

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en
Filière : **Energie Renouvelable** Spécialité : **Energie
Renouvelable en Mécanique**

THEME

**ETUDE DES PERFORMANCES ENERGETIQUES
D'UNE CENTRALE A CHEMINEE SOLAIRE**

Présenté par :

 **GRINE Imad Eddine-Noui**

Promotrice :

Dr. GUERRACHE Fadila

Encadreur :

Mr. BOUALLEG Salim Mekki

Promotion 2021- 2022

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en
Filière : **Energie Renouvelable** Spécialité : **Energie
Renouvelable en Mécanique**

THEME

**ETUDE DES PERFORMANCES ENERGETIQUES
D'UNE CENTRALE A CHEMINEE SOLAIRE**

Présenté par :

 **GRINE Imad Eddine-Noui**

Promotrice :

Dr. GUERRACHE Fadila

Encadreur :

Mr. BOUALLEG Salim Mekki

Promotion 2021- 2022

Dédicas

Remerciements

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant de m'avoir donné la santé, la volonté et la force pour survivre et pouvoir endurer ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Pour commencer, merci à mes très chers parents, mon père Amor et ma mère GRINE Latifa, pour tout l'amour qu'ils m'ont donné, pour tout ce qu'ils ont fait pour moi, je ferai de mon mieux pour rester un homme de fierté à leurs yeux avec l'espoir de ne jamais les décevoir.

- Merci à AMTI Rachida et AMTI Fatima Zahraa, elles sont les meilleures, sans oublier AMTI Aicha et AMTI Fouzia. Et aussi, merci à mes tantes et toute la famille HOUICHI. Je tiens également à remercier mes sœurs et mon frère Mohamed Tahir.
- Une grande pensée à ma grand-mère Halima que Dieu bénisse son âme et lui accorde le plus haut degré du paradis. Et je souhaite une longue vie à ma grand-mère Fatima.
- Un spécial merci à ma future femme Fatima El-Zahraa qui a été avec moi et m'a encouragé tout les jours sans oublier sa famille BELKOUK.

Au terme de ce travail je tiens à exprimer mes profondes gratitudes et mes vifs remerciements :

- Tout d'abord, mes remerciements s'adressent à ma promotrice Dr Fadila GUERRACHE pour sa disponibilité et son encadrement, ainsi que son aide pour la réussite de ce mémoire.
- Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide de groupe d'IAP de Boumerdes et spécialement Mr Abdelhafid DJEMAI, ainsi que mon encadreur Mr Salim Mekki BOUALLAG, je les remercie pour la qualité de leur encadrement et le sérieux dans leur travail.
- Par ailleurs, je tiens à remercier Pr Madjid HACHEMI pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury de soutenance. Mais également, j'exprime aussi mes sincères remerciements à Pr Hamid AKNOUCHE pour avoir bien voulu accepter d'examiner ce travail. Et enfin, je remercie l'ensemble des enseignants du département de génie mécanique, spécialement Dr Ahmed CHELLIL, le chef du département.

Imad Eddine-Noui

ملخص: الطاقة هي أساس كل نشاط بشري، استخدام الطاقات المتجددة قديم جدًا في تاريخ البشرية. ومع ذلك، منذ ظهور الثورة الصناعية، تحولت احتياجات الطاقة نحو الوقود الأحفوري على حساب تطوير واستخدام الطاقات المتجددة. المدخنة الشمسية هي جهاز شمسي مصمم لتحويل طاقة أشعة الشمس إلى طاقة حركية والتي بدورها تتحول إلى طاقة ميكانيكية ثم كهربائية. المبدأ يأتي من ألمانيا: تعتمد العملية على التسخين بواسطة تأثير الاحتباس الحراري لحجم من الهواء، والهواء الساخن ذو الكثافة الأقل كثافة والذي يخضع لطفو أرخميدس يولد حركة صعود تخلق رياحًا عند قاعدة المدخنة. سيتم تسخير الطاقة الحركية للسائل لتدوير توربينات الرياح. الغرض من هذه الدراسة هو تصميم نموذج محطة مدخنة شمسية. نتوقع من هذه الدراسة نمذجة رياضية، والتي نريد تحقيقها، والتي ستسمح لنا بالتنبؤ الدقيق لأداء نموذجنا

الكلمات الدالة: الطاقة المتجددة؛ الطاقة الشمسية؛ مدخنة شمسية متشعب؛ مدخنة؛ العنفة؛ الاحتباس الحراري؛ كفاءة الطاقة؛ إنتاج الكهرباء

Résumé : L'énergie est la base de toute activité humaine. L'utilisation des énergies renouvelables est très ancienne dans l'histoire de l'humanité. Cependant, depuis l'avènement de la révolution industrielle les besoins en énergie sont tournés vers les énergies d'origine fossile au détriment du développement et l'application des énergies renouvelables. La cheminée solaire est un dispositif solaire conçu pour transformer l'énergie des rayons solaires en énergie cinétique qui à son tour est transformée en énergie mécanique puis électrique. Le principe vient d'Allemagne : le fonctionnement est basé sur l'échauffement par effet de serre d'un volume d'air, l'air chaud à masse volumique moins dense soumis à la poussée d'Archimède engendre un mouvement d'ascension créant un vent à la base de la cheminée. L'énergie cinétique du fluide sera exploitée pour faire tourner une turbine à vent. Le but de cette étude est la conception et modélisation d'une centrale à cheminée solaire. On attend de cette étude une modélisation mathématique, à laquelle on veut aboutir, qui nous permettra une prédiction précise de performance de notre modèle.

Mots clés : Energies renouvelables ; énergie solaire ; cheminée solaire ; collecteur ; cheminée ; turbine ; effet de serre ; performances énergétiques ; production d'électricité.

Abstract: Energy is the basis of all human activity. The use of renewable energies is very old in the history of humanity. However, since the advent of the industrial revolution, energy needs have turned towards fossil fuels to the detriment of the development and application of renewable energies. The solar chimney is a solar device designed to transform the energy of the sun's rays into kinetic energy which in turn is transformed into mechanical and then electrical energy. The principle comes from Germany: the operation is based on the heating by greenhouse effect of a volume of air, the hot air with a less dense density subjected to the buoyancy of Archimedes generates a movement of ascent creating a wind at the base of the chimney. The kinetic energy of the fluid will be harnessed to spin a wind turbine. The purpose of this study is the design and modeling of a solar chimney plant. We expect from this study a mathematical modeling, to which we want to lead, which will allow us a precise prediction of the performance of our model.

Keywords: Renewable energies; solar energy ; solar chimney; manifold; chimney ; impeller; greenhouse effect ; energy performances ; electricity production.

Nomenclature

A_{coll}	Surface de la toiture du collecteur [m^2]
A_C	Section à la sortie du collecteur [m^2]
C_P	Capacité calorifique de l'air [$J/kg\ K$]
D	Diamètre de la cheminée [m]
f	Coefficient de frottement
F_R	Facteur d'extraction de chaleur
F'	Facteur d'efficacité du collecteur
F''	Facteur d'écoulement
g	Accélération de la gravité [m/s^2]
G	Rayonnement solaire incident [W/m^2]
H_C	Hauteur de la cheminée [m]
\dot{m}	Débit massique de l'air [kg/s]
T	Température absolue [K]
T_0	Température ambiante à l'entrée du collecteur [K]
ΔT	Différence de température entre l'entrée et la sortie du collecteur [K]
ΔT_a	Différence de température entre la couche d'absorption de chaleur et l'air ambiant [K]
\dot{Q}	Flux de chaleur reçue par le fluide l'air au niveau du collecteur [W]
U	Coefficient de transfert thermique total du débit d'air de la cheminée vers l'air atmosphérique [$W/m^2\ K$]

U_{∞}	Coefficient de transfert de chaleur par convection entre la paroi de la cheminée et l'air ambiant [$W/m^2 K$]
U_f	Coefficient de transfert de chaleur par convection entre la paroi de la cheminée et l'écoulement [$W/m^2 K$]
V	Vitesse d'écoulement [m/s]
P_{tot}	Puissance totale développée par le fluide [W]
ΔP_{tot}	Chute de pression au niveau de la cheminée [Pa]
Δp_s	Différence de pressions statiques [Pa]
Δp_d	Différence de pressions dynamiques [Pa]

Symboles

α	Coefficient d'absorption effective du rayonnement solaire du collecteur
β	Coefficient de perte énergétique par convection, par radiation et par stockage du sol
$\xi\alpha$	Produit de l'absorbance et la transmittance
γ_{∞}	Taux d'écoulement de la température de l'air
δ	Epaisseur de la paroi de la cheminée
λ	Coefficient de transfert thermique conductrice
η_{glob}	Rendement global
η_{coll}	Rendement du collecteur
η_c	Rendement de la cheminée
η_{tw}	Rendement de la turbine à air

Indices

Coll	Collecteur
c	Cheminée
tw	Aéro-turbine
glo	Global
tot	Total
s	Statique
$\infty, 0$	Environnement
1	Sortie collecteur, entrée cheminée
2	Sortie turbine
3	Sortie cheminée

Liste des Figures

Figure 1 : Institut Algérien du Pétrole l'I.A.P Boumerdes.....	5
Figure II.1 Centrale cheminée solaire.....	10
Figure II.2 Collecteur de cheminée solaire.....	12
Figure II.3 Cheminée de tour Solaire.....	13
Figure II.4 Turbine pour cheminée solaire de large diamètre.....	14
Figure II.5 (a) Turbines verticales, (b) Petites turbines horizontale.....	14
Figure II.6 Prototype de Manzanares en Espagne.....	16
Figure III.1 Schème représentatif d'une différente partie d'une cheminée solaire.....	18
Figure III.2 Diagramme Température – Entropie pour un cycle à air standard.....	22
Figure III.3 Schéma d'une CCS montrant les différents points d'évolution du cycle.....	22
Figure III.4 Diagramme Température – Entropie pour un cycle à air dans une centrale à cheminée solaire avec perte d'énergie.....	24
Figure III.5 Bilan thermique sur une tranche du collecteur.....	27
Figure IV.1 Schéma de discrétisation.....	30
Figure IV.2 Organigramme d'étape de calcul du programme de résolution du modèle de Gannon.....	32
Figure V.1 Effet de la variation de l'irradiation solaire sur la puissance développée.....	34
Figure V.2 Influence de l'irradiation solaire sur le rendement de la CCS.....	35
Figure V.3 Effet de la variation de la hauteur de la cheminée sur la puissance disponible.....	36
Figure V.4 Influence de la hauteur de la cheminée sur le rendement de la CCS.....	37

Figure V.5 Influence du rayon du collecteur sur la puissance développée.....	38
Figure V.6 Evolution du rendement de la CCS en fonction du rayon du collecteur.....	39
Figure V.7 Influence de la section de la cheminée sur la puissance développée.....	40
Figure V.8 Influence de la section de la cheminée sur le rendement.....	41
Figure V.9 Influence de la hauteur du collecteur sur la puissance disponible.....	42
Figure V.10 Influence de la hauteur du collecteur sur le rendement de la CCS.....	43
Figure V.11 Profil de température dans le collecteur pour le modèle de A.J Gannon & al.....	44

Liste des Tableaux

Tableau III.1 Description de différentes parties du système.....	20
Tableau V.1 Dimensions du prototype CCS.....	33

Sommaire

Dédicace

Remerciements

Résumé

Abréviations

Liste de Figures

Liste des Tableaux

Introduction Générale	1
Chapitre I : Synthèse Bibliographiques	6
I.1. Introduction.....	6
I.2. Littérature sur le développement de cheminée solaire.....	6
I.3. Conclusion	8
Chapitre II : Aperçu de la Technologie	9
II.1. Introduction	9
II.2. Historique	9
II.3. Homme et l'énergie	10
II.4. Principaux éléments de la cheminée solaire	11
II.4.1. Collecteur	11
II.4.2. Cheminée.....	12
II.4.3. Turbine	13
II.5. Avantages et inconvénients de la cheminée solaire.....	14
II.5.1. Avantages	15
II.5.2. Inconvénients	15
II.6. Projets réalisés de cheminée solaire	15
II.6.1. Projet de Manzanares	15
II.6.2. Projet de la baie Mongolie intérieure en Chine.....	16
II.7. Conclusion	17

Chapitre III : Méthodologie et Conception d'une Centrale à Cheminée Solaire..... 18

III.1. Introduction 18

III.2. Description et principe de fonctionnement 18

III.2.1. Collecteur 19

III.2.2. Cheminée 19

III.2.3. Turbine..... 20

III.3. Hypothèses générales de CCS..... 21

III.4. Modèle de A. J. Gannon & al..... 21

III.4.1. Cycle parfait de la cheminée solaire 21

III.4.2. Rendement de la CCS 22

III.4.3. Cycle réel de la centrale à cheminée solaire 24

III.4.4. Hypothèse de modélisation du cycle réel 24

III.4.5. Rendement de la turbine 24

III.4.6. Perte par frottement dans la cheminée 25

III.4.7. Perte cinétique à la sortie de la cheminée 25

III.4.8. Rendement global de la détente de l'air..... 25

III.4.9. Rendement du cycle réel..... 25

III.4.10. Puissance développée par le cycle réel 26

III.4.11. Collecteur 26

III.5. Conclusion..... 27

Chapitre IV : Simulation et Résolution..... 28

IV.1. Introduction 28

IV.2. Modèle de A. J. Gannon et al..... 28

IV.2.1. Généralités et principe de discrétisation des équations 28

IV.2.2. Erreur de troncature 28

IV.2.3. Consistance.....	28
IV.2.4. Stabilité.....	29
IV.2.5. Convergence.....	29
IV.2.6. Erreurs.....	29
IV.2.7. Système collecteur.....	29
IV.2.8. Résolution du système d'équations.....	30
IV.3. Conclusion.....	32
Chapitre V : Résultats et Discussion.....	33
V.1. Introduction.....	33
V.2. Influence de la variation de l'irradiation solaire G.....	34
V.3. Influence de la variation de la hauteur de la cheminée Hch.....	36
V.4. Influence de la variation du rayon du collecteur « Rcoll ».....	38
V.5. Influence de la variation de la section de la cheminée.....	40
V.6. Influence de la variation de la hauteur du collecteur « Hcoll ».....	42
V.7. Profil de température dans le collecteur.....	44
V.8. Conclusion.....	45
Conclusion Générale.....	46
Références Bibliographiques.....	47

Introduction Générale

↳ Introduction Générale

Si le vingtième siècle a été marqué par l'explosion de la production et de la consommation énergétique de l'humanité, le vingt-et-unième siècle se déroulera : sous le signe des économies d'énergie. Le réchauffement climatique est devenu une certitude et les politiciens du monde entier ont pris conscience des conséquences sociales liées aux impacts environnementaux de ce phénomène. Comme alternative à ces préoccupations, le développement et l'implémentation des énergies renouvelables sont incontournables. Des ressources énergétiques illimitées et abondamment disponibles existent et doivent être exploitées.

Dans l'optique de la production de l'électricité, l'énergie solaire est une source d'énergie propre et inépuisable. Actuellement les technologies de concentration solaire sont celles qui présentent le plus de possibilités pour une exploitation commerciale.

