

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Département d'Electronique

Mémoire de Magister

Spécialité: Energie renouvelable

Option: Photo-Thermique

Présenté par

Boualleg Salim Mekki

Ingénieur d'état en Génie Mécanique

THEME

**Analyse des Performances Energétiques des centrales Cheminées
Solaires par utilisation de différents Modèles Mathématiques**

Devant le jury composé de:

Président :	C. LARBES	Professeur	ENP
Examineurs :	W. GUERRI B. BENKOUSSAS	Directrice de Recherche Maître de Conférence- A	CDER ENP
Rapporteur :	S. LARBI	Professeur	ENP
Invité :	B. GADOUCHE	Ingénieur	CREDEG/SONELGAZ

ملخص:

تتمثل هذه الأطروحة في محاولة تحليل أداء محطات لما يسمى بالمداخن الشمسية لتوليد الطاقة من خلال تطوير نماذج رياضية مختلفة مثل نموذج (J. Schlaich et al.) و نموذج (Y. J Dai et al.) ، و نماذج أكثر تعقيدا مثل نموذج (X. Zhou et al.) ، نموذج (T. Chitsomboon) ، نمو (J.Gannon et al.) و نموذج (T. Ming et al)

الدراسة التحليلية للنتائج المحصل عليها و المقارنة بين هذه النماذج النظرية المختلفة مكن التنبؤ على نحو أفضل بأداء هذه المحطات، كما سمح دراسة الخصائص الطاقوية للنظام ، مردوديته والاستطاعة المنتجة. كما سمح بدراسة تأثير بعض العوامل الهندسية و الفيزيائية كارتفاع المدخنة و الإشعاع الشمسي على الأداء الطاقوي و الدينامكي لما يسمى بالمداخن الشمسية.

الكلمات المفتاحية : الطاقة المتجددة؛ محطات المدخنة الشمسية لتوليد الطاقة، أداء الطاقة، مقارنة النماذج الرياضية، طريقة الفوارق المحدودة، النمذجة، موقع Mansanares

Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire est relatif à 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 al., de Zhou et al., de Ming et al. et de Chitsomboon. La validation des résultats obtenus issus de la comparaison des différents modèles théoriques avec les résultats expérimentaux du site de Mansanares a permis de mieux comparer et prédire les performances énergétiques de ces centrales.

Mots clés : Performances énergétiques; Centrale cheminée solaire ; Comparaison de modèles mathématiques ; Simulation numérique ; Site de Mansanares.

Abstract:

The purpose of this present work is related to energy performances analysis of solar chimney power plant using different mathematical models such as the model developed by Schlaich et al., the model of Dai et al. and at least the completed models as Gannon et al. model, Zhou et al., Ming et al. and Chitsomboon models. The validation of the obtained results from these different theoretical models through the comparison with the experimental ones of Mansanares prototype allows better prediction of the performance of the updraft solar chimney power plant.

Remerciements

Grand merci à Allah, de m'avoir donné le courage et la persévérance pour mener ce travail à bout. D'avoir joint sur mon chemin le juste d'ingrédients pour me faciliter la besogne et m'ouvrir grandement les portes du savoir.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et sincères remerciements à mon directeur de mémoire, Monsieur LARBI Salah, Professeur à l'ENP, de m'avoir proposé ce sujet et de l'aide précieuse qu'i m'a apporté tout au long de la réalisation de ce travail.

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur Chérif LARBES, Professeur à l'ENP, d'avoir accepté de juger ce travail et de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance. A Monsieur Bouzid BENKOUSSAS, Maître de Conférences- A à l'ENP, d'avoir accepté d'examiner ce travail. A Melle Ouahiba GUERRI, Directrice de Recherche au CDER, d'avoir accepté d'examiner ce travail, comme je la remercie, ainsi que toute l'équipe du CDER, en particulier Mr Koussa, pour m'avoir toujours accueilli chaleureusement au CDER.

Mes remerciements vont aux employés de la bibliothèque du CDER et de l'ENP de m'avoir facilité l'accès à la documentation.

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

Dédicaces

A Mes Chers Parents,

A Mes enfants « Abderrahmane et Selma »,

A mes frères, A ma sœur,

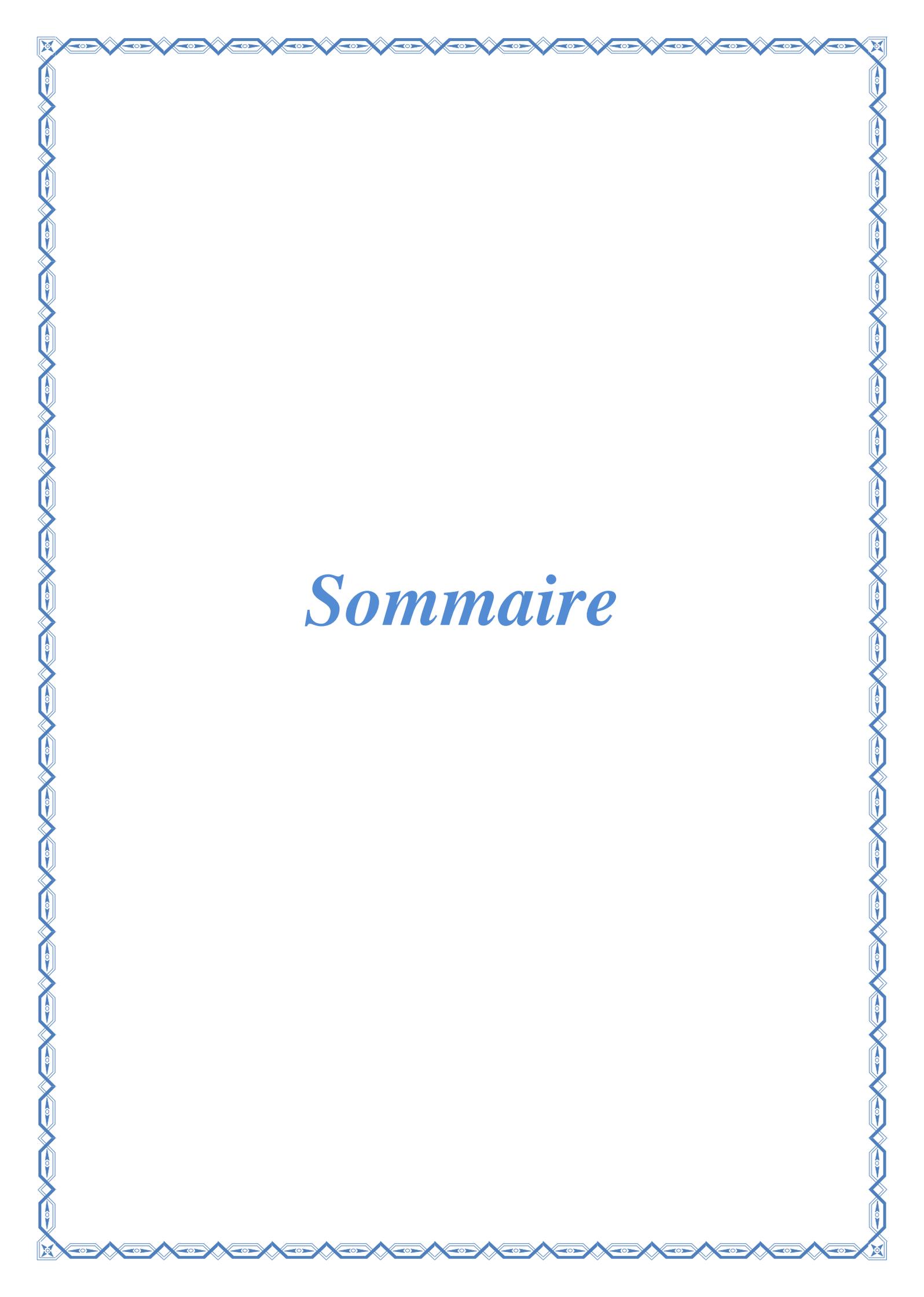
A ma famille.

A Chougui Nacer, Raaf Farid, Belkadi Zoheir,

A Abdelkader, Kamel, Taoufik, Mustapha et Ryadh.

A mes amis de l'USTHB, l'IAP, l'ENP et du CCU.

A tout mes amis.



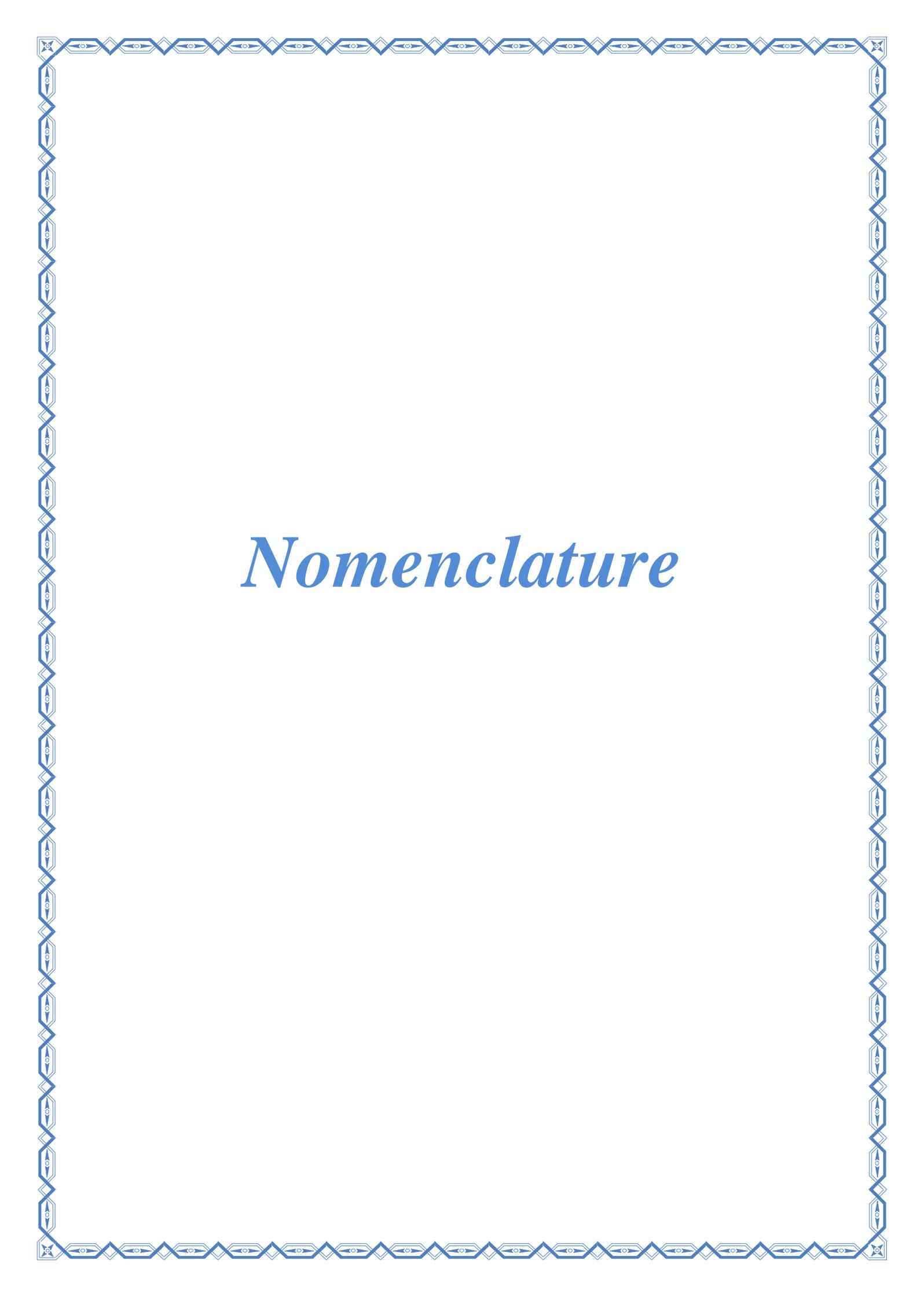
Sommaire

Sommaire

<i>Introduction Générale</i>	12
<i>CHAPITRE I : Généralités</i>	17
1.1 L'Energie	17
1.2 Le Bilan énergétique de la Terre	18
1.2.1 La chaleur terrestre	18
1.2.2 La gravitation	18
1.2.3 Le rayonnement solaire	18
1.3 L'Evolution de la consommation d'énergie	19
1.4 Formes d'énergies utilisées	21
1.4.1 L'Energie nucléaire	21
1.4.2 L'Energie fossile	22
1.4.3 Les énergies renouvelables	27
<i>CHAPITRE II : Les Centrales à Cheminée Solaire CCS</i>	29
2.1 Les tours solaires	29
2.1.1 Le Collecteur	30
2.1.2 Les Turbines	32
2.1.3 La cheminée	33
2.2 Principe de fonctionnement d'une centrale à cheminée solaire	34
2.3 Projets de Centrale à Cheminées Solaire	35
2.3.1 La centrale à cheminée solaire de la Chine	35
2.3.2 La centrale à cheminée solaire d'Arizona	37
2.3.3 Prototype de Manzanares	39
2.4 Avantages et inconvénients	41
2.4.1 Avantage des CCS	41
2.4.2 Inconvénients	41
<i>CHAPITRE III : Revue bibliographique sur les centrales cheminées solaires</i>	43
3.1 Etudes théoriques	43
3.2 Etudes expérimentales	53
<i>CHAPITRE IV : Développement de modèles & Mise en équations</i>	61
4.1 Introduction	61
4.2. Description des différents modèles mathématiques	61

4.2.1. Hypothèses communes aux différents modèles	61
4.2.2. Modèle de J. Schlaich & al. « N°1 »	62
4.2.2.1 Le collecteur	62
4.2.2.4 La cheminée	64
4.2.2.5 L'expression de la vitesse de l'air dans la cheminée	64
4.2.2.6 Le rendement de la cheminée	66
4.2.2.7 Puissance et la perte de charge totale	67
4.2.2.8 La turbine à air « aéro-génératrice »	67
4.2.2.9 La puissance maximale développée	68
4.2.2.10 La puissance fournie au réseau	69
4.2.3 Modèle de A. J. Gannon & al. « N°2»	70
4.2.3.1 Le cycle parfait de la cheminée solaire	70
4.2.3.2 Rendement de la CCS	70
4.2.3.3 Puissance développée	72
4.2.3.4 Le cycle réel de la centrale à cheminée solaire	72
4.2.3.5 Hypothèse de modélisation du cycle réel	74
4.2.3.6 Rendement de la turbine	74
4.2.3.7 Perte par frottement dans la cheminée	74
4.2.3.8 Rendement global de la détente de l'air	75
4.2.3.9 Rendement du cycle réel	75
4.2.3.10 Puissance développée par le cycle réel	75
4.2.3.11 Le collecteur	75
4.2.4 Modèle de Y.J Dai & al. « N°3 »	76
4.2.4.1 Le collecteur	76
4.2.5. Modèle de M. Tingzhen & al. « N°4»	77
4.2.5.1. Modélisation du collecteur - méthode par tranche	77
4.2.5.2. La puissance et le rendement de la CCS	78
4.2.6. Modèle de Chitsomboon « N°5»	78
4.2.6.1. Modélisation des phénomènes de transferts	79
4.2.6.2. Solution du modèle analytique	79
4.2.7. Modèle de X. Zhou & al. « N°6 »	79
4.2.7.1. La cheminée	79
4.2.7.2. Perte de charge dans la cheminée	80
4.2.7.3. Puissance et rendement de la CCS	80
4.2.7.4. La hauteur maximale de la cheminée	81
CHAPITRE V : Simulation numérique	83
5.1 Introduction	83
5.2 Les modèles de J. Schlaich, de Dai, de Ming et de Zhou	83
5.3 Modèle de A. J. Gannon & al.	83
5.3.1 Généralité et principe de discrétisation	84
5.4 Modèle de T. Chitsomboon	85

5.5	Organigrammes de résolution	86
CHAPITRE VI : Analyse des résultats & Interprétations		91
6.1.	Introduction	91
6.2.	Influence de la variation de l'irradiation solaire G	92
6.3.	Influence de la variation de la hauteur de la cheminée Hch	93
6.4.	Influence de la variation du rayon du collecteur « Rcoll »	95
6.5.	Influence de la variation de la section de la cheminée	98
6.6.	Influence de la variation de la hauteur du collecteur « Hcoll »	100
6.7.	Profil de température dans le collecteur	102
6.8.	La hauteur maximale de la cheminée	103
6.9.	Variation de la puissance en fonction de paramètres caractéristiques de la CCS	104
6.10.	Conclusion	105
CONCLUSION GENERALE		107
Références Bibliographiques		111



Nomenclature

Nomenclature

- A_{coll} : Surface de la toiture du collecteur, m^2
- A_c : Section à la sortie du collecteur (entrée de la cheminée), m^2
- C_p : Capacité calorifique de l'air, $J/kg \cdot K$
- 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, $W/m^2 \cdot K$
- U_∞ : Coefficient de transfert de chaleur par convection entre la paroi de la cheminée et l'air ambiant, $W/m^2 \cdot K$
- U_f : Coefficient de transfert de chaleur par convection entre la paroi de la cheminée et l'écoulement, $W/m^2 \cdot K$
- 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 [W / m² K].

$\xi\alpha$: 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 du béton utilise pour la construction du mur.

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, ch :Cheminée

tw : Aéro-turbine

glo :Global

tot : Total

s : Statique.

$\infty, 0$: Environnement

1 : Sortie collecteur, entrée cheminée.

2 : Sortie turbine.

3 :Sortie cheminée

Introduction Générale



Introduction Générale

Depuis des siècles que l'homme utilise les combustibles d'origine fossile provenant de roches fossilisées d'éléments organiques, pour la production d'énergie (pétrole, gaz naturel ou charbon). Ces combustibles sont présents dans des réserves limitées et non renouvelables. Outre leur épuisement inéluctable, leur exploitation est à l'origine de problèmes environnementaux relatifs aux dégâts écologiques liés à leur utilisation irrationnelle.

Les estimations relatives à l'évolution de la consommation énergétique mondiale sont pour le moins incertaines. Tous les scénarios partent du principe que la consommation d'énergie devrait notablement progresser dans les années à venir en raison de l'augmentation de la population et du PNB des pays émergents ou en voie de développement. A l'heure actuelle, 1/5e de l'humanité ne dispose d'aucun accès à l'électricité, les 2/5 couvrent leurs besoins énergétiques en recourant de façon traditionnelle à la biomasse [1].

En 2010, l'exploitation des forages au large des côtes californiennes des champs pétrolifères offshore a causé une marées noires et un désastre écologique important au Golfe du Mexique, auquel, il faut rajouter le réchauffement climatique dont seraient en partie responsables les gaz à effet de serre issus de la combustion du pétrole et de ses dérivés, tels que le dioxyde de carbone massivement émis par leur combustion[2].

L'utilisation de quantités considérables de combustibles fossiles est à l'origine d'un déséquilibre important du cycle du carbone, provoquant l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre et, par voie de conséquence, les problèmes liés aux changements climatiques.

Selon le GIEC (1995), le changement climatique s'accompagne : d'une perturbation du cycle de l'eau, d'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des catastrophes naturelles d'origine climatique (sécheresses, inondations, tempêtes, cyclones), d'une menace de disparition de certains espaces côtiers, en particulier les deltas, les mangroves, les récifs coralliens, les plages d'Aquitaine, etc..., d'une diminution de 17,5 % de la superficie émergée du Bangladesh, de 1 % de celle de l'Égypte, favoriserait la recrudescence du paludisme, et l'extension de maladies infectieuses comme la salmonellose ou le choléra, en accélérant la baisse de la biodiversité : disparition d'espèces animales ou végétales.

L'ONU rappelait en 2007 dans son rapport GEO-41 que la « combustion des carburants fossiles dans les centrales électriques et dans les véhicules est la principale source d'émissions de CO₂, de SO₂ et de NO_x », en précisant les liens étroits entre l'exposition aux polluants atmosphériques et les problèmes sanitaires humains [3].

Avec la prise de conscience du danger qui guète l'humanité toute entière « protocole de Kyoto 1997 » sur le réchauffement climatique de notre planète, et si l'on considère l'échéance des réserves d'énergies fossiles et l'évolution de la demande énergétique mondiale, il devient urgent, de développer des sources d'énergie plus respectueuses de l'environnement et économes en ressources naturelles tout en optimisant en parallèle la consommation énergétique actuelle.

La menace qui pèse sur l'épuisement précoce des combustibles fossiles, le coût relativement élevé des énergies utilisées actuellement et les exigences écologiques constituent des paramètres incitateurs pour la recherche de nouvelles sources d'énergies propres, orientées vers le développement durable, afin de préserver les ressources planétaires pour les générations futures. Dans le contexte actuel, l'énergie solaire est une alternative très intéressante et avantageuse. La cheminée solaire se présente comme étant un dispositif

pratique et non polluant pour la production d'électricité. Elle apparaît comme une technologie très prometteuse, respectueuse de l'environnement [3].

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

Une centrale à cheminée solaire (CCS) est constituée de trois éléments principaux : le capteur solaire, la tour- cheminée et la turbine. Le capteur, constitué par le sol et une couverture transparente situé à quelques mètres au dessus du sol, a pour objectif principal de capter le rayonnement solaire pour chauffer la masse d'air présente à l'intérieur.

Les forces de gravités dirigent l'air chaud vers la cheminée qui est située au centre du capteur. Une turbine est placée sur le chemin de l'écoulement d'air pour convertir l'énergie cinétique de l'air en électricité à travers une génératrice de courant. Le capteur peut être équipé d'un dispositif de stockage afin d'augmenter la période de fonctionnement du système c'est-à-dire en dehors de la période journalière. Ainsi donc grâce à diverses techniques, le rayonnement solaire peut être transformé en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment, en chaleur, et en électricité [4].

C'est dans ce cadre que ce mémoire contribue modestement à la vulgarisation de l'énergie photo- thermique, et son exploitation par les centrales à cheminée solaire.

Le travail ainsi présenté se compose de six chapitres:

- Le premier chapitre est relatif à un aperçu sur les différentes formes d'énergie, y sont décrits l'énergie solaire sur sa base de potentiel énergétique, du rayonnement solaire au niveau du sol, et des flux : directes, diffus et total.*

- *Le second chapitre est relatif à une description des centrales cheminées solaires où est décrit le principe de fonctionnement de ces centrales.*
- *Le troisième chapitre concerne une revue bibliographique sur l'état de l'art dans le domaine des cheminées solaires, y sont décrits les travaux se rapportant à la détermination des performances énergétiques de ces centrales par utilisation de différents modèles mathématiques.*
- *Le quatrième chapitre, quant à lui, est relatif la description de différents modèles mathématiques de calcul des performances énergétiques des centrales cheminées solaires. Ces différents modèles seront utilisés et les résultats issus de ces modèles seront analysés et discutés au chapitre VI.*
- *Le cinquième chapitre est consacré à la description de la méthode numérique de résolution, y sont décrits la discrétisation du problème et la résolution des équations algébriques.*
- *Au chapitre six, seront présentés les résultats issus de la simulation numérique ainsi que les discussions de ces différents résultats.*
- *Enfin, une conclusion générale faisant la synthèse des résultats obtenus et les perspectives futures.*

Chapitre I

Généralités



Généralités

1.1 L'Énergie

L'origine du mot « **énergie** » remonte à l'antiquité. Le philosophe grec Aristote désignait par « *energeia* » (activité, efficacité) la force agissant grâce à laquelle le possible se réalise. Mais sa signification actuelle dans le champ des sciences naturelles ne remonte qu'au XIX^e siècle. La définition physique du terme est depuis la suivante : c'est « le travail contenu dans un système ou la capacité d'un système à exécuter un travail ». L'énergie peut être transformée, stockée ou transportée. N'étant pas une matière, elle échappe à la perception sensorielle, seule la forme sous laquelle elle apparaît est perceptible. L'énergie apparaît sous différentes formes et peut être décomposée selon ses propriétés physiques en énergie mécanique, thermique ou chimique.

En 1847, Herman vonHelmholz a fait une découverte décisive pour la compréhension de la transformation de l'énergie : l'énergie ne peut pas être produite ; on ne peut que la transformer d'une forme à une autre. Le principe de conservation de l'énergie a parallèlement constitué le premier principe de la thermodynamique. Selon lequel, la quantité d'énergie totale (chaleur + travail) d'un système fermé est toujours constante. Le terme courant de « consommation d'énergie » désigne du point de vue physique la transformation d'une forme d'énergie en une autre et peut être formulée ainsi :

$$\text{Énergie} = \text{exergie} + \text{anergie} = \text{constante}$$

L'exergie désigne la quantité d'énergie disponible pour exécuter une tâche nécessaire, alors que l'anergie caractérise la part non disponible. Dans l'exemple du chauffage des bâtiments, l'énergie chimique d'un combustible est transformée par combustion en énergie thermique. La totalité de l'énergie se divise donc en part utile (exergie) et en part inutile (anergie) par les dégagements de chaleur et les déperditions thermiques. Contrairement à

l'énergie, l'exergie n'est donc pas conservée mais dépréciée en anergie par la transformation.

Une autre grandeur liée aux transformations de l'énergie est l'entropie (du grec entropia qui signifie retournement, transformation). en 1865, Rudolf Clausius a défini le second principe de la thermodynamique selon lequel l'entropie d'un système fermé augmente. Le retour à la situation de départ (faible entropie) nécessiterait l'utilisation d'énergie. Il en ressort qu'en absence d'énergie venant de l'extérieur, les systèmes se dirigent toujours vers un état de désordre supérieur [2].

1.2 Bilan énergétique de la Terre

Tous les flux énergétiques disponibles sur la terre proviennent majoritairement de trois sources :

1.2.1 La chaleur terrestre :

De grandes quantités d'énergie ont été accumulées (par compression) lors de la création de la terre. Avec la désagrégation naturelle des isotopes, elles forment la chaleur terrestre.

1.2.2 La gravitation :

En liaison avec l'attraction entre la Terre et la Lune, les mouvements des planètes créent les marées.

1.2.3 Le rayonnement solaire :

En raison des réactions thermo- nucléaires au sein du soleil, le rayonnement solaire produit, atteint non seulement l'atmosphère mais aussi la surface terrestre.

Les quantités d'énergie de ces trois sources sont extrêmement différentes : le rayonnement solaire constitue de loin la plus importante part avec plus de 99% de la quantité d'énergie disponible. Avec environ 0,002%, la chaleur

terrestre se place au second rang. L'apport des marées est de l'ordre de 0,02%. On peut dire ainsi que la Terre se trouve dans un état d'équilibre énergétique. Cela signifie que la quantité d'énergie apportée est égale à celle qui en est retirée. Près d'un tiers du rayonnement solaire dirigé vers la terre, avec une puissance spécifique de 1367 W/m^2 (Constante solaire), est déjà reflété au moment de sa pénétration dans l'atmosphère terrestre. En raison des variations de l'état atmosphérique. Environ la moitié du rayonnement parvient enfin à la surface terrestre, sur les continents et les océans.

L'utilisation intensive des matières premières fossiles ces 150 dernières années a influencé l'équilibre énergétique. Au cours de cette période, l'énergie libérée a en effet été nettement supérieure aux flux énergétiques reçus par le système terre ou à la création de nouvelles réserves.

1.3 Evolution de la consommation d'énergie

Après une phase de démarrage et de hausse, toutes les matières premières fossiles dont les quantités exploitées et consommées augmentent – atteignent un sommet avant de connaître une phase de baisse. Après un XIX^e siècle dominé par le bois et le charbon comme agents énergétiques, le XX^e siècle a été caractérisé par un mélange énergétique. Dans ce contexte, il apparaît aussi qu'une réelle interdépendance liait dans le passé la croissance de la population, la consommation d'énergie et les émissions de CO₂.

L'essentiel de l'approvisionnement énergétique mondial est encore du à l'exploitation du pétrole. Le recours au charbon a certes déjà atteint son sommet au début du XX^e siècle mais il joue encore aujourd'hui un rôle important pour l'approvisionnement énergétique. La part du gaz naturel et de l'énergie nucléaire augmente tandis que le bois et l'hydraulique, sources traditionnelle d'énergie renouvelable, doivent se contenter d'une modeste place.

Les estimations concernant l'évolution de la consommation mondiale d'énergie sont pour le moins incertaines. Tous les scénarios partent du principe que la consommation d'énergie devrait notablement progresser dans les années à venir en raison de l'augmentation de la population et du PNB des pays émergents ou en voie de développement. A l'heure actuelle, 1/5^e de l'humanité ne dispose d'aucun accès à l'électricité, les 2/5^e couvrent leurs besoins énergétiques en recourant de façon traditionnelle à la biomasse. La figure I.1 montre les Investissements dans les énergies renouvelables.

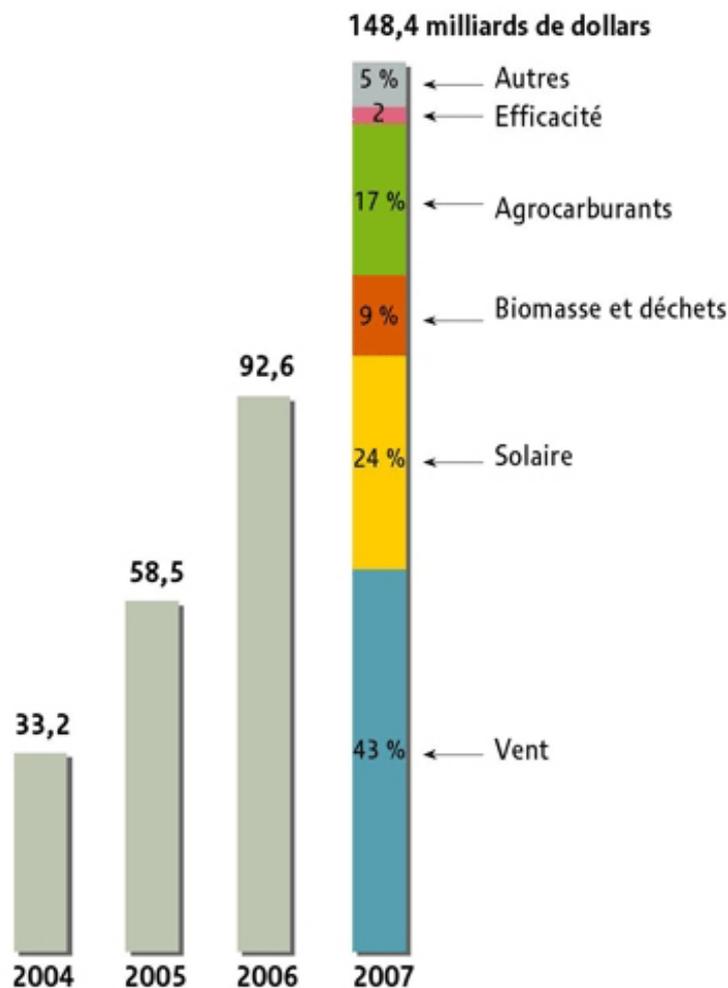


Figure I.1. Investissements dans les énergies renouvelables.

1.4 Formes d'énergies utilisées

Comme décrit précédemment, l'énergie de la Terre comprend les trois sources d'énergie primaire qui sont le rayonnement solaire, la chaleur terrestre et la gravitation.

