

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



Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Installations Energétiques et Turbomachines

THEME

Analyse des Performances Energétiques des centrales Cheminées Solaires par
utilisation de deux Modèles Mathématiques.

Présenté par :

MOHANDI SAMY

SAHEL FAWZI DJALLIL

Encadreur :

Mr BOUALLEG SALIM Mekki

Promoteur :

Mme M. GUEMMADI

Promotion 2020- 2021

ملخص:

تتمثل هذه الطروحة في محاولة تحليل أداء محطات لما يسمى بالمداخن الشمسية لتوليد الطاقة من خلال تطوير نماذجين مختلفين نموذج *Schlaich et al* و نموذج *L.B Mullett* الدراسة التحليلية للنتائج المحصل عليها و المقارنة بين هذه النماذج النظرية المختلفة مكن بالتنبؤ على أفضل أداء هذه المحطات، كما سمح دراسة الخصائص الطاقوية للنظام ، مردوبيته والاستطاعة المنتجة. كما سمح بدراسة تأثير بعض العوامل الهندسية والفيزيائية كارتفاع المدخنة و الإتساع الشمسي على الأداء الطاقوي و الديناميكي لما يسمى بالمداخن الشمسية.

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

Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire est relatif à une analyse des performances énergétiques des centrales cheminées solaires (CCS) par utilisation de deux différents modèles mathématiques issus de la littérature tels : le modèle de Schlaich et de L. B. Mullett. La validation des résultats obtenus issus de la comparaison des différents modèles théoriques avec les résultats expérimentaux du site de Manzanares a permis de mieux comparer et prédire les performances énergétiques de ces centrales.

Mots clés : Energie renouvelable ; Centrale cheminée solaire ; Performances énergétiques ; Comparaison de modèles mathématiques ; Simulation numérique ; Prototypage de Manzanares.

Abstract :

The work presented in this thesis is related to an analysis of the energy performance of solar chimney plants (CCS) by using two different mathematical models from the literature such as: the model of Schlaich and L. B. Mullett. The validation of the results obtained from the comparison of the different theoretical models with the experimental results of the site of Manzanares has allowed to better compare and predict the energy performance of these plants

Keywords : Renewable energy ; Solar chimney ; Energy performance ; Comparison mathematical models ; Manzanares prototype.

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre vive gratitude à notre encadreur **M. BOUALLEG SALIM, Mekki**, Chef département des Energies Renouvelables (IAP), pour son aide précieuse et son aimable collaboration à l'élaboration de ce travail.

Nous tenons à adresser nos vifs remerciements à notre promotrice **Mme. M GUEMMADI**, Enseignante à la faculté de technologie de Boumerdes, département de génie mécanique.

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail à :

- Nos chers parents
- Nos sœurs et Nos frères
- Nos amis (es)

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	13
CHAPITRE 1 : Généralités	16
1.1 Changement climatique	16
1.2 Transition énergétique	16
1.2.1 Le modèle énergétique Algérien	16
1.2.1.1 CDER	18
1.2.1.2 SKTM	18
1.2.1.3 SHAEMS.....	19
1.2.2 Filiales des énergies renouvelables	19
1.2.2.1 La bioénergie	19
1.2.2.2 Energie solaire	20
1.2.2.2.1 Le solaire photovoltaïque	20
1.2.2.2.2 Le solaire thermique à basse température	21
1.2.2.2.3 Le solaire thermique haute température	21
1.2.2.3 L'énergie éolienne	22
1.2.2.4 L'énergie hydraulique	22
1.2.2.5 L'hydrogène	23
1.2.3 La centrale solaire à cheminée	24
CHAPITRE 2 : Etat de l'art	28
2.1 Recherche bibliographique	28
2.2 Etudes expérimentales:.....	35
2.3 Conclusion	41
CHAPITRE 3 : Modélisation	43
3.1 Introduction	43
3.2 Modèle de J. Schlaich.....	43
3.2.1 Le collecteur	43
3.2.1.1 Flux de chaleur transmise par le collecteur au fluide	45
3.2.1.2 Vitesse de l'air:	45
3.2.2 La cheminée	45
3.2.2.1 L'expression de la vitesse de l'air dans la cheminée	46