La tour solaire à effet de cheminée est l'un des moyens pour la production de l'énergie électrique, c'est une centrale à énergie renouvelable, construite de manière à canaliser l'air chauffé par le soleil afin d'actionner des turbines pour produire de l'électricité en utilisant le rayonnement solaire. Ce dispositif solaire est l'une de ces études qui intéressent plusieurs pays.

La cheminée solaire est déjà mise en application et a montré un succès dans le domaine du développement d'exploitation des énergies renouvelables. Mais toujours l'augmentation de l'efficacité de production de la cheminée solaire fait l'objet de plusieurs études, et parmi les paramètres affectant l'efficacité de la cheminée solaire sont les dimensions, à savoir : la hauteur et le diamètre de cheminée, le rayon de collecteur et la hauteur de toit de collecteur. L'étude de l'effet de ces paramètres sur la production électrique de cheminée solaire sera déjà un intérêt sur l'amélioration de la conception de cet équipement pour une production plus de l'énergie.

Beaucoup de facteurs, tels que les matières employées pour construire la cheminée solaire, taille de la cheminée solaire, matériaux de collecteur (capteur solaire), et le contenu de sol ou de roche sous le capteur solaire, peuvent influencer à la performance de la cheminée solaire.

Ce mémoire de fin d'étude présente un projet intégrant des énergies renouvelables. Notre projet est consacré à conception et modélisation d'une centrale à cheminée solaire pour la

production de l'électricité. Cette étude est faite à l'Institut Algérien de Pétrole l'IAP de Boumerdes, au sein de ces laboratoires sou notre stage a été effectué.

La réalisation de cette étude a nécessité un travail réparti en une introduction générale ainsi que cinq chapitres et des références bibliographiques : une étude bibliographique sur les travaux relatifs ayant une certaine similarité avec notre étude fait l'objet du premier chapitre. Généralités sur les cheminées solaires a été développée dans le deuxième chapitre. Dans le suivant, précise le cadre contextuel de l'étude, méthodologie et modélisation de conception d'une centrale à cheminée solaire. Et le quatrième chapitre contient la simulation et la résolution des équations du modèle de Gannon. Le cinquième chapitre et le dernier concerne les résultats et discussion de notre travail.

Enfin, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale qui illustre les principaux résultats obtenus à travers cette étude.

↳ **Présentation de l'Organisme d'Accueil L'I.A.P (Institut Algérien du Pétrole)**

Création de l'IAP

L'IAP a été créé par Décret n° 65-269 du 29/11/1965 en tant qu'EPA (Voir l'accord relatif à la contribution du gouvernement français à la constitution et au fonctionnement de l'Institut algérien du pétrole, le 28 juillet 1965).

Il a vu sa mission étendue et précisée par le Décret n° 73-51 du 28/02/73 qui lui a fait prendre la dénomination d'Institut Algérien du Pétrole, du Gaz, de la Chimie, de la Pétrochimie, des Matières Plastiques et des Moteurs.

La création de l'IAP (après celle de SONATRACH en 1963) a répondu à des préoccupations particulières de l'époque pour doter le Secteur de l'Energie d'une main d'œuvre qualifiée et rapidement disponible pour couvrir les besoins induits par le développement rapide de l'activité pétrolière.

Le Secteur des Hydrocarbures avait à répondre de 1964 à 1969 aux besoins en personnels qualifiés induits par :

- Exploitation de l'Oléoduc de Haoud El Hamra.
- Gazoduc de Hassi Rmel.

- Skikda.
- Complexe d'Engrais Azotés d'Arzew.

La Gestion du Parc d'Appareils de Forage acquis. En réponse à ces besoins opérationnels, le Secteur s'est doté d'Instituts Spécialisés dans le domaine des Hydrocarbures et de la Chimie (IAP avec le concours de l'IFP et l'Institut National des Hydrocarbures et de la Chimie (INH) avec le concours de l'université de Goupkine de Moscou).

Ces instituts de formation sont nés suite aux insuffisances du système éducatif supérieur de l'époque conjuguées à l'important essor du développement économique. Sous Tutelle du Ministère de l'Industrie et de l'Energie, l'IAP a eu pour missions :

- Formation Supérieure dans le domaine des Hydrocarbures ;
- Formation Industrie par le Perfectionnement et le Recyclage ;
- Recherche Scientifique et Technique dans les domaines de l'Exploration, l'Exploitation des Gisements et la Transformation des Hydrocarbures.

Développement et Evolution de l'IAP

L'IAP, à travers le temps, a beaucoup évolué son programme de formation, en passant par les cycles court et long d'ingénieurs, et en arrivant au cycle de la Post-Graduation Spécialisée.

- Développement et évolution de l'IAP :
 - 1965 : Mise en place d'un Cycle Court d'Ingénieurs d'Etat Post-universitaire à Dar-El-Beida.
 - 1971 : Mise en place d'un Cycle Long d'Ingénieurs d'Etat à Boumerdès.
 - 1999 : Mise en place d'un Cycle Court d'Ingénieurs d'Etat Spécialisés à Boumerdès.
- Mise en place des Cycles Techniciens Sup et d'Ingénieurs d'Application :
 - 1966 à Hassi Messaoud, Naftogaz en 1991.
 - 1967 à Es-Sénia, au MERS en 1993.
 - 1974 à Arzew.
 - 1975 à Annaba, au MERS en 1986.
 - 1982 à Skikda.
 - 2006 Mise en place du cycle Technicien Supérieur Spécialisé à Oran et Skikda.

- Mise en place du Cycle de Post-graduation :
 - 1986, en Génie du Gaz et des Plastiques à Boumerdès.
 - 1994, consolidation aux Géosciences et à la Chimie Industrielle.
 - 2002, élargissement à l'Economie Pétrolière.
 - 2003/2004, lancement de QHSE.
 - 2006, lancement de Master en Corporate Communication.
- Mise en place du Cycle de Post-graduation Spécialisée (2003/04) à Boumerdès :
 - Géologie de Gisement.
 - Traitement et Interprétation Sismique.
 - Instrumentation Pétrolière.
 - Environnement.
 - Corrosion et Protection.
 - Raffinage.
 - Traitement et Liquéfaction du GN.
 - Technologie des Polymères.
 - Moteurs et Application.
 - Analyse et Valorisation des Hydrocarbures.
 - Commercialisation et Distribution des Produits Pétroliers.
- Majorité de créésylés a été initiée avec la Coopération :
 - Française : IFP/BEICIP pour les filières Pétrolières Classiques, l'Université de Grenoble pour Corporate Communication.
 - Américaine : IGT/SIT pour les filières Génie du Gaz et des Plastiques.
 - Allemande : GTZ pour la filière Chimie Industrielle.
 - Ecossoise : RGU pour le HSE, Economie Pétrolière et MBA.

Principales Mission de l'IAP

- Les principales missions de l'IAP se résument en :
- La formation, le perfectionnement et le recyclage dans les différents domaines d'activité du secteur de l'énergie et en particulier des hydrocarbures.

- L'organisation et la mise en œuvre des formations spécialisées et diplômées (techniciens supérieurs, ingénieurs et post-graduation spécialisée) dans les différents domaines d'activités du secteur des hydrocarbures.
- La formation de techniciens, d'opérateurs et chefs de quart dans les différentes spécialités du secteur des hydrocarbures.
- Le perfectionnement et le recyclage des cadres et techniciens en activité dans le secteur des hydrocarbures.
- La recherche appliquée orientée en priorité vers les besoins du secteur des hydrocarbures.
- La réalisation de prestations de services d'études, d'analyses et d'expertises dans ses domaines de compétences.
- L'établissement d'échanges et de partenariats avec les universités et instituts nationaux et internationaux.
- L'organisation de manifestations scientifiques et techniques.



Figure 1 : Institut Algérien du Pétrole l'I.A.P Boumerdes.

Chapitre I : Synthèse Bibliographiques

I.1. Introduction

Les énergies renouvelables désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limite de temps ou reconstituables plus rapidement qu'elles ne sont consommées.

L'utilisation de sources d'énergie renouvelables permet de réduire la pression sur les ressources naturelles et de limiter les rejets polluants dans l'atmosphère.

Différentes filières d'énergies renouvelables existent à l'heure actuelle. Elles permettent la production d'énergie mécanique, d'énergie électricité et de l'énergie thermique. De nombreuses voies de recherches se sont donc orientées vers l'utilisation des énergies renouvelables, dont l'énergie solaire dans la production de l'électricité.

I.2. Littérature sur le Développement de Cheminée Solaire

La première centrale à l'échelle a été construite en Espagne (Manzanares) par l'ingénieur allemand Jörg Schlaich en 1981. Depuis de nombreuses études théoriques et numériques ont été réalisées par de nombreux chercheurs.

Le travail *Pionnier de J. Schlaich* [1] sur le concept de la centrale à cheminée solaire pour l'exploitation de l'énergie solaire afin de produire de l'électricité, a été suivi par de nombreux travaux à caractères études pour la modélisation des CCS à grande échelle. Des études ont été effectuées à l'extrapolation des données expérimentales du prototype à Manzanares aux grandes centrales (5, 30 et 100 MW). En se basant sur un modèle mathématique, *Schlaich* a démontré qu'il n'existe pas de dimension optimale pour une cheminée solaire. Cependant si le coût de réalisation est pris en considération, la centrale peut être optimisée thermodynamiquement [2].

Gholamalizadeh et al. [3] ont présenté une analyse complète, analytique et numérique, pour prédire la performance d'une centrale solaire à cheminée à Kerman, Iran. L'influence de l'altitude du site sur le potentiel des centrales solaires à cheminée a été aussi considérée dans cette étude.

Hurtado et al. [4] ont analysé le comportement thermodynamique et la puissance que peut générer une centrale solaire à cheminée en tenant compte du sol en tant que système de stockage de chaleur, à travers une modélisation numérique dans des conditions non stationnaires. L'influence de l'inertie thermique du sol permet un gain de 10% de la puissance générée par les turbines.

Bernardes et al. [5] ont élaboré une analyse portant sur les cheminées solaires et visant le développement d'un modèle analytique et numérique permettant de décrire les performances des cheminées solaires. Ce modèle a été élaboré pour estimer la puissance de sortie des cheminées solaires ainsi que d'examiner l'effet de diverses conditions ambiantes et des dimensions structurelles caractéristiques sur la puissance développée. Les résultats du modèle mathématique ont été comparés avec les résultats expérimentaux collectés sur la centrale de Manzanares, pour être ensuite utilisé pour prédire les performances caractéristiques des CCS à grande échelle à caractère commerciale. Ces résultats montrent que la hauteur de la cheminée, le facteur de chute de pression à la turbine, le diamètre et les propriétés optiques du collecteur sont des paramètres importants pour la conception des cheminées solaires. Les auteurs ont déduit que la puissance maximale peut être atteinte lorsque le facteur de chute de pression à la turbine est égal à environ 0,97.

Backström et Gannon [6] ont présenté une approche du phénomène d'écoulement d'air dans les CCS, en développant une étude unidimensionnelle d'un écoulement de fluide compressible pour le calcul de toutes les variables thermo- dynamiques régissant cet écoulement. Ils ont montré que ces variables sont dépendantes de la hauteur de la cheminée solaire, du frottement sur les parois, des pertes supplémentaires, du friction interne et de l'échange thermique entre zones.

Gannon et Von Backström [7] se sont penchés sur une analyse thermodynamique idéale du cycle d'écoulement d'air, supposé comme gaz parfait isentropique, à travers une CCS. Ils se sont intéressés, dans une première partie, à définir les limites de fonctionnement du système en question et ont essayé de se rapprocher du cas réel en introduisant les pertes par frottement à travers le système ainsi que les pertes cinétiques à la sortie de la cheminée et le système de turbine, tout en adoptant un modèle simple qui inclue le fort couplage existant entre le débit d'air et l'élévation de la température à travers le collecteur.

Zhou et al. [8] ont proposé une étude de faisabilité pour la construction d'une CCS dans la région de Quinghai (Plateau du Tibet), en appliquant un modèle mathématique simple sur différents lieux du site.

Boualleg et al [9] ont réalisé une analyse des performances énergétiques des centrales cheminées solaires (CCS) par utilisation de différents modèles mathématiques issus de la littérature tels : le modèle de Schlaich et al., de Dai et al. Et par l'utilisation de modèles plus développés tel que le modèle de Gannon et a.l, de Zhou et al., de Ming et al. Et de Chitsomboon. La validation des résultats obtenus issus de comparaison des différents modèles théoriques avec les résultats expérimentaux du site de Manzanares a permis de mieux comparer et prédire les performances énergétiques de ces centrales. Dans une étude ultérieure, *Boualleg et al.* [10] ont étudié l'influence du vieillissement des matériaux utilisés dans les CCS sur les performances du système dans sa globalité.

I.3. Conclusion

Comme des nombreuses études, recherches et travaux déjà réalisés sur ce domaine à base de principe de professeur allemand Jörg Schlaich, les modèles de la cheminée solaire proposent souvent des résultats différents en raison des différentes approximations réalisées par chaque équipe de recherche. Après avoir recueilli toutes ses conclusions de ces scientifiques faire pour concevoir et l'étude de centrale à cheminée solaire afin de prédire ce performance. Les résultats de ce modèle serai analysés et discutés.

Chapitre II : Aperçu de la Technologie

II.1. Introduction

La plus grande partie de l'électricité consommée dans le monde aujourd'hui est produite à partir de ressources fossiles or, il est donc temps de trouver d'autres moyens de produire de l'électricité. De plus, brûler des ressources fossiles pour produire de l'énergie a un impact considérable sur l'environnement. Il faut donc développer les énergies renouvelables intéressent de plus en plus les décideurs. Ainsi, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie éolienne, les bioénergies et la géothermie sont vouées, dans un avenir proche, à se développer partout dans le monde. C'est déjà une réalité qu'il est judicieux d'étendre au plus grand bénéfice de tous : les gestionnaires, les utilisateurs et l'environnement. Leurs développements contribuent à la préservation de l'environnement et au respect du protocole de Kyoto des moyens d'exploiter les énergies renouvelables.

II.2. Historique

Les sources fossiles parmi les énergies qu'épuise l'environnement et crier un changement climatique. Le ministre algérien de l'énergie fait Un premier accord historique universel et juridiquement contraignant a été adopté après deux semaines de négociations serrées par les Parties lors de la (COP 21) du 30 Novembre au 12 Décembre 2015. L'accord de Paris qui est entré en vigueur le 4 novembre 2016 vise à limiter le réchauffement climatique d'ici la fin de ce siècle bien au- dessous de 2°C tout en poursuivant les efforts à ne pas dépasser 1.5°C.

L'Algérie a ratifié l'accord de Paris en 2016 et a souligné, son engagement à lutter contre les changements climatiques par des engagements ambitieux. L'Algérie adopte un cadre juridique favorable à la promotion des énergies renouvelables. Pour atteindre les objectifs d'atténuation, l'Algérie mise sur une stratégie cohérente qui s'étale du 2020 à 2030. Elle se base notamment sur le programme national des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique qui permettra d'atteindre à l'horizon 2030 une part de renouvelables de près de 27% dans le bilan national de production d'électricité et 37 % de la capacité installée.