Les Formes d'énergie fossiles formées sur une longue période par le rayonnement solaire passé ne sont pas non plus considérées comme renouvelables.

La plupart des formes d'énergie renouvelables découlent toutefois du rayonnement solaire disponible sous forme directe ou diffuse, de la terre proche de la surface qui réchauffe l'atmosphère ainsi que des eaux de surface. Ces réchauffements donnent lieu à des formes d'énergie dérivées comme le vent, les courants marins, le mouvement des vagues et l'eau courante. Enfin, le rayonnement solaire est à la base de la production de la biomasse.

1.4.1. L'Energie nucléaire

L'utilisation de l'énergie nucléaire est très contestée par certains groupes politiques et sociaux. Celle-ci n'entraîne effectivement pas d'émissions de CO₂ lors de sa phase de fonctionnement mais sur l'ensemble du cycle de vie, on peut déplorer certaines contreparties : construction et destruction des réacteurs, exploitation de l'uranium, traitement des déchets et risques élevés. L'énergie nucléaire contribue actuellement à environ 17% de la production mondiale d'électricité mais représente moins de 7% de l'approvisionnement énergétique mondial.

Les risques encourus et la production d'électricité nucléaire dépourvue de carbone doivent être évalués à cette aune. Un autre problème lié aux ressources vient en plus pénaliser la technologie de ces réacteurs, de nos jours très répandus. L'uranium utilisé pour les réacteurs à eau légère restera relativement bon marché encore 40 ans. Les surgénérateurs (dits à neutrons rapides) qui, outre la production d'électricité, servent aussi à obtenir d'autres matières

fissiles, ne fonctionnent en continu dans aucun pays. Le plutonium augmente la menace atomique en raison des risques d'utilisation militaire.

La recherche sur les réacteurs à fusion thermonucléaire est intense depuis les années 1960. En théorie, la fusion thermonucléaire permettrait de produire davantage d'électricité pour une consommation de combustible et une production de déchets radioactifs moins importants. Le développement des réacteurs à fusion thermonucléaire suppose néanmoins d'énormes investissements. L'utilisation commerciale de cette technologie est attendue au plus tôt dans 50 ans, si tant est qu'elle s'avère réalisable. L'extraction, l'utilisation et la gestion des déchets radioactifs s'accompagnent de risques élevés pour la santé. Ces matières doivent être durablement mises à l'écart de l'environnement et surveillées moyennant de fortes dépenses techniques et logistiques.

La crise nucléaire de la centrale japonaise de Fukushima située à environ 240 km au nord de Tokyo, endommagée lors du puissant tremblement de terre suivi par un tsunami en Mars 2011, a induit des fusions partielles de cœur dans trois réacteurs puis d'importants rejets radioactifs. Cet accident a mis une fois de plus en évidence le danger potentiel que représente ce type de centrale.

1.4.2. L'Énergie fossile

L'approvisionnement énergétique mondial repose aujourd'hui à environ 80% sur les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) et l'énergie nucléaire. Étant donné que leurs périodes de formation sont largement plus longues que les vies humaines, la consommation actuelle de ces énergies dépasse nettement leur formation. Les réserves d'énergie fossiles se sont créées à différentes époques de l'histoire de la terre par des procédés biochimiques et chimiques de transformation des matières organiques. Les périodes de formation des agents énergétiques sont les suivantes :

- **Pétrole et gaz naturel** : 20 à 440 millions d'années.

- **Charbon** : 10 à 370 millions d'années.

Pour minimiser les changements climatiques, les partisans de l'économie d'énergies fossiles mettent surtout en avant l'enfouissement du CO₂, Par séquestration issu des gaz de fumée des centrales thermiques et installations industrielles est techniquement séparé, comprimé avant d'être enfoui sous haute pression dans des nappes souterraines contenant de l'eau salée (aquifères) à environ 1000m de profondeur. En Europe, 12 sites de démonstration doivent être mis en fonctionnement d'ici 2015.

De grandes incertitudes planent néanmoins sur la sécurité et la justification économique du processus. Lors du stockage du gaz carbonique, de l'eau chargée de sel ou de métal pourrait s'échapper des nappes aquifères par des fissures dans la roche et venir contaminer les réserves d'eau souterraine. Des fuites plus importantes risqueraient de polluer l'atmosphère à grande échelle [3].

L'utilisation massive des énergies fossiles expose la planète à deux problèmes majeurs – accroissement de l'effet de serre à relativement court terme et épuisement des réserves à plus long terme – qui ne sont pas complètement dissociable. Ce sont, en effet, les atomes de carbone extraits sous forme de gaz naturel, pétrole ou charbon qui conduisent à la production inexorable de gaz carbonique (CO₂), les sources les plus hydrogénées étant celles qui en émettent le moins.

Les gaz à effet de serre sont naturellement peu abondants dans l'atmosphère mais du fait de l'activité humaine, la concentration de ces gaz s'est sensiblement modifiée (la concentration de CO₂ a augmenté de 30% depuis une centaine d'années (Figure I.2).

Nous vivons une période d'énergie abondante dont le prix reste inférieur à ce qu'il devrait être si nous avons une attitude responsable vis-à-vis des ressources naturelles et des générations futures. Dès la seconde moitié du

XXI^e siècle, gaz et pétrole se feront plus rares et plus chers. Un regain d'intérêt se manifeste pour les énergies renouvelables a priori inépuisable et perturbant moins l'environnement. Ce sont celles qui ont été utilisées depuis que l'homme a maîtrisé le feu, il y a environ 500 000 ans, jusqu'à la révolution industrielle, il y a moins de 200 ans. Depuis, leur part a largement décliné. Leur avantage majeur : une contribution négligeable à l'accroissement de l'effet de serre. Leurs inconvénients : elles sont diluées, pas toujours disponibles et, pour la plupart, pas encore compétitives dans la majorité des situations.

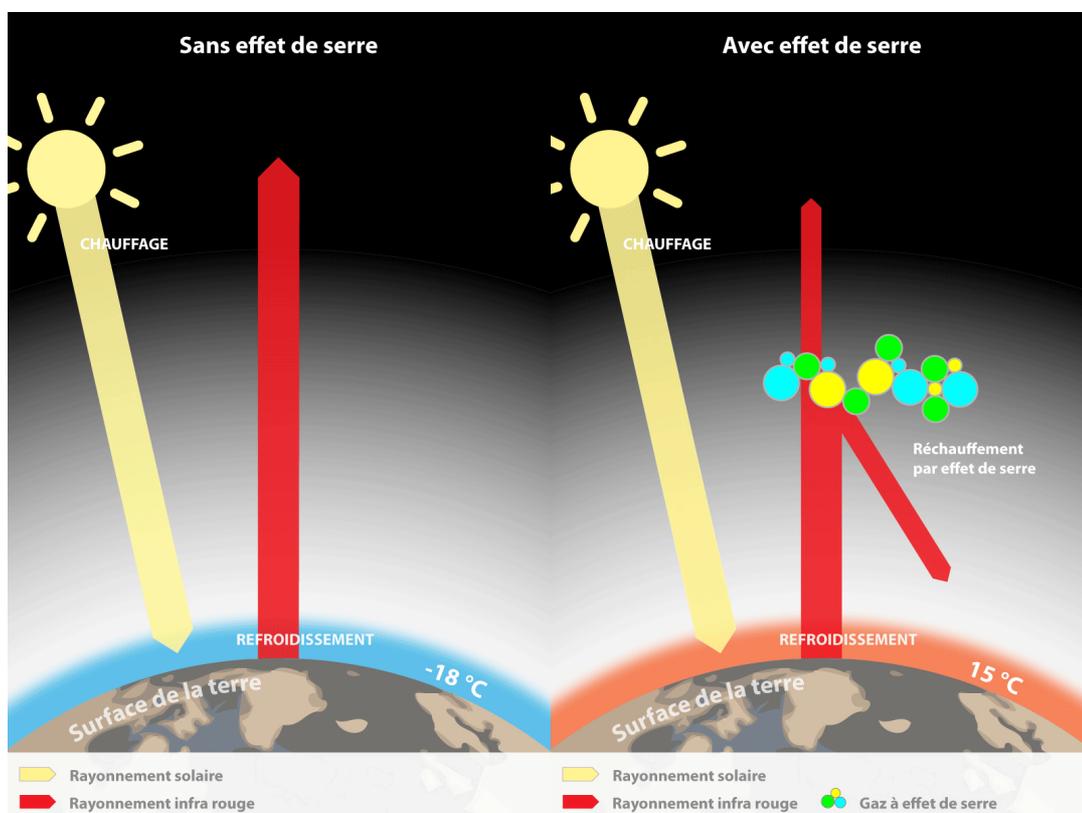


Figure. I.2. Mécanisme de l'effet de serre.

1.4.3. Les énergies renouvelables

Mise à par les formes traditionnelles d'utilisation de la biomasse, de l'énergie du vent et de l'eau, on assiste depuis le milieu des années 1970 à une utilisation croissante des sources d'énergies renouvelables suite à l'augmentation des prix des combustibles fossiles [3].

Depuis la catastrophe du réacteur nucléaire de Tchernobyl en 1986 (Photo.I.1), ce phénomène s'est amplifié et les effets sont perceptibles depuis les années 1990. Profitant de conditions politiques favorables, on constate une croissance faible mais continue des agents énergétiques renouvelables. Leur développement repose principalement sur l'énergie éolienne et la biomasse liquide et gazeuse. Si l'on observe la structure des énergies renouvelables, on voit que l'utilisation de la biomasse solide sous forme de combustion de bois occupe la première place, sachant que les statistiques dépendent d'estimations en raison de leur structure décentralisée.

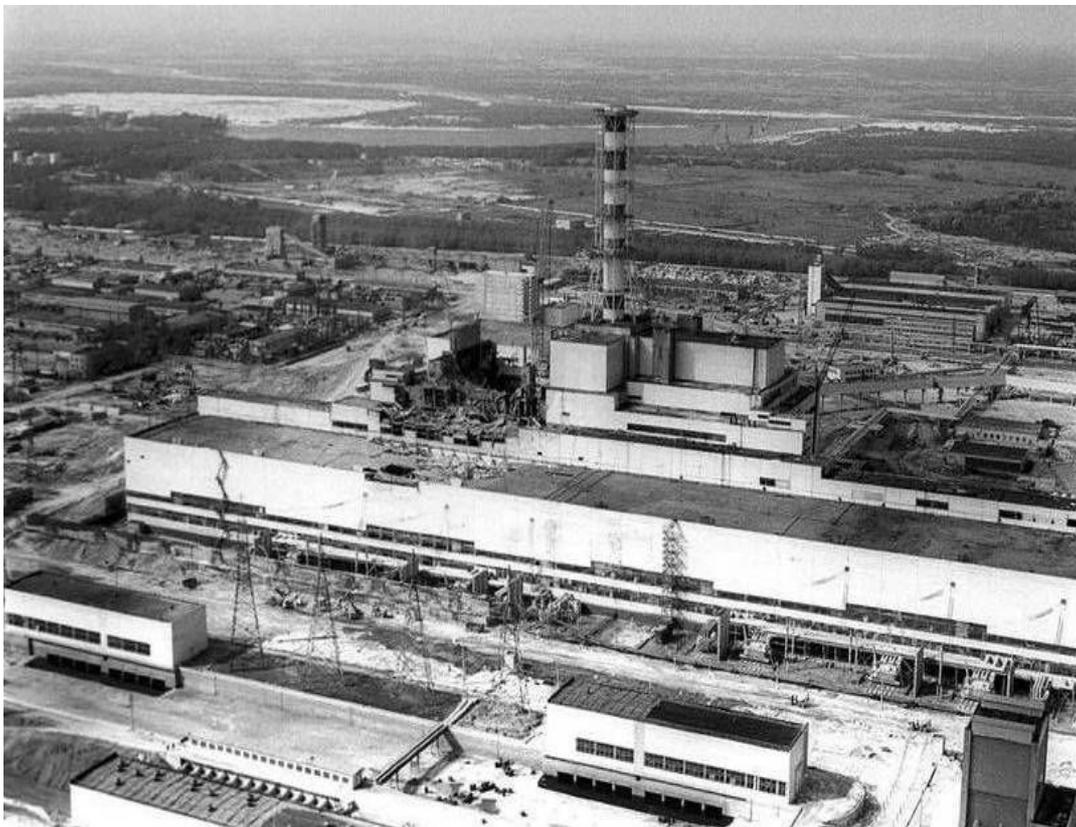


Photo.I.1 de Tchernobyl : Le 26 avril 1986, le réacteur n°4 de la centrale nucléaire soviétique de Tchernobyl, en Ukraine, explose, plongeant le monde dans la crainte d'une vaste contamination radioactive. A l'heure où tous les regards convergent vers le site japonais de Fukushima, retour en images sur ce qui reste la plus grande catastrophe nucléaire de tous les temps.

Avec les énergies hydraulique et éolienne, la biomasse solide représente plus de 75% de la contribution des sources – chauffage solaire, solaire photovoltaïque et géothermie – n'occupent pour le moment qu'une part

négligeable. Au total, les énergies renouvelables assurent environ 6% de la mise à disposition énergétique.

Pour la plupart des applications, il est nécessaire de convertir l'énergie afin de la rendre compatible avec l'usage envisagé. Bien évidemment la nature, très ingénieuse, a mis au point les tout premiers convertisseurs énergétiques que sont les êtres vivants. Les plantes, par la photosynthèse, assurent la conversion de l'énergie rayonnante de la lumière en énergie chimique. Le corps humain lui-même permet, en particulier, de convertir l'énergie chimique en énergie mécanique via le système musculaire (Figure.I.3).



Figure. I.3.Conversions des principales formes d'énergie et quelques exemples de convertisseurs d'énergie.

Par la suite, l'homme a inventé de très nombreux convertisseurs. Le premier est tout simplement le feu qui convertit de l'énergie chimique (combustion) en lumière et chaleur. Une voile transformant l'énergie éolienne en énergie mécanique. Plus récemment un poste de télévision assure la conversion de l'électricité en énergies lumineuse (images) et mécanique (sons).

En fait, de nombreux systèmes énergétiques sont l'association de plusieurs convertisseurs, tel est le cas de la centrale à cheminé solaire détaillé dans le chapitre suivant.

Chapitre II
Les Centrales
Cheminées Solaires
CCS



Les centrales Cheminée Solaires « CCS »

2.1 Les Tours Solaires

Les énergies renouvelables dont l'énergie solaire constituent une alternative indéniable aux énergies classiques, périssables et polluantes. Dans plusieurs régions du monde, il y a une conscience croissante que les ressources énergétiques alternatives pourraient avoir un rôle important à jouer dans la production de l'électricité. Cependant, il n'y a que l'énergie solaire qui soit une ressource inépuisable, totalement non polluante et qui puisse être économiquement rentable pour assurer les besoins énergétiques actuels et futurs de l'homme, Il y a beaucoup de méthodes pour exploiter l'énergie solaire. Ainsi, le choix et la bataille technologique sont de véritables enjeux sous-jacents à la question climatique et énergétique. L'appropriation d'une technologie solaire industrielle est cruciale et déterminante pour les pays du sud, qui bénéficient d'important ensoleillement mais qui, souvent sont technologiquement dépendent [3].

La tour solaire à effet de cheminée est l'un des projets les plus ambitieux de la planète pour la production d'énergie alternative. C'est une usine d'énergie renouvelable qui pourrait fournir une puissance électrique importante de l'ordre de 200 MW, tout en étant sûr, propre et d'une technologie simple et fiable. La tour solaire associe trois techniques usuelles : La serre (Collecteur), la cheminée et les turbine éolienne.

En 1978, le Professeur Jorg Schlaich [4] de l'université de Stuttgart, a eu l'idée que l'électricité pourrait être produite par un système hybride solaire – éolien composé de trois parties : Un collecteur, des aéro-génératrices, et une cheminée (Figure II.1). Son principal avantage est qu'elle peut fonctionner

sans intermittence en utilisant le rayonnement du soleil direct et diffus, le jour et la chaleur de la croûte terrestre la nuit. Même sous un ciel couvert, le rayonnement diffus peut être exploité par les CCS pour la production d'électricité.

Les différents composants des CCS sont les suivants : Le collecteur, la cheminée et la turbine.

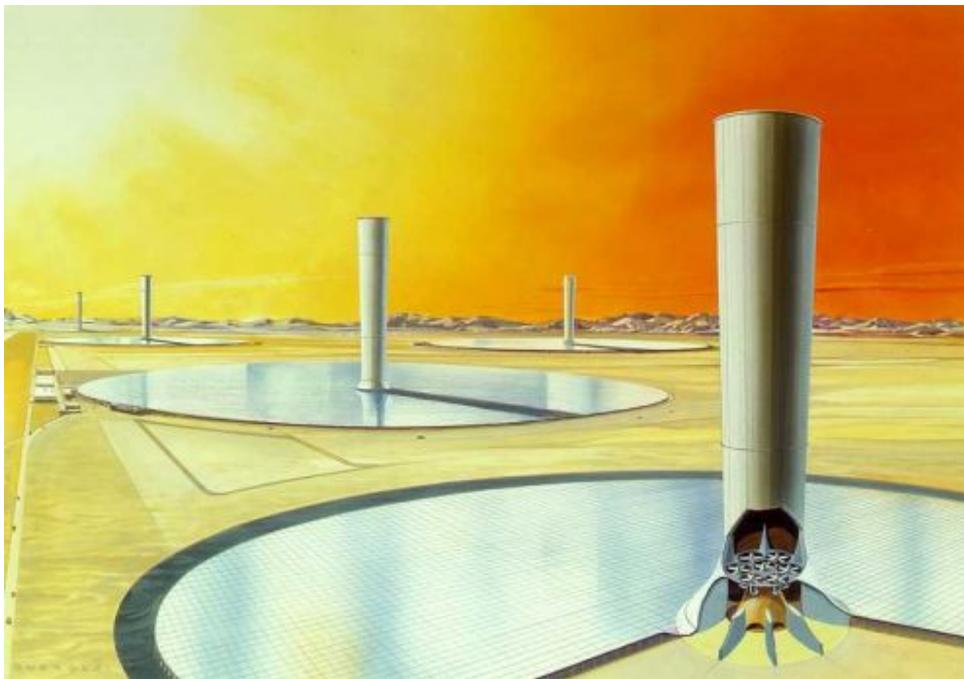


Figure. II.1. Vue des principaux composants d'une cheminée solaire : le collecteur (couverture en verre plat), la tour et les turbines éoliennes.

2.1.1 Le Collecteur

Le collecteur est la partie employée pour produire l'air chaud par effet de serre. Sa hauteur va généralement de 2 à 6 mètres et recouvre une vaste surface de plusieurs milliers de mètres carrés. Comme le poids du verre augmente la masse du toit, les collecteurs sont supportés par une structure en tiges résistantes (Figure II.2).

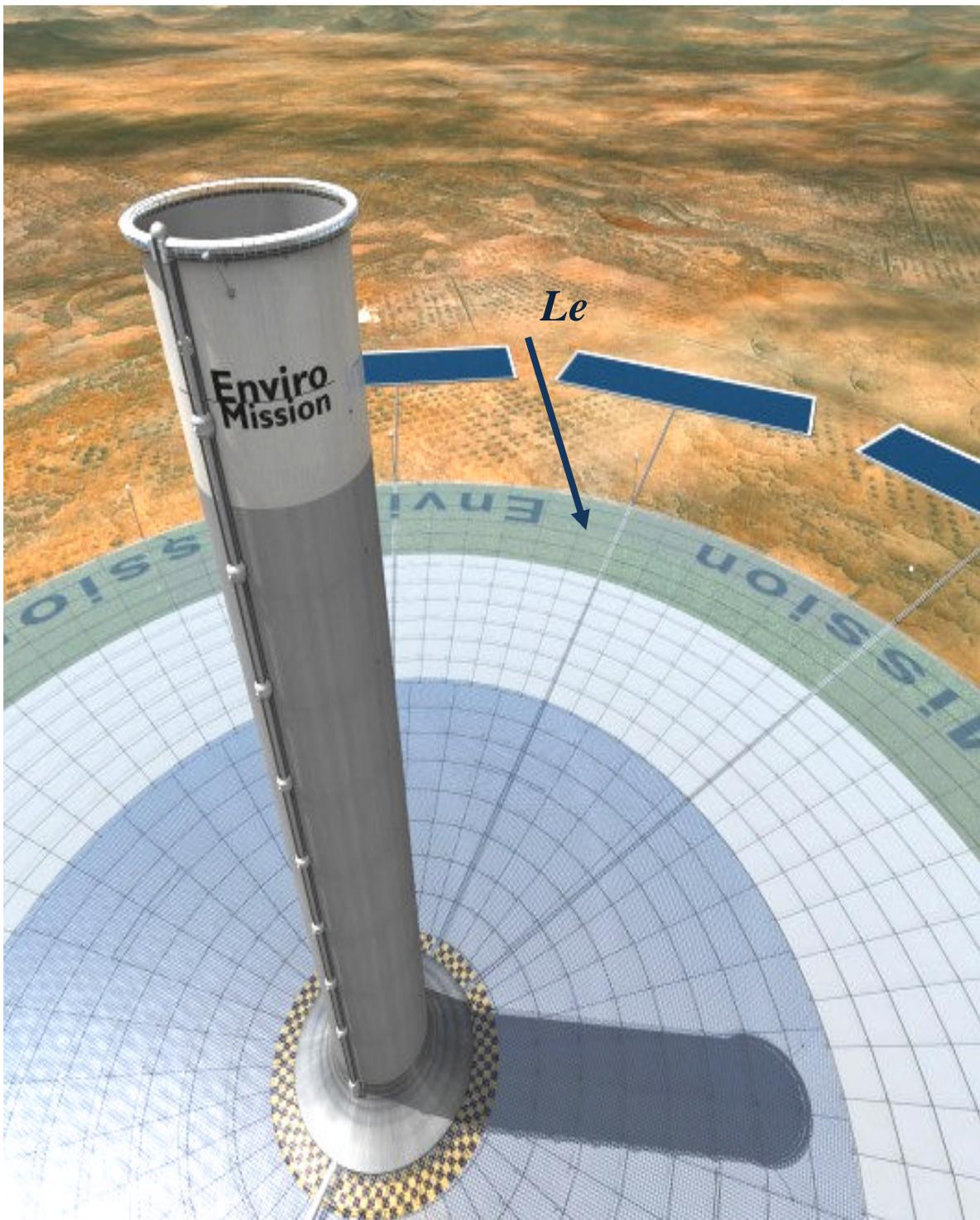


Figure. II.1. Collecteur de la Tour Solaire d'Arizona.

Il n'y a aucune limitation pour la superficie du collecteur : plus grande est la surface, plus grande est la quantité d'énergie produite par la tour solaire. La

hauteur sous la serre doit progressivement augmenter de l'extérieur vers le centre afin de diminuer les pertes par frottement. Divers matériaux peuvent constituer le couvercle de la serre comme du verre ou films plastiques.

Le plus efficace est le collecteur en verre, compte tenu de son rendement de conversion d'énergie solaire en chaleur qui pourra aller jusqu'à 70%. En outre, avec un entretien et une maintenance appropriés, sa durée de vie peut facilement atteindre 60 ans ou plus.

2.1.2 Les Turbines

Des turbines ou aéro-génératrices, servent à convertir le courant d'air ascendant en énergie mécanique, puis électrique (Figure II.3).

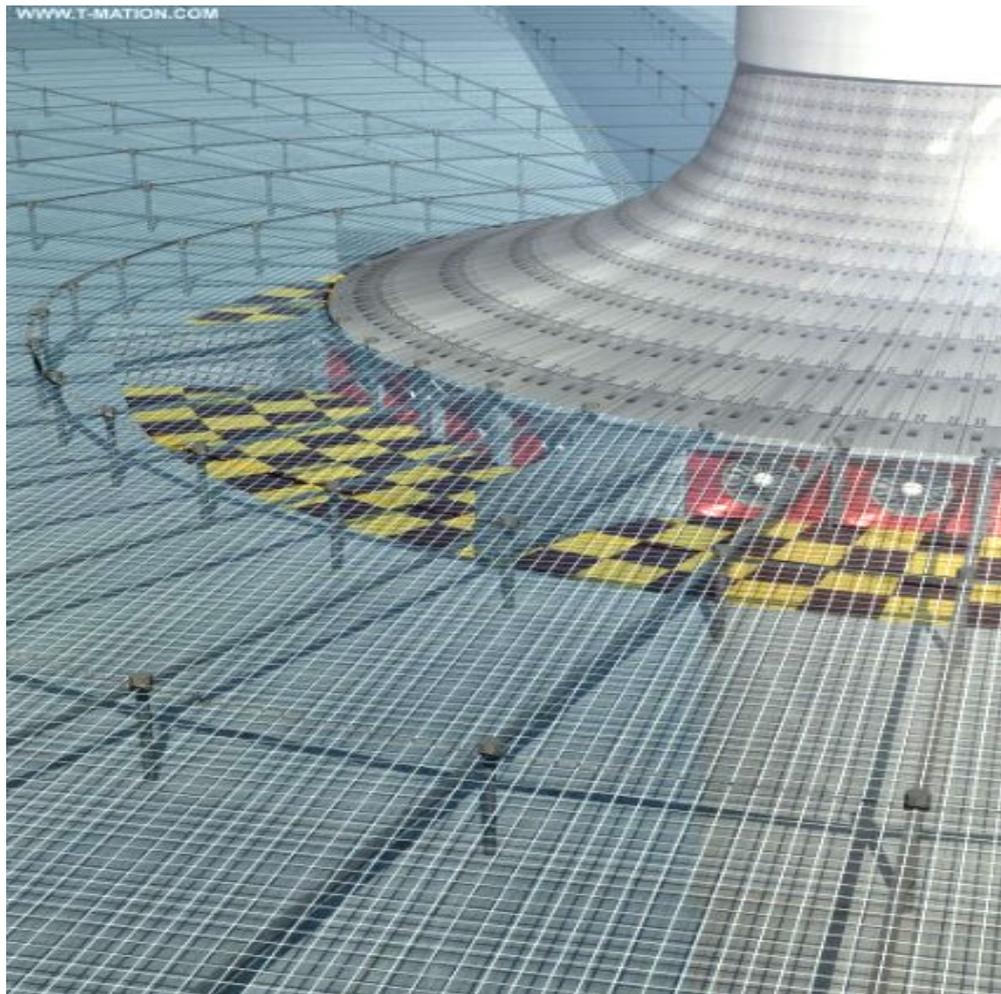


Figure. II.3.Turbines de la CCS d'Arizona.

Les turbines éoliennes sont placées soit horizontalement dans le collecteur ; soit verticalement dans la cheminée. Afin d'obtenir le maximum d'énergie à partir de l'air chauffé, les aubages des turbines doivent couvrir toute la section de la cheminée. Pour ces considérations, une grande turbine ou plusieurs petites turbines devraient être utilisées au pied de la cheminée.

2.1.3 La cheminée

La partie la plus importante de la tour solaire est la cheminée. Elle agit comme une machine thermique. Les pertes par frottements étant minimales dans la cheminée, celle-ci agira comme un tube de pression (Figure II.4).

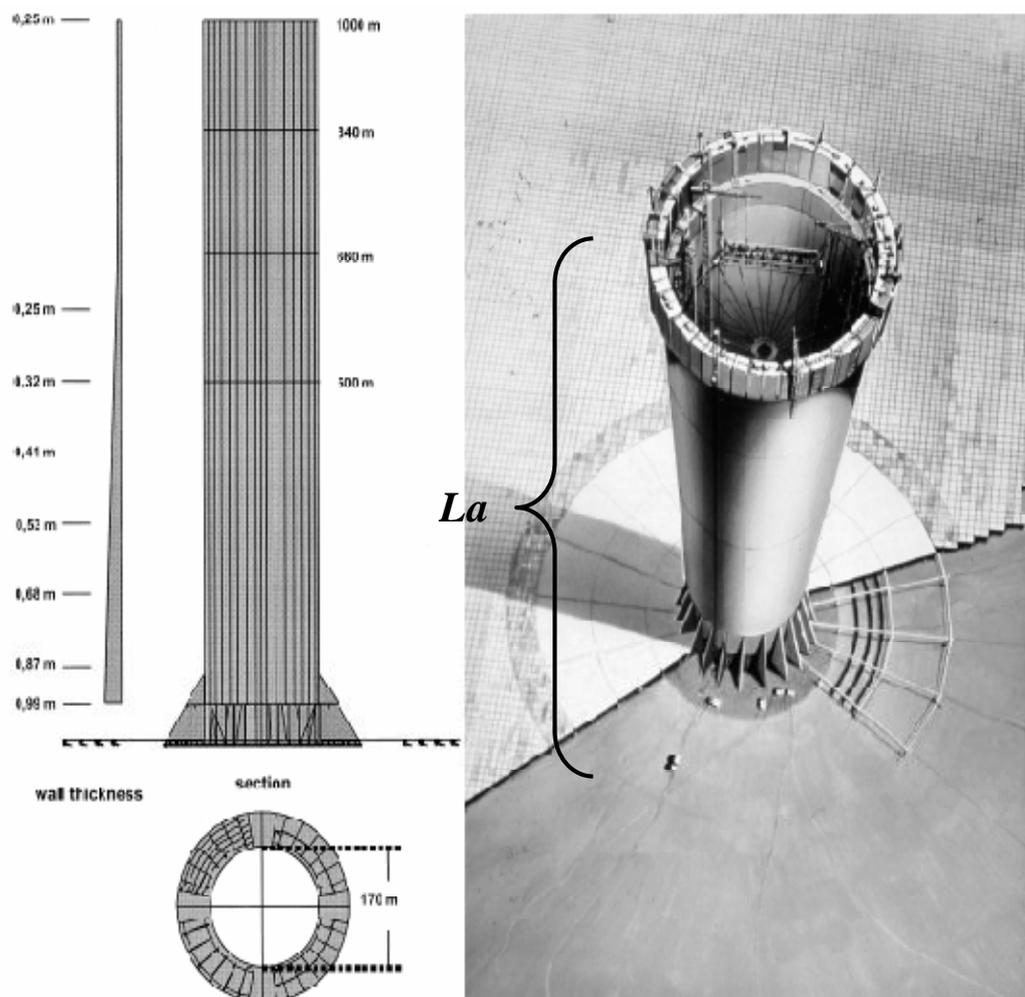


Figure. II.4. Cheminée de la CCS d'Arizona (1000 m de haut).

Vue en coupe de la cheminée en construction.

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

Deux principaux types de cheminées sont possibles : celles autoportées (construites en dur : béton ou acier) et les cheminées haubanées (structures plus légères constituées de tubes).

La durée de vie des cheminées en béton est bien supérieure à celle des cheminées en membranes, une centaine d'années contre quelques années à peine.

2.2 Principe de fonctionnement d'une tour solaire

Le principe de fonctionnement est basé sur le chauffage d'une couche d'air, sous une serre horizontale de grande taille autour d'une cheminée qui, par effet de tirage thermo-convectif, permettra la création d'un courant ascendant capté par la cheminée. Des turbines placées, soit à la base de la tour, soit dans la tour elle-même, seront actionnées par le flux d'air canalisé et produiront de l'électricité. La puissance dépend de la différence de température, de la surface chauffée et de la hauteur de la cheminée (Figure II.5).

