de la température de l'air en 2D à géométrie axisymétrique le long de la cheminée, dans la période de la matinée. $Q = 200 \text{ W} / \text{m}^2$

Dans la figure (IV.7), on remarque que la température est plus élevée sur la surface du collecteur, mais lorsque nous éloignons de ce dernier, on observe que le gradient de la

chaleur sur la surface de collecteur diminue progressivement. Il est très important de retirer la sortie d'air dans basse et plus le r la surface X et Y chaleur n'est pas



a température est e que la chaleur à chaleur et que la

Figure (IV.8) distribution de champ de température en 3D (ht) de période de la matinée.

Dans la figure (IV.8), on voit que l'échange de chaleur répartis sur la surface de la collecteur où le plus proche du centre de la cheminée solaire augmente la température et le plus loin de l'axe de la cheminée solaire basse température La chute de température lors de l'entrée de l'air bar dans le trou qui lui est attribuée dans le collecteur dans la première phase, la température est faible et après avoir entré la température monte se rapprochant progressivement de l'axe de la cheminée solaire et ce par l'écoulement de la chaleur du soleil et de réchauffement de la planète au sein du collecteur.

IV.5.2. Résultats de période de Sieste :

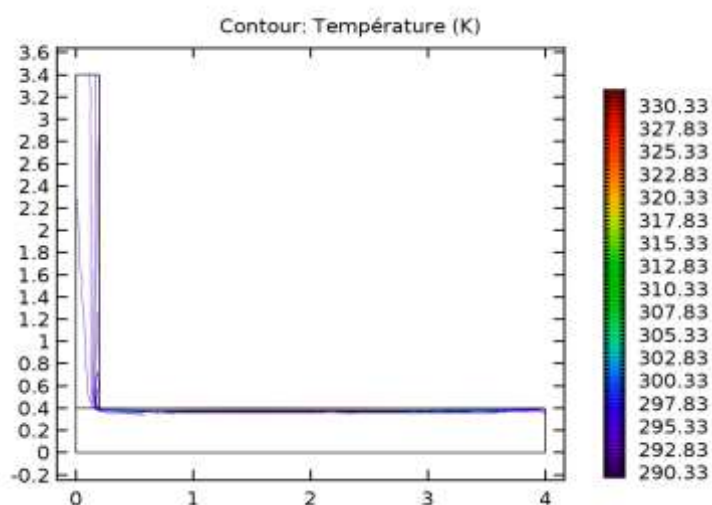


Figure (IV.9) distribution de la température de l'air en 2D à géométrie axisymétrique le long

de la cheminée, dans la période de la sieste. $Q = 800 \text{ W / m}^2$

Comme le montre la figure IV - 9 la différence de température est claire que plus que les résultats de la première période de temps parce que dans cette forme nous avons atteint un degré de température à 330 Kelvin, parce que le flux de chaleur du soleil est considérablement fort à ce moment que nous voyons que l'échange de chaleur. Il est toujours à la surface du collecteur et chaque fois que l'on passe à la périphérie vers le centre, on observe une augmentation de la température et on remarque aussi le flux d'air dans la cheminée est affecté par la chaleur. D'après ce phénomène on conclut que l'augmentation de la température est influencée sur la vitesse de l'air sur les axes X et Y.