De loin la plus grande partie de l'énergie terrestre provient du soleil (99,9%). Il rayonne une énergie d'environ $5,6 \times 10^{24}$ J par an sur la terre. Il y'a une multitude de méthodes pour l'exploitation de cette énergie solaire ; parmi elles la cheminée solaire est l'une des plus récentes technologies.



Figure II.1 Centrale cheminée solaire.

II.3. Homme et l'Énergie

Pendant la plus grande partie de son histoire, l'humanité n'a disposé que d'énergies renouvelables pour couvrir ses besoins énergétiques. Au Paléolithique, les seules énergies disponibles étaient la force musculaire humaine et l'énergie de la biomasse utilisable grâce au feu ; mais de nombreux progrès ont permis d'utiliser ces énergies avec une efficacité grandissante (inventions d'outils de plus en plus performants). Le progrès le plus significatif a été l'invention de la traction animale, qui est survenue plus tard que la domestication des animaux. On estime que l'homme a commencé à atteler des bovins à des araires ou des véhicules à roues durant l'IV^{ème} millénaire av. J.-C. Ces techniques inventées dans l'ancien croissant fertile ou en Ukraine, ont par la suite connu un développement mondial.

L'invention de la marine à voile a été un progrès très important. Celle des moulins à eau et moulins à vent a également apporté une énergie supplémentaire considérable. Braudel qualifie de « première révolution mécanique » l'introduction progressive, du XI^{ème} siècle au XIII^{ème} siècle, des moulins à eau et à vent : « ces « moteurs primaires » sont sans doute de modique puissance, de 2 à 5HPⁿ⁻¹ pour une roue à eau, parfois 5, au plus 10 pour les ailes d'un moulin à vent. Mais, dans une économie mal fournie en énergie, ils représentent un surcroît de puissance considérable. Plus ancien, le moulin à eau a une importance bien supérieure à celle de l'éolienne. Il ne dépend pas des irrégularités du vent, mais de l'eau, en gros moins capricieuse. Il est plus largement diffusé, en raison de son ancienneté, de la multiplicité des fleuves et rivières, ... » [3].

A la fin du XVIII^{ème} siècle, à la veille de la révolution industrielle, la quasi-totalité des besoins d'énergie de l'humanité était encore assurée par des énergies renouvelables. Dans un essai d'évaluation de la répartition des consommations par source d'énergie, Fernand Braudel estime à plus de 50 % la part de la traction animale, environ 25 % celle du bois, 10 à 15 % celle des moulins à eau, 5 % celle de la force humaine et un peu plus de 1 % celle du vent pour la marine marchande ; il renonce à chiffrer la part des moulins à vent, faute de données, tout en précisant : « les éoliennes, moins nombreuses que les roues hydrauliques, ne peuvent représenter que le quart ou le tiers de la puissance des eaux disciplinées ». On peut donc, évaluer la part totale de l'énergie éolienne (voile + moulins à vent) entre 3 et 5 %. Il mentionne pour mémoire la batellerie fluviale, la marine de guerre, le charbon de bois et le charbon de terre.

L'apparition de la machine à vapeur, puis du moteur Diesel, ont entraîné le déclin des moulins à eau et de l'énergie éolienne au XIX^{ème} siècle ; les moulins à eau et à vent ont disparu, remplacés par les minoteries industrielles. Au milieu du XX^{ème} siècle, l'énergie éolienne n'était plus utilisée que pour la navigation de plaisance et pour le pompage (agriculture, polders). Par contre, l'énergie hydraulique a connu un nouvel âge d'or avec l'hydroélectricité, apparue en Suisse, Italie, France et États-Unis à la fin du XIX^{ème} siècle.

Au XIX^{ème} siècle également, François de Larderel met au point en Italie les techniques d'utilisation de la géothermie ; en 1911, la première centrale géothermique était construite à Larderello. Dans les années 1910, les premiers chauffe-eau solaires individuels apparaissent en Californie. Puis, les éoliennes sont réapparues, bénéficiant de techniques plus performantes issues de l'aviation ; leur développement a pris de l'ampleur à partir des années 1990. Le solaire thermique et le solaire photovoltaïque décollent au début des années 2000.

II.4. Principaux Eléments de la Cheminée Solaire

La centrale solaire à cheminée est constituée de trois éléments essentiels, à savoir, le collecteur solaire, la cheminée ou tour et la turbine.

II.4.1. Collecteur

Le collecteur est la partie nécessaire qui est employée pour produire l'air chaud par effet de serre ; Un toit en vitre ou en film plastique et la terre naturelle en dessous forment un collecteur d'air.

Le collecteur est ouvert à la périphérie pour permettre l'introduction de l'air frais ; le toit du collecteur a pour but de rassembler les rayons solaires pour réchauffer la masse d'air à l'intérieur du collecteur ; donc placée une cheminée verticale avec un joint étanche entre sa base et le toit. La hauteur H de toit augmente au voisinage de la base de cheminée, afin que l'air soit détourné en mouvement vertical. Il est avantageux d'augmenter la capacité du toit de collecteur, en fournissant un double vitrage près de la cheminée [4].

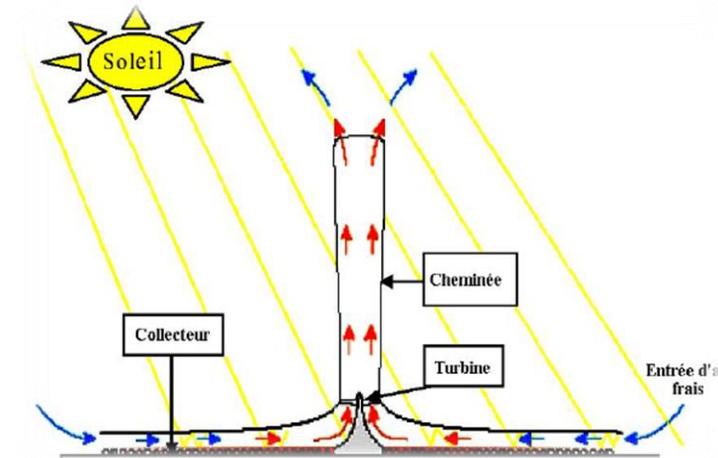


Figure II.2 Collecteur de cheminée solaire.

Le plus efficace semble être le collecteur en verre ; puisque son rendement de conversion de l'énergie solaire en chaleur peut aller jusqu'à 65 ou 70%. La moyenne annuelle typique est de l'ordre de 45 ou 50%. En outre, avec une maintenance appropriée, sa durée de vie peut facilement être de 55 ou 60 ans ou plus.

II.4.2. Cheminée

La cheminée elle-même est le moteur réel de l'équipement. Pour créer un écoulement d'air sous forme de vent, il faut engendrer une différence de pression. Il faut que la hauteur de la cheminée soit plus élevée, pour atteindre un niveau de basse pression par rapport au niveau de la base. Donc la pression de l'air à la sortie de la cheminée est inférieure à celle d'entrée, ce qui augmente la vitesse d'élévation verticale de l'air chaud dans la cheminée. La base est fixée sur la terre par des supports, qui séparent entre les entrées de l'air, ce qui permet d'augmenter la vitesse d'écoulement. La cheminée est généralement construite en béton armé [4].

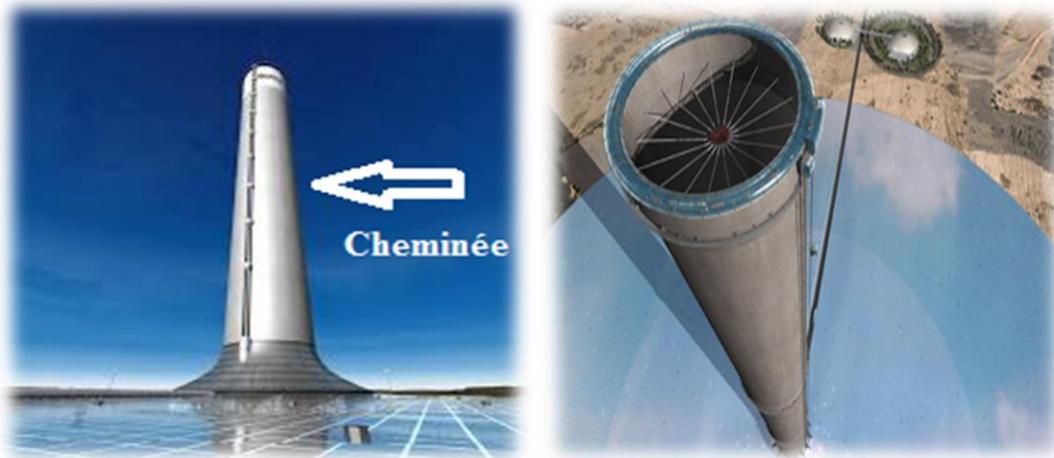


Figure II.3 Cheminée de tour solaire.

Plus haute H est la cheminée, plus importante est la quantité d'énergie produite par la tour solaire ; l'efficacité de la cheminée ne dépend pas de la température T de l'air entrant, mais de la différence de température avec l'air extérieur en haut de la cheminée. Donc l'efficacité est directement proportionnelle au ratio entre la hauteur H de la cheminée et la température T extérieure. Cependant, bien que l'efficacité soit proportionnelle à la hauteur H de la cheminée, dans la pratique il y a une limitation.

II.4.3. Turbine

Les turbines sont toujours placées à la base de la cheminée où la vitesse d'écoulement V d'air est plus élevée, pour transformer le maximum d'énergie cinétique ($\text{Max } E$) en énergie mécanique. Le générateur entraîné par la turbine transforme l'énergie mécanique (E_m) en énergie électrique (E_e). Le nombre N de turbines utilisées est soit une turbine dont les pales couvrent la coupe transversale de la cheminée, soit de petites turbines distribuées sur toute la section de la cheminée. Mais il est aussi possible d'arranger entre la verrière et la base de la cheminée un grand nombre N de petites turbines avec des axes horizontaux à la périphérie de la section du passage [4].



Figure II.4 Turbine pour cheminée solaire de large diamètre.

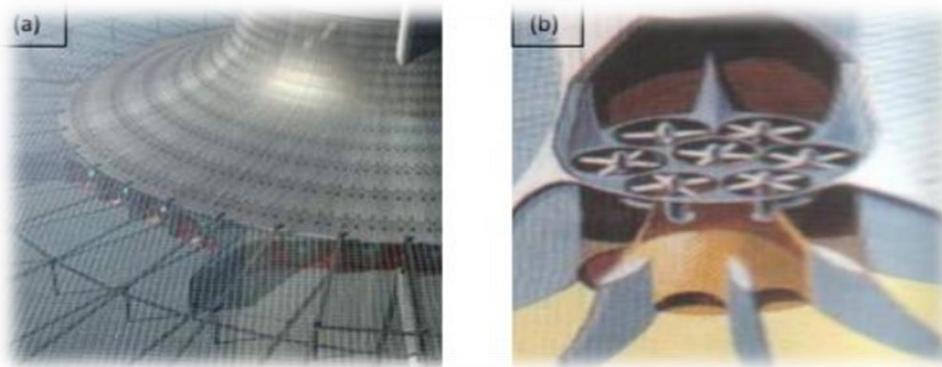


Figure II.5 (a) Turbines verticales, (b) Petites turbines horizontales.

II.5. Avantages et Inconvénients de la Cheminée Solaire

II.5.1. Avantages

- Le collecteur peut employer tout le rayonnement solaire, direct et diffus.
- En raison du système de stockage de chaleur, la cheminée solaire actionnera 24 h sur l'énergie solaire pure.
- Les cheminées solaires sont particulièrement fiables et non exposées à décomposer, dans la comparaison avec d'autres installations de production solaires.
- Vue de la robustesse de sa structure, la cheminée solaire n'a pas besoin d'un grand entretien et fonctionne naturellement. Elle n'exige pas des carburants non renouvelables pour le fonctionnement et ne produit pas n'importe quelles émissions.

- Les cheminées solaires n'a pas besoin de l'eau de refroidissement. C'est un avantage principal dans les nombreux pays ensoleillés qui ont déjà des problèmes majeurs avec l'eau potable.
- Les matériaux de construction requis pour les cheminées solaire, principalement béton et verre, sont disponibles partout en quantité suffisante.
- Elle a une longue durée de vie (au moins 80 à 100 ans). La technologie d'une centrale électrique de cheminée solaire ne deviendra pas périmée facilement.
- La Tour Solaire est particulièrement fiable et nécessite peu de maintenances comparativement aux autres usines de production d'électricité [5].

II.5.2. Inconvénients

- L'investissement de départ est plus élevé
- La production n'est pas constante pendant le jour ou l'année.
- Aucune structure d'échelle semblable n'a été construite auparavant.
- La construction de la cheminée demande des quantités énormes de matériels. Ces quantités peuvent causer des problèmes logistiques appartenant à la disponibilité et le transport des matériels.
- Le collecteur occupe une immense surface.
- Impact visuel négatif (certains y voient une dégradation du paysage) [6].

II.6. Projets Réalisés de Cheminée Solaire

II.6.1. Projet de Manzanares

Schlaich-Bergermann a conçu, construit et exploité une installation expérimentale avec une puissance de pointe de 50 kW sur un site mis à disposition par la compagnie d'électricité espagnole Union Electrica-Fenosa à Manzanares (à environ 150 km au sud de Madrid) en 1981/82 (Figure I-11)[1]. Elle était composée d'une cheminée cylindrique de 195 m de haut, de 10 m de diamètre, au centre d'un collecteur solaire circulaire de 250 m de diamètre (6000 m² de vitrages à 2 m au-dessus du sol) et permettant de chauffer l'air. Sa puissance était de 50 KW.



Figure II.6 Prototype de Manzanares en Espagne.

Elle fut arrêtée en raison d'un coût du kilowattheure, cinq fois plus élevé qu'une centrale thermique classique.

- **Spécifications de projet**

- Hauteur de la tour 194,6 m.
- Diamètre de la tour 10,16 m.
- Diamètre du collecteur 244 m.
- Hauteur moyenne du toit 1,85 m.
- Différence de température dans le collecteur ΔT 20 °C.
- Puissance électrique nominale 50KW.
- Surface du collecteur en Membrane plastique 40 000 m².
- Surface du collecteur en verre 6 000 m².
- Nombre de turbine 1.
- Vitesse de l'air dans la cheminée 12m/s.

II.6.2. Projet de la Baie Mongolie Intérieure en Chine

Dans la région de la baie de Mongolie intérieure en Chine, la région de la baie de Wuhai Jinsha a construit un modèle expérimental de thermo-solaire de 200 kilowatts. La première phase du projet s'est achevée entre mai 2009 et décembre 2010 et a permis de construire une cheminée solaire typique de 200 kilowatts occupant une superficie de 40 000 mètres carrés de tour du désert ou de cheminée d'une hauteur de 53 mètres et d'un diamètre de 18 mètres, représentant

des dépenses d'un million de yuans ;la deuxième phase du projet a débuté en février 2011 et s'est poursuivie jusqu'en décembre2011 afin d'achever la construction d'une centrale solaire de 2,2 MW. Cette manifestation occupera 220000 mètres carrés de désert. L'investissement prévu est de 110 millions de yuans; la troisième phase du projet entre janvier 2012 et décembre 2013permettra la construction d'une centrale solaire de 25,1mégawatts avec un complexe des erres occupant une zone désertique de 2,51 mégawatts Millions de mètres carrés, l'investissement sera de 1,26 milliard de yuans (1,2 milliard de yuans) [7].