Le concept de base peut être amélioré en plaçant des accumulateurs de chaleur, des bâches à eau à titre d'exemple, pour emmagasiner de la chaleur sous la serre pendant le jour et la restituer pendant la nuit. Une autre alternative est de créer en dessous de la serre, des surfaces agricole qui seraient de surcroît être irriguées par la condensation de l'humidité de l'air, lors des baisses de température dans la phase nocturne.

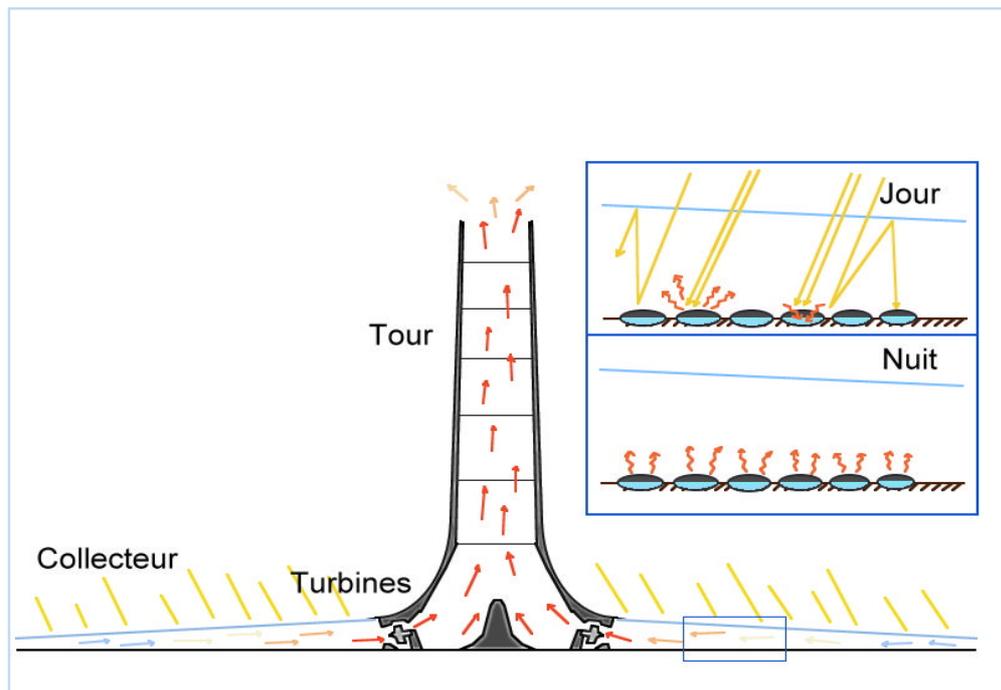


Figure II.5. Principe de Fonctionnement d'une centrale solaire à effet de cheminée.

2.3 Projets de Centrale à Cheminées Solaire

De nombreux pays se sont engagés dans la construction de CCS, tel que la Chine, l'Espagne et les États-Unis.

2.3.1 La centrale à cheminée solaire de la Chine

Il s'agit d'un système de centrale électrique à cheminée solaire dans le Jinshawan, ville de Wuhai en Chine du Nord dans la région autonome de la Mongolie intérieure, où est installée la première usine du pays qui combine l'énergie solaire et l'énergie éolienne pour la production d'électricité [24].

L'unité de production de 200 kW de puissance peut fournir 400.000 kWh d'électricité par an, épargnant ainsi l'équivalent des émissions de 100 tonnes de charbon et économisant 900 tonnes d'eau, par rapport à la production d'énergie au moyen d'une centrale thermique.

Soutenu par le Ministère de la Science et de la Technologie du gouvernement régional autonome de Mongolie intérieure, le projet a été conçu et développé par l'Université des sciences et de la technologie de Mongolie intérieure (IMUST) et l'Université Polytechnique de Madrid, en Espagne.

La centrale est composée de trois éléments : les capteurs solaires, la cheminée et le générateur à turbine. Sous la couverture en verre, utilisant l'effet de serre, le sable chauffe et absorbe la chaleur du soleil, le flux d'air chaud transmis à la cheminée assure la production d'électricité en faisant tourner la turbine à l'intérieur de la tour.

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

La construction a démarré en mai 2009 et s'effectuera en trois phases jusqu'à couvrir une superficie totale de 277 hectares et une capacité de production totale de 27,5 MW, après la phase finale dont l'achèvement est prévu en 2013. La puissance générée par l'usine sera ensuite transférée au réseau électrique de Mongolie intérieure.

D'autres cheminées solaires de ce genre seront construites, en prenant avantage de 2,6 millions de kilomètres carrés de "ressources" du désert de Chine.

Ce projet n'occupe du désert que des terres incultes. L'exploitation et l'entretien est également très simples et l'usine solaire ne produira aucune pollution. Cette tour solaire affiche d'excellentes performances en matière de protection de l'environnement.

2.3.2 La centrale à cheminée solaire d'Arizona

La firme australienne Enviro- Mission, spécialisée dans le développement de tours solaires productrices d'énergie, développe actuellement un projet technologique de grande envergure dans le désert de l'Arizona (Figure II.6).

Faithful&Gould, société nord américaine de conseil en construction s'est associée au projet pour ériger cette centrale solaire de 200 MW. Avec la génération de cette puissance électrique, 150 000 foyers américains pourront être alimentés. Cette nouvelle technologie fournira de l'énergie, que l'on peut considérer comme propre, pendant 80 ans et ce avec très peu d'entretien. La tour solaire d'Enviro- Mission est constituée de 3 éléments : Le canopée, la tour et les turbines

La canopée est une énorme serre en verre où le soleil vient réchauffer l'air emprisonné sous la verrière.

La tour, placée au centre de la serre constitue le moteur thermique de cette technologie. Elle transforme la chaleur en énergie mécanique. L'air chaud, qui est plus léger que l'air froid, remonte le long de la tour pour s'échapper et se refroidit en prenant de l'altitude, créant ainsi un courant d'air ascendant continu. Plus la tour est haute, plus la vitesse du courant d'air est élevée et plus il est possible de l'exploiter. Néanmoins, il existe une hauteur seuil optimal de fonctionnement.

Les turbines disposées à la base de la tour, utilisent la pression de l'air ascendant pour générer, grâce à leurs hélices, de l'électricité comme le font les centrales hydroélectriques traditionnelles. L'avantage de cette technologie est qu'elle fonctionne sur le principe du différentiel de température entre l'air chaud et l'air froid. Par ailleurs, pendant la journée, l'air sous la serre est tellement réchauffé (80 à 90°C) que le fonctionnement continu est assuré la nuit.

Cette structure gigantesque de 800 mètres de haut et 130 mètres de diamètre au sommet, sera presque aussi haute que le plus grand building de la planète : Burj-Khalifa de Dubaï.

En cours d'ingénierie et d'acquisition des terrains, Enviro- Mission estime que cette centrale solaire générera 200 MW avec un bon rendement énergétique.

Si tout se passe comme prévu, la tour solaire de l'Arizona devrait commencer à produire de l'énergie vers 2015.



Figure II.6. Impression d'artiste de la centrale d'Enviro- Mission en Arizona.

2.3.3 Prototype de Manzanares

Le premier prototype expérimental d'une centrale à cheminée solaire a été conçu par le bureau d'études SchlaichBergermann et Partner de Stuttgart [7, 8]. Le distributeur d'électricité espagnol « Union ElectricaFenosa » a proposé le site de Manzanares (ville espagnole située à 150 kilomètres de Madrid) et le ministère de recherche allemand (BMFT) a financé le projet. La construction du prototype a été terminée en 1982 et a fonctionné pendant plus de 7 ans. Les dimensions principales et les données techniques de ce prototype sont données dans le tableau II.1 ci-dessous.

Tableau. II.1. Dimensions principales et données techniques du prototype de Manzanares.

Rayon de la tour	5.08 m
Rayon du collecteur	122.0 m
Hauteur de la couverture	1.85 m
Hauteur de la cheminée en acier	195 m
Nombre de pales de la turbine	4
Profil des pales de la turbine à air	FX W-151-A
Puissance nominale	50 kW
Partie en plastique de la couverture du collecteur	40 000 m ²
Partie en verre de la couverture du collecteur	6 000 m ²

Les figures II.7 et II. 8 montrent les photos du prototype expérimental de Mansanares.



Photo.II.7. Prototype de Manzanares en Espagne.



Photo II.8. Zoom de la cheminée de la centrale de Manzanares via le vitrage de la toiture du collecteur.

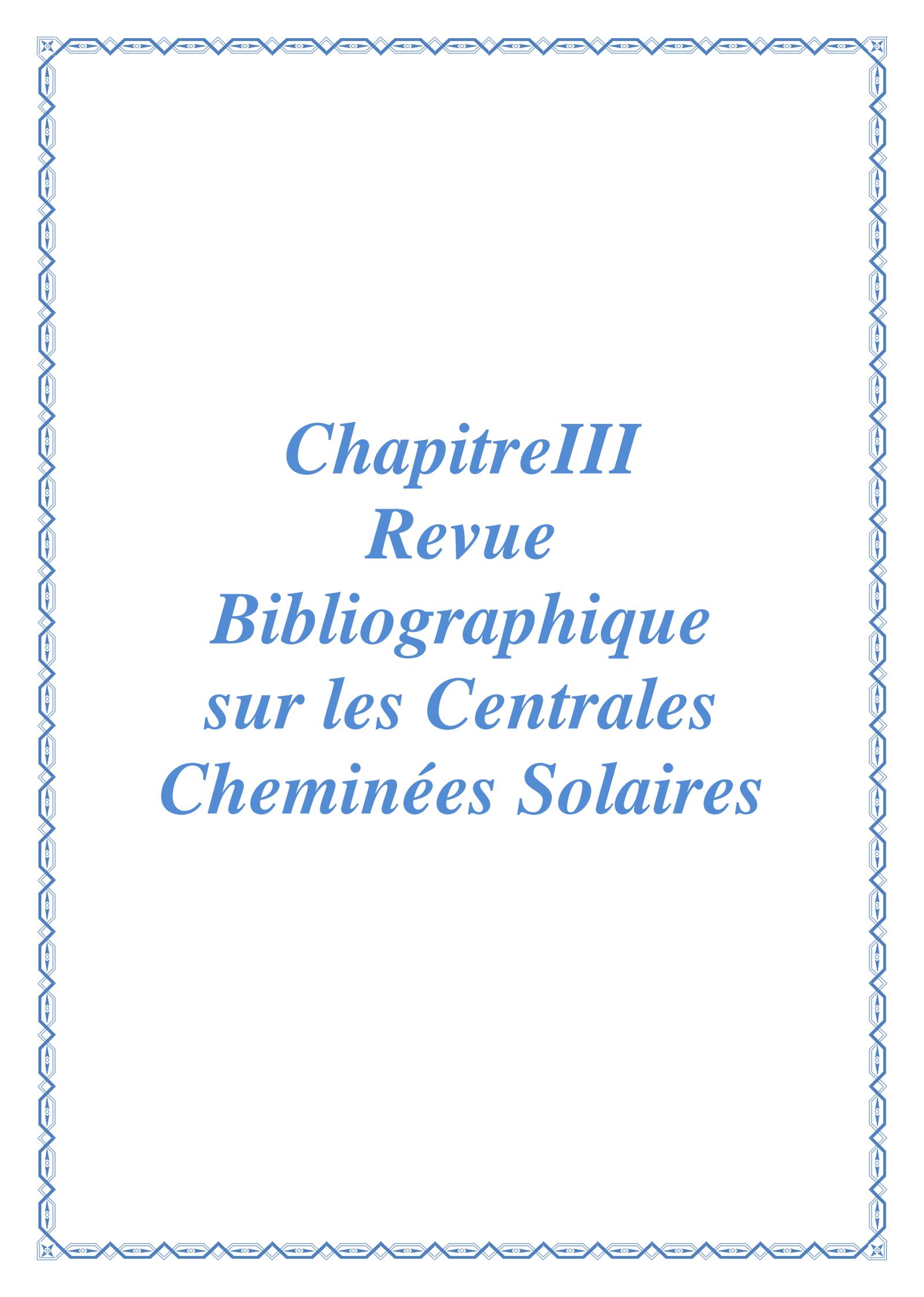
2.4 Avantages et inconvénients:

2.4.1 Avantage des CCS :

- 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 et Fonctionnent sans intermittence (jour et nuit).
- 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 maintenance comparativement aux autres usines de production d'électricité. Leur mécanique simple et nécessite peu d'entretien.
- 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.
- Source d'énergie inépuisable et gratuite
- Pas d'émission polluante
- Impact visuel positif (certains y voient un symbole d'espoir, de vision à long terme).

2.4.2 Inconvénients

- La structure elle-même est massive et requiert beaucoup d'expertise en ingénierie et de matériaux pour sa construction
- Investissement de départ important.
- Impact visuel négatif (certains y voient une dégradation du paysage).



Chapitre III
Revue
Bibliographique
sur les Centrales
Cheminées Solaires

Contexte Bibliographique

3.1. Etudes théoriques :

Le travail pionnier de J. Schlaich [4] sur le concept de la CS pour l'exploitation de l'énergie solaire en vue de la production d'électricité, a été suivi par de nombreux travaux à caractères études théoriques et / ou expérimentales pour la modélisation des CCS à grande échelle.

En effet, Schlaich et al. [5, 6] ont étudié 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 [5].

Dans leur article, les auteurs ont présenté les aspects théoriques, expérimentaux et économiques des CCS. D'abord une étude théorique simplifiée de la CCS a été décrite, puis des résultats de conception, de réalisation et de fonctionnement du prototype de Manzanares ont été présentés. Des considérations techniques et des données économiques de base pour de futures installations de CCS commerciales comme celle d'Australie ont été discutées. Les auteurs ont également proposé des solutions aux contraintes que peuvent présenter les CCS, tout en justifiant les avantages de tels systèmes.

Une étude fondamentale sur le prototype de CCS espagnol a été réalisée par Haaf et al. [7]. Dans leur article, les auteurs analysé brièvement le bilan énergétique, les critères de conceptions et l'analyse des couts.

Dans une étude ultérieure, Haaf [8] a reporté les résultats des tests préliminaires menés sur la CCS de Manzanares. Depuis, des efforts

considérables ont été déployés pour dimensionner et estimer les performances énergétiques des cheminées solaires pour démontrer leur faisabilité ainsi que leur rentabilité.

Mullet [9] a présenté une analyse pour déterminer l'efficacité globale de la cheminée solaire.

Padki et Sherif [10, 11] ont mené des investigations sur la viabilité des CCS à produire de l'énergie électrique à moyenne et grande puissance et la production d'énergie en lieu rural. Dans un autre article, les auteurs [12, 13] ont discuté les effets des paramètres géométriques et d'exploitation sur les performances énergétiques de la cheminée. Ils ont proposé un modèle analytique simple pour la prédiction des performances d'une CCS avec une erreur de 6 % en comparaison avec des prédictions, faites à base de la résolution d'un modèle mathématique composé des équations de continuité, de conservation de mouvement et d'énergie, régissant l'écoulement unidimensionnel de l'air chaud dans la tour de la cheminée solaire.

Yan et al. [14] ont développé un modèle analytique simple, facile à exploiter où des corrélations pratiques ont été utilisées pour déterminer le débit et la vitesse d'écoulement d'air ainsi que la puissance et l'efficacité de CCS. Il est à noter, que le modèle présenté par les auteurs, considère la turbine de la cheminée solaire comme une éolienne qui, en réalité, va dévier le vent, même avant qu'il atteigne le rotor. Le rendement théorique maximum de $16/27$ ou de 59%, d'après la loi de Betz, ne s'applique pas pour les turbines des cheminées solaires.

Kreetz [15] a présenté un modèle numérique incluant le cas de l'utilisation de l'eau comme moyen de stockage de l'énergie solaire dans le collecteur. Ses calculs ont montré la possibilité d'un fonctionnement continu jour et nuit, de la cheminée solaire.

Pasumarthi and Sherif[16] ont mené une étude pour démontrer la viabilité de la centrale à cheminée solaire comme technologie alternative, appropriée et adaptables à des zones climatiques chaudes telles que celles de la Floride. Un modèle mathématique a été élaboré pour estimer la température et la puissance développée par les cheminées solaires ainsi que l'étude de l'effet des conditions ambiantes et des dimensions structurelles sur la puissance de sortie. Des essais ont été effectués sur un modèle expérimental, conçu à cet effet et deux types de collecteurs ont été testés: l'élargissement de la base du collecteur et l'introduction d'un absorbeur intermédiaire. Les températures expérimentales obtenues ont été trouvées plus élevées que les températures prédites théoriquement. Les auteurs ont justifié que l'une des raisons de ce comportement est dû au fait que les températures expérimentales rapportées sont les températures maximales atteintes à l'intérieur de la cheminée, tandis que le modèle théorique prédit la température moyenne de l'air.

Les mêmes auteurs [17] ont entrepris une étude en deux parties : la première, en vue de prédire les performances d'une cheminée solaire pilote à grande échelle à Gainesville en Floride. Les auteurs ont présenté une étude théorique d'une cheminée solaire typique basée sur un modèle d'écoulement unidimensionnel pour évaluer l'effet des différents paramètres de fonctionnement et de construction sur la température de l'air, sa vitesse et la puissance produite par la cheminée solaire. Ces derniers, ont adopté le modèle simplifié de Betz pour la turbine dans la cheminée, ce qui est incorrecte, car le fonctionnement d'un aérogénérateur dans une cheminée solaire diffère de celle installée à l'extérieur.

Dans la deuxième partie, les auteurs [18] ont présenté les résultats expérimentaux effectués sur un prototype de cheminée solaire de démonstration à échelle réduite. Ils ont affirmé que la puissance produite par une cheminée solaire est directement proportionnelle au produit du gradient de température et du débit d'air. L'augmentation de la puissance produite pourra être obtenue par augmentation de la surface de captation ou par augmentation

de la hauteur de la tour. Dans le cas où l'augmentation de la hauteur de la tour s'avère coûteuse, où on ne peut pas apporter une augmentation significative de débit, on a recours à d'autres artifices, tels que l'adjonction d'obstacles dans le conduit de passage d'air pour améliorer le débit d'écoulement. Le modèle mathématique proposé par ces auteurs a été capable de prédire les performances de la centrale de référence de Manzanares en Espagne avec une marge d'erreur de 20 % sur la vitesse et de 5 à 9% sur la puissance produite.

Bernardes et al. [19] ont présenté une analyse théorique d'une cheminée solaire fonctionnant en régime stationnaire et en convection naturelle laminaire. Afin de prédire le comportement thermo-hydrodynamique de l'air, des conditions aux limites thermiques ont été imposées à l'entrée, de manière à garantir un écoulement laminaire et stationnaire le long du dispositif. Le modèle mathématique établi a été résolu par la méthode des volumes finis en coordonnées généralisées.

Après avoir effectué une recherche bibliographique assez riche, les auteurs [20] 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 and Gannon [21] 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 and Von Backström [22] 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.

Les auteurs [23] ont présenté une étude qui confirme la validité et l'applicabilité de l'hypothèse qui consiste à supposer que la puissance d'écoulement devient maximale lorsque le rapport de la chute de pression à travers la turbine par rapport au potentiel de pression (différence de pression disponible à travers le système) est de $2/3$. Ils ont également montré que la puissance d'écoulement est maximale pour un débit assez faible et que la chute de pression à travers la turbine est plus élevée que prévue par la supposition d'un potentiel de pression.

Dai et al. [24] ont présenté, dans leur article, une méthode itérative basée sur un modèle global de connaissance régissant l'écoulement d'air dans une cheminée solaire typique fictive et fonctionnant dans trois régions de l'ouest de la chine. Afin de prévoir les performances de la cheminée solaire, les auteurs ont présenté une méthode simple en se basant sur le modèle théorique des

capteurs à air bien connus dans la littérature solaire. Ces modèles tiennent compte de la captation solaire, du gain utile de fonctionnement et de la puissance électrique à la sortie de la turbine.

Les auteurs ont conclu que la puissance produite est fortement influencée par l'augmentation de la radiation solaire en comparaison avec la température ambiante. La puissance produite augmente de manière non linéaire avec l'augmentation de la surface de captation et de la hauteur de la tour de la cheminée. Cette augmentation devient moins sensible dans le cas des cheminées à grande échelle par rapport aux cheminées de faibles tailles. Les auteurs ont conclu qu'une centrale cheminée solaire constituée d'un capteur à air de 500 m de rayon et d'une tour de 200 m d'hauteur et de 10 m de diamètre est capable de produire de 110 à 190 kW électrique.

Pastohr et al. [25] ont utilisé le logiciel FLUENT (code commercial CFD) pour modéliser la centrale CCS semblable géométriquement à celle de Mansaranes dans le but d'effectuer une analyse avec plus de détail du mode de fonctionnement et du rendement du système. Ils ont confirmé que la chute de pression dans la turbine et le débit massique sont des éléments décisifs sur l'efficacité du système et ne peuvent être déterminés uniquement par l'accouplement de toutes les parties d'une centrale CCS. Les résultats numériques donnés par FLUENT rivalisent bien avec les résultats donnés par un modèle simple proposé par les auteurs, ce qui a conduit à la conclusion de pouvoir employer ce dernier tout simplement pour des études paramétriques en vigueur.

Dans son analyse, Ming et al. [26] ont introduit un modèle numérique pour explorer l'influence de la géométrie de la CS sur les performances de la CCS. Leur modèle a permis d'évaluer les performances d'une CCS et mettre en évidence les effets de plusieurs paramètres tel que la hauteur de la cheminée solaire et son diamètre, le diamètre du collecteur ainsi que l'irradiation solaire sur la puissance développée et l'efficacité du système.

Ninic [27], a tenté de déterminer dans son étude, la dépendance du potentiel énergétique acquis de la chaleur gagnée dans le collecteur par l'air circulant dans le collecteur, l'humidité de l'air et la pression atmosphérique en fonction de la hauteur de la cheminée. Divers types de collecteurs utilisant l'air sec et humide ont été analysés. L'influence des hauteurs de différentes cheminées sur le potentiel de travail de l'air a été établie. Une analyse des colonnes de type vortex gravitationnel a été présentée pour prouver sa viabilité.

Pretorius [28] a effectué des études approfondies sur les flux d'air et de transfert de chaleur dans les CCS de grande échelle. Il a montré, suite à une étude numérique, que la puissance développée est fonction de la hauteur intérieure de la toiture du collecteur et de sa forme.

Une étude complémentaire utilisant le même modèle numérique précédent a permis à Pretorius and Kröger [29] d'évaluer l'influence des différentes expressions du coefficient de transfert thermique et autres paramètres sur les performances prédites d'une CCS. Dans cette étude, les auteurs ont critiqué l'évaluation des performances d'une CCS à grande échelle et ont présenté plus particulièrement les effets résultant de l'utilisation d'expression plus sophistiquée pour le coefficient de transfert ainsi que l'utilisation de verres de meilleure qualité pour la toiture du collecteur et de l'emploi d'un nouveau coefficient de perte plus réaliste à l'admission de la turbine.

Dans une autre étude, les auteurs [30] ont comparé la puissance annuelle produite, calculée avec deux estimations du coefficient de perte dû au changement de passage de section horizontale/verticale « HTVTS » « horizontal to vertical transition section » respectivement 0,25 et 0,14. Les résultats ont montré que la puissance annuelle obtenue par des calculs utilisant le coefficient de perte le plus élevé « 0.25 », était sous estimé par 0.4% uniquement. Pretorius et al. [31] ont trouvé que la puissance annuelle

calculée était moindre de 0.55% pour la même comparaison et ceci pour différentes configurations de centrales à cheminée solaire.

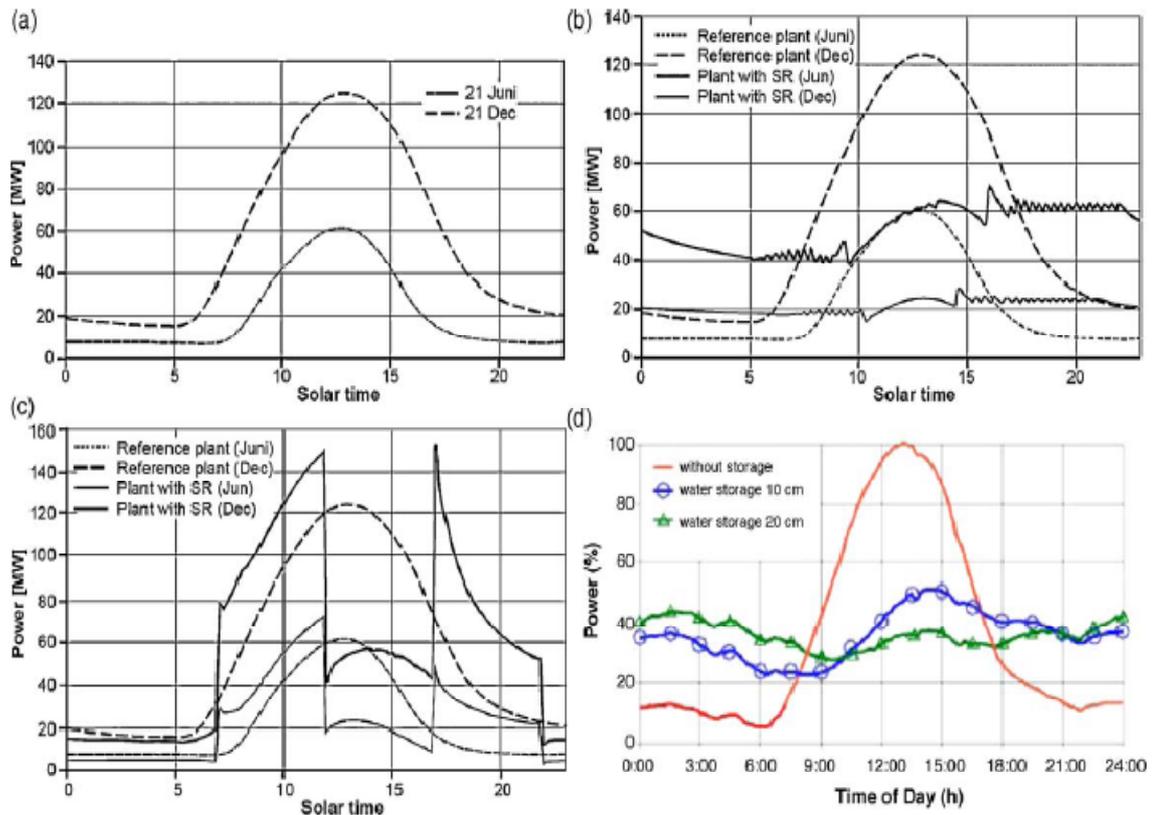


Fig. III.1. Profils de puissance à grande échelle à la fois la SCPP sans et avec une bonne performance du système de contrôle-: (a) sans la performance du système de contrôle [29], (b) avec un toit intermédiaire secondaire en tant que charge de base; (c) avec toit intermédiaire secondaire comme charge de pointe ; (d) avec supplémentaire fermée remplie d'eau du système de stockage thermique.

Le profil type de puissance développée par jour pendant l'été et l'hiver, pour une CCS, à grande échelle type (un collecteur de 5000 m de diamètre et une CS de 1000 m de hauteur et 210 m de diamètre intérieur.) [29] est illustré dans la figure III.1.a

Les profils journaliers de puissance produite d'une CCS de référence, avec toit intermédiaire secondaire pour une charge de base et de pointe ont été respectivement représentés sur la figure III.1b et c [30].

Les résultats ont montré que les centrales à toit intermédiaire secondaire donnent un profil de puissance de sortie journalier, plus uniforme par rapport à une centrale avec un seul toit [31].

Deux méthodes typiques et efficaces de contrôle et d'amélioration de la puissance de sortie de la CCS ont été proposées : L'instauration d'un toit secondaire sous le premier toit du collecteur [29] et l'installation de système de stockage thermique [32- 35]. L'intégration de système de stockage thermique à eau a également révélé être un bon mécanisme pour le contrôle et l'amélioration de la puissance de sortie. Ces CCS ont donné un profil de sortie journalier beaucoup plus uniforme par rapport à une CCS sans un tel système de stockage (fig. III.1).

L'étude de Chergui et al. [36] fut basée sur la modélisation du transfert thermique et de l'écoulement d'air dans les CCS avec comme hypothèse un écoulement laminaire en convection naturelle. Le modèle à été résolu par la méthode des volumes finis ce qui leur a permis de déterminer le champ de vitesse et de température.

Dans leur analyse, S. Larbi et al. [37] ont étudié les performances d'une CCS pour l'application dans le sud algérien. Le résultat obtenu ont montré qu'une CCS similaire à celle de Mananares, installée dans la région d'Adrar, pourra fournir une puissance de 140 à 200 kW. Une puissance suffisante pour l'alimentation en énergie les régions isolées. L'analyse des performances de la CCS a montré que l'efficacité du collecteur et de la turbine jouent un rôle important dans la performance du système. La puissance générée dépend de l'irradiation solaire de la température ambiante, de la hauteur de la cheminée et de la surface du collecteur.

R. Petela [38] a introduit dans son modèle une analyse exergetique et le concept azergétique (Exergie mécanique) afin de montrer l'influence des paramètres d'entrée sur les paramètres de sortie et d'illustrer leur tendance.

Dans leur article, Zhou, Yang et al. [39] ont analysé l'effet de la hauteur maximale de la cheminée sur l'effet négatif de la convection naturelle afin de déterminer la hauteur optimale de la cheminée pour une puissance maximale. Leur modèle théorique a été validé avec les mesures du prototype de Manzanares. Leur étude a démontré que l'influence de la pression atmosphérique sur la hauteur maximale était négligeable.

Zhou et al. [40] dans leur publication, ont proposé une étude de faisabilité pour la construction d'une CCS dans la région de Qinghai (Plateau du Tibet), en appliquant un modèle mathématique simple sur différents lieux du site.

Dans leur étude, Koonsrisuk et al. [41] ont décrit la théorie « constructale » de recherche de la géométrie d'une cheminée solaire dont l'objectif est d'augmenter la production d'énergie sur la zone occupée par l'usine. Le rapport hauteur /rayon, le taux maximum de débit massique et la puissance maximale sous les contraintes d'un espace et volume fixe ont été déterminés. Les auteurs ont constaté que l'énergie produite par unité de surface est proportionnelle à la longueur échelle de la centrale. L'analyse a été validée par un modèle mathématique. Les pertes de pression ont été présentées en termes de l'échelle de longueur adimensionnelle du système, et ont été illustrés graphiquement. Les auteurs ont noté que la chute de pression à l'entrée du collecteur et à la section de transition entre le collecteur et la cheminée sont négligeable et que la perte de charge par frottement dans le collecteur peut être négligée lorsque le nombre de sveltesse (S_v) est supérieur à 6.

3.2. Etudes expérimentales :

Durant ces dernières décennies, plusieurs prototypes expérimentaux de cheminée solaire de structures différentes, ont été conçus, réalisés et testés dans le but d'étudier expérimentalement les performances des CCS.

Le premier prototype de centrale à cheminée solaire de 50 kW fut construit à Manzanares (Fig. III.2). Il était doté d'une cheminée métallique haubanée de 194,6 m de haut et 0,00125 m d'épaisseur et un collecteur de rayon de 122 m couvert d'une toiture en PVC.