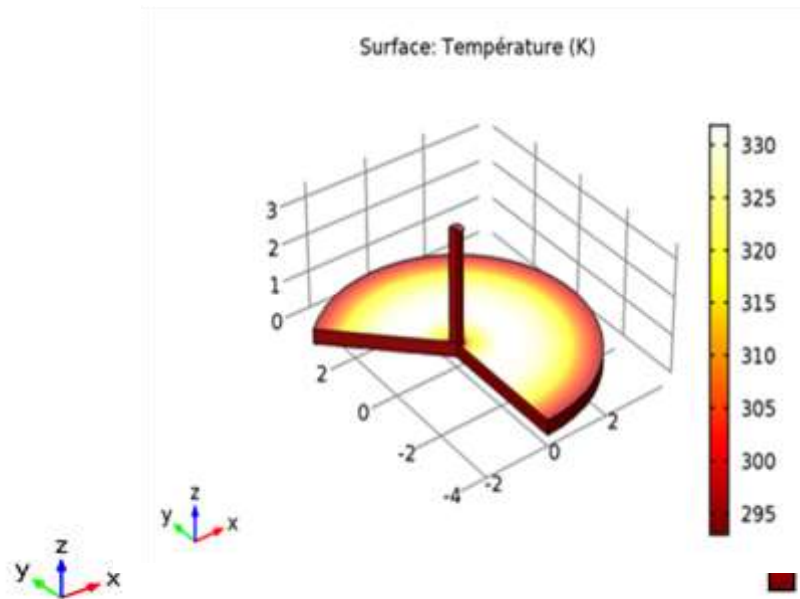


Figure (IV.10) *distribution de champ de température en 3D (ht) dans de période de la sieste.*

En ce qui concerne la forme de la représentation des graphes tridimensionnelle des deux figures IV.8 et IV10 ; ces différents que les courbes de température, alors notant également sous cette forme que la température est élevée au centre de la cheminée et bas en dessous de celle-ci ; pour d'autres machines et profite, l'augmentation de cette température est accélérer le mouvement de l'écoulement d'air, alors on peut dire que l'efficacité de la chaleur dans cette période est très acceptable.

IV.6 Conclusion :

Après avoir appris sur ce programme et d'identifier les avantages que nous parvenions au programme de simulation COMSOL Multiphysics. La manipulation des projets dans ce logiciel est très difficile sa demande beaucoup du temps en comparaison avec d'autres langages de programmation comme Matlab ou fortran, par contre il est très efficace par rapport à la réalité et la complexité des phénomènes physiques existant dans notre cas d'étude

telle qu'elle explique la situation réelle, ce qui permet de donner des résultats logiques avec la science. Ce travail utilise un certain nombre de logiciels avec les dernières mises à jour COMSOL Multiphysics, nous avons utilisé seulement les modules CFD de transfert thermique et de la mécanique de fluides, pour simuler l'échange de chaleur dans la cheminée.

Conclusion général :

De toute évidence, les énergies renouvelables seront de plus en plus présentes dans un futur proche et c'est grâce à leurs multiples qualités de coût, simplicité et durabilité qu'elles s'imposeront face aux énergies traditionnelles.

Avec plusieurs sources inépuisables et durables comme le vent, la géothermie, la biomasse, l'énergie des mers et surtout le soleil ce dernier vu naître plusieurs techniques afin de s'approvisionner de son énergie et parmi eux la cheminée solaire. Cette cheminée constitue d'abord un moyen très intéressant de produire de l'énergie électrique renouvelable en utilisant différentes réactions physiques connues et maîtrisées par l'homme depuis quelques dizaines d'années (Effet thermosiphon, convection, effet de serre).

Pour fonctionner au mieux, une cheminée solaire doit être construite dans une région très ensoleillée et disposant de nombreux espaces inhabités ; les endroits les plus favorables se trouvent en Afrique du Nord et principalement au Sahara, au sud de l'Inde, dans le centre de l'Australie et aux Etats-Unis. Le désert algérien est donc parmi les endroits les plus remarquables au monde où l'ensoleillement global annuel est maximal et où les surfaces inoccupées ne manquent pas.

L'objectif principal de notre étude pour atteindre la plus grande efficacité thermique possible dans la cheminée solaire pour chauffer l'air pour produire une plus grande vitesse disponible pour l'air de fonctionner les turbines. Nous avons parlé de l'étude des différents modèles conçus avant maintenant « cheminée solaire » en Espagne, l'Inde, la Tunisie et l'Iran ...

Nous avons simulé chaleur à l'intérieur de la cheminée solaire pour chauffer l'air pour produire rapidement le débit d'air pour faire tourner la turbine pour produire de l'énergie électrique

Les résultats attestent avoir obtenu de bons résultats pour la chaleur pour former le flux d'air à l'intérieur de la cheminée solaire est trop grande, atteindre son apogée dans la période 11h00 -15h30. Qui se sont élevées à 330 kelvin et cela nous montre que la cheminée solaire dans notre région offre un bon rapport coût-efficacité.