II.7. Conclusion

Actuellement, une grande variété de technologies solaires pour la production d'électricité est disponible. L'utilisation de la technique cheminée solaire pour la production de l'énergie s'est avérée être une approche prometteuse pour des futures applications.

Chapitre III : Méthodologie et Conception d'une Centrale à Cheminée Solaire

II.1. Introduction

L'étude d'une cheminée solaire est jugé très nécessaire afin de connaître l'importance de ce nouvel mode de production d'électricité utilisant l'énergie solaire vis-à-vis des autres moyens d'exploitation de l'énergie solaire. Cet étude détaillée des différentes parties d'une cheminée solaire est très important pour avoir une connaissance profonde sur le fonctionnement de la centrale d'une part et un détail de calcul d'autre part afin d'aboutir à un résultat plus précis. Dans ce chapitre, on se propose d'utiliser un modèle théorique proposé dans la littérature afin de prédire la performance des centrales à cheminée solaire. Y est présenté, l'analyse de la puissance développée et du rendement de la centrale à cheminée solaire en fonction des paramètres prédominants.

III.2. Description et Principe de Fonctionnement

Le présent travail est consacré à l'étude de performance du fonctionnement d'une centrale à cheminée solaire (CCS) destinée pour la production d'énergie électrique au niveau des hauts-plateaux, Figure III.1.

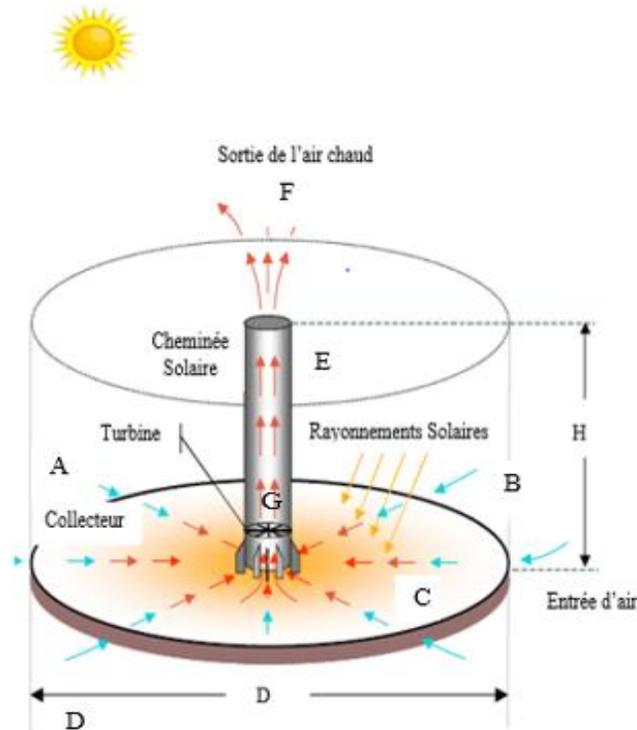


Figure III.1 Schème représentatif d'une différente partie d'une cheminée solaire.

III.2.1. Collecteur

Le collecteur est composé du sol (D), d'une surface transparente (A) située quelques mètres au-dessus du sol, d'un domaine de circulation de l'air (B), et d'un système de stockage de la chaleur (C) pour un fonctionnement continu jour et nuit. Celui-ci, ouvert aux deux extrémités, récupère l'énergie solaire incidente en réchauffant et en contenant l'air qui y circule. L'air est réchauffé par l'absorption du flux solaire, lequel traverse la surface supérieure transparente du collecteur, suivie du transfert et du transport de la chaleur à travers les différents éléments. L'air circule au sein du collecteur soumis à des phénomènes de convection.

➤ Fonctions des différents éléments dans le collecteur

1. Vitrage (A)

- Conduire l'air.
- Conserver la chaleur dans le système.
- Permettre l'entrée du flux solaire.

2. Air (B)

- Porter l'énergie : cinétique et thermique.

3. Système de stockage (C)

- Capter le rayonnement solaire.
- Stocker la chaleur.
- Transmettre la chaleur.

4. Sol (D)

- Capter le rayonnement solaire.
- Stocker la chaleur.
- Transmettre la chaleur.
- Conduire l'air.

III.2.2. Cheminée

La cheminée est délimitée par une paroi cylindrique (E) au centre de laquelle se situe la zone d'écoulement du fluide (F). La taille de la cheminée dépend généralement du débit d'air en dessous du collecteur. Donc, elle dépend également de la taille du collecteur. Celle-ci crée un appel d'air en sortie du collecteur. Et la différence de pression entre le haut et le bas de cette dernière entraîne le fluide dans un mouvement ascendant.

➤ **Fonctions des différents éléments dans la cheminée**

1. Paroi (E)

- Conduire l'air

2. Air (F)

- Porter l'énergie cinétique

III.2.3. Turbine

La turbine (G) est située sur le parcours de l'écoulement du fluide au pied de la cheminée. Le choix du type des turbines est en fonction de la taille de la centrale. Elle transforme l'énergie cinétique du fluide en énergie mécanique. Celle-ci sera ensuite transformée en énergie électrique par le biais d'un générateur.

Le phénomène interne de chaque partie est résumé dans le tableau ci-dessous. D'après ce tableau, chaque partie du système joue chacune un rôle plus important en créant des phénomènes physiques nécessaires au fonctionnement d'une cheminée solaire.

	<i>Au niveau du collecteur</i>	<i>Au niveau de la cheminée</i>	<i>Au niveau de la turbine</i>
Vitrage (A)	Rayonnement : transmission, absorption, réflexion Transfert de chaleur		
Air (B)	Mécanique des fluides : écoulement et convection		
Système de stockage (C)	Rayonnement : absorption et réflexion Transfert de chaleur		
Sol (D)	Rayonnement : absorption et Réflexion Transfert de chaleur		
Paroi (E)		Transfert de chaleur	
Air (F)		Mécanique des fluides	
Turbine (G)			Écoulement Mécanique

Tableau III.1 Description de différentes parties du système.

III.3. Hypothèses Générales de CCS

Ce modèle proposé est fondé sur des hypothèses données comme suit :

- Régime stationnaire ;
- Les éléments du collecteur sont à une température moyenne ;
- La couverture du collecteur est opaque aux radiations infrarouges ;
- Les propriétés physiques des composants du système (collecteur, cheminée et aéro-turbine) sont indépendantes de la température ;
- L'effet de la poussière, des impuretés et de l'ombre portée sur l'absorbeur sont négligeables ;
- Le collecteur est considéré comme étant la superposition de deux surfaces planes (i.e. : L'écoulement dans le collecteur est considéré comme un écoulement entre deux plans parallèles) ;
- L'effet d'évaporation dans le collecteur est négligeable ;
- L'écoulement est axisymétrique ;
- Le gradient transversal de la température dans le collecteur est négligeable ;
- L'air est considéré comme étant un gaz parfait ;
- Les transferts de chaleur par conduction dans le sens de l'écoulement sont négligeables ;
- Le ciel est considéré comme corps noir ;
- L'unique gain de chaleur dans le système est le gain net acquis dans le collecteur.

III.4. Modèle de A. J. Gannon & al

Ce modèle introduit dans son analyse les pertes par frottement au niveau de la cheminée, les pertes énergétiques au niveau de la turbine ainsi que les pertes d'énergie cinétique.

III.4.1. Cycle Parfait de la Cheminée Solaire

Gannon & al, a effectué une comparaison entre un cycle à air idéal et un cycle réel permettant la prédiction des performances des deux cycles. Le diagramme entropique, Figure III.1, illustre l'évolution d'un cycle parfait de l'air dans une les centrales à cheminée solaire « CCS ».

Avec : h , l'enthalpie spécifique.

La réduction de l'enthalpie de 3-4 est égale à l'évolution 1'-2

$$\Delta h = g\Delta z = c_p (T_2 - T_{1'}) \quad (3.3)$$

La puissance récupérée à l'arbre de la turbine est :

$$P_{sh} = \dot{m} c_p (T_3 - T_4) - \dot{m} c_p (T_{3te} - T_4) \quad (3.4)$$

$$\text{Or : } T_{3te} - T_4 = T_2 - T_{1'}$$

$$\text{D'où : } P_{sh} = \dot{m} c_p (T_3 - T_4) - \dot{m} c_p (T_2 - T_{1'}) \quad (3.5)$$

Pour une évolution isentropique d'un gaz parfait :

$$\frac{T_2}{T_{1'}} = \frac{T_3}{T_4} = Cst \quad (3.6)$$

En remplaçant les équations (3.3), (3.4) et (3.5) dans (3.6), on aura :

$$\eta_{glob} = \frac{\text{Puissance à l'arbre de la turbine}}{\text{énergie solaire reçue}} = \frac{\dot{m}c_p(T_3-T_4) - \dot{m}c_p(T_2-T_{1'})}{\dot{m}c_p(T_3-T_2)} \quad (3.7)$$

$$\eta_{glob} = 1 - \frac{1}{cst} = \frac{g\Delta z}{c_p T_2} \quad (3.8)$$

↳ Puissance développée

Définissant la puissance spécifique normalisée par rapport au débit massique et la température d'entrée du collecteur par :

$$P_2^* = \frac{P_{sh}}{\dot{m}c_p T_2} = \frac{\dot{m}c_p(T_3-T_4) - \dot{m}c_p(T_2-T_{1'})}{\dot{m}c_p T_2} \quad (3.9)$$

En introduisant l'équation :

$$P_2^* = \left\{ 1 - \frac{1}{cst} \right\} \left\{ \frac{T_3 - T_2}{T_2} \right\} \quad (3.10)$$

$$P_2^* = \left\{ \frac{g\Delta z}{c_p T_2} \right\} \left\{ \frac{\Delta T}{T_2} \right\} \quad (3.11)$$

III.4.3. Cycle réel de la centrale à cheminée solaire

Le diagramme entropique, Figure III.3, inclut les différentes pertes dans le système et illustre les déviations par rapport au cycle parfait, Figure III.1.

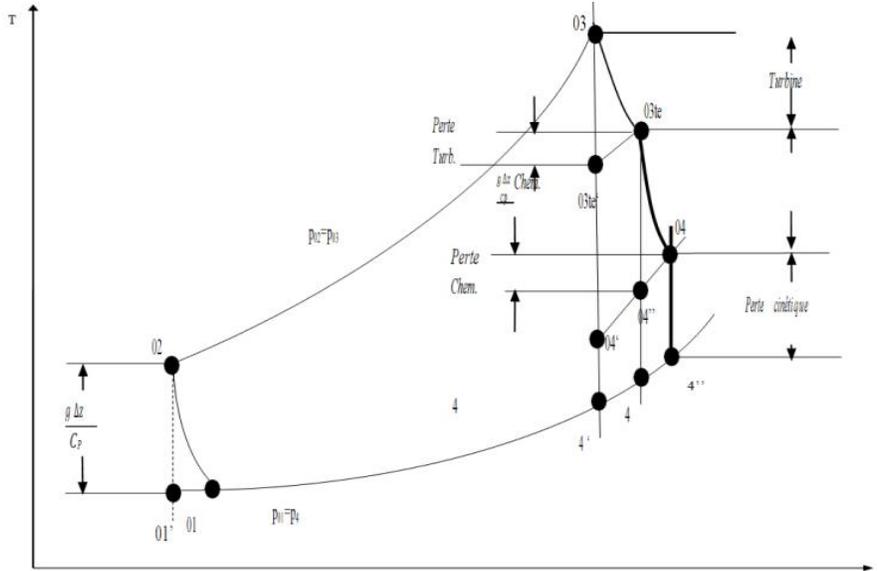


Figure III.4 Diagramme Température – Entropie pour un cycle à air dans une centrale à cheminée solaire avec perte d'énergie.

La figure III.3 montre les trois étapes de la détente de l'air sortant du collecteur, ainsi que les pertes énergétiques dans la turbine, la cheminée et les pertes cinétique à la sortie de la cheminée.

III.4.4. Hypothèse de Modélisation du Cycle Réel

Les hypothèses adoptées sont :

- Les pertes dans chacune des parties constituantes de la centrale sont considérées.
- La pression totale sous le collecteur reste constante.
- Toute l'énergie cinétique se dissipera à la sortie de la cheminée solaire.

III.4.5. Rendement de la Turbine

A partir du cycle illustré dans la Figure III.3 le rendement isentropique de la turbine est :

$$\eta_{\text{turb}} = \frac{T_{03} - T_{03te}}{T_{03} - T'_{03te}} \quad (3.12)$$

III.4.6. Perte par Frottement dans la Cheminée

Une partie de l'énergie développée par le soulèvement de l'air à l'intérieur de la cheminée se dissipe par frottement contre les parois intérieur de celle-ci.

Le rapport de perte énergétique par frottement dans la cheminée est exprimée par :

$$K_{\text{chem}} = \frac{T_{04} - T_{04}''}{T_{04} - T_{04}} \quad (3.13)$$

III.4.7. Perte Cinétique à la Sortie de la Cheminée

Le rapport de perte d'énergie cinétique à la sortie de la cheminée est :

$$\alpha_{\text{cin}} = \frac{KE}{\overline{KE}} = \frac{\int (\rho V_{z4})^2 \frac{1}{2} V_{z4}^2 dK}{(\rho \overline{V_{z4}})^2 \frac{1}{2} V_{z4}^2 A} \quad (3.14)$$

Avec :

- KE : Energie cinétique à la sortie de la cheminée ;
- \overline{KE} : Energie cinétique de sortie moyennée ;
- V : vitesse du fluide ;
- A : Section de passage du fluide.

III.4.8. Rendement global de la détente de l'air

Le rendement total du processus de détente lors de l'évolution de l'air chauffé du point 03 au point 04, Figure III.3 est :

$$\eta_{\text{exp}} = \frac{T_{03} - T_{04}}{T_{03} - T_{04}'} \quad (3.15)$$

III.4.9. Rendement du Cycle Réel

En considérant la définition du rendement, et en incluant les pertes cinétiques, le rendement global de la CCS devient :

$$\eta_{\text{glob}} = \left(\frac{g\Delta Z}{C_p T_{02}} \right) \left[\frac{\eta_{\text{exp}} (T_{02} + \Delta T_{23}) - T_{02}}{\Delta T_{23}} \right] - \alpha_{\text{cin}} \frac{\overline{v_4^2}}{2C_p \Delta T_{23}} \quad (3.16)$$

III.4.10. Puissance Développée par le Cycle Réel

La puissance spécifique normalisée est :

$$\eta_{\text{glob}} = \left(\frac{g\Delta Z}{C_p T_{02}} \right) \left[\frac{\eta_{\text{exp}}(T_{02} + \Delta T_{23}) - T_{02}}{\Delta T_{02}} \right] - \alpha_{\text{cin}} \frac{\overline{v_4^2}}{2C_p \Delta T_{02}} \quad (3.17)$$

III.4.11. Collecteur

Le développement qui suivra lie entre le rayonnement solaire incident et le débit d'air. La figure III.4 montre le bilan thermique sur une tranche du collecteur.