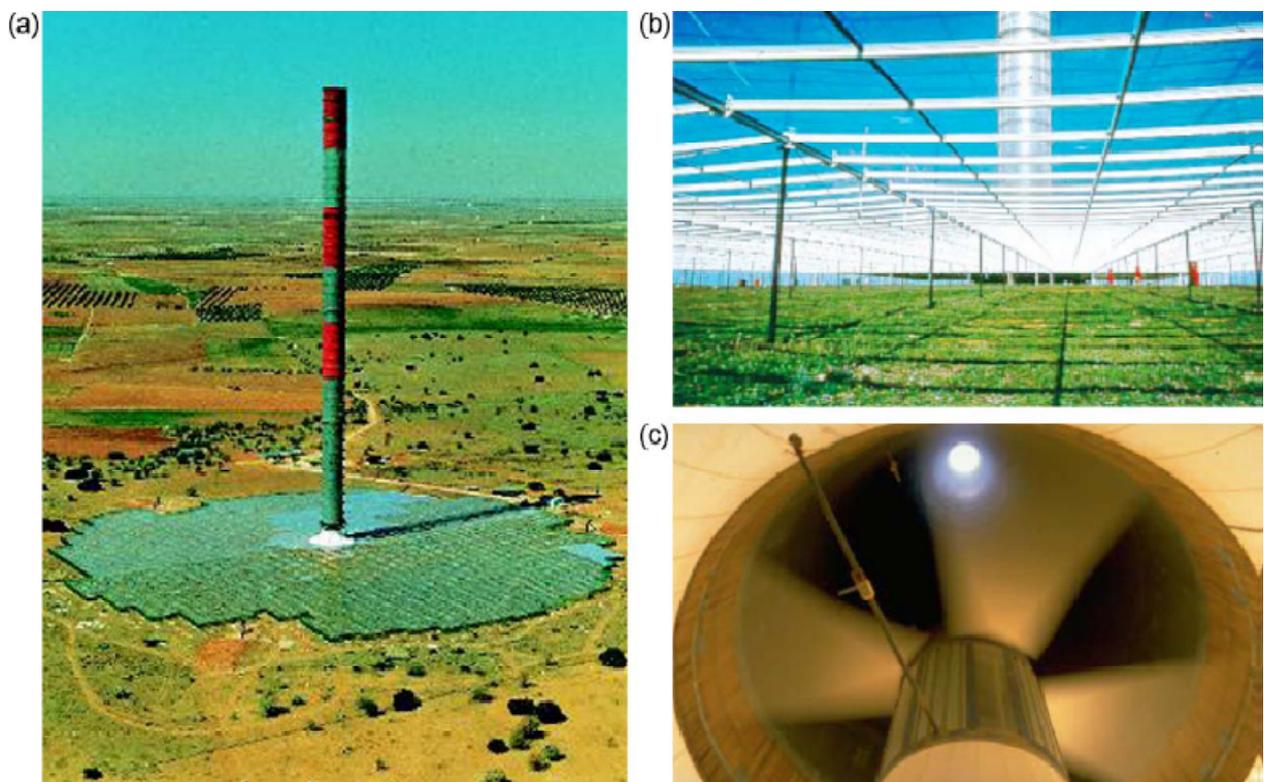


Figure III.2 : Photo de la CCS de Manzanares: a) vue globale de la centrale, b) Collecteur, c) Turbine [7]

Les principaux paramètres de l'usine de Manzanares sont présentés dans le tableau III.1. L'usine de Manzanares a été exploitée pendant huit ans de 1982 à 1989 [5, 7, 8]. Les principales données opérationnelles, à savoir, l'irradiation, la vitesse du courant d'air ascendant et la puissance développée, ont été relevées pour une journée typique (8 Juin 1987) dans la Fig. III.3 [5].

Tableau 1. Les principaux paramètres de la CCS de Manzanares [7].

Item	Value
SC height (m)	194.6
SC radius (m)	5.08
Mean collector radius (m)	122
Mean roof height (m)	1.85
Number of turbine blades	4
Turbine blade profile	FX W-151-A
Blade tip speed to air transport velocity ratio (m)	10:1
Operation modes	Stand-alone or grid connected mode
Typical collector air temperature rise (K)	$\Delta T = 20$
Nominal power output (kW)	50
Collector covered with plastic membrane (m ²)	40,000
Collector covered with glass (m ²)	6000

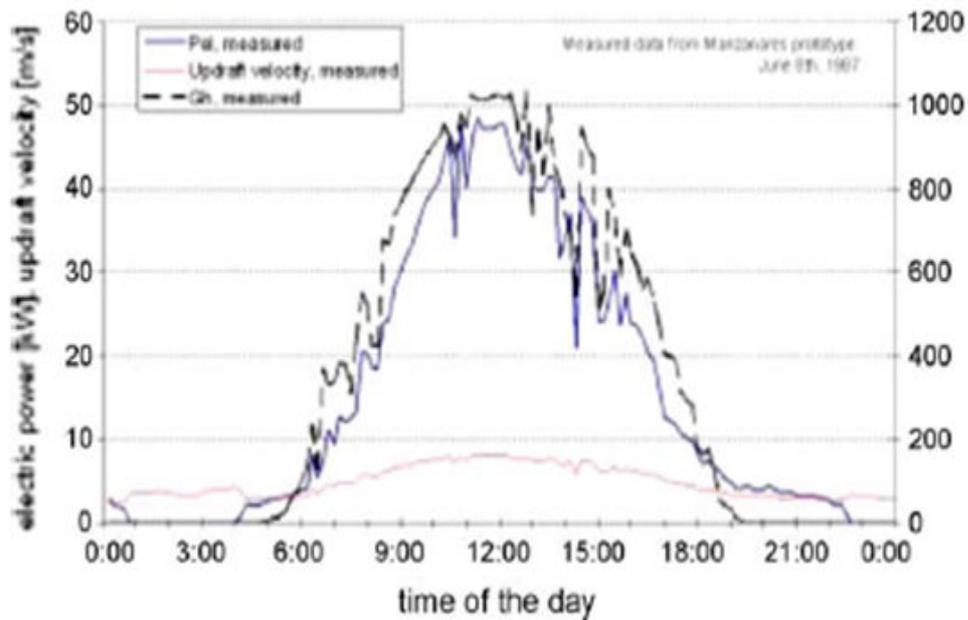


Fig. III.3. Relevé des vitesses d'air ascendant et la puissance développée de la CCS de Manzanares pour une journée typique (08 Juin 1987) [5].

Le profil de puissance produit est en étroite corrélation avec le profil d'insolation pendant la journée, pour cette centrale prototype, sans système de stockage supplémentaire. De plus, au cours de la nuit il y'a toujours un courant ascendant en raison de la capacité de stockage thermique naturel du sol, qui peut être utilisé pour produire de l'énergie pendant les premières heures de la nuit [8].

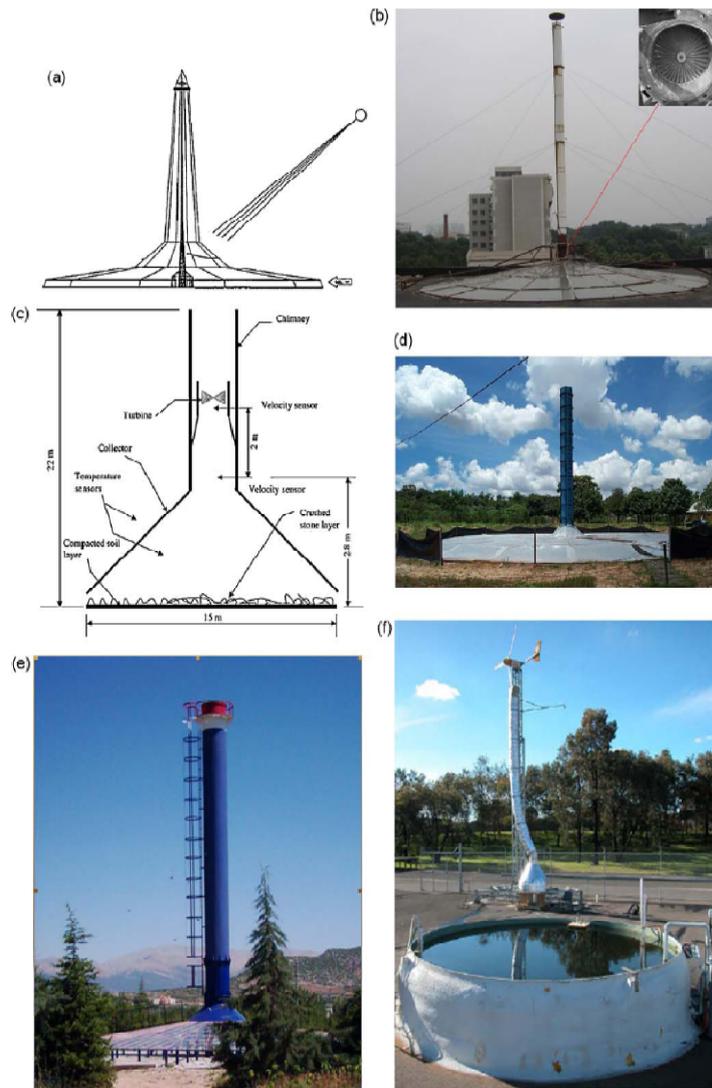


Fig.III.4. Figures et schéma de prototypes de CCS expérimentaux : (a) Sherif et al. [33] ; (b) Zhou et al. [44] ; (c) Ketlogetswe et al. [45] ; (d) Ferreira et al. [46]; (e) Koyun et al. [43] ; (f) Golder et al. [47].

En 1983, Krisst [42] a construit une petite installation expérimentale de 10W de puissance. Le diamètre de la base du collecteur et la hauteur de la cheminée étaient de 6 m et 10 m respectivement. En 1985, un modèle à micro-échelle avec une cheminée de 2 m de haut et un diamètre de 7 cm et un collecteur de 9 m² a été construit par Kulunk en Turquie [43].

En 1997, un dispositif de centrale à cheminée solaire a été mis en place par Pasurmarthiet Sherif [33] en Floride. Le collecteur de 9.15 m de diamètre

avait une toiture en Lexan La tour cheminée a 7,92 m de haut, son diamètre diminuait graduellement de 2,44 m à l'entrée à 0,61 m au sommet.

Un absorbeur en plaque d'aluminium a été prévu pour revêtir le terrain du collecteur (Configuration de type I). Deux améliorations ont été testées sur le collecteur de configuration type I, pour augmenter la puissance de sortie. Le collecteur de configuration de base de type I a été étendu pour former le collecteur de configuration Type II de 18,3 m de diamètre. Du polyane (Visqueen) noir clair avec une transparence d'environ 60% a été utilisé respectivement comme absorbeur et toiture pour la partie d'extension du collecteur de configuration « Type II ». Un absorbeur en toile (canevas) intermédiaire a été introduit entre le toit et l'absorbeur en plaque d'aluminium à l'intérieur du collecteur de configuration de type II, pour améliorer le rendement de conversion du collecteur et former le collecteur de configuration de type III.

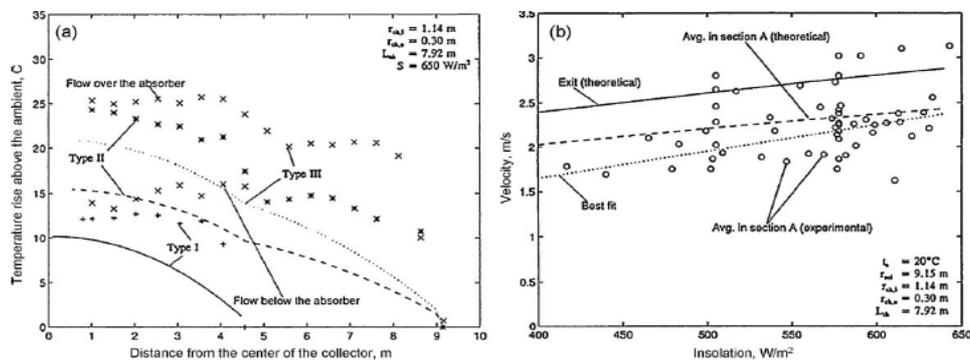


Fig.III.5. Mesures prises du prototype test de Sherif et al. [33] : (a) Le profil de température pour la configuration des trois collecteurs ; (b) La vitesse versus l'irradiation pour la 3eme configuration du collecteur.

La hausse de la température de l'air mesurée et la distribution de vitesse à différents endroits du collecteur a été illustrée dans la fig.III.5 pour les trois configurations du collecteur pour un ensoleillement de 650 W/m².

L'élévation de la température de l'air du collecteur de configuration de type I, a été d'environ 15 °C, alors que celle du type II et III était de 25 et 28 °C, respectivement. Ceci démontre que le collecteur de configuration type I

n'est pas très efficace, et que pour les collecteurs de type II et III, la variation de la température dans la section étendue était presque la même, alors que pour le collecteur dont une partie de la toiture a été couverte en Lexan, une légère amélioration a été constaté dans le collecteur de type III comparativement au collecteur de type II. Dans le collecteur de type III, l'écoulement d'air s'effectuait des deux côtés de l'extension de l'absorbeur en toile, induisant ainsi une augmentation du débit massique, et par conséquent la puissance de sortie [33].

Une installation pilote de cheminée solaire constituée d'un collecteur d'air de 10 m de diamètre et une cheminée de 8 m de hauteur a été construite à Wuhan, en Chine (Fig.III.6) [44] en 2002 et reconstruite à plusieurs reprises. Pour une structure mise à jour, le toit du collecteur et la cheminée étaient respectivement en verre de 4.8 mm d'épaisseur et en PVC. La différence de température entre la sortie du collecteur et la température ambiante pouvait atteindre en général 24,1 °C. Un phénomène intéressant a été observé qui consiste en l'inversion de la température de l'air à la sortie de la cheminée solaire juste après le lever du soleil, et ceci pour les journées froides ou chaudes. L'inversion de la température d'air a été formée suite au processus d'accroissement de l'irradiation solaire du point minimum pour disparaître quelque temps après, lorsque le lit de l'absorbeur est chauffé à une température suffisamment élevée pour permettre au flux d'air de briser la couche d'inversion de température et s'écouler normalement vers la sortie de la CS.

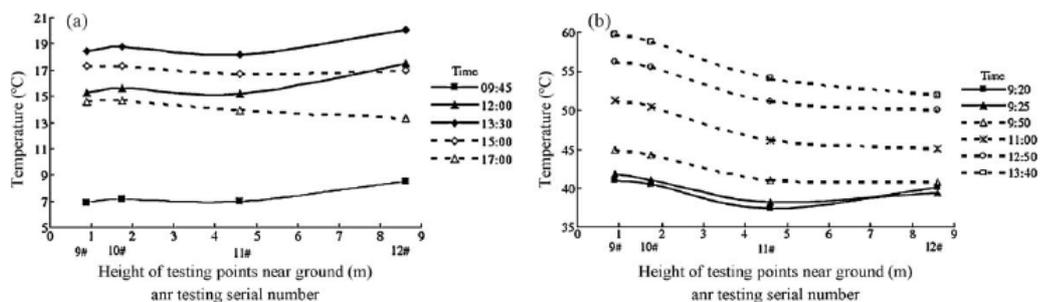


Fig.III.6.Evolution des températures de l'air dans la CS en fonction de sa hauteur pour le prototype test de Zhou et al.[44].

Basé sur le besoin d'un plan énergétique stratégique à long terme, Le Ministère des Sciences et de la Technologie du Botswana a conçu et construit une installation pilote de centrale à CS pour la recherche [45]. La CS a été fabriquée à partir de matériaux en polyester renforcé en fibre de verre, dont le diamètre intérieur était de 2 m et une hauteur de 22 m. L'unité de collecteurs soutenu par un cadre en acier, est d'un verre clair de 5 mm d'épaisseur. L'aire du collecteur a atteint les 160 m².

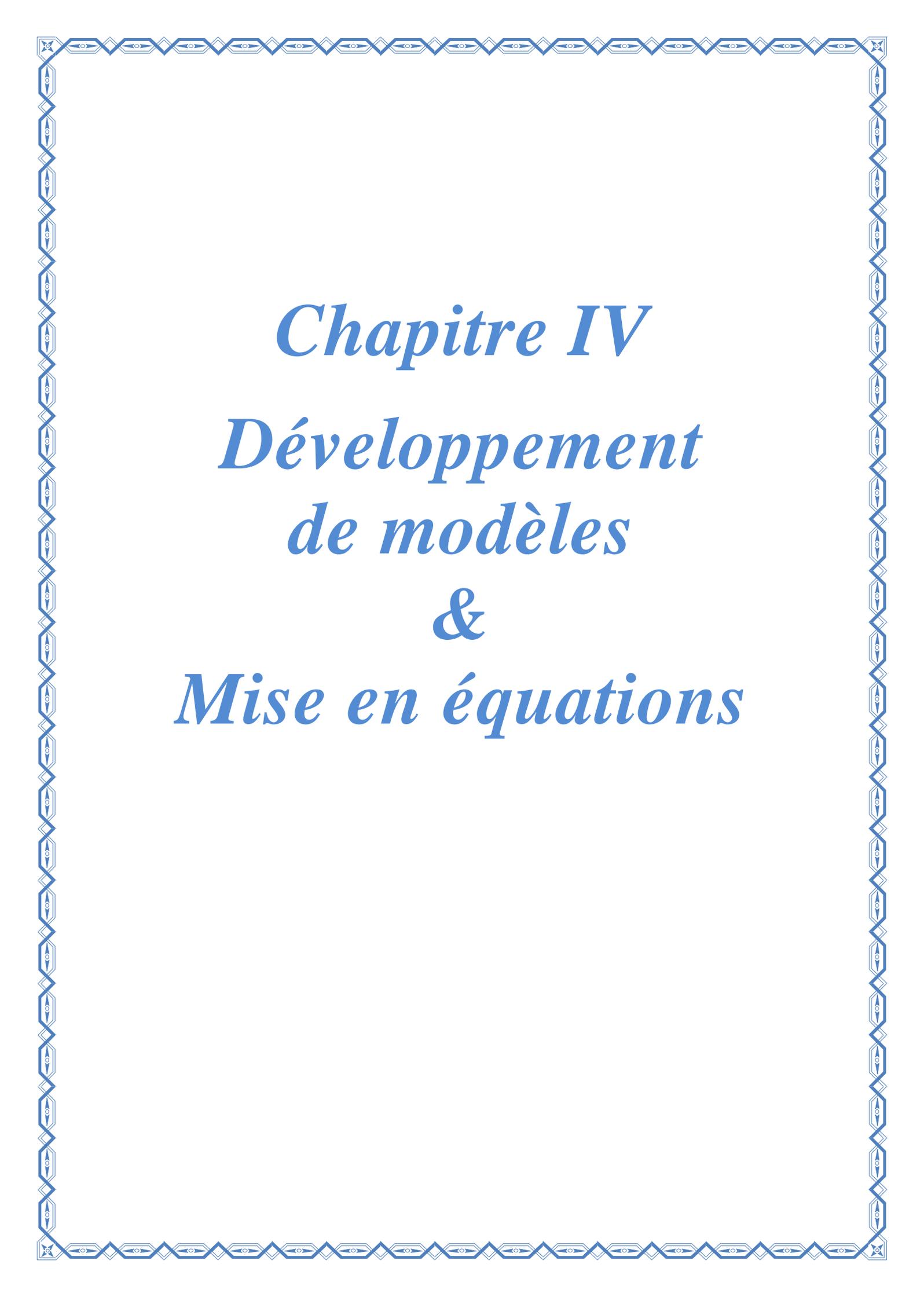
Le plancher de l'absorbeur, sous la toiture, était formé de deux couches de terre compactées d'environ 10 mm d'épaisseur, et une couche de pierres concassées. La couche de pierres concassées a été étalée sur la surface supérieure de la couche de sol compacté. Cette configuration de CCS a fonctionné du 7 Octobre au 22 Novembre 2005.

Au cours de la période allant entre 6:00 h et 8:00h, et, avec une augmentation de l'irradiation de 100 à 500 W/m², la vitesse de l'air augmente progressivement pour atteindre une valeur élevée et rester alors presque constante jusqu'à environ 14:00h, malgré l'augmentation de l'insolation vers 12:00h, à un pic maximum de 950 W/m². Environ 47% de l'énergie solaire incidente est absorbée et stockée par le sol et libérée plus tard lorsque la température locale diminue. La différence de température a augmenté de 2°C à 6H 00 à 7,5 °C à midi, et la vitesse de l'air a varié de 1 à 2,5 m/s avec l'installation du diffuseur et de 2 à 4 m/s avec diffuseur désinstallé.

Une installation électrique à CS a été construite avec une CS de 11 m de hauteur et 1 m de diamètre, sur le campus de l'Université Fédérale de Minas Gerais, à Belo Horizonte, Brésil [46, 48].

La structure de la CS a été construite en cinq modules en bois de 2,2 m de haut chacune, recouverte intérieurement et extérieurement avec de la fibre de verre. Le capteur solaire d'un diamètre de 25 m et une hauteur de 0,5 m a été construit à partir d'un film en plastique soutenu par une structure tubulaire en acier.

Une station pilote de CCS a également été construite sur le campus de l'Université de Suleyman Demirel, à Isparta, Turquie. Elle avait une cheminée solaire de 15 m de haut et 1,2 m de diamètre et un collecteur de 16 m de diamètre avec une toiture en verre [43].



Chapitre IV
Développement
de modèles
&
Mise en équations

Développement de modèles & Mise en équations

4.1. Introduction

Bien que les conditions environnantes du site d'implantation, les dimensions, les matériaux utilisés dans la construction des différents composants de la centrale à cheminée solaire, la nature du sol sous le collecteur....etc, ont un impact sur le fonctionnement des centrales à cheminée solaire, la plupart des études effectuées se focalisent sur la détermination du rendement de ces centrales en fonction des paramètres caractéristiques ainsi que sur l'analyse de l'interdépendance des différentes parties constituantes des CCS en définissant les paramètres influents sur la puissance générée.

Dans ce chapitre, on se propose d'utiliser six (06) modèles théoriques proposés dans la littérature afin de prédire la performance des centrales à cheminée solaire. Y sont présentés, l'analyse de la puissance développée et du rendement de la centrale à cheminée solaire en fonction des paramètres prédominants.

Les différents modèles proposés sont fondés sur des hypothèses données, dont certaines sont communes et d'autres spécifiques à chaque modèle. Ces dernières seront introduites au cours de la description du modèle en question.

4.2. Description des différents modèles mathématiques :

4.2.1. Hypothèses communes aux différents modèles :

Les hypothèses communes adoptées sont :

- 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.

4.2.2. Modèle de J. Schlaich et al. [5] :

L'un des modèles pionnier dans la modélisation des centrales à cheminée solaire est celui développé par Jorg Schlaich et son équipe, pour l'étude de la centrale à cheminée solaire prototype de Manzanares. Bien que le modèle étudie un cas idéal, il reproduit les bilans énergétiques au niveau des différents composants de la centrale et permet de déduire l'influence des principaux variables caractéristiques de la centrale sur son rendement global et analyse les limites de performances de celle-ci.

4.2.2.1. Le collecteur

En plus des hypothèses communes su- citées, les pertes par frottement dans le collecteur et la cheminée sont considérées négligeables.

Legain en chaleur du fluide (l'air), sous le collecteur, s'exprime par :

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T \quad (4.1)$$

Avec :

\dot{Q} : La chaleur de chaleur reçue par le fluide (l'air) au niveau du collecteur.

$\dot{m} = \rho_c V_c A_c$, Débit massique de l'air.

c_p : Capacité calorifique de l'air.

ΔT : Différence de température entre l'entrée et la sortie du collecteur.

Le rendement énergétique du collecteur, η_{coll} , est défini comme étant le rapport de la quantité de chaleur reçue par le fluide, au niveau du collecteur, sur la quantité chaleur totale reçue par la surface du collecteur. Il est donné par :

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{Q}}{A_{coll} G} \quad (4.2)$$

Avec : G , le rayonnement solaire incident.

A_{coll} , la surface de la toiture du collecteur.

En combinant les équations (4.1) et (4.2), le rendement du collecteur s'exprime par :

$$\eta_{coll} = \frac{\rho_c V_c A_c C_p \Delta T}{A_{coll} G} \quad (4.3)$$

Avec : ρ_c, V_c, A_c , respectivement la masse volumique, la vitesse et la section à la sortie du collecteur (entrée de la cheminée).

4.2.2.2. Flux de chaleur transmise par le collecteur au fluide :

En appliquant un bilan thermique sur un volume de contrôle de dimensions infinitésimales, représenté par le collecteur, on aura :

$$\dot{Q} = \alpha A_{coll} G - \beta \Delta T A_{coll} \quad (4.4)$$

Avec :

α : Coefficient d'absorption effective du rayonnement solaire du collecteur.

β : Coefficient de perte énergétique englobant les pertes par convection, par radiation et par stockage du sol.

Finalement en combinant les équations (4.2) et (4.4) on obtient :

$$\eta_{coll} = \alpha - \frac{\beta \Delta T}{G} \quad (4.5)$$

4.2.2.3. Vitesse de l'air :

Des équations (4.1), (4.2) et (4.3) et (4.4) on peut déduire l'expression de la vitesse de l'air au niveau du collecteur :

$$V_c = \frac{\alpha A_{coll} G - \beta \Delta T A_{coll}}{\rho_c A_c c_p \Delta T} \quad (4.6)$$

4.2.2.4. La cheminée :

Le rôle de la cheminée est de convertir la chaleur du fluide, \dot{Q} , acquise dans le collecteur en énergie cinétique (Courant convectif) et en énergie potentielle (Chute de pression au niveau de la turbine). Le gain en température au niveau du collecteur est transformé en force motrice (Voir schéma représentatif montré en Figure IV.1).

4.2.2.5. L'expression de la vitesse de l'air dans la cheminée :

L'équation du mouvement appliquée sur une section différentielle de la cheminée s'exprime par :

$$\rho V \frac{d(V)}{dz} = - \frac{dp}{dz} - (\rho - \rho_0)g \quad (4.7)$$

D'où l'on peut déduire après transformation, l'expression de la vitesse de l'air dans la cheminée :

$$V_c = \sqrt{\frac{2}{\rho} \left(\int_0^{H_c} dp - \int_0^{H_c} (\rho - \rho_0)g dz \right)} \quad (4.8)$$

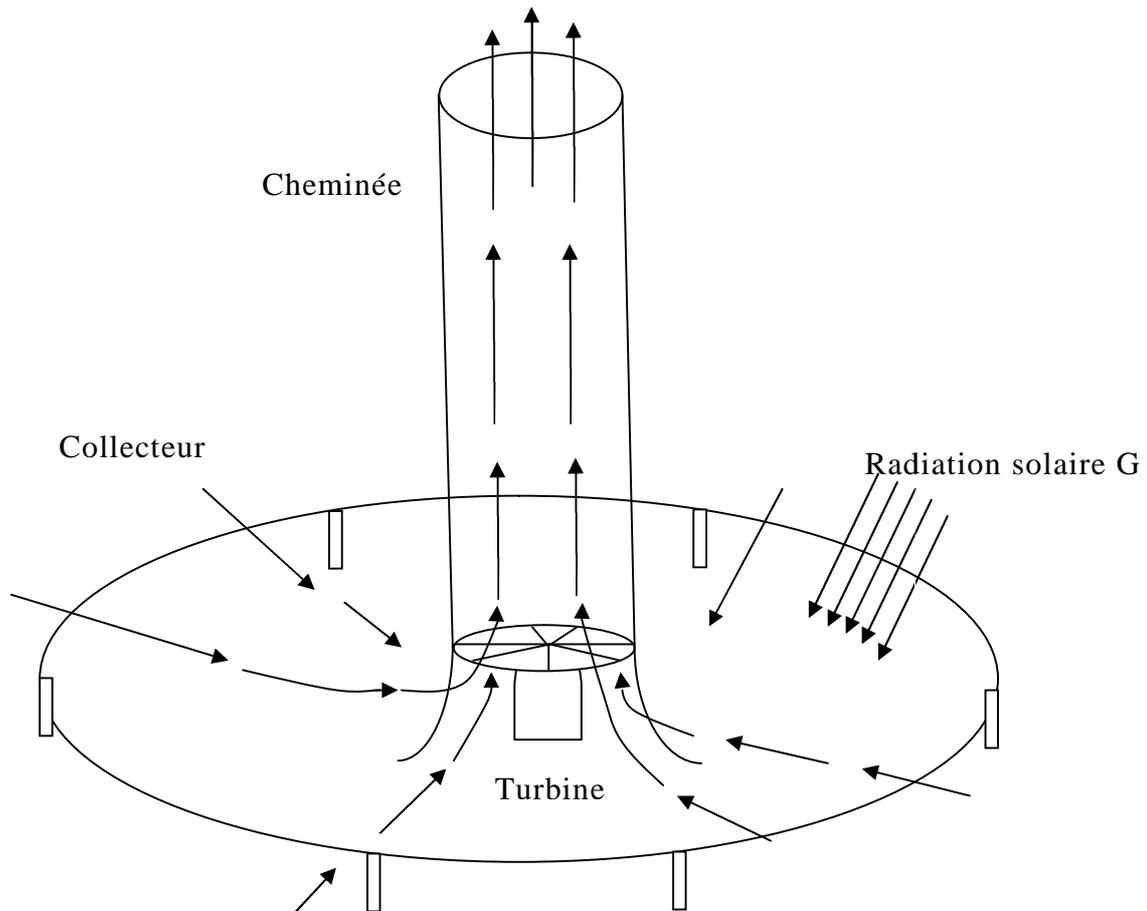


Fig IV.1: Représentation schématique de la centrale à cheminée.

En éliminant dans une première phase de cette étude la turbine afin d'obtenir la vitesse maximale dans la cheminée, les pertes par frottement étant négligeables du fait que la cheminée a un rapport surface volume optimal, la vitesse maximale du fluide sera alors :

$$V_{\text{cmax}} = \sqrt{-\frac{2}{\rho} \left(\int_0^{H_c} (\rho - \rho_0) g dz \right)} \quad (4.9)$$

En appliquant l'approximation de Boussinesq avec introduction du coefficient de dilatation thermique β , pour le cas d'un gaz parfait, on aura :

$$V_{\text{cmax}} = \sqrt{2gH_c \frac{\Delta T}{T_0}} \quad (4.10)$$

Avec : T_0 : Température ambiante à l'entrée du collecteur.

$$\beta = \frac{\partial \frac{1}{\rho}}{\partial T} \text{ et } \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0} = \beta(T - T_0) \quad (4.11)$$

Pour un gaz parfait $\beta = T$.

4.2.2.6. Le rendement de la cheminée

Le rendement, η_c , de la cheminée est défini comme étant :

$$\eta_c = \frac{P_{tot}}{\dot{Q}} \quad (4.12)$$

Avec : P_{tot} , la puissance totale développée par le fluide.

La différence de pression entre la base de la cheminée et son sommet est donnée par :

$$\Delta p_{tot} = g \int_0^{H_c} (\rho_e - \rho_c) dh \quad (4.13)$$

Avec : g : Accélération de la pesanteur ;

H_c : Hauteur de la cheminée ;

ρ_e et ρ_c , désignent respectivement la masse volumique de l'air dans l'environnement extérieur et dans la cheminée. Δp_{tot} est proportionnel à la hauteur de la cheminée.