Un grand nombre des facteurs qui affectent la température à l'intérieur de la cheminée solaire, y compris le changement de température au fil du temps dans des endroits différents de la forme. A cet effet, nous avons examiné trois endroits, la température de la chaleur degrés de cheminée solaire, entrée d'antenne au galop et le degré de chauffage central et de la température

Les résultats obtenus dans ces simulations nous disent que la cheminée solaire pour un projet de production d'énergie électrique est un projet valable dans notre région et tout le désert algérien et que nous dirigeons notre attention sensible à l'exception de ce projet

LA BIBLIOGRAPHIE

Chapitre I:

1. Too, J.H. and C.N. Azwadi, A brief review on solar updraft power plant. J. Adv. Rev. Sci. Res, 2016. 18: p. 1-25.
2. Fluri, T.P., Turbine layout for and optimization of solar chimney power conversion units. 2008, Stellenbosch: Stellenbosch University.
3. Zhou, X., et al., Simulation of a pilot solar chimney thermal power generating equipment. Renewable Energy, 2007. 32(10): p. 1637-1644.
4. Zhou, X., et al., Experimental study of temperature field in a solar chimney power setup. Applied Thermal Engineering, 2007. 27(11): p. 2044-2050.
5. Dai, Y., H. Huang, and R. Wang, Case study of solar chimney power plants in Northwestern regions of China. Renewable Energy, 2003. 28(8): p. 1295-1304.
6. Tayebi, T. and M. Djezzar, Numerical Analysis of Flows in a Solar Chimney Power Plant with a Curved Junction. International Journal of Energy Science, 2013. 3(4).
7. Chekirou, W., N. Boukheit, and T. Kerbach, Différents modes de transfert de chaleur dans un absorbeur d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique. Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen, 2007: p. 21-28.
8. Beneke, L., C. Fourie, and Z. Huan, Investigation of an octagon-shaped chimney solar power plant. Journal of Energy in Southern Africa, 2016. 27(4): p. 38-52.
9. Sangi, R., M. Amidpour, and B. Hosseinizadeh, Modeling and numerical simulation of solar chimney power plants. Solar Energy, 2011. 85(5): p. 829-838.
10. Asnaghi, A. and S. Ladjevardi, Solar chimney power plant performance in Iran. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. 16(5): p. 3383-3390.
11. Chergui, T., et al., Technologie de la cheminée solaire pour la production de l'énergie.

12. Cao, F., et al., Design and simulation of the solar chimney power plants with TRNSYS. Solar Energy, 2013. 98: p. 23-33.

13. Nia, E.S. and M. Ghazikhani, Numerical investigation on heat transfer characteristics amelioration of a solar chimney power plant through passive flow control approach. Energy Conversion and Management, 2015. 105: p. 588-595.

14. Jemli, M.R., et al., Experimental investigation of solar tower with chimney effect installed in CRTEn, Tunisia. International Journal of Hydrogen Energy, 2016.

Chapitre II :

1. Meza, E.G., *Schlaich Bergermann und Partner*. El domo del Palacio de los Deportes de la ciudad de México se convirtió en la estructura olímpica para deportes bajo techo de mayores dimensiones construidas hasta esa fecha.: p. 443.

2. Schlaich, J. Das Aufwindkraftwerk: Strom aus der Sonne. Stuttgart : Deutsche Verlagsanstalt, 1994, ISBN 3-421-03074-X.

3. Schlaich, J.; Schiel, W.; Friedrich, K. Abschlussbericht Aufwindkraftwerk: Übertragbarkeit der Ergebnisse von Manzanares auf größere Anlagen. BMFT-Förderkennzeichen 03242490. Schlaich Bergermann und Partner 1990.

4. Becker, M.; Meinecke, W. Solarthermische Anlagen-Technologien im Vergleich. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1992.

5. DEW Vereinigung deutscher Elektrizitätswerke: Stromerzeugungskostenvergleich 1990 in Betrieb gehender großer Kern- und Steinkohlekraftwerksblöcke.

6. Heise, O. Schadensvermeidung. Ein Weg zur Abschätzung der externen Kosten der Energieversorgung. BWK, Band 45, 1993, Nr. 3.

Chapitre III :

1 BOUZIANE Khadidja, Etude d'une installation photovoltaïque de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, mémoire de magister, spécialité énergétique et procédé, université kasdi merbah Ouargla, mai 2011.