Le bilan énergétique sur un volume de contrôle circulaire du collecteur est donné par, figure III.4 :

On a

$$\frac{dT_{\text{aire}}}{dr} = \frac{2\pi r}{\dot{m}c_p} \left[\tau_{\text{in}} \alpha_{\text{surf}} G - \left\{ \tau_{\text{out}} \varepsilon_{\text{out}} \sigma (T_{\text{surf}}^4 - T_{\text{atm}}^4) + h_{\text{gli}} (T_{\text{air}} - T_{\text{gli}}) + \frac{K_{\text{gro}}}{L_{\text{glo}}} (T_{\text{surf}} - T_{\text{sto}}) \right\} \right] \quad (3.18)$$

$$\tau_{\text{in}} \alpha_{\text{surf}} G = \tau_{\text{out}} \varepsilon_{\text{out}} \sigma (T_{\text{surf}}^4 - T_{\text{atm}}^4) + h_{\text{surf}} (T_{\text{surf}} - T_{\text{air}}) + \frac{K_{\text{gro}}}{L_{\text{gro}}} (T_{\text{surf}} - T_{\text{sto}}) \quad (3.19)$$

et

$$h_{\text{gli}} (T_{\text{air}} - T_{\text{gli}}) = \frac{K_{\text{glass}}}{L_{\text{glass}}} (T_{\text{gli}} - T_{\text{glo}}) \quad (3.20)$$

$$\frac{K_{\text{glass}}}{L_{\text{glass}}} (T_{\text{gli}} - T_{\text{glo}}) = h_{\text{glo}} (T_{\text{glo}} - T_{\text{atm}}) \quad (3.21)$$

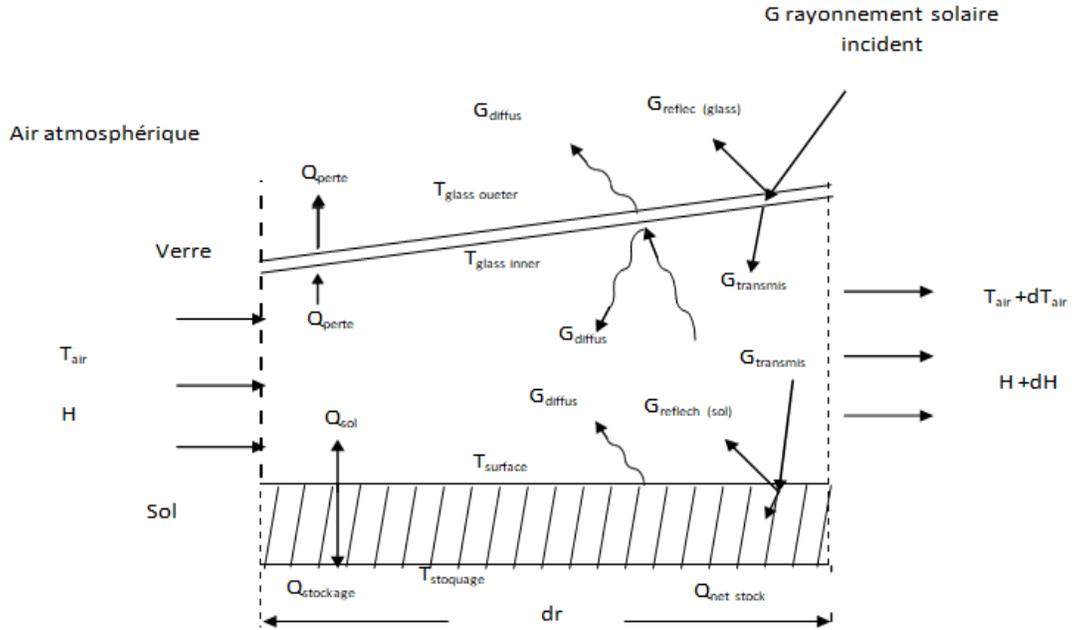


Figure III.5 Bilan thermique sur une tranche du collecteur.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, on a vu l'analyse de la puissance développée et du rendement de la centrale à cheminée solaire en fonction des paramètres prédominants. Et on a proposé l'utilisation d'un modèle théorique proposé dans la littérature afin de prédire la performance des centrales à cheminée solaire.

Chapitre IV : Simulation et Résolution

IV.1. Introduction

La résolution des équations du modèle décrites et développées au chapitre III permettra de prédire les performances énergétiques d'une centrale solaire à cheminée, d'étudier et d'analyser les effets de différents paramètres principaux sur ces performances, de prédire et dimensionner la centrale. À une mise en œuvre dans l'industrie réalisée à grande échelle.

IV.2. Modèle de A. J. Gannon et al.

Ce modèle présente un système d'équations mixtes (ensemble d'équations linéaires couplées à une équation différentielle), pour la partie collecteur. La résolution de ce type de système nécessite la discrétisation de l'équation différentielle, qui dégagera un système algébrique secondaire facilement résolvable avec une méthode classique.

Les données de la résolution de l'équation différentielle discrétisée, seront injectées dans le système algébrique linéaire principal. Ce dernier sera résolu à son tour par une méthode itérative. Le résultat ainsi obtenu sera de nouveau injecté à son tour dans la résolution de l'équation différentielle discrétisée, jusqu'à convergence de la solution et obtention d'une solution stable, voir la Figure IV.1.

IV.2.1. Généralités et Principe de Discrétisation des Equations

La discrétisation permet de transformer l'équation différentielle obtenu précédemment, chapitre III, en un système algébrique facile à résoudre.

IV.2.2. Erreur de Troncature

L'erreur de troncature représente la différence entre l'équation à dérivée partielle et l'équation à différence finie.

IV.2.3. Consistance

La consistance est la certitude que la représentation en différence finie tend vers l'équation différentielle lorsque le maillage est raffiné.

IV.2.4. Stabilité

Elle correspond à une assurance que la solution du problème est stable et que les erreurs n'augmentent pas au cours du calcul.

IV.2.5. Convergence

La méthode converge lorsque la solution se rapproche de la solution exacte alors que la taille du maillage tend vers zéro. Si les conditions de consistance et de stabilité sont vérifiées la méthode converge.

IV.2.6. Erreurs

Elles proviennent de deux sources, les erreurs de discrétisation qui englobent les erreurs de troncature ainsi que les erreurs d'arrondissement provoquées par la machine.

IV.2.7. Système collecteur

➤ 1ere phase de résolution

Le système d'équations gouvernantes est résolu après linéarisation avec une méthode itérative.

➤ 2ème phase de résolution

Afin de déterminer la distribution de température dans le collecteur, une formulation progressive de Taylor d'ordre un « 1 » sera utilisée pour la discrétisation de l'équation correspondante, Chapitre IV. Elle est donnée par :

$$T_{i+1} = T_i + \Delta r \left(\frac{dT}{dr} \right)_i + O(\Delta x)^2 \Rightarrow \left(\frac{dT}{dr} \right)_i = \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta r} + O(\Delta x) \quad (4.1)$$

La discrétisation de l'équation d'énergie, Figure IV.1, abouti au résultat suivant :

- Pour les nœuds $i=2 \text{ à } i=N$, avec N le nombre de nœud :

$$T_{air(i+1)}^j = T_{air(i)}^j + A(i)T_{air(i)}^j + B(i) \quad (4.2)$$

Avec

$$A(i) = -Cst1\Delta r r(i) \text{ et } B(i) = Cst2\Delta r r(i) \quad (4.3)$$

L'indice «i» représente les nœuds alors que l'indice «j» représente les étapes d'itérations.

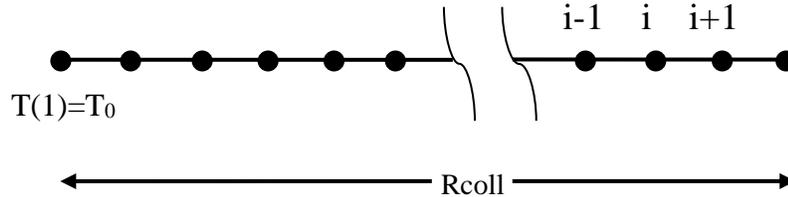


Figure IV.1 Schéma de discrétisation.

- Pour le nœud $i=1$ « condition à la limite » :

La température à l'entrée du collecteur est égale à la température ambiante, d'où pour le nœud 1 :

$$T(1)=T(R_{coll}) = T_1.$$

IV.2.8. Résolution du Système d'Equations

Le système d'équations obtenu sera résolu par une méthode classique telle que la méthode de Gauss. A cet effet, un programme sous environnements Matlab a été développé (voir la figure IV.1), décrivant la méthode de résolution adoptée.

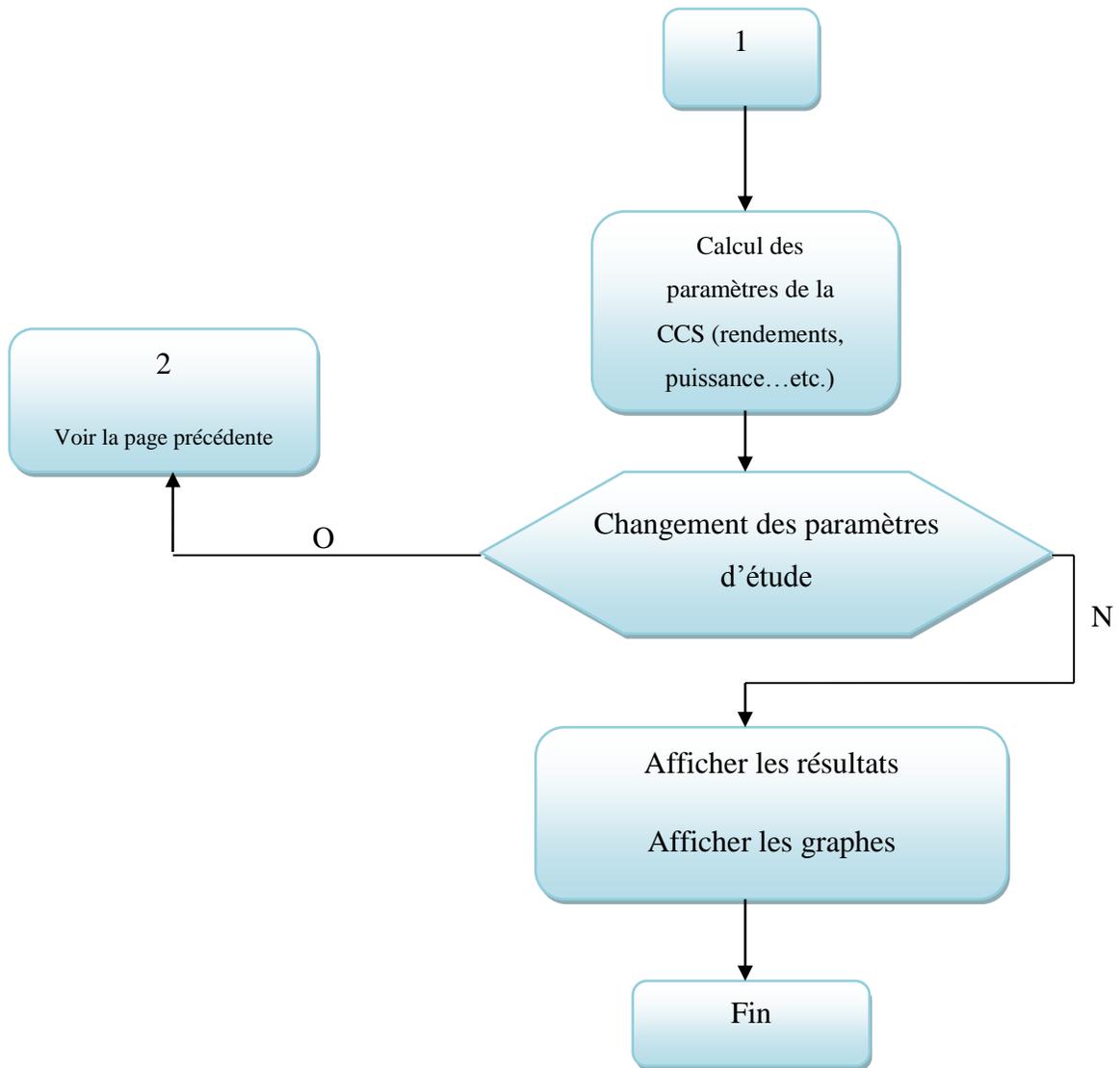


Figure IV.2 Organigramme d'étape de calcul du programme de résolution du modèle de Gannon.

IV.3. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la méthode classique de résolution des équations appliquées sur la partie collecteur dans la CCS. Et on a obtenu notre résultats à l'aide de logiciel Matlab, qu'on les verrons dans le chapitre suivant.

Chapitre V : Résultats et Discussion

V.1. Introduction

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'analyse des performances énergétiques des centrales à cheminée solaire à l'aide d'un modèle mathématique issu de la littérature. Les performances énergétiques ont été analysées dans le but de déterminer l'influence de certains paramètres prépondérants dans les transferts énergétiques.

A cet effet, divers programmes de calcul ont été mis au point pour traiter et analyser l'impact de différents paramètres sur les performances des CCS. Les paramètres analysés dans cette étude sont la hauteur, le rayon du collecteur, la section et la hauteur de la cheminée et l'irradiation solaire.

Les dimensions du prototype CCS considéré comme référence de base sont :

Hauteur de la toiture du collecteur	Hcoll= 2m
Rayon du collecteur	Rcoll = 100m
Rayon de la cheminée	Rch= 4m
Hauteur de la cheminée	Hch= 100
Température ambiante	T0= 20°C
Irradiation solaire	G=800 W/m ²

Tableau V.1 Dimensions du prototype CCS.

V.2. Influence de la Variation de l'Irradiation Solaire G

La figure V.1 montre l'effet de la variation de l'irradiation solaire sur la puissance développée. La puissance disponible augmente avec l'augmentation de l'irradiation solaire.