En négligeant les pertes de charge par frottement, la différence de pression peut être subdivisée en deux composantes statique et dynamique :

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_s + \Delta p_d \quad (4.14)$$

Δp_{tot} : Perte de charge totale au niveau de la cheminée.

Δp_s : Perte de charge statique.

Δp_d : Perte de charge dynamique.

Si on élimine la turbine, la perte de charge statique s'annule et par conséquent la perte de charge totale sera l'accélérateur du fluide dans son mouvement de la base de la cheminée à sa sortie vers l'environnement.

La puissance totale, développée par le fluide est :

$$P_{\text{tot}} = \Delta p_{\text{tot}} V_{\text{cmax}} A_c \quad (4.15)$$

Or dans le cas optimal où $\Delta p_{\text{tot}} = \Delta p_d$ la puissance totale sera égale à l'énergie dynamique.

$$P_{\text{tot}} = \frac{1}{2} \dot{m} V_{\text{cmax}}^2 \quad (4.16)$$

En combinant les équations 4.14, 4.15, 4.16, le rendement de la cheminée sera:

$$\eta_c = \frac{g H_c}{T_0 c_p} \quad (4.17)$$

4.2.2.7. Puissance et perte de charge totale :

La puissance totale peut être déduite comme suit :

$$P_{\text{tot}} = \eta_c \dot{Q} = \frac{g H_c}{T_0} \rho_c V_c \Delta T A_c \quad (4.18)$$

Combinant 16 et 19 :

$$\Delta p_{\text{tot}} = \frac{g H_c}{T_0} \rho_{\text{coll}} \Delta T \quad (4.19)$$

La cheminée agit de manière analogique aux pertes de charge hydraulique où

$$\Delta p_{\text{tot}} = \rho_{\text{coll}} g H.$$

4.2.2.8. La turbine à air « aéro-génératrice »

Installée à la base de la cheminée, l'aéro-turbine a pour rôle la conversion de l'énergie du mouvement du flux ascendant en énergie de rotation.

La perte de pression dans la turbine est égale à :

$$\Delta p_s = \Delta p_{tot} - \Delta p_d \Rightarrow \Delta p_s = \Delta p_{tot} - \frac{1}{2} \rho V_c^2 \quad (4.20)$$

La puissance théorique de la turbine étant :

$$P_{wt} = V_c A_c \Delta p_s \quad (4.21)$$

On définit par \dot{V} le produit $V_c A_c$

De l'équation (4.20) et (4.21), on peut déduire :

$$\dot{V} = \sqrt{\frac{\rho k}{2} (\Delta p_{tot} - \Delta p_s)} \quad (4.22)$$

4.2.2.9. La puissance maximale développée :

En combinant les équations (4.21) et (4.22) on aura :

$$P_{wt} = \sqrt{\frac{\rho k}{2} (\Delta p_{tot} - \Delta p_s)} \cdot \Delta p_s \quad (4.23)$$

En dérivant cette équation afin de trouver son point optimum :

$$\frac{\partial P_{wt}}{\partial \Delta p_s} = 0 \Rightarrow \Delta p_s = \frac{2}{3} \Delta p_{tot} \quad (4.24)$$

La puissance P_{wt} est maximale entre les deux extrémités de la surface du rectangle représentatif de la puissance « Fig 4.2 », le point optimal étant : $\Delta p_s = \frac{2}{3} \Delta p_{tot}$, d'où :

$$V_{c,ppm} = \sqrt{\frac{2 \Delta p_{tot}}{3 \rho c}} \quad (4.25)$$

Avec $V_{c,ppm}$ est la vitesse du fluide pour le point de puissance maximal.

La puissance maximale est atteinte quand 2/3 de la différence de charge est utilisée par la turbine. Cependant Δp_s est implicitement dépendante de la vitesse V_c . En combinant les équations (4.23), (4.24) et (4.25), la puissance maximale à l'arbre de la turbine est :

$$P_{wt,max} = \frac{2}{3} \frac{g H_c}{C_p T_0} \eta_{coll} A_{coll} G \quad (4.26)$$

4.2.2.10. La puissance fournie au réseau :

En introduisant le rendement de la turbine η_{wt} qui prend en considération le rendement des pales et la transmission au générateur, $\eta_{wt}P_{wt,max}$ est la puissance électrique $P_{\text{électrique}}$ maximale transmise par la centrale à cheminée solaire CCP, au réseau.

$$P_{\text{électrique}} = \eta_{wt} P_{wt,max} \quad (4.27)$$

4.2.2.11. Rendement global de la centrale à cheminée solaire :

Le rendement thermique de la centrale à cheminée solaire est le rapport de la puissance produite par celle-ci, sur l'énergie reçue par le collecteur :

$$\eta_{glob} = \frac{\text{Puissance à l'arbre de la turbine}}{\text{Energie solaire reçue}} \quad (4.28)$$

Les modèles étudiés considèrent chaque partie de la CCS comme étant un sous système à part, les données de sortie de chaque sous-système constituent les données d'entrées du sous-système suivant.

De ce fait le rendement global de la centrale peut s'exprimer aussi, comment étant le produit du rendement de chaque composant de la CCS :

$$\eta_{glob} = \eta_{coll} \cdot \eta_c \cdot \eta_{tw} \quad (4.29)$$

Avec : η_{glob} : Rendement global de la CCS.

η_{coll} : Rendement du collecteur

η_c : Rendement de la cheminée

η_{tw} : Rendement de la turbine à air

4.2.3. Modèle de A. J. Gannon & al. « N°2 » [22] :

Critiquant l'étude idéale de Schlaich & al. [5], 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.

4.2.3.1. Le cycle parfait de la cheminée solaire :

Gannon & al. [22], 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 V.2) illustre l'évolution d'un cycle parfait de l'air dans une les centrales à cheminée solaire « CCS ».

4.2.3.2. Rendement de la CCS :

L'extraction de la puissance pendant l'expansion (3-4) (voir Fig V.2) à travers la turbine, n'est pas totale, puisque une partie de cette puissance est nécessaire pour soulever l'air à travers la cheminée, on a :

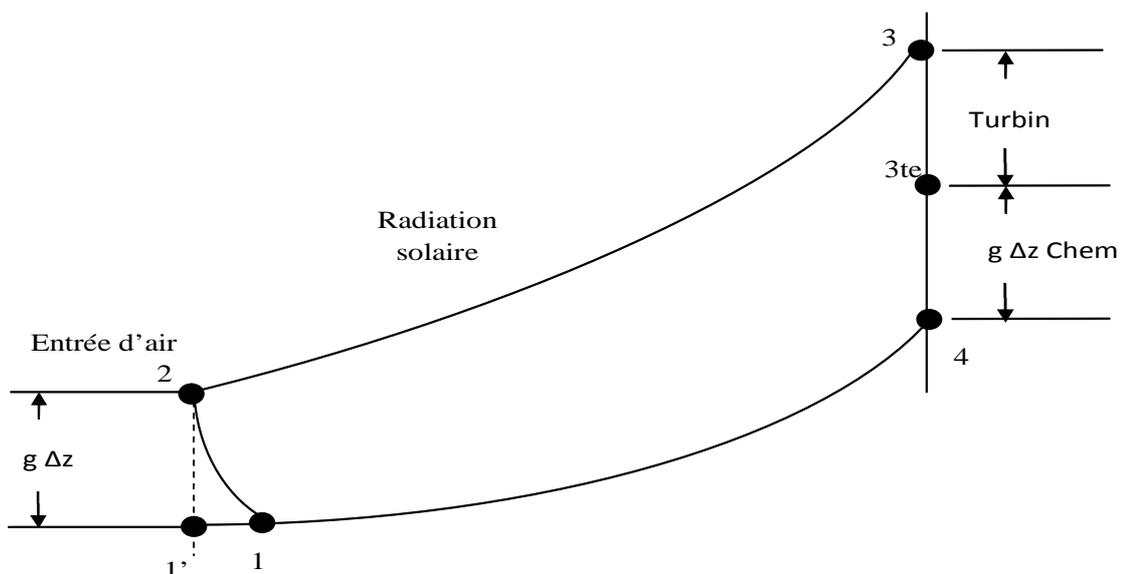


Fig.V.2. Diagramme Température – Entropie pour un cycle à air standard.

La Fig. V.3 montre le schéma d'une CCS montrant les différents points d'évolution. du cycle.

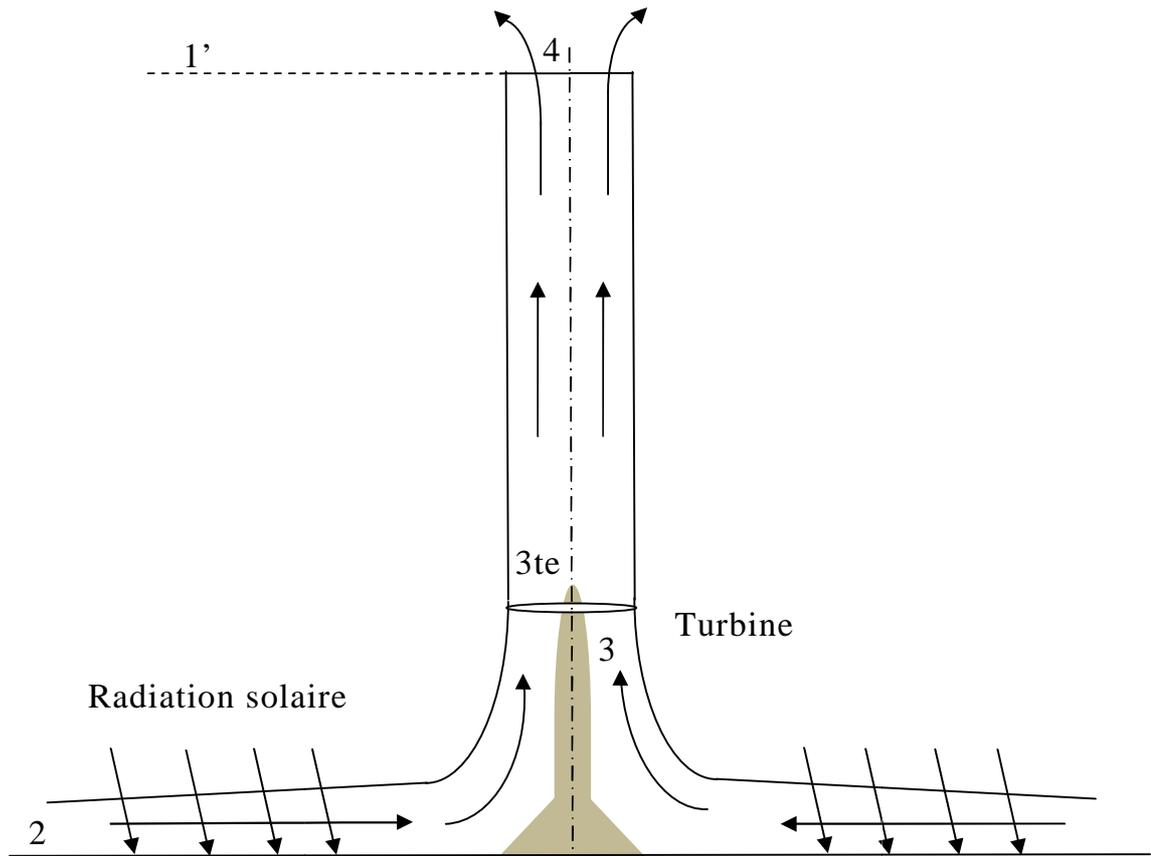


Fig. V.3. Schéma d'une CCS montrant les différents points d'évolution du cycle.

La puissance générée lors de cette détente est :

$$P_{3-4} = \dot{m} c_p (T_3 - T_4) \quad (4.30)$$

$$P_{3te-4} = \dot{m} c_p (T_{3te} - T_4) = \dot{m} \Delta h = \dot{m} g \Delta z \quad (4.31)$$

Avec : h , l'enthalpie spécifique.

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

$$\Delta h = g\Delta z = c_p (T_2 - T_{1'}) \quad (4.32)$$

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

$$P_{sh} = \dot{m} c_p (T_3 - T_4) - \dot{m} c_p (T_{3te} - T_4) \quad (4.33)$$

Or : $T_{3te} - T_4 = T_2 - T_{1'}$ d'où :

$$P_{sh} = \dot{m} c_p (T_3 - T_4) - \dot{m} c_p (T_2 - T_{1'}) \quad (4.34)$$

Pour une évolution isentropique d'un gaz parfait :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = \text{cst} \quad (4.35)$$

En remplaçant les équations (4.32), (4.33) et (4.34) dans (4.35), on aura :

$$\eta_{glob} = \frac{\text{Puissance à l'arbre de la turbine}}{\text{Energie solaire reçue}} = \frac{\dot{m} c_p (T_3 - T_4) - \dot{m} c_p (T_2 - T_1)}{\dot{m} c_p (T_3 - T_2)}$$

$$\eta_{glob} = 1 - \frac{1}{\text{Cst}} = \frac{g \Delta z}{C_p T_2} \quad (4.36)$$

4.2.3.3. Puissance développée :

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

$$P_2^* = \frac{P_{sh}}{\dot{m} c_p T_2} = \frac{\dot{m} c_p (T_3 - T_4) - \dot{m} c_p (T_2 - T_1)}{\dot{m} c_p T_2} \quad (4.37)$$

En introduisant l'équation (2.5') :

$$P_2^* = \left\{ 1 - \frac{1}{\text{Cst}} \right\} \left\{ \frac{T_3 - T_2}{T_2} \right\} \quad (4.38)$$

$$P_2^* = \left\{ \frac{g \Delta z}{C_p T_2} \right\} \left\{ \frac{\Delta T}{T_2} \right\} \quad (4.39)$$

La formulation du rendement et de la puissance sont identiques à la formulation du modèle de Schlaich présenté précédemment.

4.2.3.4. Le cycle réel de la centrale à cheminée solaire

Le diagramme entropique (figure V.4) inclut les différentes pertes dans le système et illustre les déviations par rapport au cycle parfait (figure V.2).

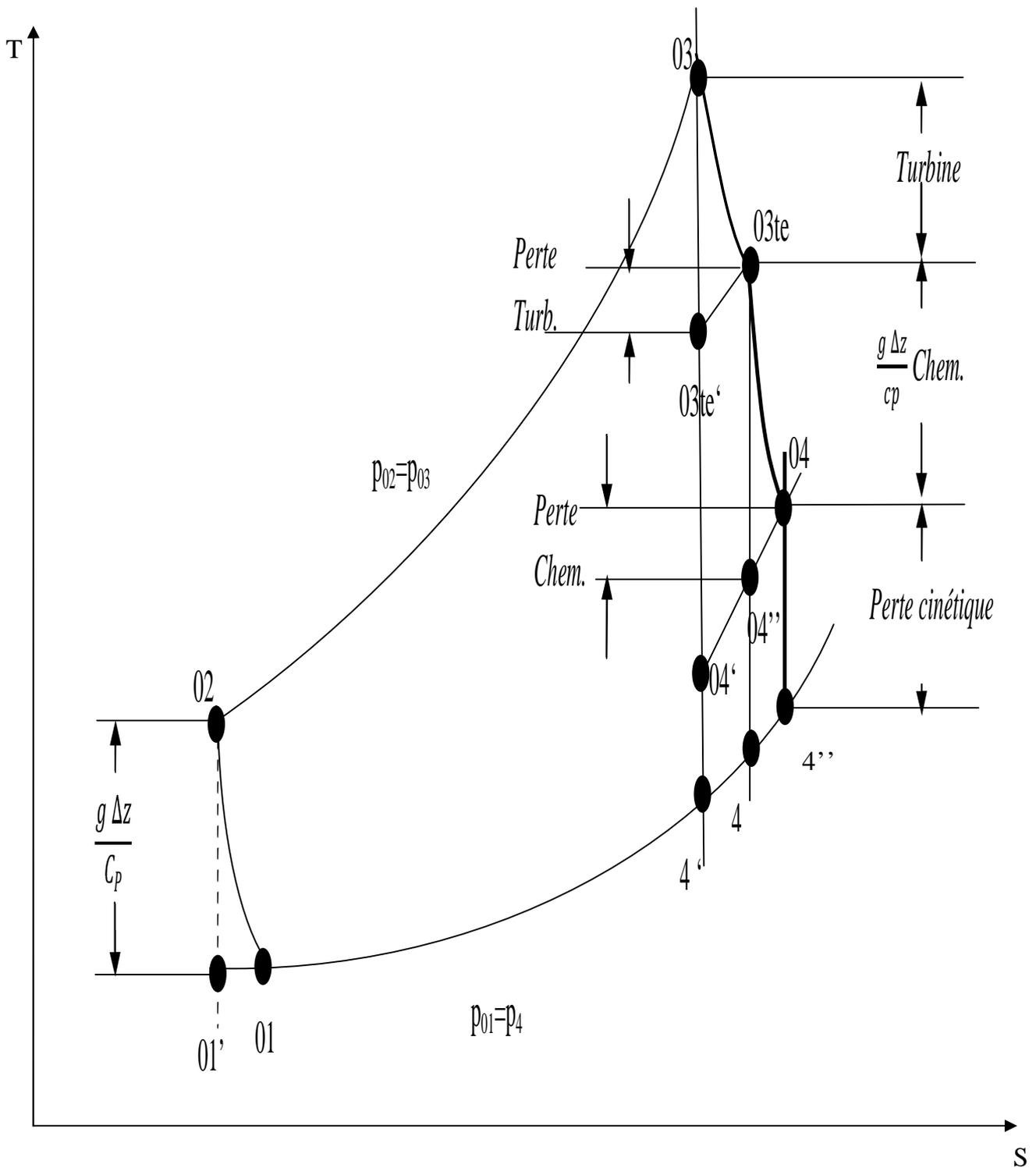


Fig. V.4. Diagramme Température – Entropie pour un cycle à air dans une centrale à cheminée solaire avec perte d'énergie.

La (figure V.4) 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.

4.2.3.5. 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.

4.2.3.6. Rendement de la turbine :

A partir du cycle illustré dans la fig 4.5, le rendement isentropique de la turbine est :

$$\eta_{turb} = \frac{T_{03} - T_{03te}}{T_{03} - T_{03te}'} \quad (4.40)$$

4.2.3.7. 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 :

$$K_{chem} = \frac{T_{04} - T_{04}''}{T_{04} - T_{04}} \quad (4.41)$$

4.2.3.7.1. Perte cinétique à la sortie de la cheminée :

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

$$\alpha_{cin} = \frac{KE}{\overline{KE}} = \frac{\int (\rho v_{z4}) \frac{1}{2} v_{z4}^2 dA}{(\rho \bar{v}_{z4}) \frac{1}{2} \bar{v}_{z4}^2 A} \quad (4.42)$$

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.

4.2.3.8. 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 (Fig V.4) est :

$$\eta_{exp} = \frac{T_{03} - T_{04}}{T_{03} - T_{04}'} \quad (4.43)$$

4.2.3.9. Rendement du cycle réel :

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

$$\eta_{glob} = \frac{g \Delta z}{c_p T_{02}} \left[\frac{\eta_{exp}(T_{02} + \Delta T_{23}) - T_{02}}{\Delta T_{23}} \right] - \alpha_{cin} \frac{\bar{v}_4^2}{2 c_p \Delta T_{23}} \quad (4.44)$$

4.2.3.10. Puissance développée par le cycle réel :

La puissance spécifique normalisée est :

$$P_2^* = \frac{g \Delta z}{c_p T_{02}} \left[\frac{\eta_{exp}(T_{02} + \Delta T_{23}) - T_{02}}{T_{02}} \right] - \alpha_{cin} \frac{\bar{v}_4^2}{2 c_p T_{02}} \quad (4.45)$$

4.2.3.11. Le collecteur

Contrairement au modèle de Schlaich qui ne prend pas ceci en considération, le développement qui suivra lie entre le rayonnement solaire incident et le débit d'air. La figure V.6 montre le bilan thermique sur une tranche du collecteur.

Le bilan énergétique sur un volume de contrôle circulaire du collecteur est donné par (Cf. figure V.6.) :

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

$$\tau_{in} \alpha_{surf} G = \tau_{out} \varepsilon_{out} \sigma (T_{surf}^4 - T_{atm}^4) + h_{surf} (T_{surf} - T_{air}) +$$

$$\frac{k_{gro}}{L_{gro}} (T_{surf} - T_{sto})$$

$$h_{gli}(T_{air} - T_{glin}) = \frac{k_{gl}}{L_{gl}} (T_{glin} - T_{glout}) \tag{4.46}$$

$$\frac{k_{gl}}{L_{gl}} (T_{glin} - T_{glout}) = h_{glo}(T_{glout} - T_{atm}) \tag{4.46'}$$

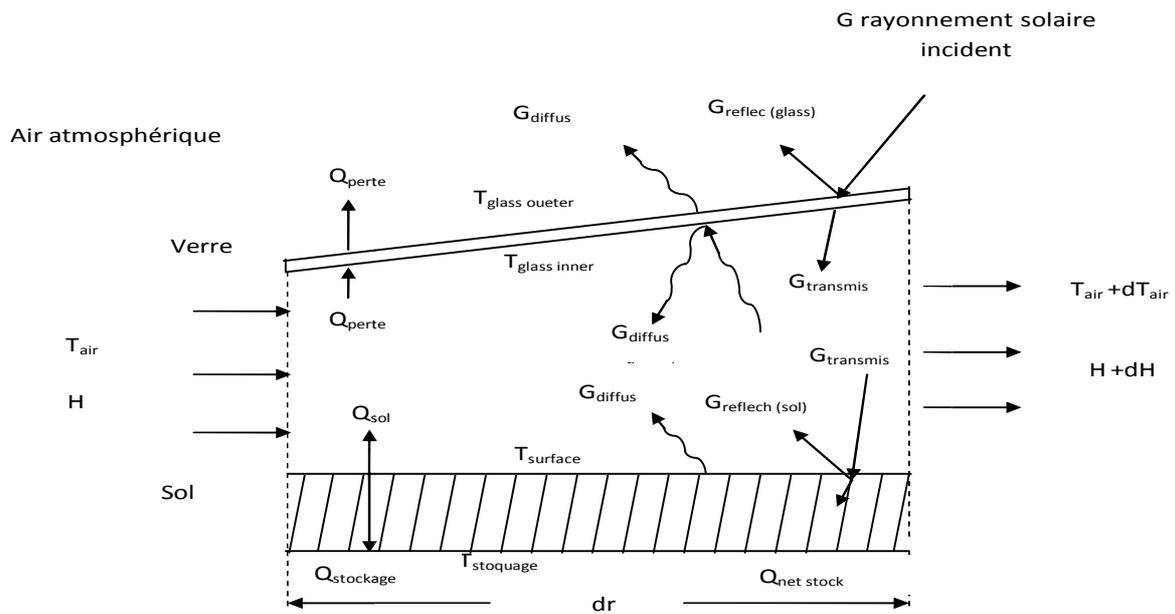


Fig.V.6. Bilan thermique sur une tranche du collecteur.

4.2.4. Modèle de Y.J Dai & al. « N°3 » [24] :

Dans son étude Dai & al. s'est inspiré des différentes précédentes études afin d'analyser les performances des centrales à cheminées solaires dont la réalisation est prévue dans les régions retirées de Chine.

4.2.4.1. Le collecteur

La chaleur gagnée par l'air sous le collecteur est donnée par l'équation du bilan énergétique suivante :

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T = (\tau \alpha) A_{coll} G - \beta \Delta T_a A_{coll} \tag{4.47}$$

Ou, en introduisant le rendement du collecteur :

$$\dot{Q} = \eta_{coll} A_{coll} G \tag{4.48}$$

Avec \dot{m} désigne le débit massique de passage d'air chaud à travers la cheminée solaire, et est déduit par l'expression suivante :

$$\dot{m} = \rho_c A_c V_c \quad (4.49)$$

L'expression de la vitesse de sortie du collecteur (entrée cheminée) est :

$$V_c = \frac{(\tau\alpha)A_{coll} G - \beta\Delta T_a A_{coll}}{\rho_c A_c C_p \Delta T} \quad (4.50)$$

Le rendement du collecteur est donné par :

$$\eta_{coll} = (\tau\alpha) - \frac{\beta\Delta T_a}{G} \quad (4.51)$$

Le modèle suppose une évolution linéaire de la température de l'air à l'intérieur du collecteur. L'élévation de température à l'intérieur du collecteur ΔT (Température entre l'entrée et la sortie du collecteur) est [60]:

$$\Delta T = \frac{2Q}{A_c \beta F_R} (1-F'') \quad (4.52)$$

4.2.5. Modèle de M. Tingzhen & al. « N°4 » [26] :

Jugeant que les modèles existants sont insuffisants pour décrire efficacement le mécanisme et l'évolution de l'air dans les CCS, Tingzhen a étudié principalement l'influence de plusieurs paramètres sur la pression statique relative, les forces motrices, la puissance développée, et le rendement.

4.2.5.1. Modélisation du collecteur - méthode par tranche :

Si on considère que toute l'irradiation solaire incidente est absorbée par l'air sous le collecteur, on peut exprimer l'équation d'énergie en fonction du transfert de chaleur entre le sol et l'air:

$$-c_p \frac{\dot{m}(dT_j)}{dr} = (1+F_1) 2 \pi r h_{gr,a} (T_{gr,j} - T_j) = G 2 \pi r \quad (4.53)$$

$$\text{Avec : } F_1 = \frac{2 \pi r h_{gl,a} (T_{gl,j} - T_j)}{2 \pi r h_{gr,a} (T_{gr,j} - T_j)}$$

En intégrant cette équation le long du collecteur :

$$T - T_0 = \frac{\pi G}{c_p \dot{m}} (R_{coll}^2 - r^2) \quad (4.54)$$

Avec : R_{coll} , le rayon du collecteur.

La différence de température peut être exprimée en fonction du coefficient d'expansion volumique « Boussinesq » par :

$$\beta = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho(T - T_0)} \quad (4.55)$$

La force motrice s'exprime par :

$$\Delta p = \left(\frac{g^2}{2c_p^2} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\rho_0 \beta_0^2}{\rho} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{H}{R_{ch}^2} \right)^{2/2} \cdot R_{coll}^{4/2} \cdot G^{2/2} \quad (4.56)$$

4.2.5.2. La puissance et le rendement de la CCS

La puissance maximale est le produit de la force motrice par le débit :

$$P_{max} = \frac{\Delta p \dot{m}}{\rho} \Rightarrow P_{max} = \frac{\rho_0 \pi g}{\rho c_p T_0} H_c R_{coll}^2 G \quad (4.57)$$

Le rendement maximal du système est :

$$\eta_{max} = \frac{P_{max}}{Q} = \frac{P_{max}}{\pi R_{coll}^2} = \frac{\rho_0 g H_c}{\rho c_p T_0} \quad (4.58)$$

4.2.6. Modèle de Chitsomboon « N°5 » [52]

Le modèle analytique proposé diffère des autres modèles proposés dans la littérature, par la représentation du couplage thermomécanique, sans supposition d'un gain en température arbitraire, permettant ainsi l'analyse de l'interaction de l'écoulement de l'air dans les différentes parties de la CCS le plus naturellement que possible.

4.2.6.1. Modélisation des phénomènes de transferts :

En combinant l'équation du mouvement et de l'énergie et en substituant les expressions de Δp et $\Delta \rho$ dans l'équation obtenue et en utilisant l'équation de continuité on obtient :

$$\frac{1}{2} \rho_1 \dot{m} V_1^2 - \dot{m}^2 \int_1^2 \frac{dA}{\rho A^2 (1-M^2)} + \dot{m}^2 \int_1^2 \frac{G dA_r}{\rho A^2 (1-M^2) c_p T} + \dot{m} g h \int_1^2 \frac{\rho M^2 dA}{1-M^2 A} = g h \int_1^2 \frac{\rho}{1-M^2} \frac{G dA_r}{c_p T} - \dot{m} g h \delta \rho \quad (4.59)$$

4.2.6.2. Solution du modèle analytique:

Après intégration et réarrangement, nous obtenons une équation sous forme algébrique cubique en V_1 :

$$C_1 V_1^3 + C_2 V_1^2 = C_3 \quad (4.60)$$

Avec : $C_1 = \frac{1}{2} \rho_1 \frac{A_1^2}{A_3^2} + \frac{1}{2} \frac{\rho_1 A_1 g H_{ch}}{\gamma R T_1} - \frac{1}{2} \frac{\rho_1 g H_{ch} A_1^2}{\gamma R T_1 A_3^2}$

$$C_2 = \frac{1}{2} \frac{G}{c_p T_1} A_1 \frac{R_{coll}}{H_c} \ln \frac{R_{ch}}{R_{coll}} \quad \text{et} \quad C_3 = -\frac{g H_{ch} G}{c_p T_3} A_{r1}$$

Cette équation peut être résolue numériquement avec la méthode de Newton-Raphson. Après la détermination de V_1 tous les autres paramètres seront facilement calculables.

4.2.7. Modèle de X. Zhou & al. « N°6 » [36] :

Ce modèle développe une analyse détaillée de la cheminée solaire, utilisant une méthode différentielle. La hauteur maximale et la hauteur optimale de la cheminée pour une puissance maximale sont déterminées et analysées.

4.2.7.1. La cheminée :

La cheminée est le moteur thermique du système. Elle converti la chaleur de l'air en énergie cinétique.

4.2.7.2. Perte de charge dans la cheminée :

Les pertes de charge dans la cheminée sont données par :

$$\Delta p = 0.00353.gH \left(\frac{\pi G \eta_{coll}}{c_p \dot{m}} R_{coll}^2 - \frac{g}{2C_p} H + \frac{1}{2}\gamma_{\infty}H \right) \quad (4.61)$$

D'autre part, la différence de pression est causée par les pertes de charge par frottement dans la cheminée, les pertes dues au changement de section à l'entrée de la cheminée et les pertes d'énergie cinétique à la sortie :

$$\Delta p = \Delta p_t + \Delta p_f + \Delta p_{in} + \Delta p_{out} \quad (4.62)$$

Avec:

$$\Delta p_f = \frac{1}{2} f \frac{H_c}{D_c} \rho V_c^2 : \text{Perte par frottement dans la cheminée ;}$$

$$\Delta p_{in} = \frac{1}{2} f_{in} \rho V_c^2 : \text{Perte singulière à l'entrée de la cheminée ;}$$

$$\Delta p_{out} = \frac{1}{2} f_{out} \rho_{out} V_{c_{out}}^2 : \text{Perte cinétique à la sortie de la cheminée}$$

Δp_t : Perte de charge due à la détente dans la turbine, c'est l'énergie transformée en énergie cinétique par la turbine.

f : Le coefficient de perte de charge par frottement dans la cheminée ;

f_{in} : Le coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de la cheminée ;

f_{out} : Le coefficient de perte d'énergie cinétique.