3.2.2.2	Le rendement de la cheminée	47
3.2.2.3	Puissance et perte de charge totale	49
3.2.3	La turbine à air « aéro-génératrice »	49
3.2.3.1	La puissance maximale développée	50
3.2.3.2	La puissance fournie au réseau	50
3.2.4	Rendement global de Centrale a cheminée solaire	51
3.3	Modèle de L. B. Mullett	52
3.3.1.1	Vitesse	52
3.3.1.2	Puissance nominale	53
3.3.1.3	Emplacement de l'aéro-turbine.....	53
3.3.1.4	Le rendement globale	53
3.3.1.5	Rendement de la cheminée (Aero-Turbine au repos).....	53
3.3.1.6	Température et vitesse	54
3.4	Résolution numérique du modèle de J. Schlaich	54
3.5	Résolution numérique du modèle de L. B. Mullett	54
CHAPITRE 4 : Résultats & Interprétation		58
4.1	Validation	58
4.2	Influence de la variation de l'irradiation solaire I_0	59
4.3	Influence de la variation de la hauteur de la cheminée H_{ch}	62
4.4	Influence de la variation du rayon du collecteur R_{coll}	64
4.5	Conclusion :.....	66
Conclusion générale		68

Figure. I.1. Production d'électricité dans le monde par bioénergie

Figure. I.2. Constitution d'une cellule photovoltaïque (Connaissance des Énergies, d'après CEA)

Figure I.3. Collecteur de la centrale a cheminée solaire de Manzanares.

Figure I.4. Turbines verticales

Figure I.5. Petites turbines horizontales

Figure I.6. Cheminée de la centrale a cheminée solaire de Manzanares

Figure I.6. Cheminée de la centrale a cheminée solaire de Manzanares

Figure. II.1. Profils de puissance à grande échelle à la fois la SCPP sans et avec une bonne performance du système de contrôle

Figure II.2. Photo de la CCS de Manzanares

Tableau 1. Les principaux paramètres de la CCS de Manzanares

Figure. II.3. Relevé des vitesses d'air ascendant et la puissance développée de la CCS de Manzanares pour une journée typique (08 Juin 1987)

Figure.II.4. Figures et schéma de prototypes de CCS expérimentaux

Figure.II.5. Mesures prises du prototype test de Sherif et al

Figure.II.6. Evolution des températures de l'air dans la CS en fonction de sa hauteur pour le prototype test de Zhou et al

Figure III.1 Représentation schématique de la centrale à cheminée.

Figure III.2. Organigramme montrant les différentes étapes du calcul sous MATLAB

Tableau IV.1. Les résultats expérimentaux de la CCS de Manzanares comparés aux résultats de la simulation.

Figure IV.1. Influence de l'irradiation solaire sur le gain thermique du collecteur de la centrale a cheminée solaire.

Figure IV.2. Influence de l'irradiation solaire sur la vitesse maximale dans la cheminée CCS

Figure IV.3. Influence de l'irradiation solaire sur le rendement du collecteur de la centrale a cheminée solaire.

Figure IV.4. Influence de l'irradiation solaire sur la puissance effective

Figure IV.5. Influence de la hauteur de la cheminée sur la différence de température entre l'entrée et la sortie du collecteur

Figure IV.6. Influence de la hauteur de la cheminée sur la vitesse maximale dans la cheminée

Figure IV.7. Influence de la hauteur de la cheminée sur le rendement de la cheminée.

Figure IV.8. Influence de la hauteur de la cheminée sur la puissance disponible.

Figure IV.9. Influence du rayon du collecteur sur le gain thermique dans le collecteur.

Figure IV.10. Influence du rayon du collecteur sur le rendement du collecteur.

Figure IV.11. Influence du rayon du collecteur sur le rendement du collecteur.

Figure IV.12. Influence du rayon du collecteur sur la puissance effective.

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. K

g : Accélération de la gravité, m/s^2

I_0 : Rayonnement solaire incident, W/m^2

H_c : Hauteur de la cheminée, m

$\dot{m}$: Débit massique de l'air, kg/s

ρ : Masse volumique, kg/m^3

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

$\dot{Q}$: Flux de chaleur reçue par le fluide l'air au niveau du collecteur, W

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

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

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

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

max : maximale

₀ : Environnement

Introduction Générale

Introduction Générale

Face au défi du réchauffement planétaire, les énergies renouvelables intéressent de plus en plus les décideurs et usagers. Ainsi, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie éolienne, les bioénergies et la géothermie sont vouées, dans un avenir proche, à se développer partout dans le monde. Chaque région a des atouts différents. C'est déjà une réalité qu'il est judicieux d'étendre au plus grand bénéfice de tous : les gestionnaires, les utilisateurs et l'environnement. Leurs développements contribuent à la préservation de l'environnement et au respect du protocole de Kyoto.