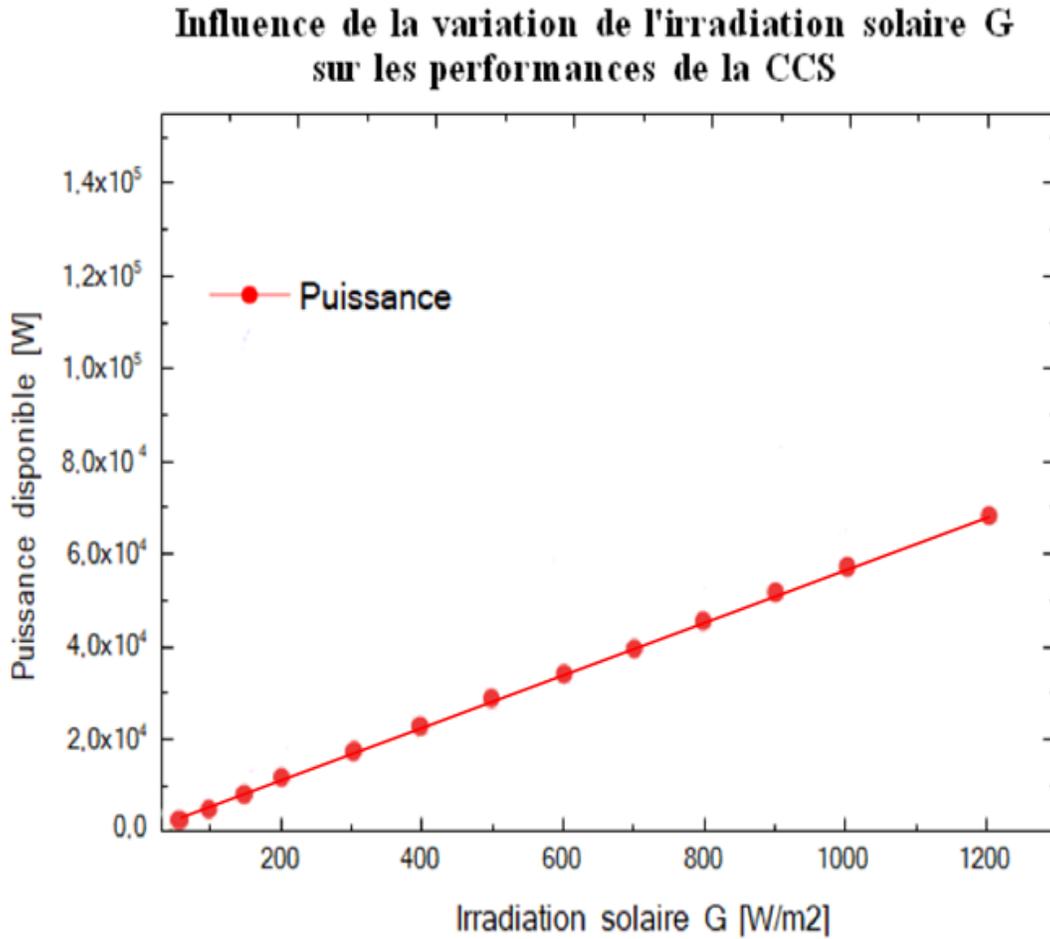


Figure V.1 Effet de la variation de l'irradiation solaire sur la puissance développée.

La figure V.2 montre l'influence de l'irradiation solaire sur le rendement de la CCS. Le modèle de A.J Gannon & al. révèle un profil plat ou légèrement variable. Pour ce modèle la fraction énergétique transformée en puissance est la même pour une dimension donnée de la CCS et ne dépend pas de l'énergie incidente.

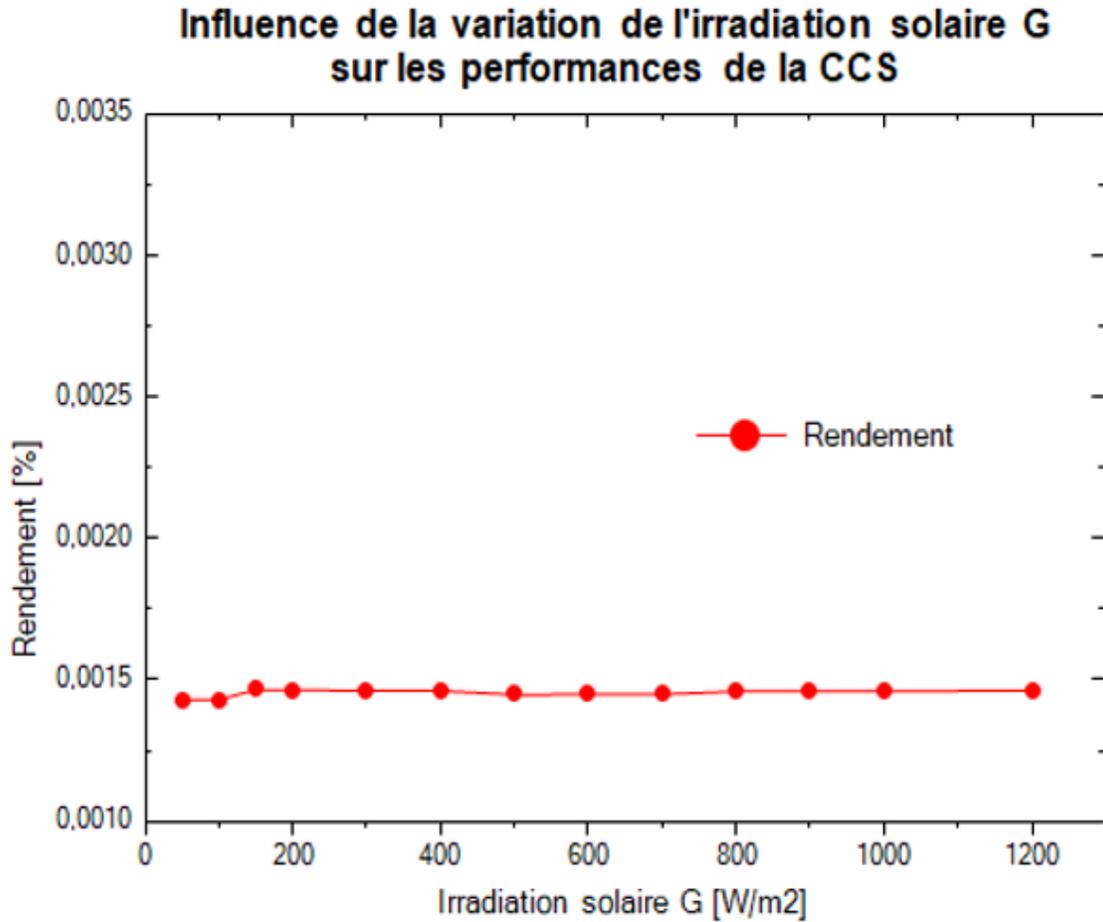


Figure V.2 Influence de l'irradiation solaire sur le rendement de la CCS.

V.3. Influence de la Variation de la Hauteur de la Cheminée Hch

Les figures V.3 et V.4 montrent l'effet de la variation de la hauteur de la cheminée sur la puissance disponible et le rendement. La puissance et le rendement sont proportionnellement dépendants et augmentent avec l'augmentation de Hch.

L'élévation de la hauteur de la cheminée augmente considérablement le rendement de la CCS, mais aussi, la puissance qui peut atteindre l'ordre de Mégawatt pour des hauteurs avoisinant les 1000 m. La hauteur de la cheminée est un paramètre principal et prédominant dans le dimensionnement des CCS.

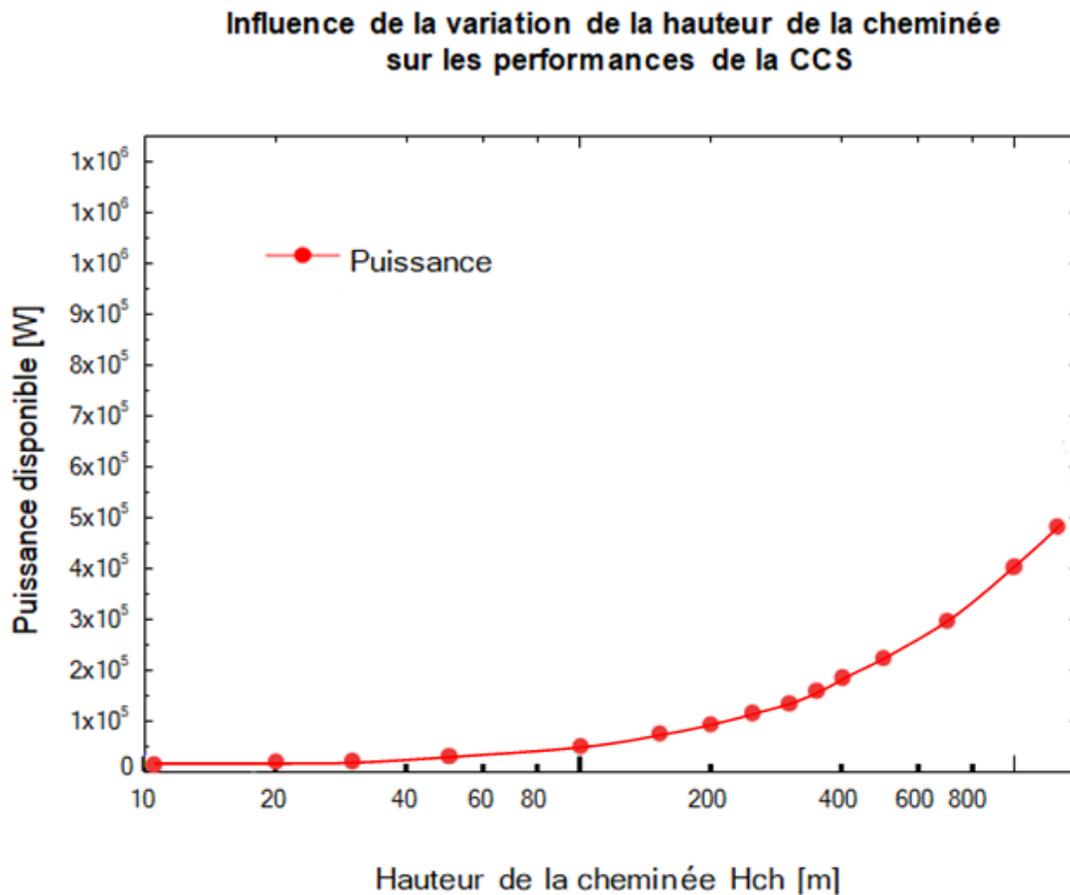


Figure V.3 Effet de la variation de la hauteur de la cheminée sur la puissance disponible.

Influence de la variation de la hauteur de la cheminée sur les performances de la CCS (Rendement de la CCS)

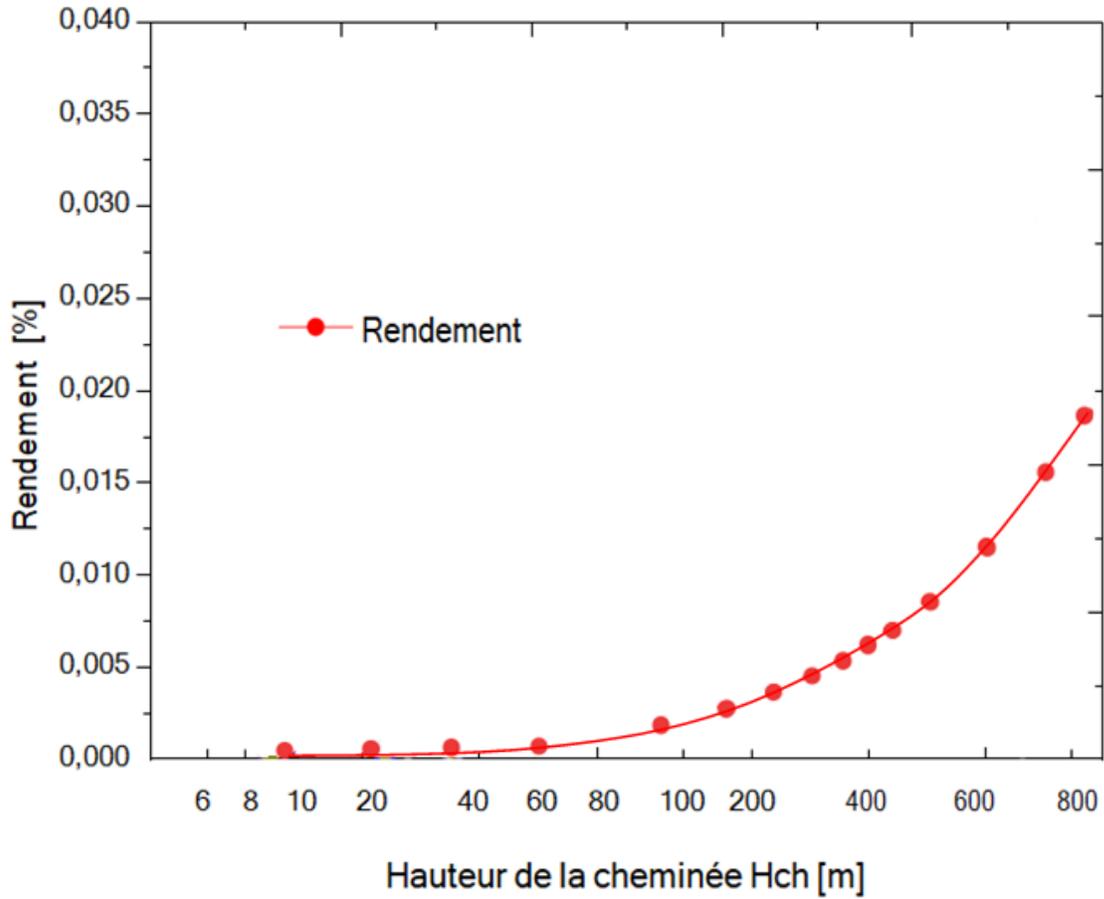


Figure V.4 Influence de la hauteur de la cheminée sur le rendement de la CCS.

V.4. Influence de la Variation du Rayon du Collecteur « Rcoll »

La variation du rayon du collecteur de 10 à 200m (Figure V.5), montre une évolution similaire de la puissance pour le modèle de A.J Gannon & al. Plus le collecteur est large, plus importante sera la puissance développée. Elle évolue lentement pour les petits rayons et augmente d'une manière plus importante pour les grands diamètres.

Influence de la variation du Rayon du collecteur Rcoll sur les performances de la CCS

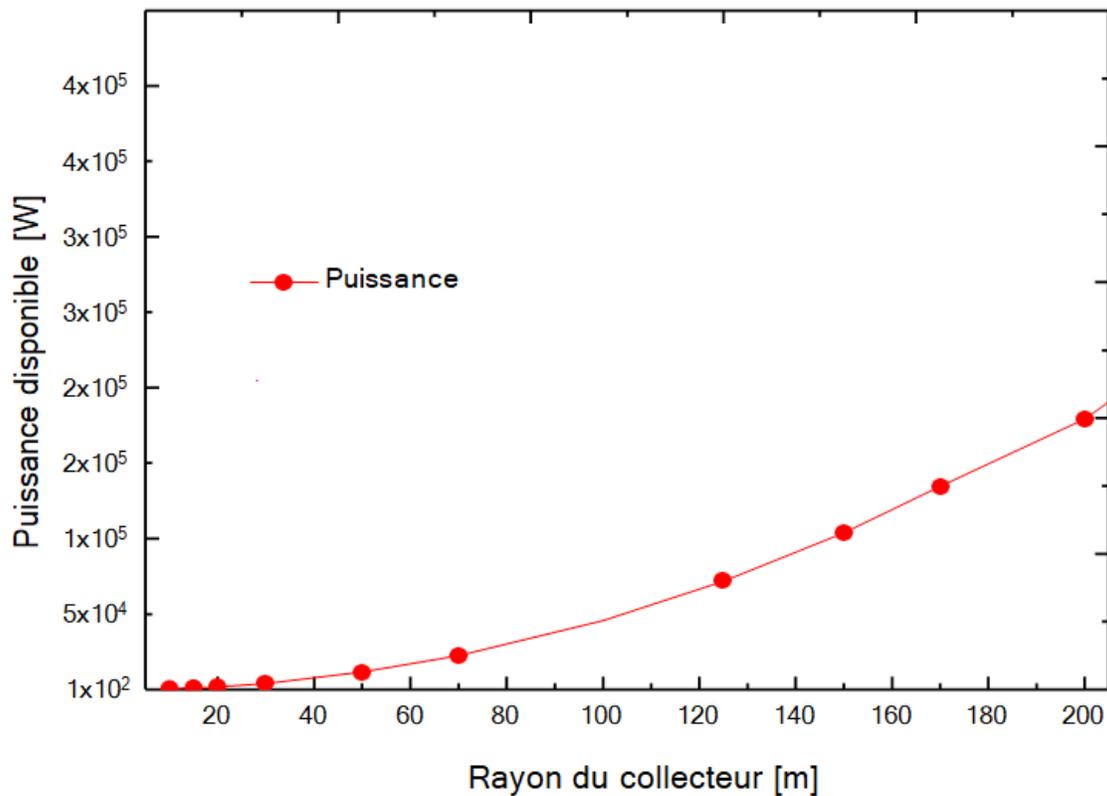


Figure V.5 Influence du rayon du collecteur sur la puissance développée.