4.2.7.3. Puissance et rendement de la CCS :

La puissance de la CCS est donnée par :

$$P_{out} = \eta_{wt} V_c A_c (0.00353.gH \left(\frac{\pi G \eta_{coll}}{c_p \dot{m}} R_{coll}^2 - \frac{g}{2C_p} H + \frac{1}{2}\gamma_{\infty}H \right)) \quad (4.63)$$

$$\text{En admettant un } \gamma_{\infty} = \frac{g}{C_p} : P_{out} = 0.00353 \eta_{wt} \left(gH \frac{\pi G \eta_{coll}}{c_p \rho_c} R_{coll}^2 \right)$$

Le rendement total est :

$$\eta_{glob} = 0.00353 g H \frac{\eta_{wt} \eta_{coll}}{c_p \rho_c} \quad (4.64)$$

4.2.7.4. Hauteur maximale de la cheminée :

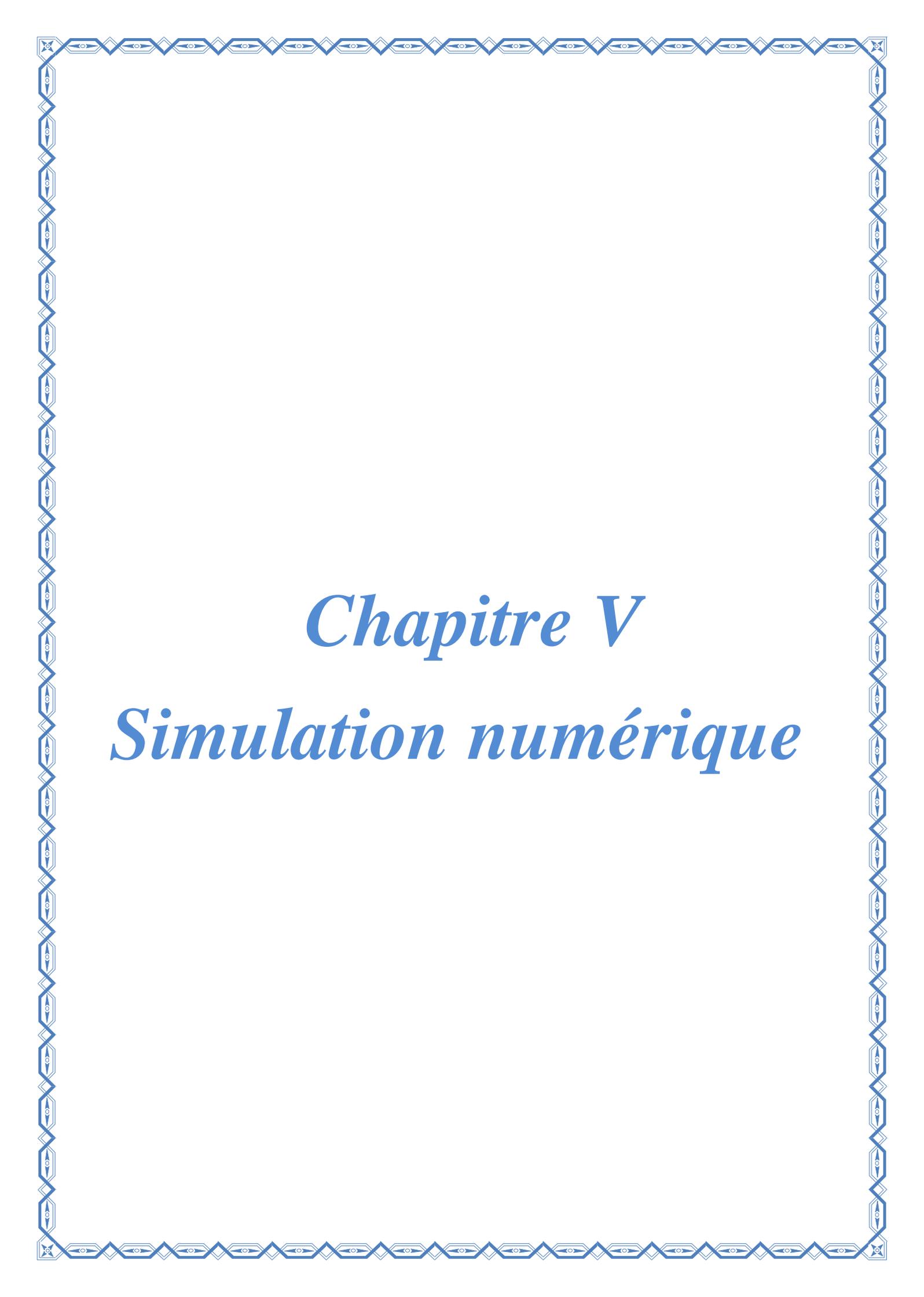
La température de l'air dans la cheminée diminue plus rapidement que celle de l'ambiance à cause des pertes de charge, du potentiel de gravité et des pertes de chaleur à travers la paroi de la cheminée. Cependant, la température à la sortie de la cheminée ne doit pas atteindre une température inférieure à celle de l'ambiance correspondante à la même hauteur. Autrement la masse volumique du flux d'air à la sortie de la cheminée sera plus élevée que la masse volumique de l'air ambiant ce qui décélérera l'écoulement dans la cheminée. Cette condition nous donne la hauteur maximale de la cheminée pour un collecteur donnée, et s'exprime mathématiquement par :

$$T(H_{max}) = T_{\infty}(H_{max}) \quad (4.65)$$

Après résolution, on obtient l'expression de Hmax :

$$H_{max} = \frac{c_p \dot{m}}{U \pi D} \ln \left(\frac{(\pi^2 U D c_p G \eta_{coll} \square R \square_{coll}^2) / (c_p \dot{m}^2 (g - \gamma_{air} c_p)) + 1}{1} \right) \quad (4.66)$$

Ceci achèvera le développement des différents modèles choisis dans la littérature, la résolution de ces modèles nous permettra d'analyser et de comparer les résultats et tirer des conclusions.



Chapitre V

Simulation numérique

Résolution numérique

5.1. Introduction :

La résolution des équations régissant les modèles décrits et développés au chapitre IV, permettra de prédire les performances énergétiques des centrales à cheminée solaire, d'étudier et d'analyser l'influence des différents paramètres dominants sur ces performances et de prévoir et dimensionner les centrales à échelle industrielle avant leur réalisation.

5.2 Modèles de J. Schlaich [4], de Dai[24], de Ming[26] et de Zhou [39]

Les systèmes d'équations représentant les modèles de J. Schlaich, de Dai, de Ming et de Zhou ont été résolu par combinaison et substitution des inconnus, dans les différentes équations. Des programmes de résolution de ces équations ont été développés dans cet esprit, sous- environnement MATLAB [59] (Voir l'organigramme V.1 montrant les différentes étapes du calcul).

5.3 Modèle de A. J. Gannon et al. [21, 22, 23]

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 ré solvable 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 organigramme V.2 de résolution correspondant).

5.3.1 Généralités et principe de discrétisation des équations:

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

5.3.1.1 Erreur de troncature :

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

5.3.1.2 Consistance:

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

5.3.1.3 Stabilité:

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

5.3.1.4 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.

5.3.1.5 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.

5.3.1.6 Système collecteur : 1ere phase de résolution :

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

5.3.1.7 Système collecteur : 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 (Cf. Chapitre IV). Elle est donnée par :

$$T_{i+1} = T_i + \Delta r \left(\frac{dT}{dr} \right)_i + O(\Delta x)^2 \Rightarrow \left(\frac{dT}{dr} \right)_i = \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta r} + O(\Delta x) \quad (5.1)$$

La discrétisation de l'équation d'énergie (figure V.1) abouti au résultat suivant :

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

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

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

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

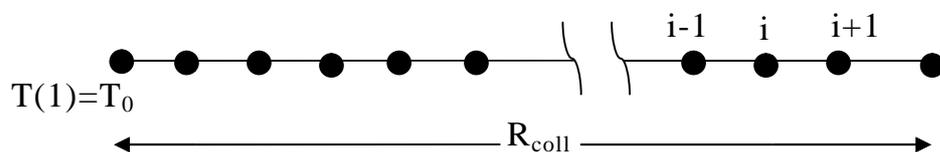


Figure V.1. Schéma de discrétisation.

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

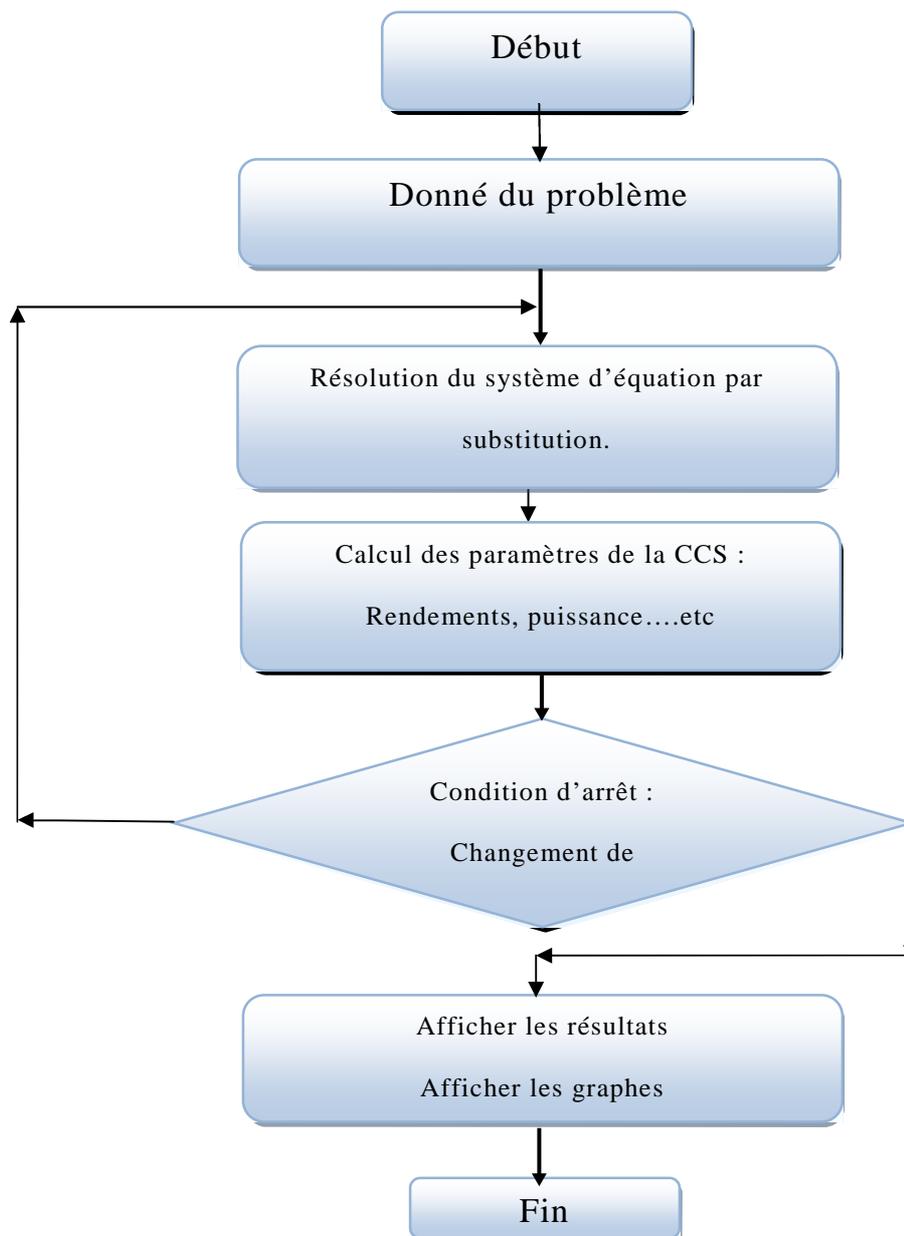
La température à l'entrée du collecteur est égale à la température ambiante, d'où pour le nœud 1 : $T(1)=T(R_{coll}) = T_1$.

5.3.1.8 Résolution du système d'équations :

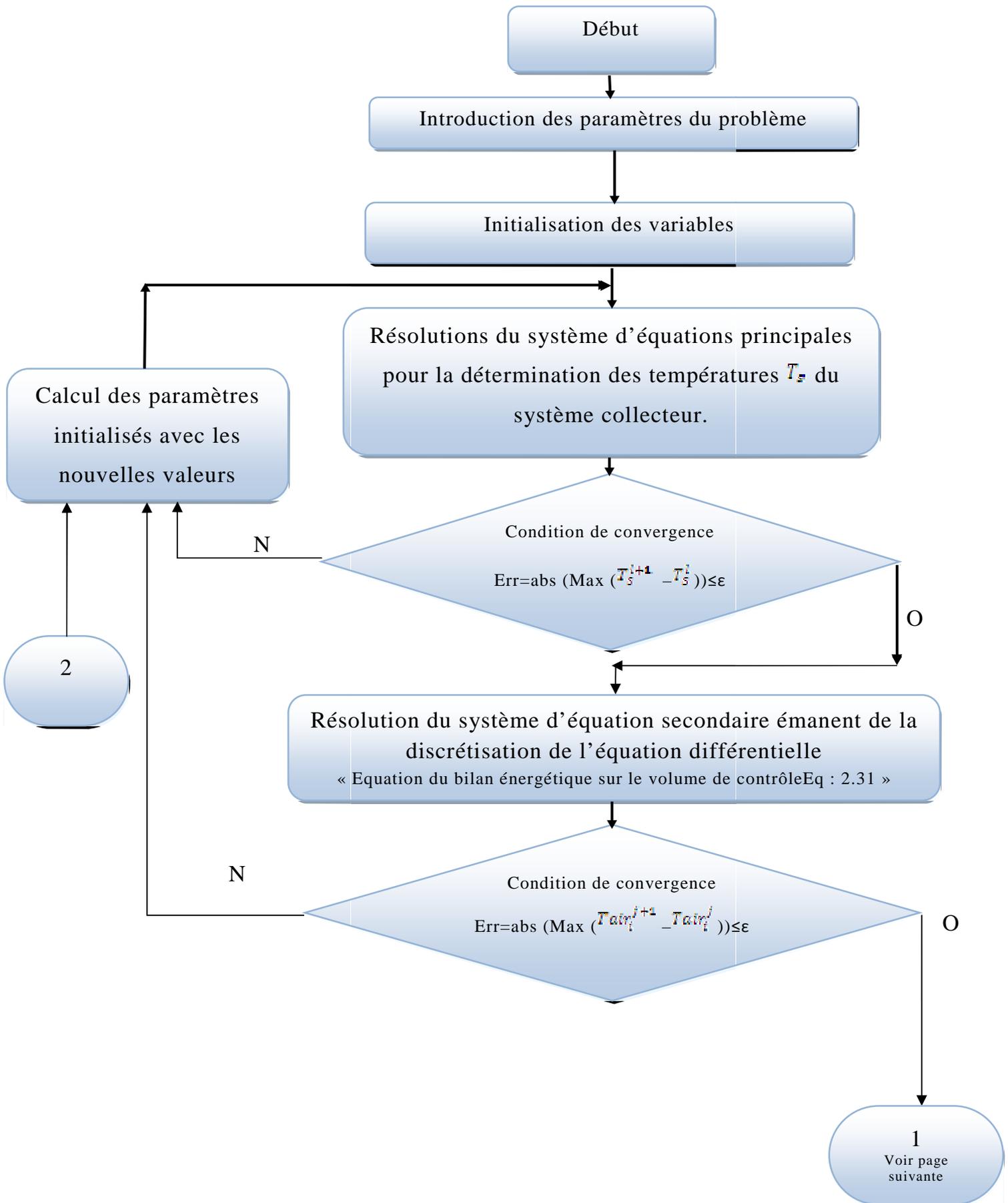
Le système d'équations obtenu sera résolu par une méthode classique telle que la méthode de Gauss. A cet effet, un programme sous environnements Matlab a été développé (voir organigramme V.2), décrivant la méthode de résolution adoptée.

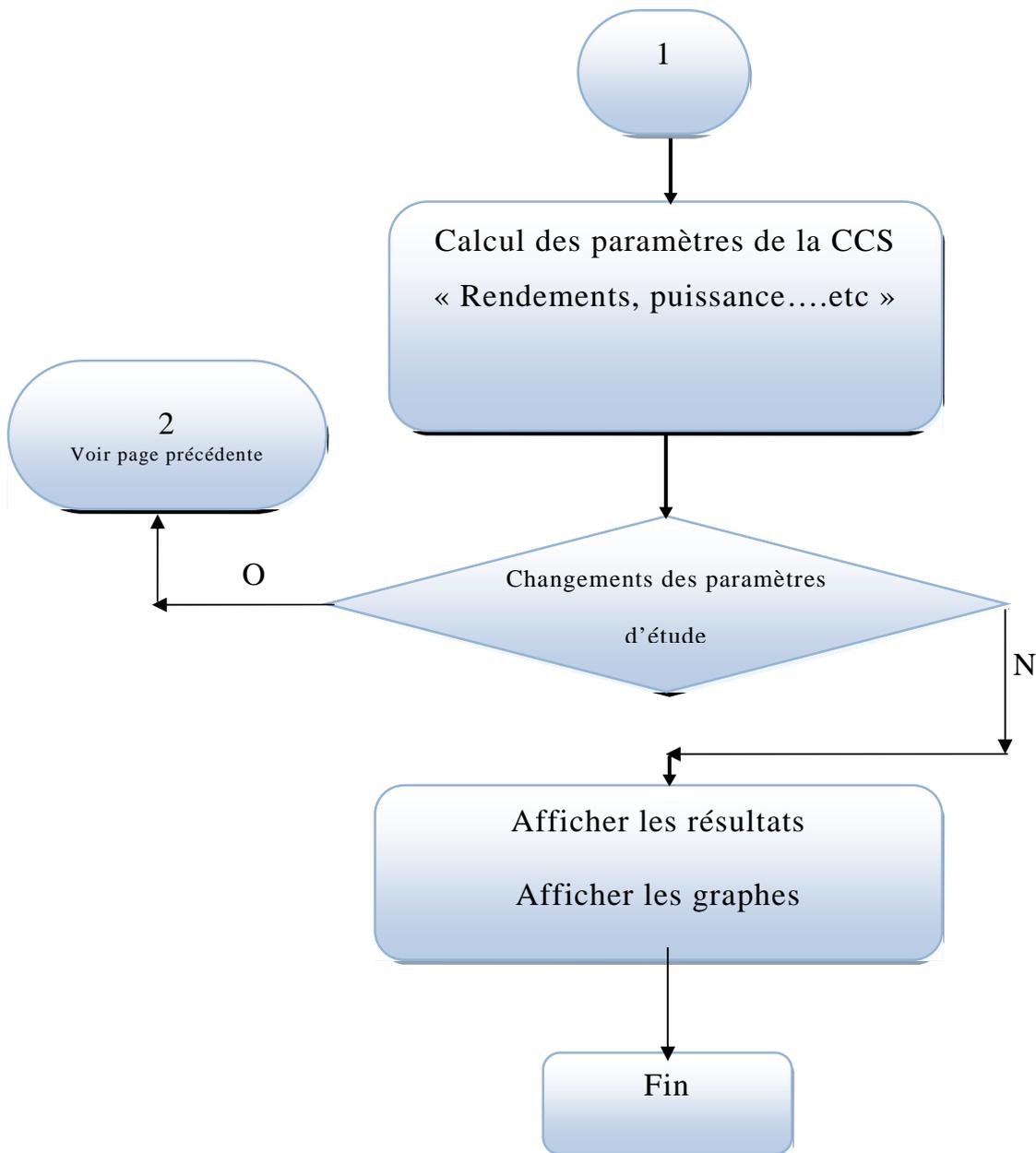
5.4 Modèle de T. Chitsomboon [56]:

Le modèle de Chitsomboon est basé essentiellement sur le développement d'une équation caractéristique de la vitesse (Cf. Chapitre IV). Cette équation est résolue numériquement avec la méthode de Newton-Raphson [56] (Voir principe organigramme V.3). Après la détermination de vitesse, tous les autres paramètres seront facilement calculables.

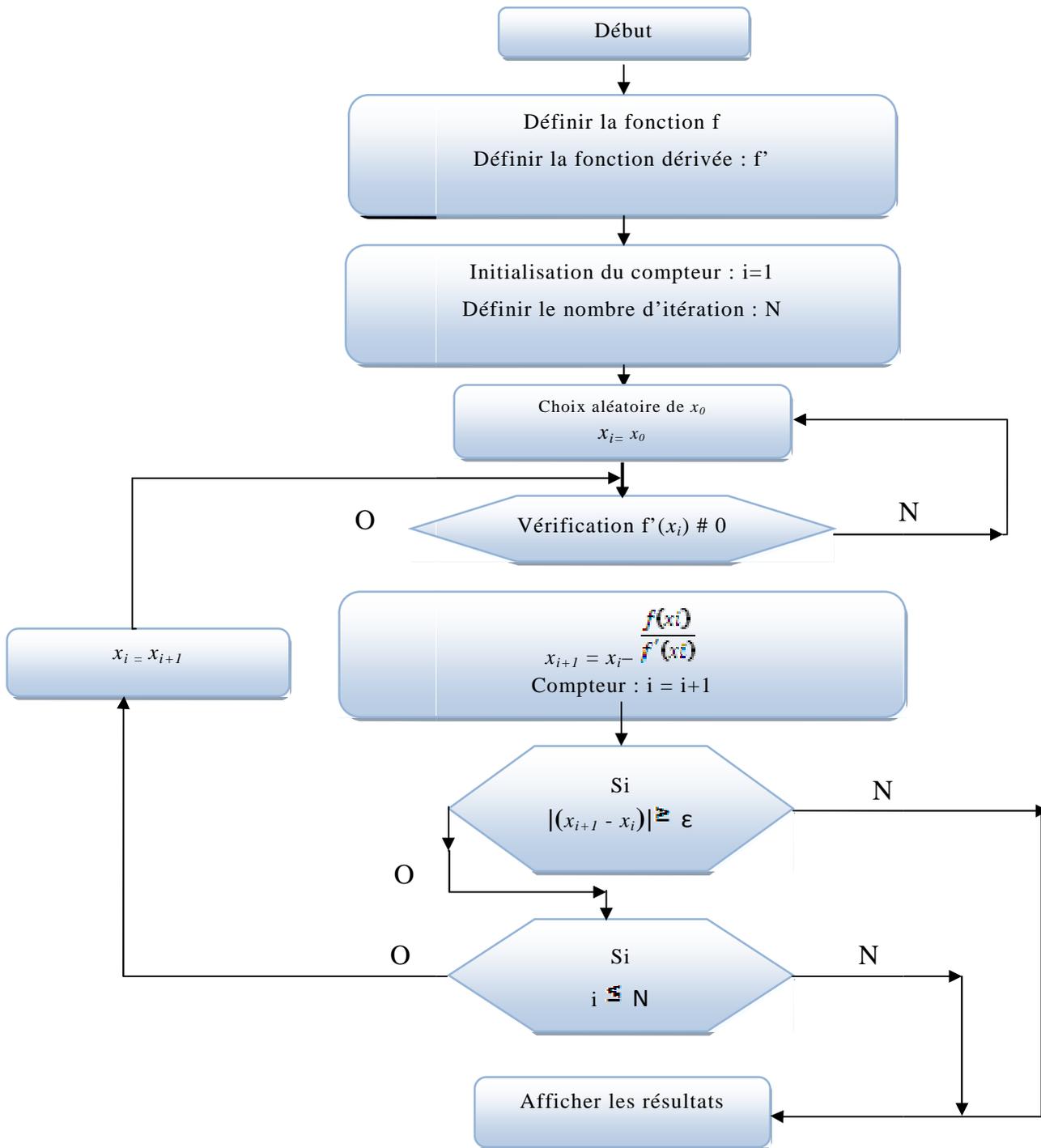


Organigramme V.1. Etape de calcul de résolution des modèles de Schlaich, de Dai, et de Ming.

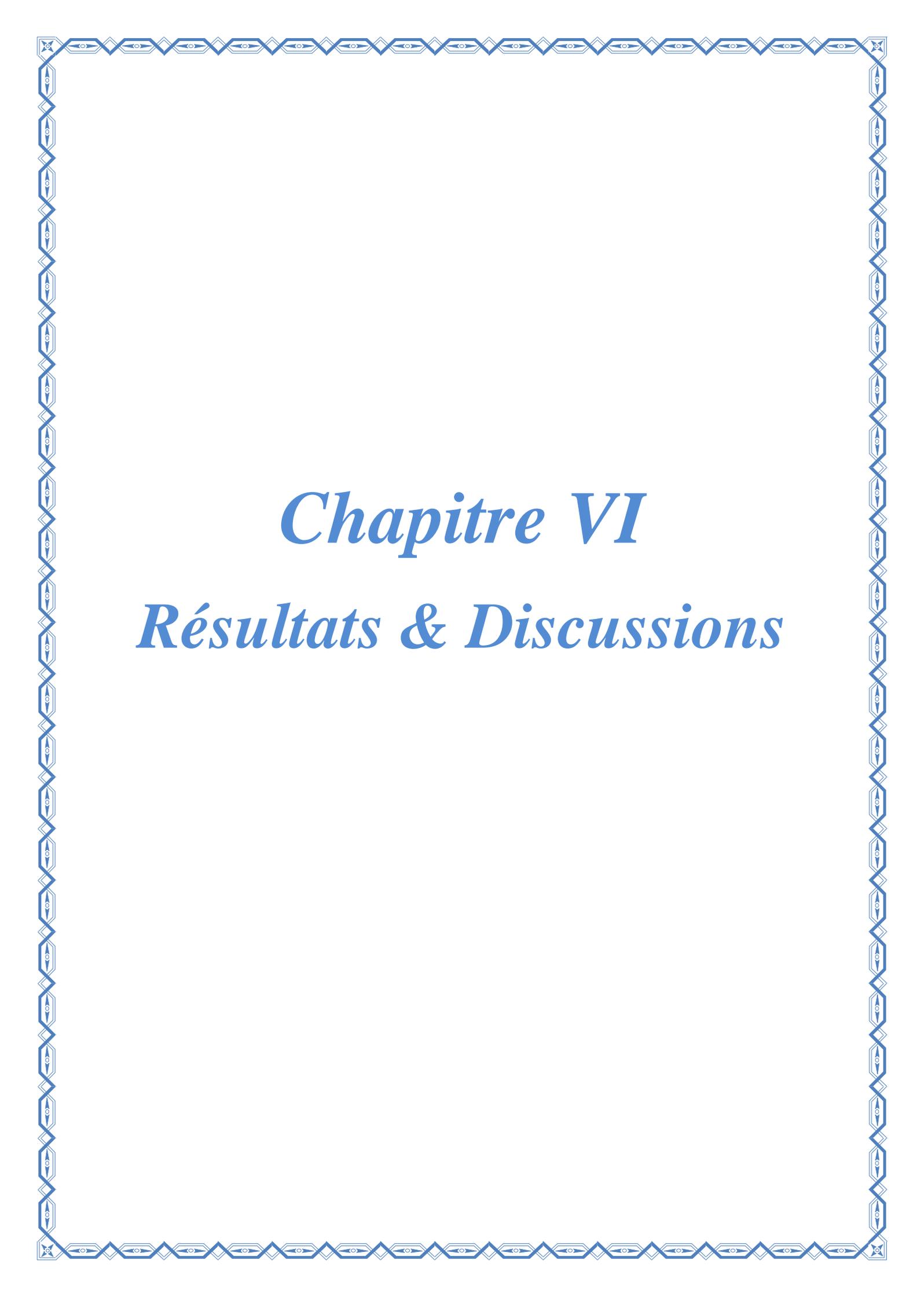




OrganigrammeV.2. Etape de calcul du programme de résolution du modèle de Gannon.



Organigramme V.3. Etape de calcul de résolution par la méthode de Newton – Raphson.



Chapitre VI

Résultats & Discussions

Résultats et discussions

6.1. Introduction

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'analyse des performances énergétiques des centrales à cheminée solaire par utilisation de six (6) modèles mathématiques issus 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 : $H_{coll} = 2\text{m}$

Rayon du collecteur : $R_{coll} = 100\text{m}$

Rayon de la cheminée : $R_{ch} = 4\text{m}$

Hauteur de la cheminée : $H_{ch} = 100$

Température ambiante : $T_0 = 20^\circ\text{C}$

Irradiation solaire: $G = 800\text{ W/m}^2$

Par souci d'alléger la rédaction, les modèles seront référencés comme suit :
Mod1 : Modèle de J. Schlaich & al. « N°1 ». Mod2 : Modèle de A. J. Gannon & al. « N°2 ». Mod3 : Modèle de Y.J Dai & al. « N°3 ». Mod4 : Modèle de M. Tingzhen & al. « N°4 ». Mod5 : Modèle de Tawit Chitsomboon « N°5 ». Mod6 : Modèle de X. Zhou & al. « N°6 ».

6.2. Influence de la variation de l'irradiation solaire G

La Figure VI.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.

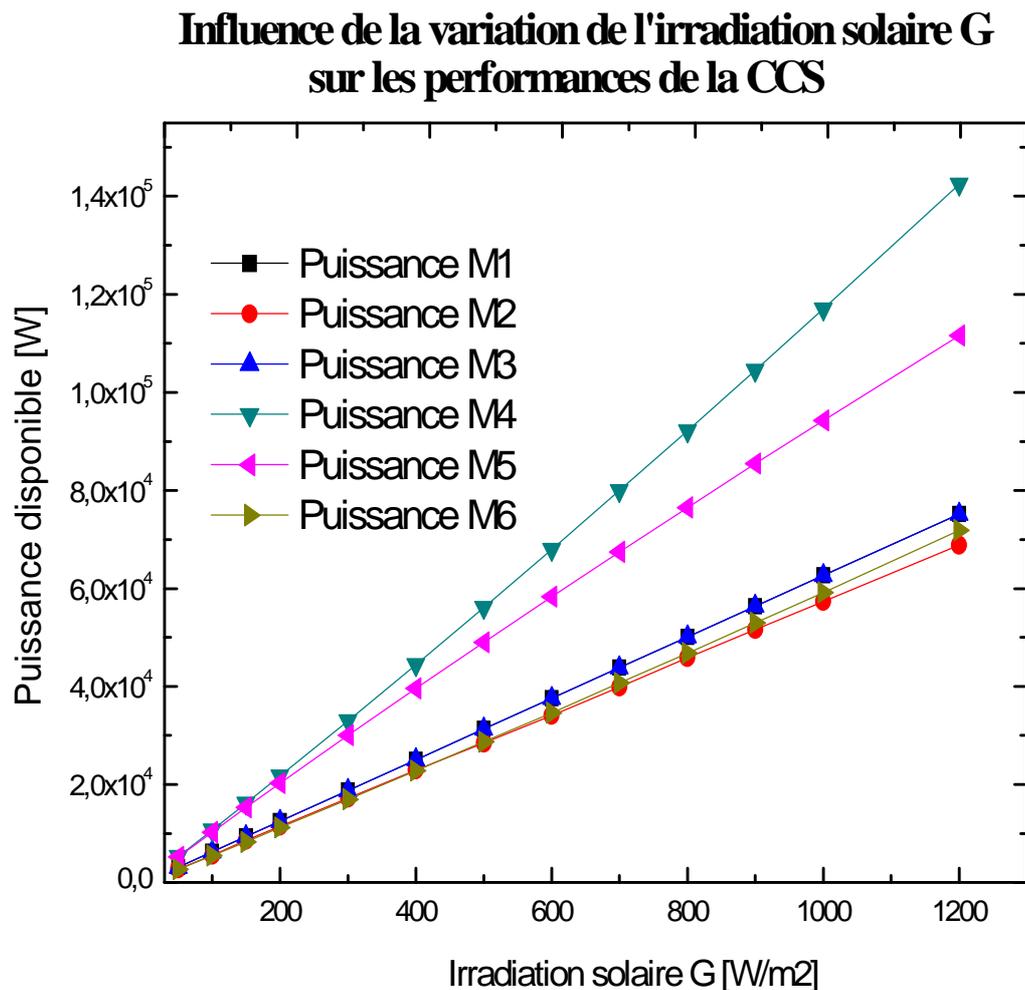


Fig. VI.1 : Influence de l'irradiation solaire sur la puissance développée par la CCS

La Figure VI.2 montre l'influence de l'irradiation solaire sur le rendement de la CCS. La plupart des modèles (M1, M2, M3 et M6) révèlent un profil plat ou légèrement variable. Pour ces modèles la fraction énergétique transformée en puissance est la même pour une dimension donnée de la CCS et ne dépend pas de

l'énergie incidente. Alors que les modèles M4 et M5 montrent une augmentation du rendement de la CCS avec l'augmentation de l'irradiation « G », donc le rendement n'est pas uniquement fonction des dimensions et du type de matériau utilisé dans la CCS, mais dépend aussi de la puissance incidente.