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, certain couvrent leurs besoins énergétiques en recourant de façon traditionnelle à la biomasse.

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.

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. Les résultats obtenus issus de la comparaison des différents modèles théoriques avec les résultats expérimentaux du prototype de Manzanares a permis de mieux comparer et prédire les performances énergétiques de ces centrales.

Le travail ainsi présenté se compose de quatre chapitres :

- Le premier chapitre est relatif à un aperçu sur les différentes formes d'énergie ainsi que la transition énergétique dans le monde et en Algérie.
- Le second chapitre concerne une revue bibliographique sur l'état de l'art dans le domaine des centrales à 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 troisième chapitre, quant à lui, est relatif la description de différents modèles mathématiques de calcul des performances énergétiques des centrales cheminées solaires. La description de la méthode numérique de résolution, y sont décrits la discrétisation du problème et la résolution des équations algébriques.
- Au quatrième chapitre, seront présentés les résultats issus de la simulation numérique ainsi que les discussions de ces différents résultats.
- Pour finir, une conclusion générale faisant la synthèse des résultats obtenus.

Chapitre 1 : Généralités

1 Généralités

1.1 Changement climatique :

Il est essentiel de prendre des mesures pour réduire l'impact du changement climatique. L'Accord de Paris se fixe comme objectif de limiter l'augmentation de la température moyenne mondiale bien en dessous de 2 ° C au-dessus des niveaux préindustriels et d'essayer de limiter l'augmentation à 1,5 ° C. La nécessité d'une transition vers un secteur énergétique à faible émission de carbone, qui représente les deux tiers des émissions mondiales, est implicite dans ces objectifs. Les énergies renouvelables, associées à des gains d'efficacité énergétique, peuvent fournir 90% des réductions d'émissions de CO₂ nécessaires d'ici 2050. L'énergie renouvelable est donc un élément clé des contributions déterminées au niveau national (CDN) - l'outil central de mise en œuvre pour les pays dans le cadre de l'Accord de Paris. À l'heure actuelle, le niveau de détail des CDN diffère d'un pays à l'autre, avec peu d'analyses approfondies et des informations quantitatives limitées sur le rôle des énergies renouvelables dans la réalisation des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). [1]

1.2 Transition énergétique :

La transition énergétique est une voie vers la transformation du secteur énergétique mondial de l'énergie fossile à zéro carbone d'ici la seconde moitié de ce siècle. La nécessité de réduire les émissions de CO₂ liées à l'énergie pour limiter le changement climatique est au cœur de son action. La décarbonation du secteur énergétique nécessite une action urgente à l'échelle mondiale, et alors qu'une transition énergétique mondiale est en cours, des actions supplémentaires sont nécessaires pour réduire les émissions de carbone et atténuer les effets du changement climatique. Les mesures relatives aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique peuvent potentiellement atteindre 90% des réductions de carbone requises. [2]

1.2.1 Le modèle énergétique Algérien :

L'Algérie se trouve aujourd'hui confrontée à un choix dans sa transition économique et énergétique très complexe. Sa dépendance aux hydrocarbures devient

dangereuse, surtout en raison de l'incertitude du revenu de cette rente mais aussi du caractère épuisable de cette ressource dont les réserves s'amenuisent et peinent à faire face à une demande croissante (croissance démographique et développement du niveau de vie et des exigences sociales).

Outre l'objectif de s'affranchir de manière graduelle de la dépendance vis-à-vis des ressources conventionnelles, cette transition doit permettre à notre pays d'amorcer une dynamique d'émergence d'une énergie verte et durable dans le cadre de la lutte contre les changements climatiques.

La transition énergétique, partie intégrante de la transition écologique, représente l'ensemble des transformations en termes de production, distribution et consommation des énergies destinées à rendre le système énergétique plus durable.