La figure V.6 illustre l'évolution du rendement de la CCS en fonction du rayon du collecteur.

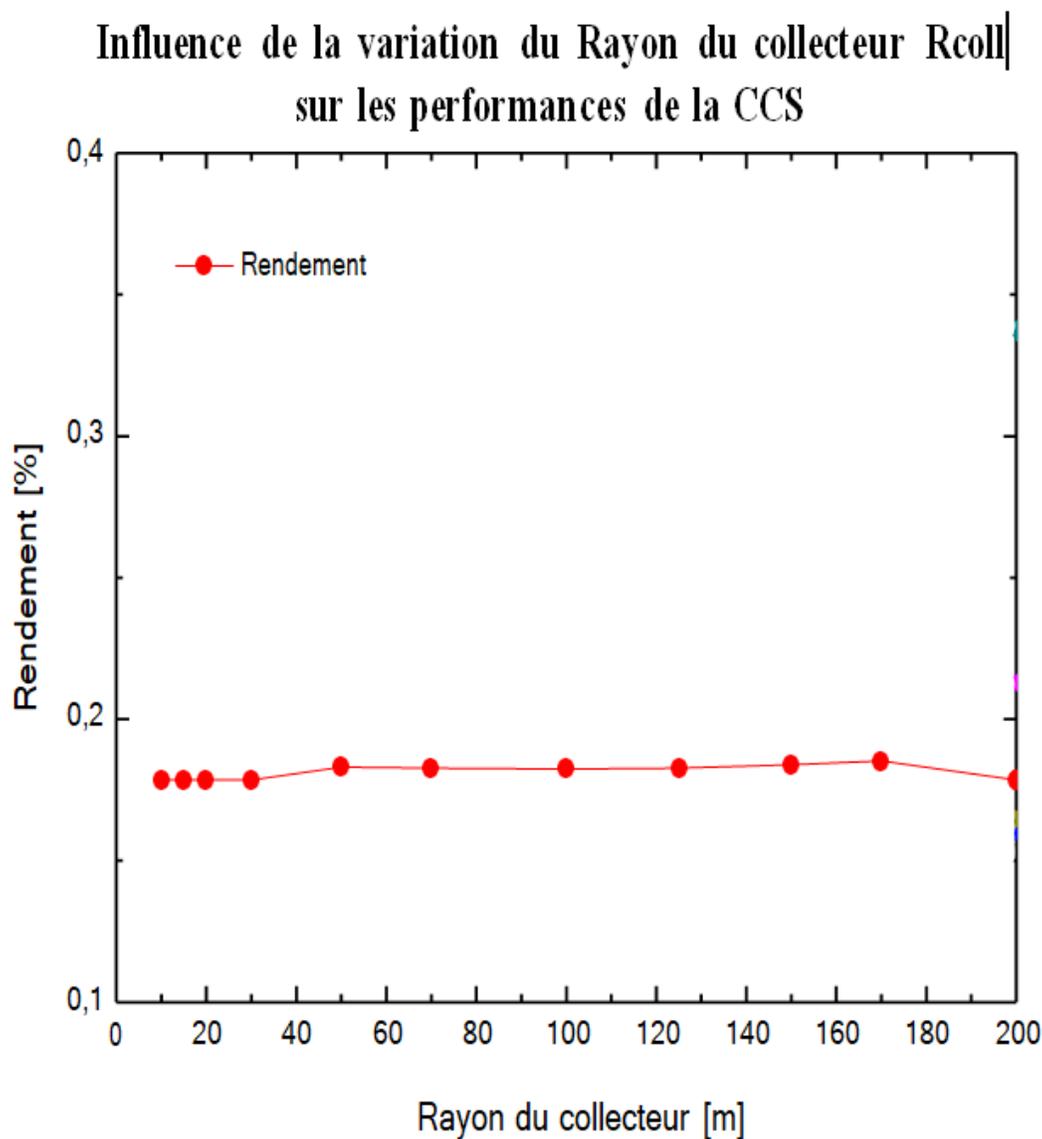


Figure V.6 Evolution du rendement de la CCS en fonction du rayon du collecteur.

Le modèle de A.J Gannon & al. montre une évolution presque horizontale, elle fluctue légèrement suivant le gain de température et le bilan thermique au niveau du collecteur.

V.5. Influence de la variation de la section de la cheminée

La figure V.7 illustre l'évolution de la puissance en fonction de la section de la cheminée. Notre modèle montre un profil plat ou légèrement variable.

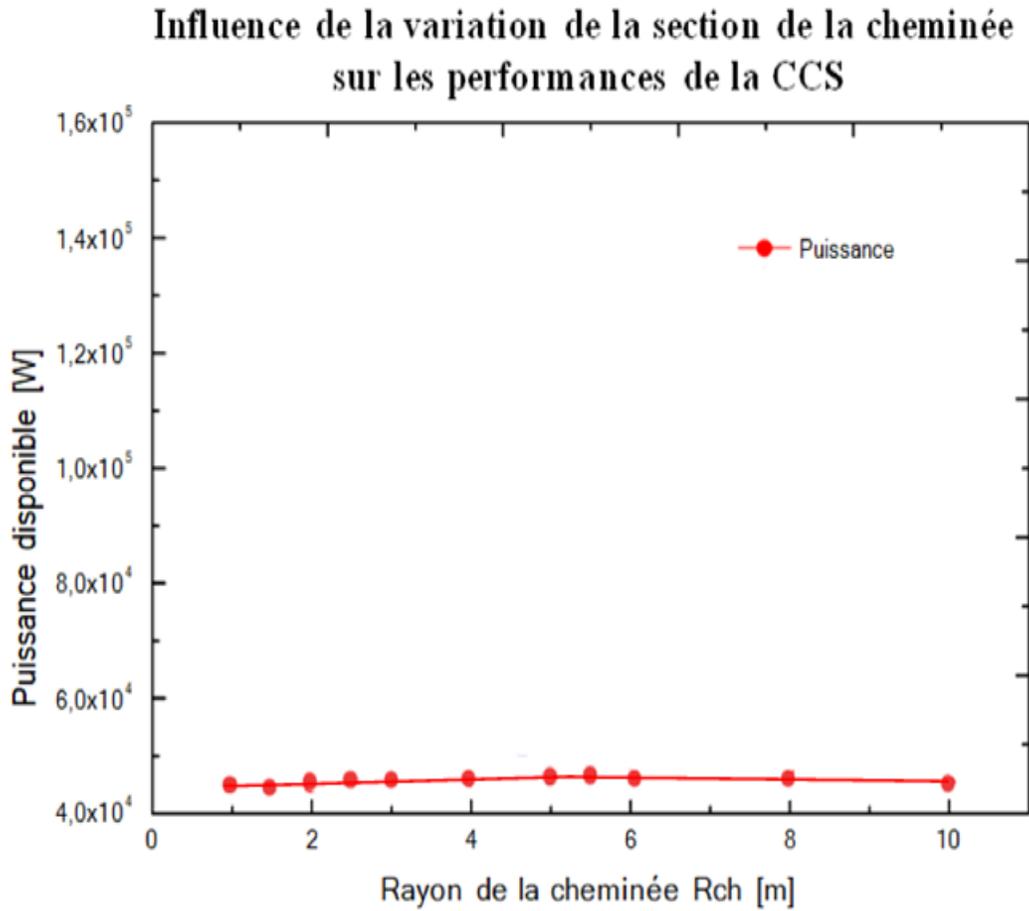


Figure V.7 Influence de la section de la cheminée sur la puissance développée.

La figure V.8 illustre l'évolution du rendement de la CCS en fonction de la section de la cheminée. Notre modèle montre une évolution plate du rendement.

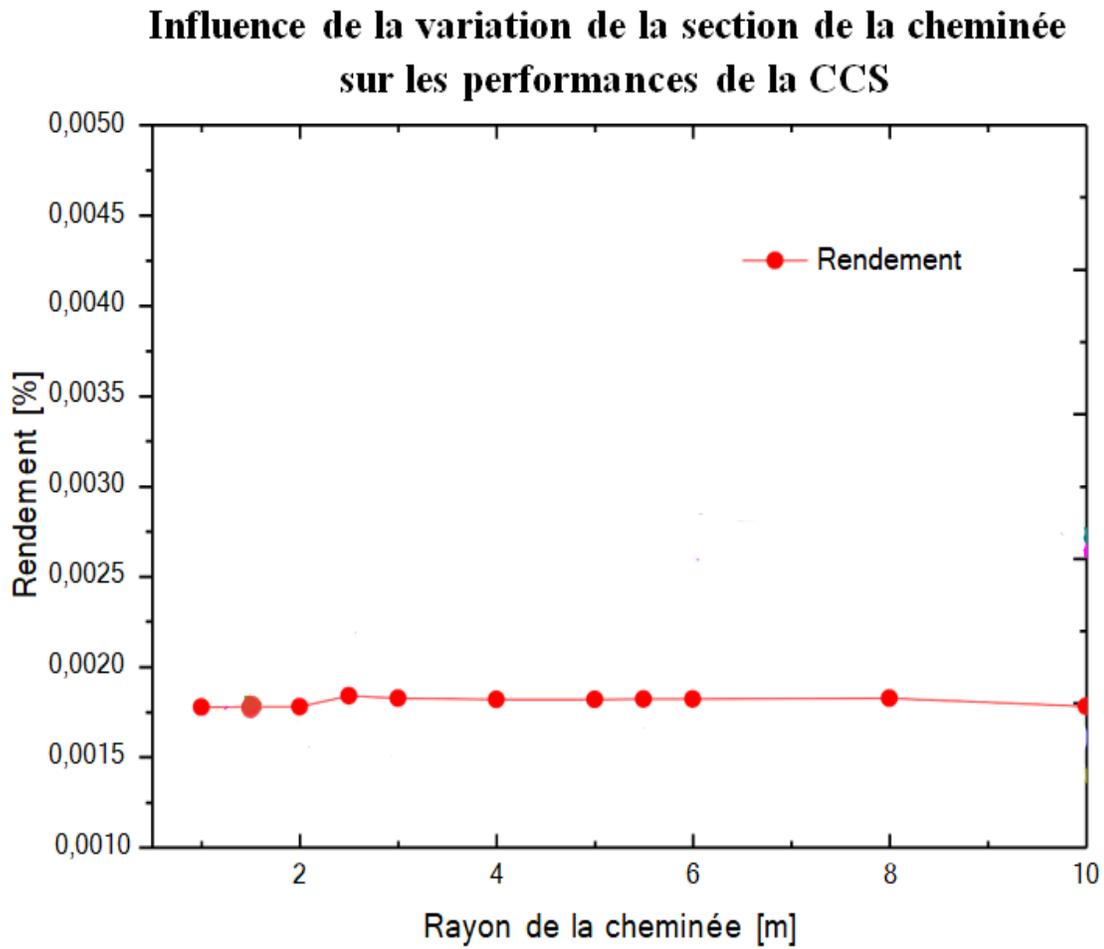


Figure V.8 Influence de la section de la cheminée sur le rendement.

V.6. Influence de la Variation de la Hauteur du Collecteur « Hcoll »

Les figures V.9 et V.10 illustrent l'évolution de la puissance et du rendement de la CCS en fonction du collecteur. Alors que le modèle A.J Gannon & al. présente un profile plat de la puissance et du rendement, en fonction de la hauteur du collecteur Hcoll.

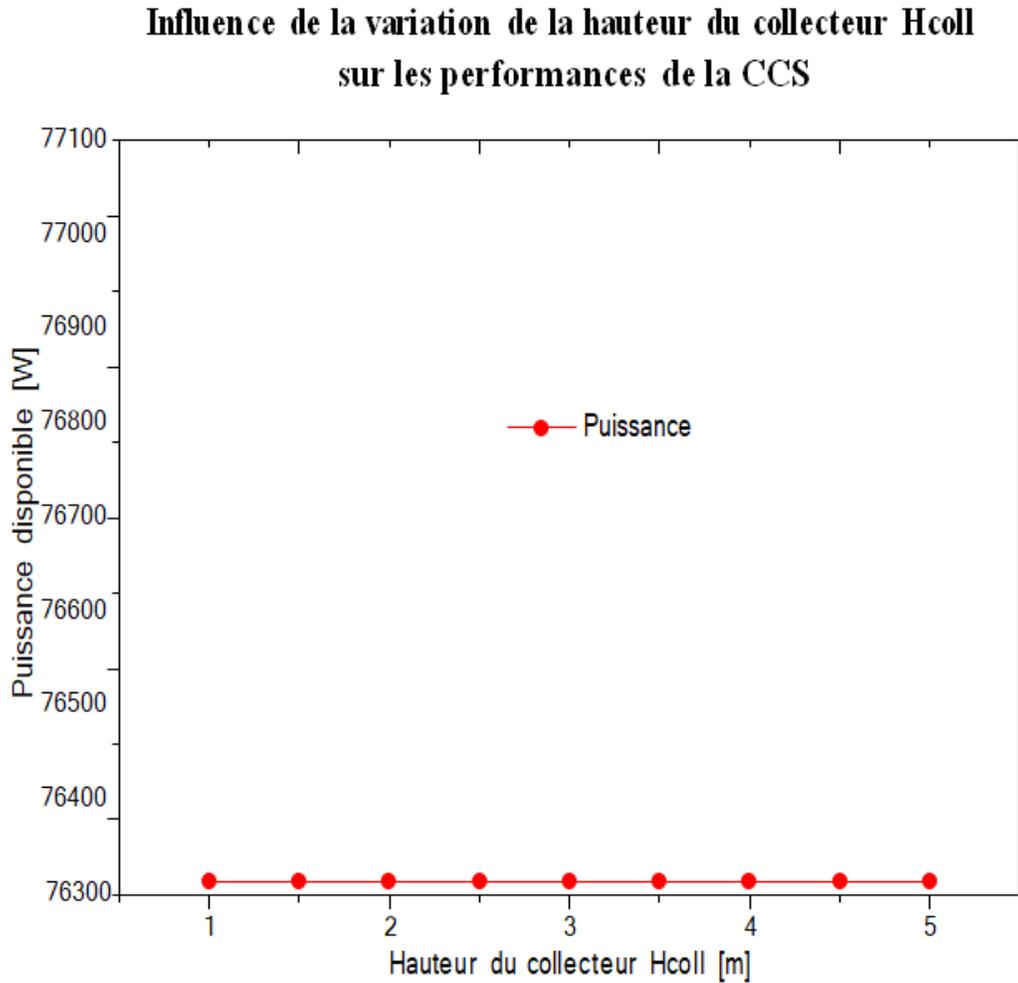


Figure V.9 Influence de la hauteur du collecteur sur la puissance disponible.