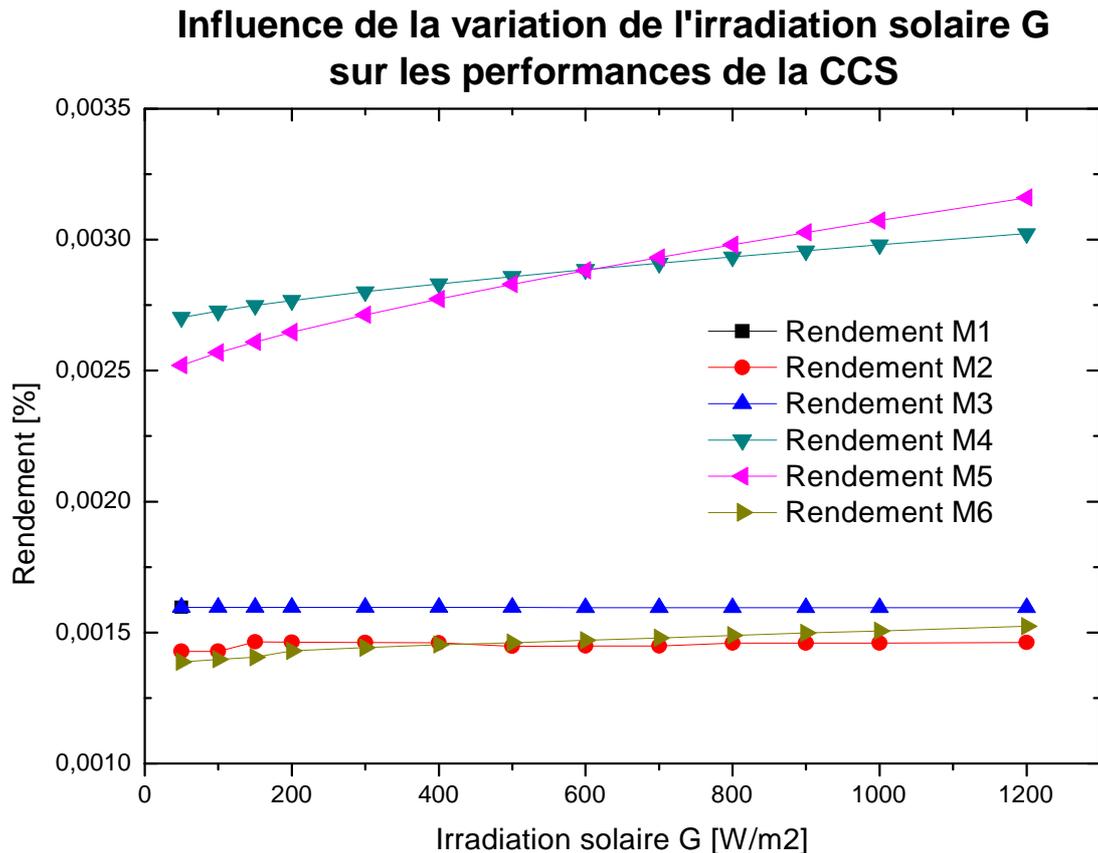


Fig. VI.2 : Influence de l'irradiation solaire sur le rendement de la CCS

6.3. Influence de la variation de la hauteur de la cheminée Hch :

Les Figures VI.3 et VI.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.

Influence de la variation de la hauteur de la cheminée sur les performances de la CCS

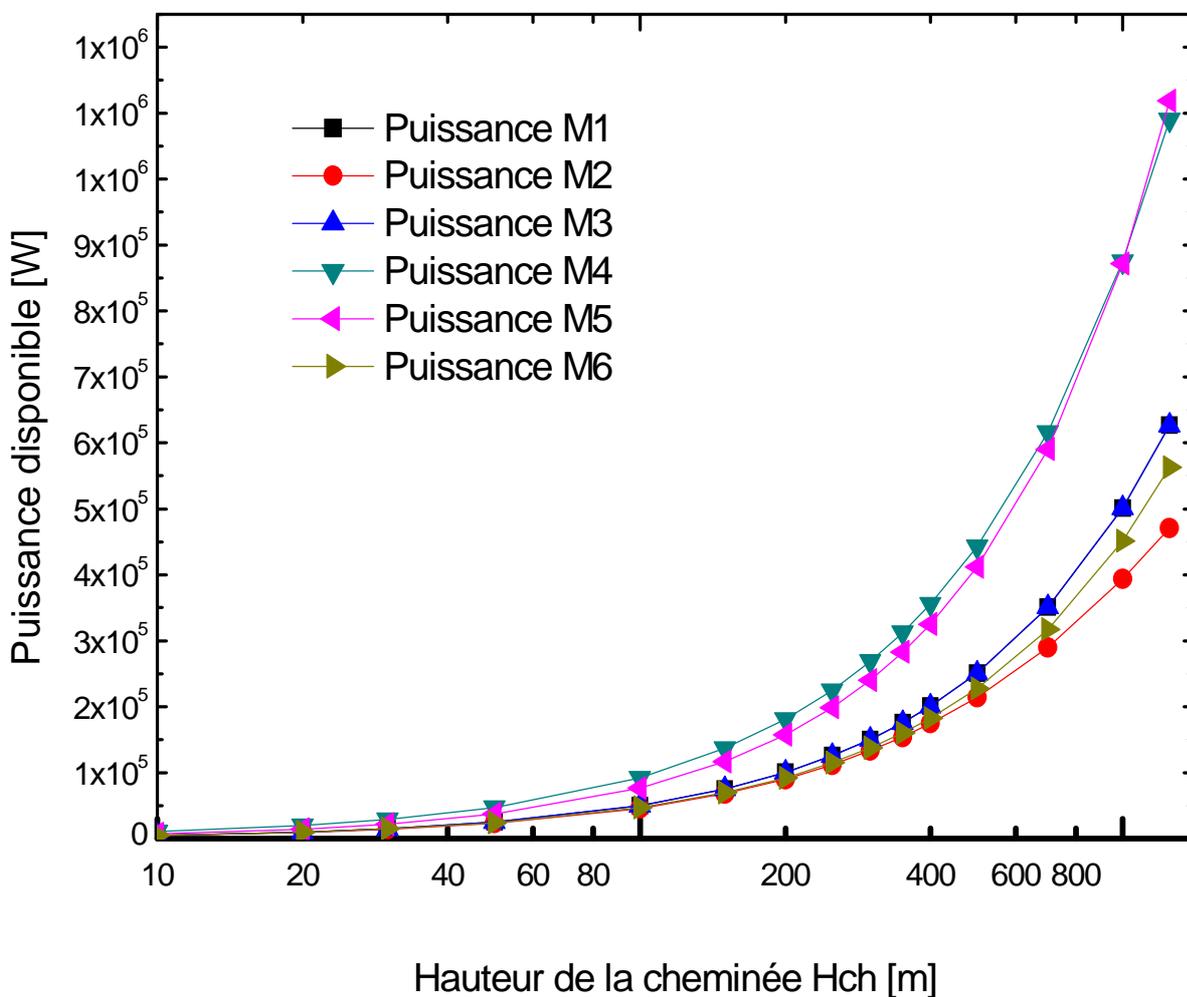


Fig. VI.3 : Influence de la hauteur de la cheminée sur la puissance disponible

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

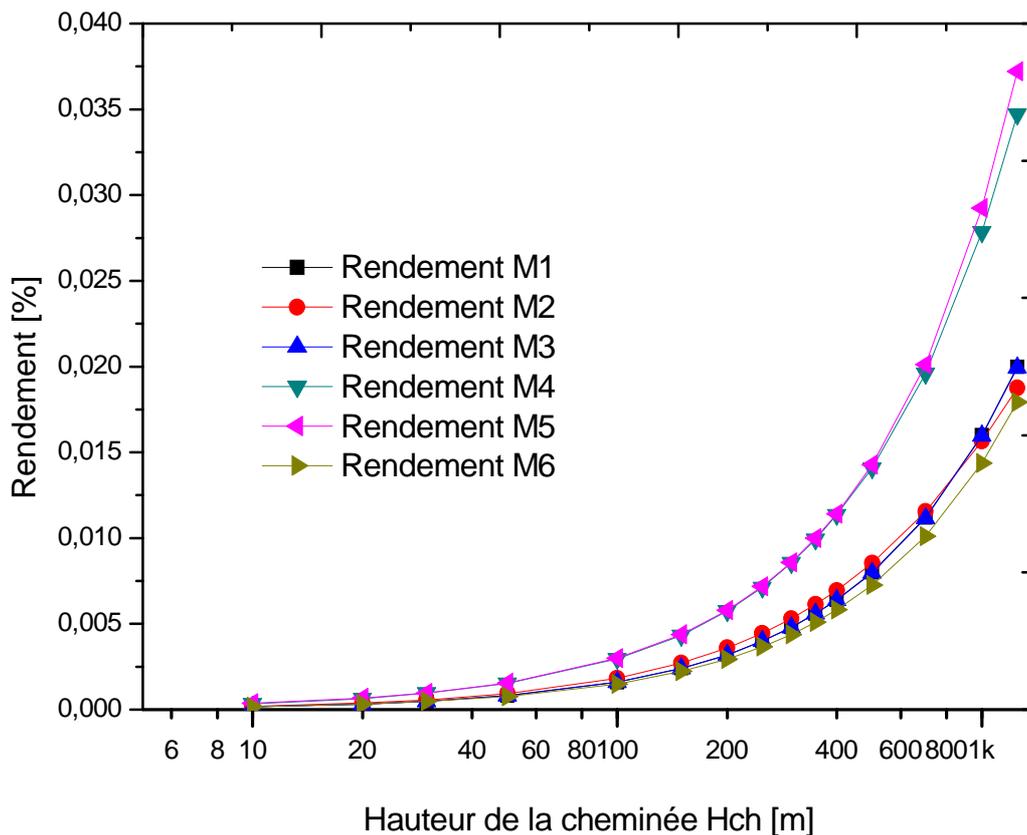


Fig. VI.4 : Influence de la hauteur de la cheminée sur le rendement de la CCS

6.4. Influence de la variation du rayon du collecteur « Rcoll » :

La variation du rayon du collecteur de 10 à 200m (Fig VI.5), montre une évolution similaire de la puissance pour les six modèles. 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.

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

Influence de la variation du Rayon du collecteur R_{coll} sur les performances de la CCS

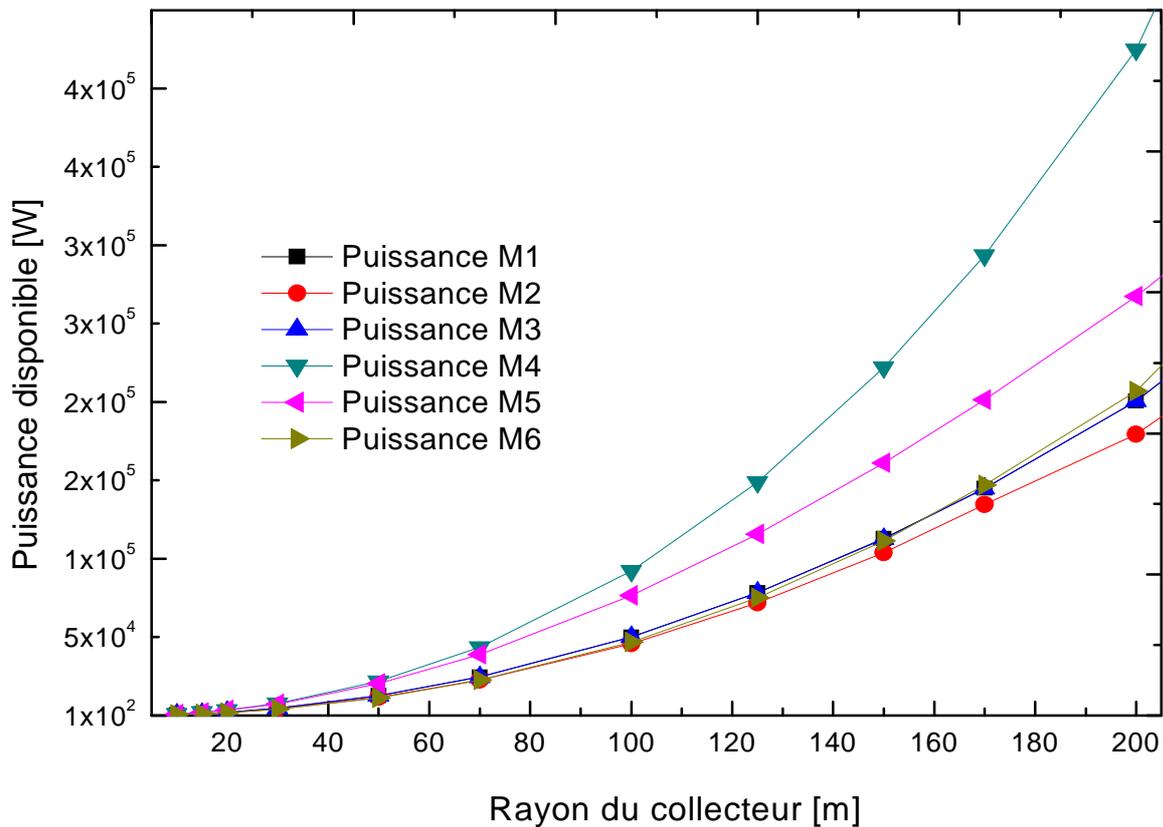


Fig. VI.5 : Influence du rayon du collecteur sur la puissance développée.

Les modèles M1 et M3 montrent des valeurs quasi statiques du rendement. La dimension du collecteur n'influe pas sur le rendement, car pour ces modèles, le rendement du collecteur dépend principalement des caractéristiques physico-thermiques des matériaux constituant celui-ci.

Le modèle M2 montre une évolution presque horizontale, elle fluctue légèrement suivant le gain de température et le bilan thermique au niveau du collecteur.

Les modèles M4 et M6 montrent une augmentation du rendement avec l'augmentation du rayon, le modèle M5 démontre une évolution inversement proportionnelle du rendement de la CCS avec le diamètre du collecteur.

L'augmentation du rayon du collecteur affecte le gain de chaleur dans ce dernier, d'où une augmentation de la température à l'entrée de la cheminée, et une réduction de sa masse volumique.

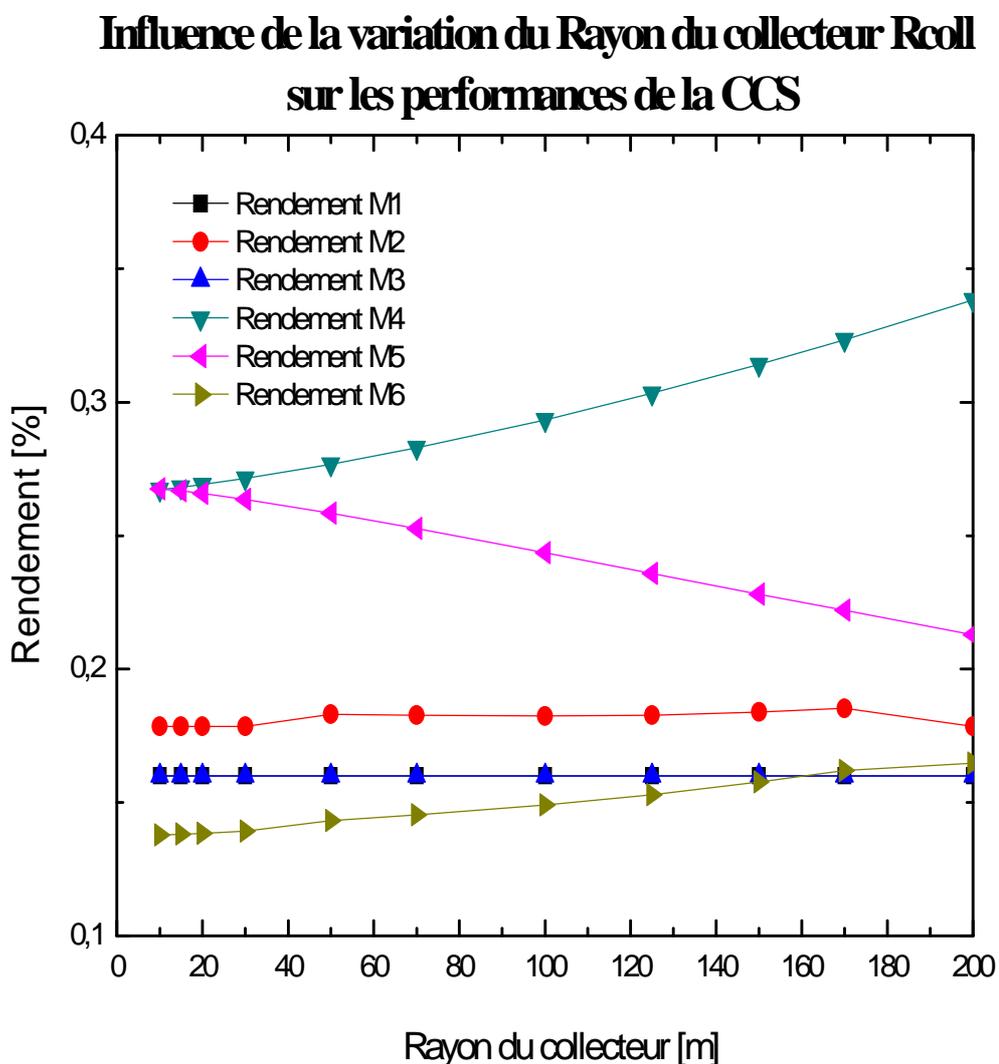


Fig. VI.6 : Influence du rayon du collecteur sur la puissance développée.

Le dénominateur de l'expression du rendement global des modèles M4 et M6 étant fonction de la masse volumique, alors que M5 est fonction de la température d'entrée cheminée, il explique l'évolution opposée du rendement entre les différentes approches.

6.5. Influence de la variation de la section de la cheminée :

La Figure VI.7 illustre l'évolution de la puissance en fonction de la section de la cheminée. Les modèles M1, M2 et M3 montrent un profil plat alors que M4 et M6 montrent une diminution de la puissance avec l'augmentation de la section cheminée. Finalement le modèle M5 démontre une évolution proportionnelle entre la section et la puissance.

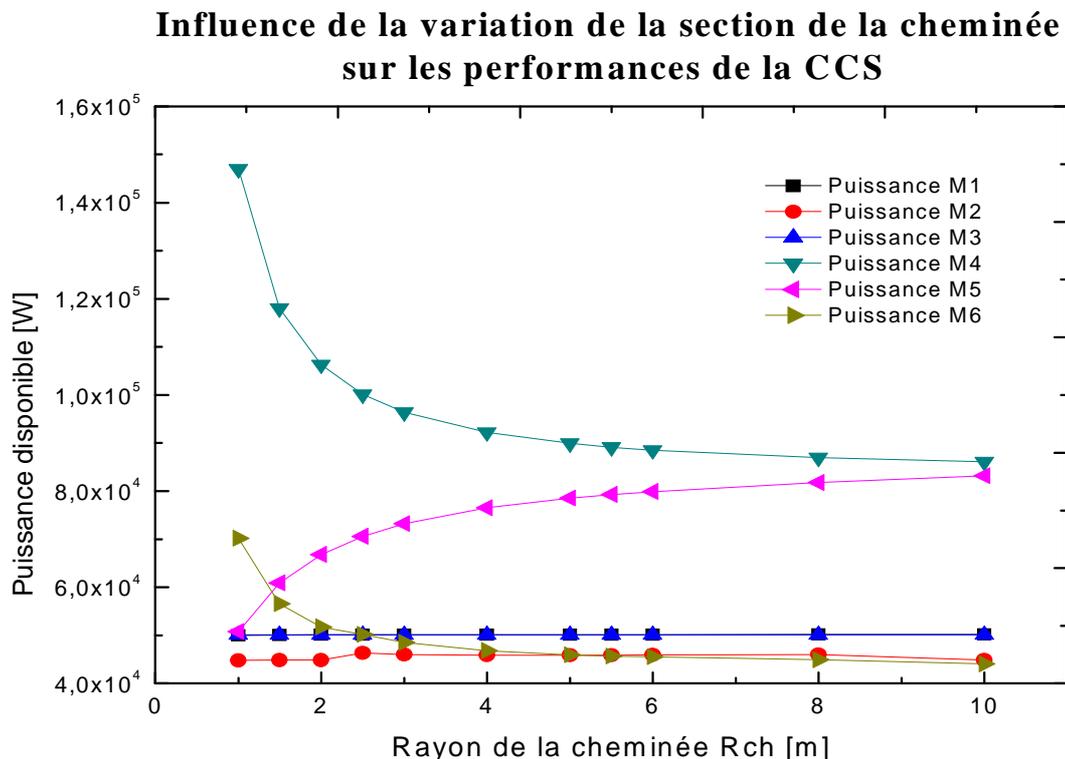


Fig. VI.7 : Influence de la section de la cheminée sur la puissance développée.

La Figure VI.8 illustre l'évolution du rendement de la CCS en fonction de la section de la cheminée. Les modèles M1, M2 et M3 montrent une évolution plate du rendement alors que les modèles M4 et M6 illustrent une réduction du rendement avec l'augmentation de la section. A l'opposé le modèle M5 décrit une évolution proportionnelle entre le rendement et Rch.

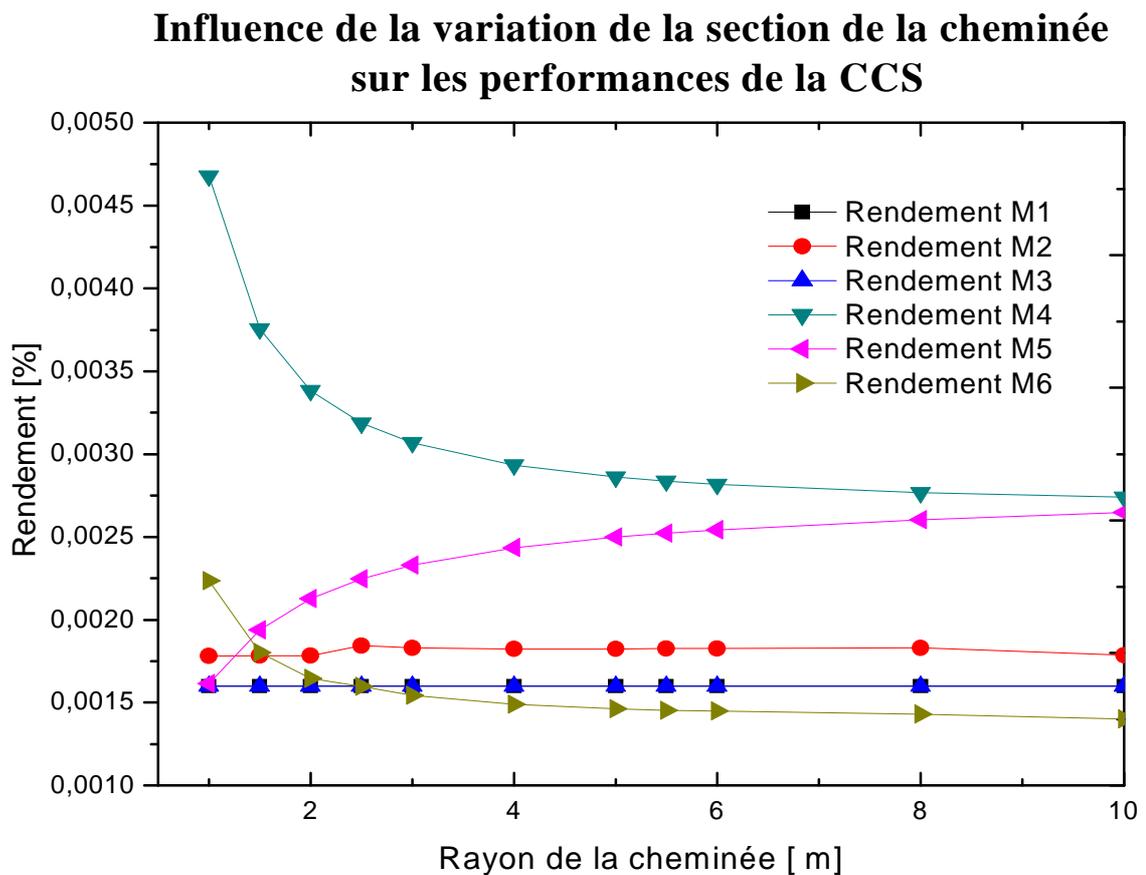


Fig. VI.8 : Influence de la section de la cheminée sur le rendement

Les modèles M4 et M5 convergent vers les mêmes valeurs pour les grandes sections de cheminée.

L'augmentation de la section de la cheminée, augmente le débit d'écoulement mais réduit le gain en chaleur, d'où une faible élévation de température à l'entrée de la cheminée et une masse volumique plus grande.

Ceci se traduit différemment suivant les paramètres prépondérants dans les différentes formulations de puissance et de rendement de chaque modèle.

6.6. Influence de la variation de la hauteur du collecteur « Hcoll » :

Influence de la variation de la hauteur du collecteur Hcoll sur les performances de la CCS

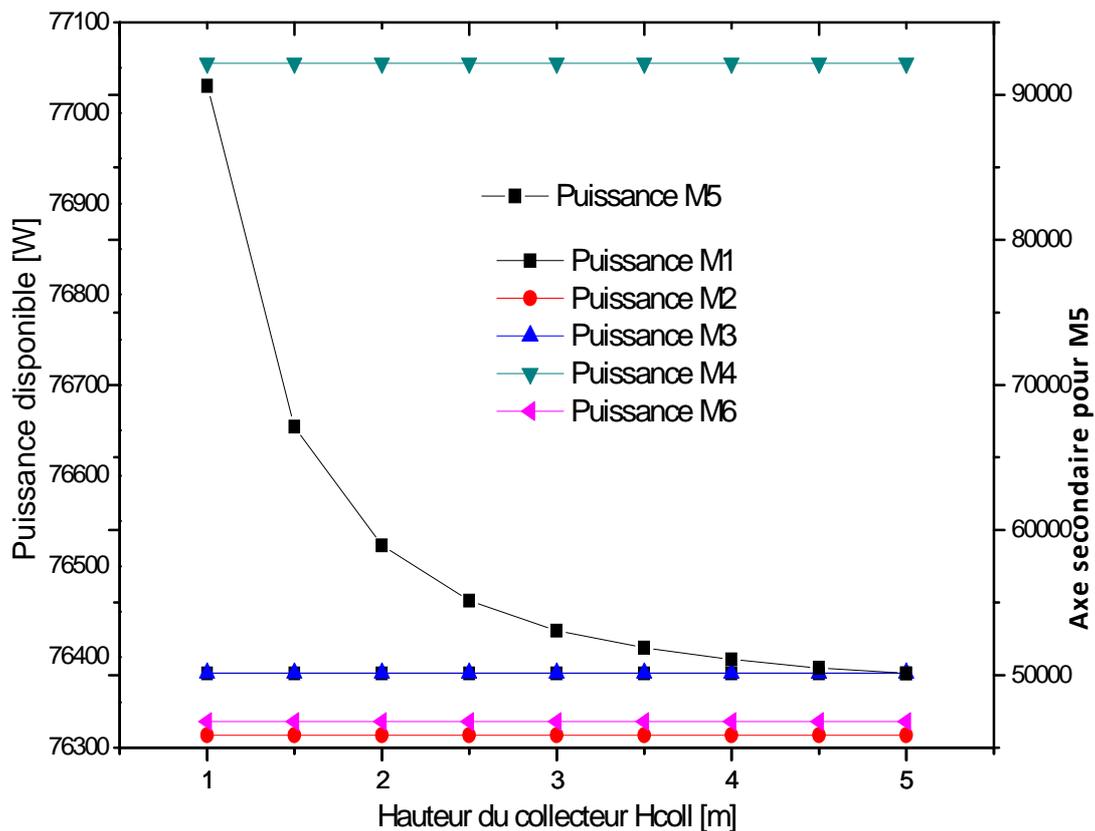


Fig. VI.9 : Influence de la hauteur du collecteur sur la puissance disponible

Les Figures VI.9 et VI.10 illustrent l'évolution de la puissance et du rendement de la CCS en fonction du collecteur. Alors que les modèles M1, M2, M3 M4 et M6 présentent des profils plats, M5 est l'unique modèle qui permet de visualiser l'évolution inversement proportionnelle de la puissance et du rendement, en fonction de la hauteur du collecteur. En effet l'expression de la puissance et du rendement de la CCS dans le modèle M5, sont explicitement exprimé en fonction de H_{coll} .

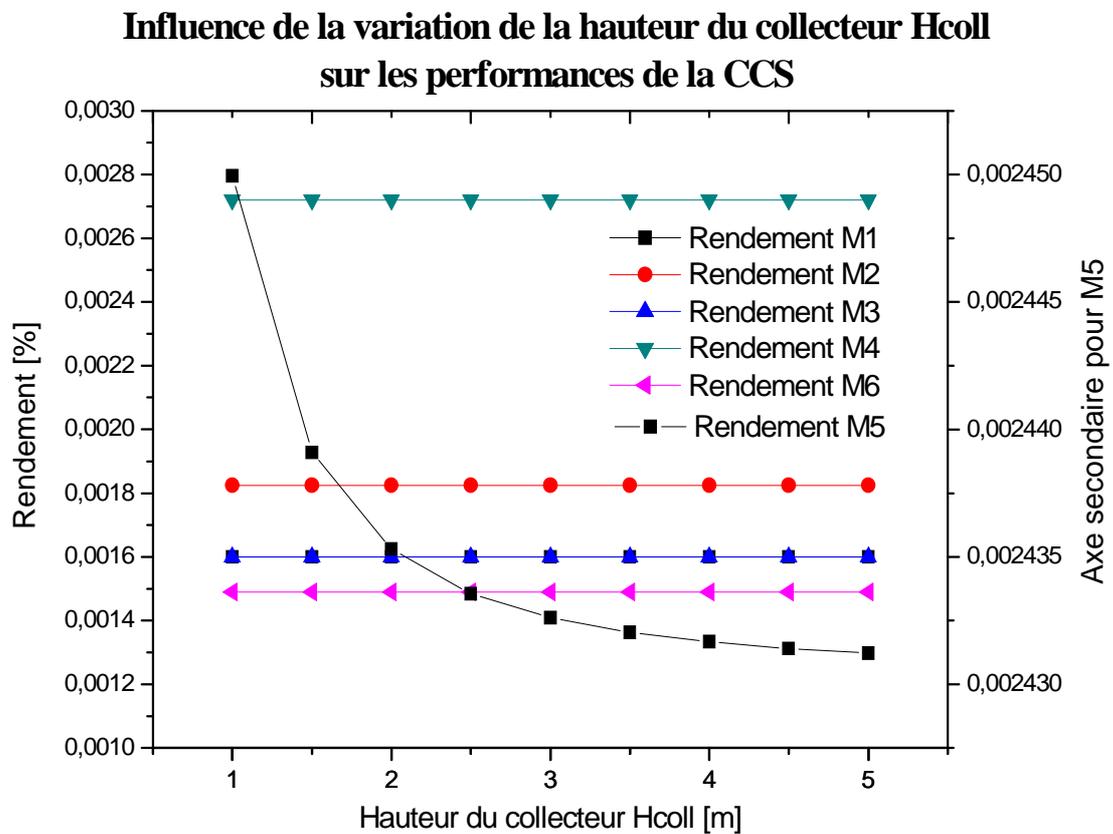


Fig. VI.10 : Influence de la hauteur du collecteur sur le rendement de la CCS.