Elle s'appuie sur deux leviers :

- Les économies d'énergies qui passe par l'amélioration technique de nos systèmes de consommation par l'efficacité énergétique et un changement comportemental et une prise de conscience des enjeux de la transition énergétique menant à la sobriété énergétique.
- Le passage progressif d'un système de production d'énergie basée sur les énergies fossiles (nocive et épuisables) vers les énergies renouvelables

Ainsi, la transition se manifeste dans tous les secteurs de l'économie notamment le transport, l'habitat, l'industrie et le secteur d'agriculture.

Pour faire face à toutes ces contraintes l'Algérie se doit d'élaborer un modèle énergétique durable et flexible à l'horizon 2030 et 2050. Il s'appuiera sur le potentiel d'économie d'énergie existant dans l'ensemble des secteurs d'activité, sur l'intégration progressive des énergies renouvelables dans le mix énergétique et l'exploitation de l'ensemble du potentiel énergétique existant et exploitable tel que le nucléaire. Ce nouveau modèle énergétique permettra à l'Algérie de s'éloigner de cette dépendance aux énergies fossiles, de continuer à assurer son développement économique et social et enfin de laisser un viatique aux générations futures. La proposition de la loi sur la transition viendra alors, en fonction du modèle énergétique retenu, fixer des objectifs quantifiables, pour l'ensemble des secteurs concernés, ainsi les choix futurs en rapport avec la transition énergétique.

Le modèle énergétique à 2030 prendra en compte toutes les énergies, et permettra la définition d'une stratégie où les énergies fossiles seront de plus en plus épargnées au profit des générations futures. Le modèle du "bouquet énergétique" pour 2030, mettra l'accent sur toutes les énergies renouvelables comme le solaire, l'éolien ainsi que la géothermie et l'hydroélectricité. Les

hypothèses de travail en termes de ressources énergétiques à prendre en considération seront définies conjointement en concertation avec les différents secteurs concernés.

L'élaboration de ce modèle énergétique permettra d'aboutir à une loi sur la transition énergétique. Cette dernière permettra de :

- Encadrer et clarifier les objectifs et les échéanciers de la transition énergétique
- Fixer les orientations et surtout définir des stratégies adéquates pour atteindre ces objectifs. [3]

1.2.1.1 CDER :

Le Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER) est un Centre de Recherche, issu de la restructuration du Haut-Commissariat à la Recherche, créé le 22 mars 1988.

C'est un Etablissement Public à caractère Scientifique et Technologique (EPST) chargé d'élaborer et de mettre en œuvre les programmes de recherche et de développement, scientifiques et technologiques, des systèmes énergétiques exploitant l'énergie solaire, éolienne, géothermique et l'énergie de la biomasse.

Le CDER en tant que pôle scientifique participe activement dans le programme national de recherche et du développement technologique défini par la loi d'orientation et de programme à projection quinquennale sur la recherche scientifique et le développement technologique. Les projets nationaux retenus dans ce programme sont orientés sur des priorités économiques et sociétales pour répondre aux principaux besoins stratégiques de développement économique.

Le CDER active depuis sa création dans la mise en œuvre de cette stratégie à travers le déploiement et l'intégration de plusieurs réalisations et projets pilotes au niveau national [4]

1.2.1.2 SKTM :

Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida, est une société de production d'électricité, a pour missions principales l'exploitation des réseaux d'énergie électrique isolés du sud (production d'électricité en conventionnel) et des énergies renouvelables pour l'ensemble du territoire national.

Le développement des infrastructures électriques du parc de production des Réseaux Isolés du Sud, de l'Engineering, de la maintenance et de la gestion des centrales électriques relevant de son champ de compétence.

La commercialisation de l'énergie produite pour les filiales de distribution notamment après le déploiement des Energies Renouvelables sur les réseaux interconnectés. [12]

1.2.1.3 SHAEMS :

Il s'agit d'une société par actions dont l'objectif principal est de mettre en œuvre le programme national de développement de la production de l'électricité à partir de sources renouvelables, qui vise à atteindre une capacité de 15 000 MW à l'horizon 2035, soit une moyenne de 1000 MW réalisés par an. Elle devrait être chargée, notamment, de l'élaboration des cahiers des charges et le lancement des appels d'offres à investisseurs, le traitement des offres des soumissionnaires jusqu'à l'attribution définitive, la promotion de l'intégration nationale à travers, notamment, des dispositions incitatives dans les cahiers des charges, le développement du partenariat public/privé dans le domaine des énergies renouvelables pour renforcer l'expertise locale et permettre la maîtrise de l'ensemble des niveaux du cycle des projets dans ce domaine.[13]

1.2.2 Filiales des énergies renouvelables :

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables, produites à partir de sources différentes.