2. Jörg Schlaich, The solar chimney: electricity from the sun, [Edition Axel Menges](#), Novembre 2004.
3. Martin Kaltschmitt, Wolfgang Streicher, Renewable energy: technology economics and environment, Edition Springer, 2007.
4. NEGROU Belkhir, Conception et analyse de fonctionnement d'une turbine éolienne installée dans une cheminée solaire, mémoire de magister, spécialité Thermo-Energétique, université Kasdi Merbah Ouargla, Novembre 2007.
5. S. Nizetic , B. Klarin, A simplified analytical approach for evaluation of the optimal ratio of pressure drop across the turbine in solar chimney power plants, Applied Energy, mai 2009.
6. <http://www.tour-solaire.fr/nouvelles-infos.php> , mars 2011.

Chapitre IV:

1. M., TRAD, Convection naturelle et forcée dans un cylindre vertical poreux. Analyse numérique du transfert de chaleur et influence de la matrice solide sur l'écoulement Thèse de Docteur en Sciences 2015
2. Ming Tingzhen , Liu Wei , Xu Guoling , Xiong Yanbin , Guan Xuhu , Pan Yuan, Numerical simulation of the solar chimney power plant systems coupled with turbine, Renewable Energy, Aout 2007.
3. Suhas Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, Washington D.C, (1980).

Résumé :

La tour de l'énergie solaire est un centre d'énergie renouvelable, conçu pour diriger l'air chaud des turbines solaires vers la production d'électricité, le concept a été développé par l'ingénieur allemand Jörg Schlach

Cette étude présente l'étude des échanges thermiques dans une tour saline, de sorte que l'étude visait à simuler le flux d'air dans une cheminée solaire pour obtenir l'énergie cinétique théorique de l'air récupérable dans celui-ci

Cette étude est divisée en deux parties. Dans la première partie, une recherche bibliographique sur le travail de recherche récent des tours solaires ainsi que le principe de construction et d'exploitation et d'expliquer les différentes parties de la tour de l'énergie solaire,

À la deuxième fin, grâce au programme de simulation **ComSol**, ce dernier me permet d'effectuer cette simulation après t structure avec un autre programme de construction

Mots clés : Tour solaire, transfert thermique, modélisation, cheminée solaire

Abstract:

The solar power tower is a renewable energy center, built to direct the hot air of the solar power turbines to the production of electricity, the concept has been developed by the German engineer **Jörg Schlach**

This study presents the study of thermal exchanges in a saline tower, so the study was directed towards simulating the airflow in a solar chimney to obtain the theoretical kinetic energy of the recoverable air in this one

This study is divided into two parts. In the first part, a bibliographic research on the recent research work of the solar towers and also the construction and operation principle and explain the different parts of the solar power tower,

At the second end, thanks to the **Comsol** simulation program, the latter allows me to perform this simulation after t structure with another program of construction

Key words: Solar tower, thermal transfer, modeling, solar chimney

ملخص:

مدخنة الطاقة الشمسية هو مركز للطاقة المتجددة، الذي بني لتوجيه الهواء الساخن من الشمس لتوربينات الطاقة لإنتاج الكهرباء، وقد تم تطوير هذا المفهوم من قبل المهندس الألماني يورغ شلايتش. تقدم هذه الدراسة دراسة التبادلات الحرارية في برج ملحي، لذا فقد تم توجيه الدراسة نحو محاكاة تدفق الهواء في مدخنة شمسية للحصول على القدرة الحركية النظرية للهواء القابل للاسترداد في هذا واحد. وتنقسم هذه الدراسة إلى جزأين، في الجزء الأول بحث بيليوغرافي على أعمال البحث الأخيرة من الأبراج الشمسية وأيضاً البناء ومبدأ التشغيل وشرح الأجزاء المختلفة من برج الطاقة الشمسية، في الطرف الثاني، وذلك بفضل برنامج محاكاة (كومصول)، وهذا الأخير يسمح لي لإجراء هذه المحاكاة بعد رسم هيكل المدخنة الشمسية داخل هذا البرنامج واعطائه القيم اللازمة لهذه الدراسة. الكلمات المفتاحية: برج شمسي، نقل حراري، نمذجة، مدخنة شمسية.