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.

6.7. Profil de température dans le collecteur :

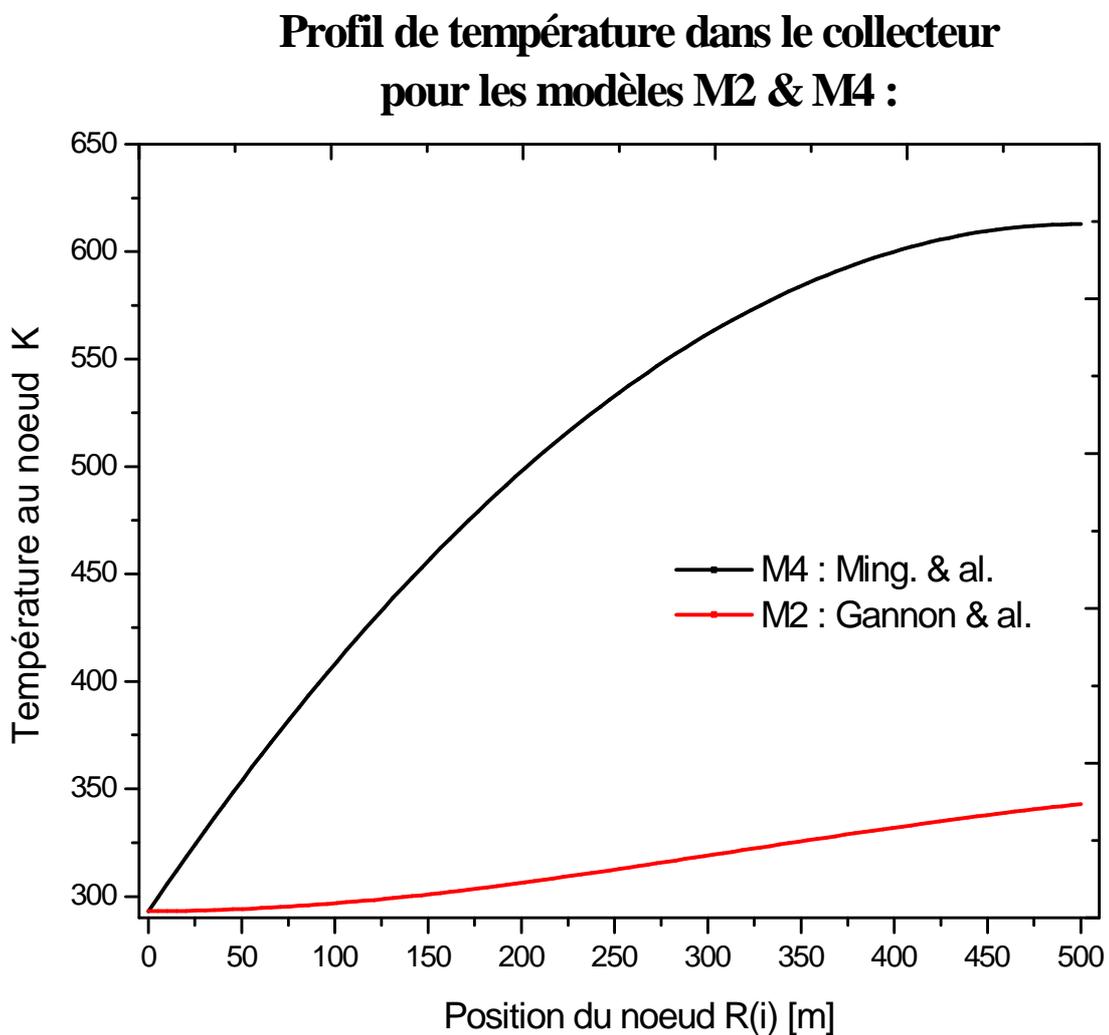


Fig. VI.11 : Profil de température dans le collecteur pour les modèles M2 & M4.

La Figure VI.11 montre l'évolution de la température dans un collecteur d'un rayon de 500m. L'évolution de température pour le modèle M4 est beaucoup plus importantes par rapport au modèle M2. En effet ne prenant pas en compte les déperditions énergétiques avec l'ambiance, ni le stockage thermique vers le sol, le modèle M4 surestime le rendement du collecteur et par conséquent le gain en température.

6.8. La hauteur maximale de la cheminée :

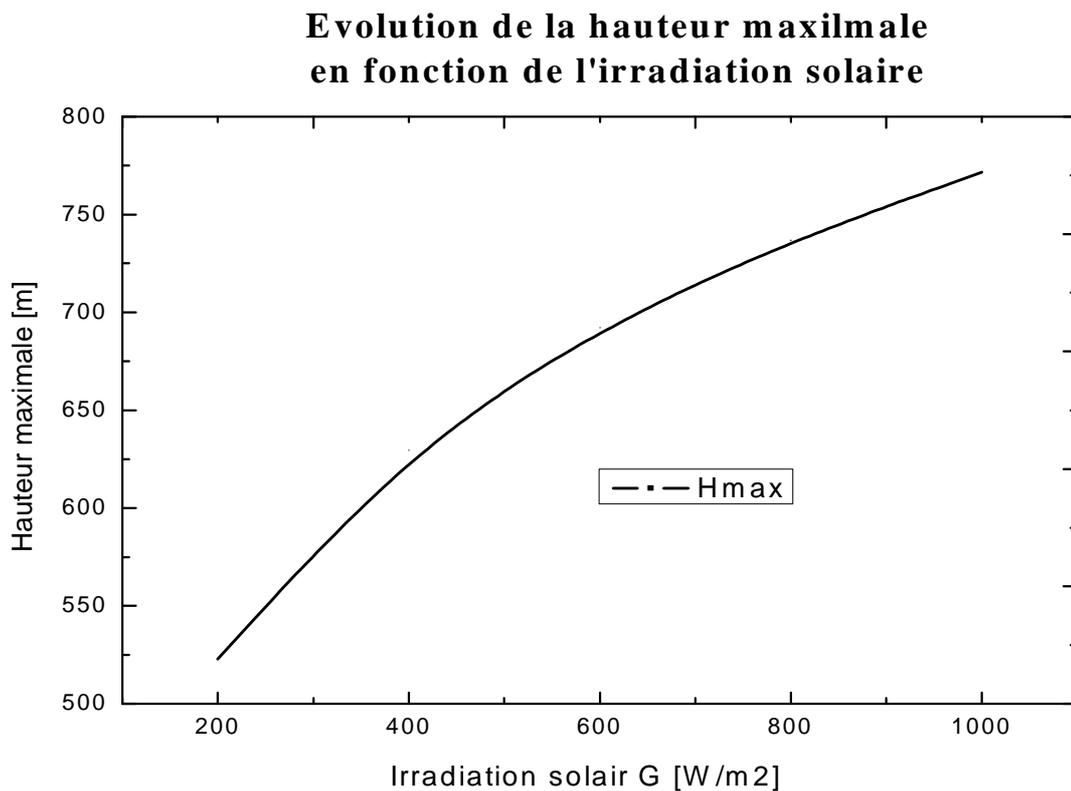


Fig. VI.12 : Profil de température dans le collecteur pour les modèles M2 & M4.

La FigureV.12 représente l'évolution de la hauteur maximale en fonction de l'irradiation solaire (modèle M6). La hauteur maximale admissible est

proportionnelle au rayonnement solaire incident. Cependant la détermination de H_{max} dépend du coefficient de transfert global « U », caractérisant les pertes thermique entre l'air dans la cheminée et l'air extérieur.

La détermination de U, dépend de la vitesse du vent à l'extérieur de la cheminée, du profil de température des parois intérieurs et extérieurs de la cheminée ainsi que des paramètres physiques de l'air, telle que la masse volumique et la viscosité, ne pouvant être considérées constants pour des hauteurs importantes.

6.9. Variation de la puissance en fonction de paramètres caractéristiques de la CCS :

Les Figures VI.13 et VI.14 montrent la variation de la puissance développée avec le diamètre du collecteur et la hauteur de la cheminée d'une part, et l'intensité de l'irradiation solaire et la température ambiante d'une autre part.

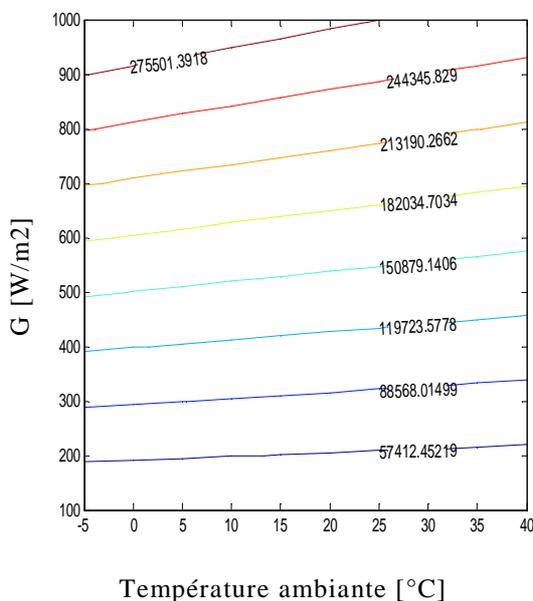


Fig. V.13 : Puissance développée versus irradiation solaire et température ambiante.

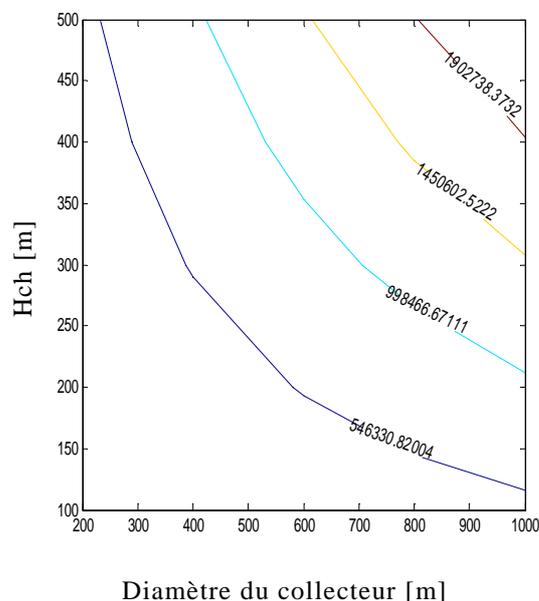


Fig.VI.14 : Puissance développée versus hauteur de la cheminée et diamètre du collecteur.

La puissance développée augmente considérablement avec l'augmentation de la hauteur de la cheminée « Hch », la surface du collecteur « Acoll » et l'intensité de l'irradiation solaire « G ». L'influence de l'élévation de la température ambiante est beaucoup moins intense.

Ces résultats confirment que Hch, Acoll et G sont des paramètres prépondérants dans le dimensionnement des centrales à cheminée solaire CCS.

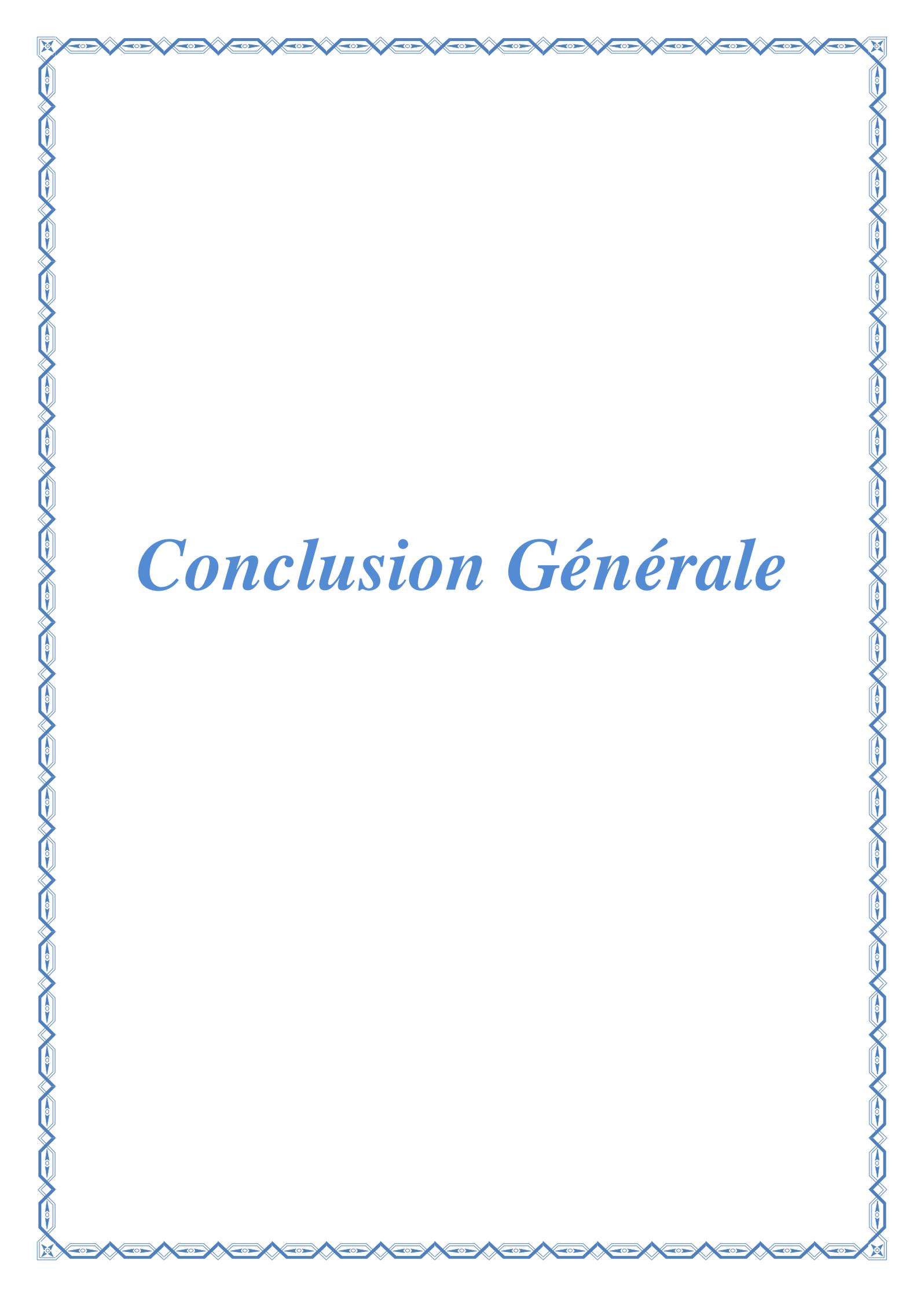
6.10. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats obtenus, suite au développement et résolution de 6 modèles, présentés dans la littérature et validés par leurs hauteurs. Ce qui nous a permis de visualiser l'évolution de la puissance et du rendement, en fonction de paramètres caractéristiques de la CCS. Cependant, certaines tendances sont parfois opposées suivant le modèle, ces différences sont dues aux hypothèses adoptées pour chaque modèle et à l'approche de résolutions.

Les résultats ont révélé aussi 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. Ces déperditions sont proportionnelles à la dimension du collecteur et influent sur le gain en température.

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

Finalement, la puissance développée est fortement dépendante de la hauteur de la cheminée Hch, du rayon du collecteur Rcoll, de l'irradiation solaire G et d'une manière moindre de la température atmosphérique, et de la hauteur du collecteur.



Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire est relatif à l'analyse des performances énergétiques des centrales à cheminée solaire par utilisation de différents modèles mathématiques issus de la littérature. Les résultats obtenus sont relatifs à la détermination des rendements et des puissances développés au sein des centrales à cheminée solaire ainsi que leur évolution en fonction des variations de certains paramètres caractéristiques. L'analyse des résultats ainsi obtenus à partir de ces modèles et des différents programmes de résolution, nous a permis de conclure :

- Que le modèle de base développé par J. Schlaich & al. donne les limites des performances des CCS pour un cycle parfait. En effet la vitesse maximale est limitée par la hauteur de la cheminée, la température ambiante et le gain en température dans le collecteur. Il a été démontré aussi que la puissance optimale est égale au $2/3$ de la puissance disponible, le $1/3$ restant étant indispensable pour vaincre les forces gravitationnelles à l'intérieur de la cheminée et permettre l'ascension de l'air jusqu'à la sortie du système.

- L'approche de A. J. Gannon & al. intègre dans les pertes énergétiques par frottement dans la cheminée ainsi que les pertes cinétiques à la sortie en adoptant moins d'hypothèses simplificatrices ;

- Dans l'approche de Y.J Dai & al, l'ordre de grandeur de la chaleur transmise à l'air et la température entrée cheminée sont du même ordre que celui du 1^{er} modèle. Les résultats sont similaires à ceux de Schlaich, néanmoins il présente une approche simple permettant l'étude de faisabilité ;

-Le modèle de M. Tingzhen & al. a démontré que la puissance et le rendement de la CCS étaient aussi fonction de la masse volumique du fluide à l'entrée et à

la sortie du collecteur. Cependant les hypothèses admises pour la modélisation du collecteur surestiment le gain en température.

- Le modèle de Chitsomboon a synthétisé les phénomènes de transfert en une seule équation permettant après intégration et réarrangement d'écrire une relation cubique de la vitesse. Il a permis d'expliciter le rendement et la puissance développée en fonction de la hauteur du collecteur et la section de la cheminée. C'est le seul modèle permettant l'étude de l'influence de H_{coll} sur les performances de la CCS. Cependant le fait d'admettre que la masse volumique de l'air reste constante, néglige l'effet de flottabilité dû à la convection naturelle ;

- Le Modèle de X. Zhou & al. intègre les pertes par frottement et les pertes singulières à l'entrée et à la sortie de la cheminée. En adoptant une corrélation décrivant la chute de température en fonction de la hauteur, tout en considérant les pertes thermiques dans la cheminée, le modèle a permis de définir une contrainte physique limitant la hauteur maximale de la cheminée. Cependant le taux de baisse de température vs l'altitude diffère d'un site à un autre. Dans le cas

où ce taux est égal à $\gamma_{\infty} = \frac{g}{c_p}$, ou dans le cas où la cheminée est considérée comme adiabatique la hauteur maximale de la cheminée devient infinie, donc sans aucune limitation physique.

Afin de compléter ce travail, nous pensons que cette étude devrait être poursuivie par d'autres études complémentaires, en particulier l'étude expérimentale de l'influence de la variation du diamètre de la cheminée sur les performances des CCS. En effet, l'impact de la variation du diamètre de la cheminée sur le fonctionnement de la CCS est complexe : L'augmentation du diamètre de la cheminée causera une augmentation du débit massique et que l'augmentation de la masse volumique réduira la force motrice.

Finalement le tableau ci-dessous résume les points fort et point faible des différents modèles traités.

Tableau. VI.1.Tableau comparatif des différents modèles utilisés.

Modèles	Points forts	Points faibles
Mod1 : Modèle de J. Schlaich& al.	Permet de déterminer les limites de puissance et de rendement pour un cycle parfait.	Approche du collecteur très simpliste.
Mod2 : Modèle de A. J. Gannon& al.	Permet une étude du cycle réel. Une approche détaillée du collecteur, englobant les pertes par convections et par conductions.	La résolution nécessite l'implication de méthodes CFD.
Mod3 : Modèle de Y.J Dai& al.	Amélioration du modèle 1 par une meilleure approche du collecteur.	L'approche du collecteur similaire à l'étude de capteur plan nécessite la connaissance des facteurs caractéristiques de ce dernier.
Mod4 : Modèle de M. Tingzhen& al.	Détermine l'impact de la différence de densité de l'air à l'entrée et sortie du collecteur sur la puissance et le rendement.	Suppose un profil parabolique de la température du collecteur et en conséquence surestime le gain en chaleur.
Mod5 : Modèle de TawitChitsomboon	Permet l'étude de l'impact de la hauteur du collecteur sur les performances de la CCS.	Sous-estime l'impact de la différence de densité dans le collecteur.
Mod6 : Modèle de X. Zhou & al.	Permet la détermination de la hauteur maximale admissible de la cheminée.	Basé sur des formulations empiriques,reste donc limité.



Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1]. Sheldon J., Ripples from the Gulf of Mexico, *International Energy Law Review*, Vol. 1, pp. 12- 18, 2011.
- [2]. <http://dissertationsenligne.com/Sciences-et-Technologies/Les-%C3%89nergies-DHier-Et-De/29118.html>
- [3]. Foster R., Ghassemi M., Cota A., *Solar Energy, Renewable Energy and the Environment*, Taylor and Francis Group Edition, New York, USA, 2009.
- [4]. Schlaich, J., *The Solar Chimney*, Axel Menges Edition, Stuttgart, Germany, 1995.
- [5]. Schlaich, J. And Schiel, W., *Solar Chimneys. Encyclopedia of Physical Science and Technology*, pp.99-109, 2004.
- [6]. 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.
- [7]. Haaf, W, Friedrich, K., Mayr, G., Schlaich, J., *Solar chimneys, part I: principle and construction of the pilot plant in Manzanares. Int. J. Solar Energy*, Vol. 2, pp.3–20, 1983.
- [8]. Haaf, W., *Solar chimneys, part II: preliminary test results from the Manzanares pilot plant. Int. J. Solar Energy*, Vol.2, pp.141–161 1984.
- [9]. Mullet, L.B., *The solar chimney overall efficiency, design and performance. Int. J. Ambient Energy*, Vol. 8, pp.35–40, 1987.
- [10]. Padki, M.M., Sherif, S.A., *Solar chimney for medium-to large scale power generation. In: Proceedings of the Manila International Symposium on the Development and Management of Energy Resources, Manila, Philippines, 1989.*
- [11]. Padki, M.M., Sherif, S.A., *Solar chimney for power generation in rural areas. Seminar on Energy Conservation and Generation Through Renewable Resources, Ranchi, India, 1989.*
- [12]. Padki, M.M., Sherif, S.A., *A mathematical model for solar chimneys. In: Proceedings of International Renewable Energy Conference, Amman, Jordan, 1992.*
- [13]. Padki, M. M., Sherif, S. A., *On a Simple Analytical Model for Solar Chimneys. Int. J. Energy Res.*, Vol. 23, pp. 345-349, 1999.

- [14]. Yan, M.Q., Sherif, S.A., Kridli, G.T., Lee, S.S. and Padki, M.M., Thermo-fluid analysis of solar chimneys. In *Industrial Applications of Fluid Mechanics*, FED, ASME, 1991.
- [15]. Kreetz H. Theoretische Untersuchungen und Auslegung eines temporären Wasserspeichers für das Aufwindkraftwerk. Diplomarbeit. Berlin: Energie und Verfahrenstechnik der TU Berlin, 1997.
- [16]. Pasumarthi, N., Sherif, S. A., Experimental and Theoretical Performance of a Demonstration Solar Chimney Model –Part I: Mathematical Model Development. *Int. J. Energy Res.*, Vol. 22, pp. 277- 288, 1998.
- [17]. Pasumarthi, N., Sherif, S. A., Experimental and Theoretical Performance of a Demonstration Solar Chimney Model –Part II: Experimental and theoretical results and economic analysis. *Int. J. Energy Res.*, Vol. 22, pp.443-461, 1998.
- [18]. Pasumarthi, N., Sherif, S.A., Performance of a demonstration solar chimney model for power generation. In: *Proceedings of the 35th Heat Transfer and Fluid Mechanics*, Sacramento, USA, Juin 1997
- [19]. Bernardes, M.A.D.S., Valle, R.M., Cortez, M.F.-B., Numerical analysis of natural laminar convection in a radial solar heater. *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 38, pp.42–50, 1999.
- [20]. Bernardes M.A. dos S., Weinrebe, A. Voß G., Thermal and technical analyses of solar chimneys, *Solar Energy*, Vol. 75, pp. 511–524, 2003.
- [21]. 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.
- [22]. 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.
- [23]. Gannon A.J, Von Backström T.W., Solar chimney turbine part 1 of 2: design. In: *International solar energy conference*, Houston, USA, 2002.
- [24]. Dai, Y. J., Huang, H. B., Wang, R. Z., Case study of Solar Chimney Power Plants in Northwestern Regions of China. *Renewable Energy*, Vol. 28, pp.1295-1304, 2003.
- [25]. Pastohr H., Kornadt, O., Gürlebeck, K., Numerical and analytical calculations of the temperature and flow field in the upwind power plant. *Int. J. Energy Res.*, Vol. 28, pp. 495–510 2004.

- [26]. T. Ming, Liu W., Xu G., Analytical and numerical investigation of the solar chimney power plant systems. *Int. J. Energy Res.* Vol. 30, pp. 861–873, 2006.
- [27]. Ninic N., Available energy of the air in solar chimneys and the possibility of its ground-level concentration. *Solar Energy*, Vol. 80, pp. 804–811, 2006.
- [28]. Pretorius J.P., Optimization and control of a large-scale solar chimney power plant. Ph.D. Thesis, University of Stellenbosch. South Africa, 2007.
- [29]. Pretorius J.P., Kröger D.G., Solar chimney power plant performance. *J. Solar Energy Eng.*, Vol. 128, pp. 302–311, 2006.
- [30]. Pretorius, J.P., Kröger, D.G., Critical evaluation of solar chimney power plant performance. *Solar Energy*, Vol.80, pp. 535–544, 2006.
- [31]. Pretorius, J.P., Kröger, D.G., Buys, J.D., Von Backström, T.W., Solar tower power plant performance characteristics. In: *Proceedings of the ISES EuroSun2004 International Sonnenforum 1*, Freiburg, Germany, 2004.
- [32]. Kulunk H., A prototype solar convection chimney operated under Izmit conditions. In: *Proceedings of the 7th Miami international conference on alternative energy sources*, 1985.
- [33]. Sherif S. A, Pasumarthi N, Harker R.A, Brinen G.H., Performance of a demonstration solar chimney model for power generation. Final technical Report No. UFME/SEECL-9507, Solar Energy and Energy Conversion Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of Florida, December 1995
- [34]. Schlaich J., Bergemann R., Schiel W., Weinrebe G., Design of commercial solar updraft tower systems—utilization of solar induced convective flows for power generation. *J Solar Energy Eng*, Vol.127, pp.117–124, 2007.
- [35]. Davey R.C., Device for generating electricity from solar power. WO 2008/022372 A1, February 2008.
- [36]. Chergui T., Larbi S., Bouhdjar A., Thermo-hydrodynamic aspect analysis of flows in solar chimney power plants-A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, pp.1410–1418, 2010.
- [37]. Larbi S., Bouhdjar A., Chergui C., Performance analysis of a solar chimney power plant in the southwestern region of Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.14, 470–477, 2010.

- [38]. Petela R., Thermodynamic study of a simplified model of the solar chimney power plant. *Solar Energy*, Vol. 83, pp. 94–107, 2009.
- [39]. Zhou X., Yang J., Xiao B., Hou G., Xing F., Analysis of chimney height for solar chimney power plant. *Appl Therm Eng*, Vol. 29, pp. 178- 185, 2009.
- [40]. Zhou X., Wang F., Fan J., Ochieng R. M., Performance of solar chimney power plant in Qinghai-Tibet Plateau. *Renew Sustain Energy Rev*, Vol. 14, pp. 2249- 2255 2010.
- [41]. Koonsrisuk A., Lorente S., Bejan A., Constructal solar chimney configuration. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp.327–333, 2010.
- [42]. Krisst R.J.K. Energy transfer system. *Alternat. Sources Energy*, Vol. 63, pp.8–11, 1983.
- [43]. Koyun A, Üçgül, Acar M, Senol R. Günes, Bacası Sisteminin Termal Özet Dizaynı. *Tesisat Mühendisliği Dergisi* 2007;98:45-50. available at: <http://www.mmoistanbul.org/yayin/tesisat/98/6>
- [44]. Zhou X.P., Yang J.K., Xiao B., Hou G.X., Experimental study of the temperature field in a solar chimney power setup. *Appl Therm Eng*, Vol. 27, pp. 2044-2050, 2007.
- [45]. Ketlogetswe C, Fiszdon J.K, Seabe O.O., Solar chimney power generation project—the case for Botswana. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, pp. 2005- 2012, 2008.
- [46]. Ferreira A.G, Maia C.B, Cortez M.F.B, Valle R.M., Technical feasibility assessment of a solar chimney for food drying. *Solar Energy*, Vol. 82, pp. 198-205, 2008.
- [47]. Golder K., Combined solar pond and solar chimney. Final year Mechanical Engineering Project. School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering, Bundoora Campus, RMIT University, Melbourne, Australia; 2003.
- [48]. Maia C.B, Ferreira A.G, Valle R.M, Cortez M.F.B., Analysis of the airflow in a prototype of a solar chimney dryer. *Heat Transfer Eng.*, Vol. 30, pp. 393- 399, 2009.
- [49]. Stern N., *The economics of climate change: the Stern Review*. Cambridge, Cambridge University Press Edition, 2007.
- [50]. Denantes F., Bilgen E., Counter-rotating turbines for solar chimney power plants. *Renewable Energy*, Vol. 31, pp. 873–891, 2006.

- [51]. Zhou X.P., Yang J.K., Xiao B., Hou G.X., Simulation of a pilot solar chimney power equipment. *Renewable Energy*, Vol. 32, pp. 1637- 1644, 2007.
- [52]. 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, pp.25-30, 2008.
- [53]. 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, p. 1345–1359, 2009.
- [54]. Manfred H., Stark T., Manfred F., Zeumer M., *Construction et énergie: Architecture et développement durable*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2006.
- [55]. http://www.gov.cn/english/2010-12/28/content_1773883.htm
- [56]. Chitsomboon, T., A validated analytical model for flow in solar chimney. *International Journal of Renewable Energy Engineering*, Vol. 3, pp.339-346, 2001.
- [57]. Lomax H., Pulliam T., Zingg D., *Fundamentals of computational fluid Dynamics*, Springer Verlag Edition, 2001.
- [58]. Wendt J. F., *Computational Fluid Dynamics*, Springer Verlag Edition, 2009.
- [59]. Mathews J. H., Fink K. D., *Numerical Methods Using Matlab*, Prentice Hall Edition, 1999.