1.2.2.1 La bioénergie :

L'utilisation de la bioénergie se divise en deux grandes catégories : « traditionnelle » et « moderne ». L'utilisation traditionnelle fait référence à la combustion de la biomasse sous des formes telles que le bois, les déchets animaux et le charbon de bois traditionnel. Les technologies bioénergétiques modernes comprennent les biocarburants liquides produits à partir de la bagasse et d'autres plantes ; les bioraffineries ; biogaz produit par digestion anaérobie des résidus ; systèmes de chauffage à granulés de bois ; et d'autres technologies.

Environ les trois quarts de l'utilisation d'énergie renouvelable dans le monde impliquent la bioénergie, dont plus de la moitié consiste en l'utilisation traditionnelle de la biomasse. La bioénergie représentait environ 10% de la consommation finale totale d'énergie et 1,9% de la production mondiale d'électricité en 2015.

La biomasse a un potentiel important pour stimuler les approvisionnements énergétiques dans les pays peuplés à la demande croissante, comme le Brésil, l'Inde et la Chine. Il peut être directement brûlé pour le chauffage ou la production d'électricité, ou il peut être converti en substituts de pétrole ou de gaz. Les biocarburants liquides, un substitut renouvelable pratique de l'essence, sont principalement utilisés dans le secteur des transports.

Le Brésil est le leader des biocarburants liquides et possède la plus grande flotte de véhicules à carburant flexible, qui peuvent fonctionner au bioéthanol - un alcool principalement fabriqué

par la fermentation d'hydrates de carbone dans les cultures de sucre ou d'amidon, comme le maïs, la canne à sucre ou le sorgho doux. [5]

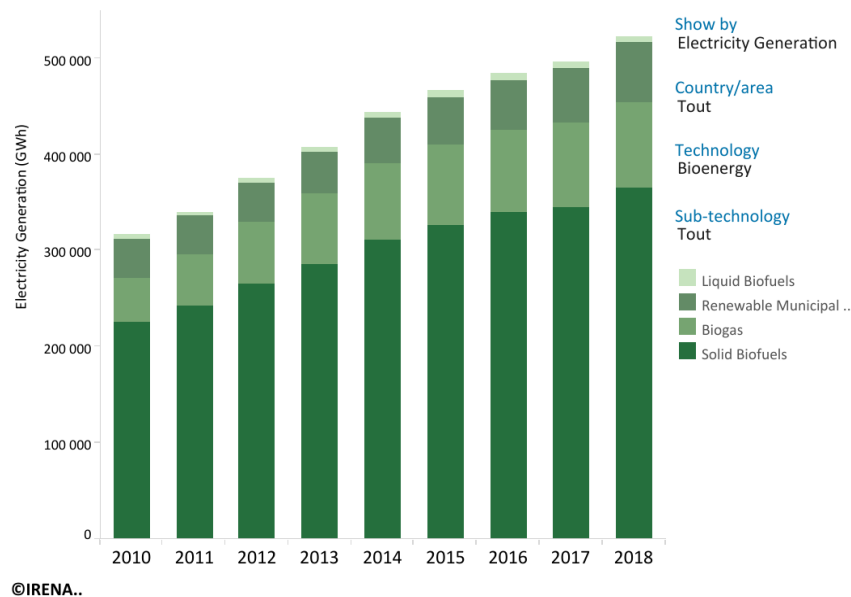


Figure. I.1. Production d'électricité dans le monde par bioénergie

1.2.2.2 Énergie solaire :

1.2.2.2.1 Le solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro-puissance calculé en watt crête (Wc) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur.

L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau.

Un générateur solaire photovoltaïque est composé de modules photovoltaïques eux même composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles.