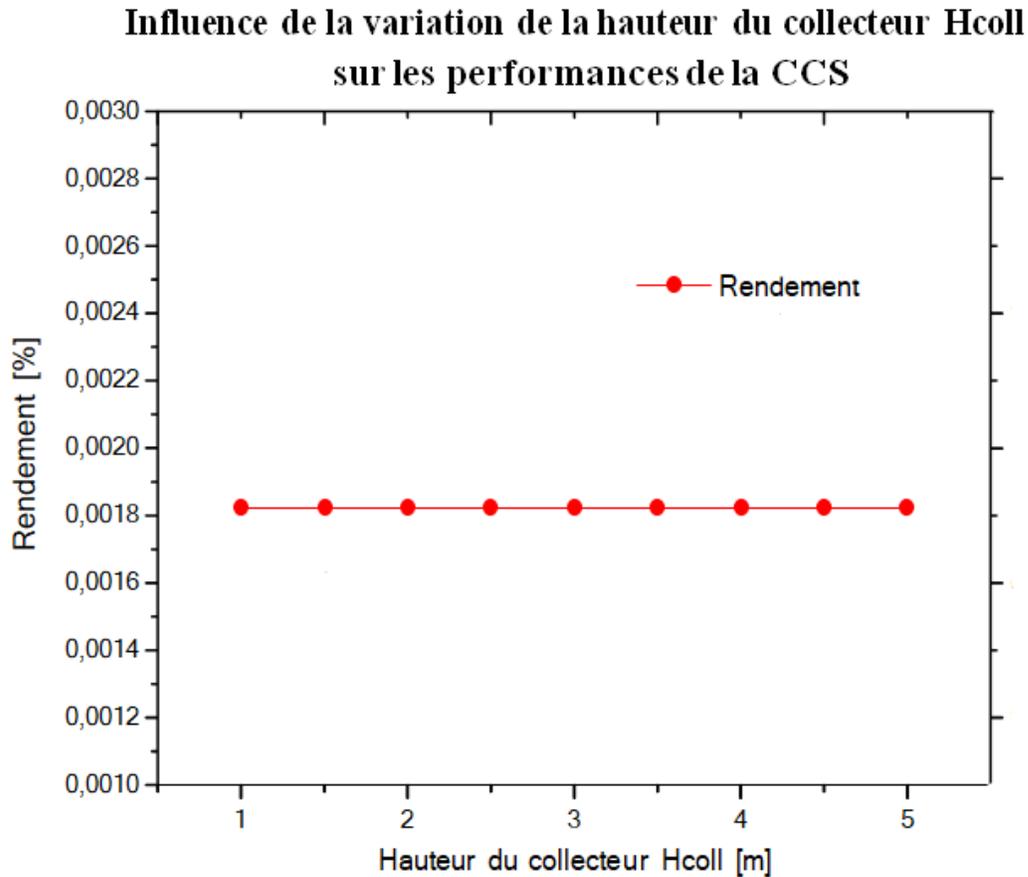


Figure V.10 Influence de la hauteur du collecteur sur le rendement de la CCS.

↪ **Remarque**

L'augmentation du H_{coll} augmente le volume d'air sous le collecteur. Si la surface du collecteur est constante alors le gain en température sera réduit. La réduction de la température d'entrée cheminée (sortie collecteur) induira une réduction de la puissance et du rendement.

V.7. Profil de Température dans le Collecteur

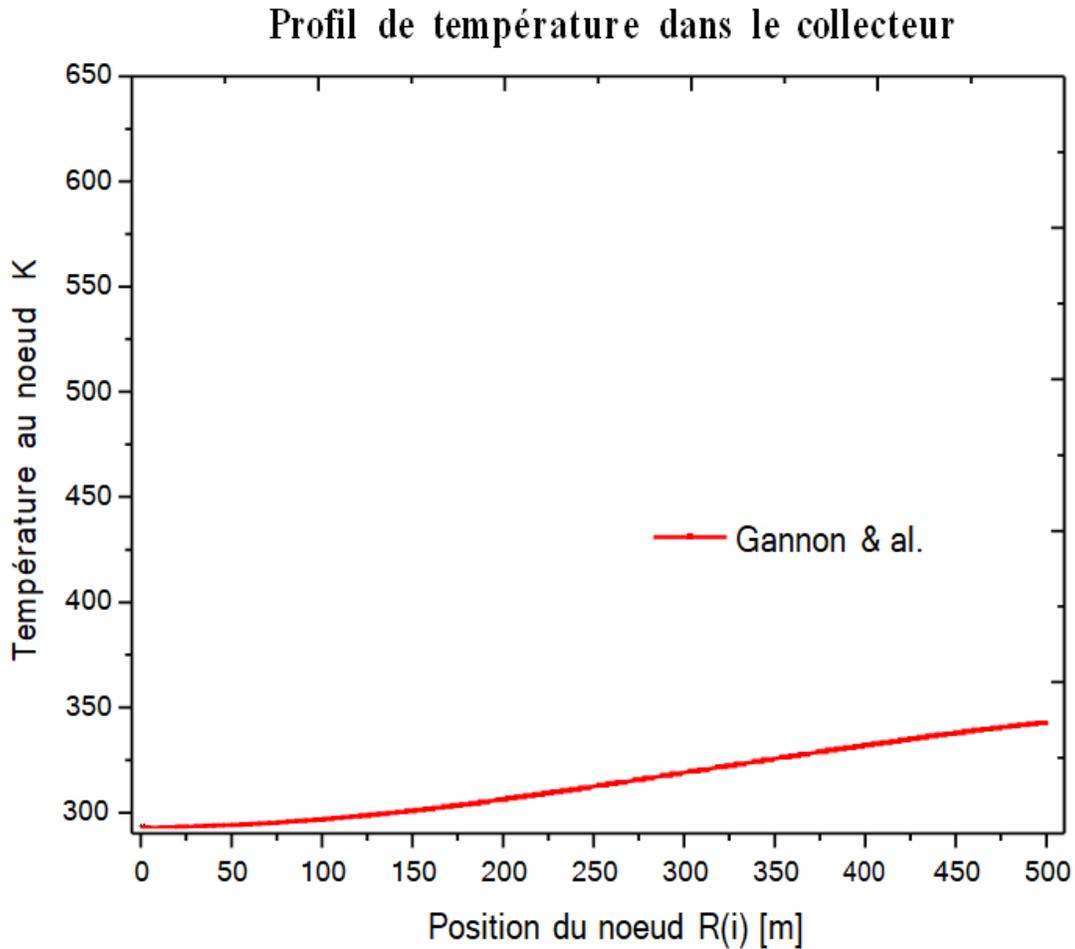


Figure V.11 : Profil de température dans le collecteur pour le modèle de A.J Gannon & al.

La figure VI.11 montre l'évolution de la température dans un collecteur d'un rayon de 500m. En effet ne prenant pas en compte les déperditions énergétiques avec l'ambiance, ni le stockage thermique vers le sol.

V.8. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats obtenues, suite au développement et résolution de modèle de A.J Gannon & al, présenté dans la littérature et validé par leur hauteur. Ce qui nous a permis de visualiser l'évolution de la puissance et du rendement, en fonction de paramètres caractéristiques de la CCS.

Les résultats ont révélé que l'élévation de température dans le collecteur, dépend de la dimension de celui-ci, mais aussi des déperditions énergétiques avec l'air ambiant et le stockage vers le sol, par conduction.

La hauteur maximale admissible croit proportionnellement avec l'irradiation solaire, nous avons illustré la variation de H_{max} pour un taux de baisse de température dans l'atmosphère égale à 0.0065 K/m [40].

Enfin, la puissance développée est fortement dépendante de la hauteur de la cheminée H_{ch} , du rayon du collecteur R_{coll} , de l'irradiation solaire G et d'une manière moindre de la température atmosphérique, et de la hauteur du collecteur.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

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 verra naître plusieurs techniques afin de s'approvisionner de son énergie et par mieux 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). Cependant, le prix élevé de l'énergie solaire par rapport à celui des sources d'énergie conventionnelles constitue un handicap face à l'expansion tant attendue de l'utilisation de l'énergie solaire.

- ☞ Le travail présenté dans ce mémoire est relatif à l'étude et modélisation d'une centrale à cheminée solaire par l'utilisation d'un modèle mathématique résolue par la méthode de différences finies et on a utilisé le logiciel de Matlab pour obtenir les résultats.
- ☞ Les résultats obtenus portent sur la détermination du rendement et de la puissance développée au sein de la centrale solaire à cheminée et leur évolution en fonction de la variation de certains paramètres caractéristiques. Analyser les résultats obtenus à partir de le modèle de A. J. Gannon & al.

En fin, on conclure que ce modèle permet une étude du cycle réel. Et une approche détaillée du collecteur, englobant les pertes par convections et par conductions.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] Schlaich, J., The Solar Chimney, Axel Menges Edition, Stuttgart, Germany, 1995.
- [2] Schlaich, J. And Schiel, W., Solar Chimneys. Encyclopedia of Physical Science and Technology, pp.99-109, 2004.
- [3] Schlaich, J., Bergemann, R., Schiel, W., Weinrebe, G., Design of commercial solar tower systems utilization of solar induced convective flows for power generation, Proceedings of the International Solar Energy Conference, Kohala Coast, United States, pp. 573-581, 2003.
- [4] E. Gholamalizadeh, S.H. Mansouri. A comprehensive approach to design and improve a solar chimney power plant: A special case Kerman project. Applied Energy 102: 975- 982. 2013. F.J. Hurtado,
- [5] BernardesM.A. dos S.,Weinrebe, A. Voß G., Thermal and technical analyses of solar chimneys, Solar Energy, Vol. 75, pp. 511-524, 2003.
- [6] Backstrom, T.W.V., Gannon, A.J., Compressible flow through tall chimneys. In: Proceedings of Solar 2000: Solar Powers Life, Share the Energy, Wisconsin, USA, 2000.
- [7] Gannon, A.J., Backström, T.W.V., Solar chimney cycle analysis with system loss and solar collector performance. In: Proceedings of Solar 2000: Solar Powers Life, Share the Energy, Wisconsin, USA, 2000.
- [8] Koonsrisuk A., Lorente S., Bejan A.,Constructal solar chimney configuration. Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 53, pp.327-333, 2010.
- [9] Pretorius J.P, Kröger D.G., Solar chimney power plant performance. J. Solar Energy Eng., Vol. 128, pp. 302-311, 2006.
- [10] Salim Mekki Boualleg, Salah Larbi, Amor Bouhdjar, Dalila Amokrane, Abdallah Sofiane Berrouk, Influence of environment and aging materials on the performance of solar chimney power plants, Renew. Energy Environ. Sustain. 6, 11 (2021).

- [11] Pablo González, Guillermo Gómez, OleGeisen : « les tours solaire, deux approches pour utiliser l'énergie du soleil », ENSTA Paris Tech, 5 .1.2011. // 01-12-2021.
- [12] Energies renouvelables et de récupération (ENR&R) [archive] Driee Ile-de- France, consulté en mars // 01-12-2021.
- [13] Pierre Pétrequin, Rose-Marie Arbogast, Anne-Marie Pétrequin, Samuel Van Willigen, Maxence Bailly, Premiers chariots, premiers araires : La diffusion de la traction animale en Europe pendant les IV^e et III^e millénaires avant notre ère, CNRS, coll. « Recherches Archéologiques », 16 novembre 2006, 397 p.(ISBN 2-271- 06426-0) // 01-12-2021.
- [14] Jörg Schlaich, “The solar chimney: electricity from the sun“, Edition Axel Menges,Novembre 2004.
- [15] Jörg Schlaich, Wolfgang Schiel: solar chimneys, Encyclopedia of Physical Science and Technology Third Edition, 2000, Consulting Engineers, Stuttgart.
- [16] T. Tayebi, “Processus de la convection naturelle laminaire dans une cheminée solaire“, magister en physique, faculté des sciences exactes, département de physique,UniversitéMentouri Constantine06 / 07 /2010
- [17] Jörg Schlaich, “The solar chimney: electricity from the sun“, Edition Axel Menges, Novembre 2004.
- [18] Abdulcelil Buğutekin, «Experemental study of temperature filed in a solar chimney plant in Adiyaman» .Isı Bilimive Tekniği Dergisi, 32, 2, 73-80, 2012 J. of Thermal Science and Technology ©2012 TIBTD Printed in Turkey ISSN 1300-3615.
- [19] <http://ladolcevit4.canalblog.com/archives/2008/03/21/8403052.html>.comportement aérothermique dans une cheminée solaire combinée avec l'énergie géothermique » Mémoire master en génie mécanique université Ouargla 2011.
- [20] <http://www.tour-solaire.fr/nouvelles-infos.php>,30 avril 2014.
- [21] M.Ulian M. Ricard, B. Lasmarrigues,M. Lelaidier Mathias, “Cheminée tour solaire“, Université de Pau et des Pays de l'Adour,2010/2011.
- [22] Stern N., The economics of climate change: the Stern Review. Cambridge, CambridgeUniversity Press Edition, 2007.

- [23] Denantes F., Bilgen E., Counter-rotating turbines for solar chimney power plants. *Renewable Energy*, Vol. 31, 2006.
- [24] Zhou X.P., Yang J.K., Xiao B., Hou G.X., Simulation of a pilot solar chimney power equipment. *Renewable Energy*, Vol. 32, 2007.
- [25] Zhou X.P., Yang J.K., Temperature field of solar collector and application potential of solar chimney power systems in China. *J Energy Inst*, Vol. 81, 2008.
- [26] Akbarzadeh A., Johnson P., Singh R., Examining potential benefits of combining a chimney with a salinity gradient solar pond for production of power in salt affected areas. *SolarEnergy*, Vol. 83, 2009.
- [27] Manfred H., Stark T., Manfred F., Zeumer M., *Construction et énergie: Architecture et développement durable*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2006.
- [28] http://www.gov.cn/english/2010-12/28/content_1773883.htm
- [29] Chitsomboon, T., A validated analytical model for flow in solar chimney. *International Journal of Renewable Energy Engineering*, Vol. 3, 2001.
- [30] Lomax H., Pulliam T., Zingg D., *Fundamentals of computational fluid Dynamics*, Springer Verlag Edition, 2001.
- [31] Wendt J. F., *Computational Fluid Dynamics*, Springer Verlag Edition, 2009.
- [32] Mathews J. H., Fink K. D., *Numerical Methods Using Matlab*, Prentice Hall Edition, 1999.