Les performances d'une installation photovoltaïque dépendent de l'orientation des panneaux solaires et des zones d'ensoleillement dans lesquelles vous vous trouvez. [6]

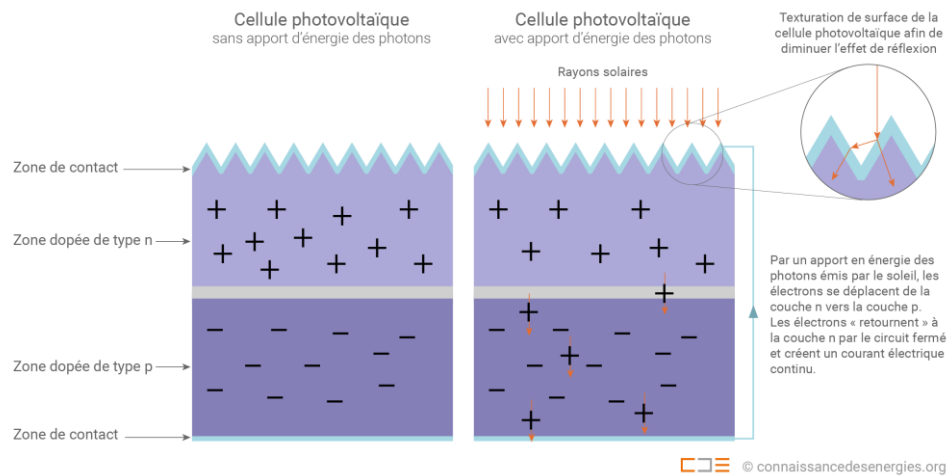


Figure. I.2. Constitution d'une cellule photovoltaïque (Connaissance des Énergies, d'après CEA)

1.2.2.2.2 Le solaire thermique à basse température :

- La technologie solaire « active » : traditionnellement, ce terme désigne les applications à basse et moyenne température. Des capteurs solaires thermiques sont installés sur les toits des bâtiments. Un capteur solaire thermique est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie provenant du Soleil et la transmettre à un fluide caloporteur. La chaleur est ensuite utilisée afin de produire de l'eau chaude sanitaire ou bien encore chauffer des locaux.
- La technologie solaire « passive » : toujours dans le domaine de la basse température, on peut également citer les installations solaires passives. Par opposition aux applications précédentes, celles-ci ne requièrent pas de composants dits actifs (les capteurs solaires). Ces applications reposent sur des concepts de génie civil et climatique impliquant une architecture adaptée et l'emploi de matériaux spéciaux. L'utilisation passive de l'énergie du Soleil permet de chauffer, d'éclairer ou de climatiser des locaux. [7]

1.2.2.2.3 Le solaire thermique haute température :

La concentration optique des rayons du soleil permet d'obtenir de très hautes températures. Selon les différentes technologies de captage, la chaleur produite est

généralement comprise entre 400 °C et 1 000 °C. On distingue deux usages principaux :

- la production de chaleur (thermique),
- la production d'électricité (thermodynamique).

Dans leur principe, les concentrateurs optiques superposent en un même point des rayons solaires collectés sur une surface de captage, le plus souvent formée de miroirs. Différentes géométries de concentrateurs ont été expérimentées. Ils sont dotés de dispositifs de suivi de la course du soleil, en hauteur ou en hauteur et en azimut.

Attention, les systèmes solaires à concentration collectent uniquement le rayonnement solaire direct, alors que les capteurs solaires plans non concentrateurs et les modules photovoltaïques captent également le rayonnement diffus.[8]

1.2.2.3 L'énergie éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. [9]

1.2.2.4 L'énergie hydraulique :

À l'instar de l'énergie éolienne, les énergies hydrauliques (à l'exception de l'énergie marémotrice) ont leur origine principale dans les phénomènes météorologiques et donc l'énergie solaire. Le soleil provoque l'évaporation de l'eau, principalement dans les océans et en libère une partie sur les continents à des altitudes variables. On parle du cycle de l'eau pour décrire ces mouvements. L'eau (en fait, la vapeur d'eau) possède, en altitude, une énergie potentielle de pesanteur ; cette énergie peut être captée et transformée dans des barrages hydroélectriques, lors du retour de l'eau vers les océans. Avant l'avènement de l'électricité, les moulins à eau permettaient de capter cette énergie mécanique pour entraîner des machines ou des outils (machines à tisser, moulins à moudre le blé, etc.). Depuis l'invention de l'électricité cette énergie mécanique est transformée en énergie électrique ; l'hydroélectricité est après la biomasse, la deuxième énergie renouvelable : selon l'Agence internationale de l'énergie, elle fournit 2,4 % de l'énergie primaire produite dans le monde en 2014 (contre 1,8 % en 1973), sur un total de 14,1 % d'énergies renouvelables (12,4 % en 1973). [1]

1.2.2.5 L'hydrogène :

L'hydrogène représente un gros potentiel de diminution de gaz à effet de serre (GES) ainsi qu'une manne économique significative. Les pays européens investissent aujourd'hui de manière conséquente dans ce marché en pleine expansion, à commencer par la France qui en attend 100 000 nouveaux emplois directs [10]. Comme l'électricité, le dihydrogène H_2 est principalement un vecteur énergétique et non une énergie en tant que telle, car il est produit au moyen d'une réaction chimique à partir d'une ressource primaire.

Les ressources principales permettant de produire le dihydrogène H_2 (que l'on appelle hydrogène par abus de langage) sont l'eau et les hydrocarbures .

- En effet, chaque molécule d'eau est le fruit de la combinaison entre un atome d'oxygène et deux atomes d'hydrogène, suivant la formule H_2O .
- Les hydrocarbures sont issus de la combinaison d'atomes de carbone et d'hydrogène. C'est par exemple le cas du méthane, constituant principal du gaz naturel dont la formule est CH_4 , l'une des combinaisons les plus simples pour les hydrocarbures.

L'hydrogène existe aussi à l'état naturel. Les premières sources naturelles d'hydrogène ont été découvertes au fond des mers dans les années 70 et plus récemment à terre. Mais la route est longue avant d'envisager une exploitation rentable. Les connaissances sur l'origine de la formation de cet hydrogène et les recherches sur des techniques de production rentables doivent encore progresser.

Différentes techniques de production existent :

- Le **reformage du gaz naturel à la vapeur d'eau** est la technique la plus répandue. Il s'agit de faire réagir du méthane avec de l'eau pour obtenir un mélange contenant de l'hydrogène et du CO_2 . Le CO_2 émis par ce procédé pourrait éventuellement être capté et stocké pour produire un hydrogène décarboné. En lieu et place du gaz naturel, l'utilisation du bio méthane (méthane issu de la fermentation de la biomasse) constitue aussi une solution pour produire un hydrogène dé carboné ;
- L'hydrogène **peut aussi être produit à partir d'eau et d'électricité, c'est l'électrolyse de l'eau**. L'électrolyseur sépare une molécule d'eau en hydrogène et en oxygène. Cette voie est encore peu répandue car nettement plus coûteuse (2 à 3

fois plus chère que le reformage du gaz naturel) et réservée aujourd'hui à des usages spécifiques, comme l'électronique, qui requièrent un niveau élevé de pureté ;

- La **gazéification** permet de produire, par combustion, un mélange de CO et d'H₂ à partir de charbon (solution qui émet beaucoup de CO₂) ou de biomasse. [11]

1.2.3 La centrale solaire à cheminée :

La centrale solaire à cheminée est constituée de trois éléments essentiels, à savoir, le collecteur solaire, la cheminée ou tour et la turbine qui nous sont, séparément, familiers. Leur combinaison pour produire de l'électricité a été déjà décrite en 1931 [14]. L'air est chauffé par les rayons solaires, sous la couverture transparente (plastique ou verre) du collecteur, puis s'écoule d'un écoulement ascendant suivant un itinéraire constitué par le capteur et la cheminée. La couverture transparente et le sol en dessous du couvercle constituent le collecteur solaire. Au milieu du collecteur est placée une cheminée verticale avec une ouverture à sa base, d'où s'écoulera l'air sortant du collecteur. La jonction entre la couverture transparente et la base de la cheminée est hermétique. Son principe de fonctionnement se base sur le fait que l'air chaud étant plus léger que l'air froid, s'élève. L'air chaud est produit par l'effet de serre dans le collecteur qui peut s'étaler horizontalement sur plusieurs dizaines de mètres sur la surface du sol. La hauteur du capteur sous la couverture peut augmenter dans la direction de la cheminée dans le but de dévier le mouvement de l'air en mouvement vertical avec une perte, due au frottement, minimale, comme elle peut diminuer dans le but de diminuer la section de passage du fluide et de ce fait, comme le débit massique reste constant, augmenter la vitesse du fluide au niveau de l'entrée de la cheminée. La tour (cheminée) convertit le flux de chaleur produit par le collecteur en énergie cinétique (courant de convection) et énergie potentiel (chute de pression dans la turbine). Ainsi la différence de densité de l'air causée par l'élévation de température dans le collecteur joue le rôle d'une force d'entraînement. Le déplacement de l'air permet à des turbines situées à l'embouchure de la cheminée de produire de l'électricité à travers des génératrices qui leurs sont couplées. La centrale reste opérationnelle pendant de longues périodes, du fait que, le sol a la capacité d'emmagasiner la chaleur reçue durant le jour et de la libérer suivant le gradient de températures sol -air et les coefficients d'échange thermique. Si on désire augmenter la capacité de stockage, Kreetz [15] propose de fixer des tubes noirs remplis d'eau côte à côte sur la surface du sol au-dessous de la couverture du collecteur. Les tubes seront remplis une fois et demeurent fermé de sorte que l'évaporation n'ait pas lieu.

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 I.3**).



Figure I.3. Collecteur de la centrale a cheminée solaire de Manzanares.

Des turbines ou aéro-génératrices, servent à convertir le courant d'air ascendant en énergie mécanique, puis électrique (**Figure I.4** et **Figure I.5**). 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.

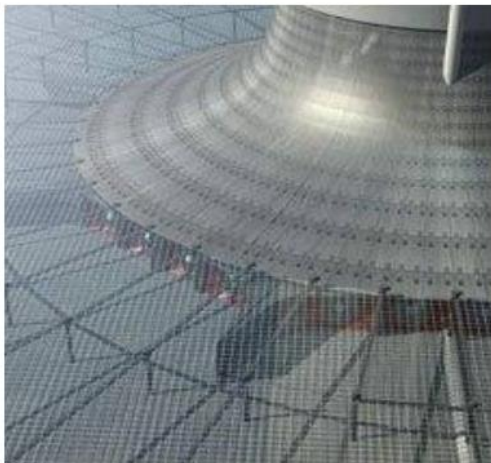


Figure I.4. Turbines verticales



Figure I.5. Petites turbines horizontales

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 I.6**).



Figure I.6. Cheminée de la centrale a cheminée solaire de Manzanares

Chapitre 2 : Etat de l'art

2 Etat de l'art

L'idée de la centrale solaire à cheminée a été proposée initialement par deux ingénieurs allemands, Jorg Schlaich et Rudolf Bergermann. Depuis de nombreuses études théoriques et numériques ont été réalisées par de nombreux chercheurs.

2.1 Recherche bibliographique

Le travail pionnier de J. Schlaich [19] sur le concept de la centrale a cheminée solaire pour l'exploitation de l'énergie solaire afin de produire de l'électricité, a été suivi par de nombreux travaux à caractères études pour la modélisation des CCS à grande échelle. Des études ont été effectuées à l'extrapolation des données expérimentales du prototype à Manzanares aux grandes centrales (5, 30 et 100 MW). En se basant sur un modèle mathématique, Schlaich a démontré qu'il n'existe pas de dimension optimale pour une cheminée solaire. Cependant si le coût de réalisation est pris en considération, la centrale peut être optimisée thermodynamiquement [20, 21].

Haaf et al. [22]. Ont réalisé une étude fondamentale sur le prototype de la centrale a cheminée solaire espagnol. Dans leur article, les auteurs analysés brièvement le bilan énergétique, les critères de conceptions et l'analyse des couts.

Dans une autre étude, Haaf [23] a reporté les résultats des tests préliminaires menés sur la CCS de Mansanares. 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.

Une analyse pour déterminer l'efficacité globale de la cheminée solaire a été présentée par Mullet [24].

Gholamalizadeh & al. [25] ont présenté une analyse complète, analytique et numérique, pour prédire la performance d'une centrale solaire à cheminée à Kerman, Iran. L'influence de l'altitude du site sur le potentiel des centrales solaires à cheminée a été aussi considérée dans cette étude.

Hurtado & al. [26], dans leur travail, ont analysé le comportement thermodynamique et la puissance que peut générer une centrale solaire à cheminée en tenant compte du sol en tant que système de stockage de chaleur, à travers une modélisation numérique dans des conditions

non stationnaires. L'influence de l'inertie thermique du sol permet un gain de 10% de la puissance générée par les turbines.

Padki et Sherif [27, 28] 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. [29] 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 [30] 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 [31] ont développé un modèle mathématique pour étudier l'effet des conditions environnementales et de la géométrie sur la température de l'air, la puissance produite et la vitesse de l'air dans la centrale solaire à cheminée.

Les mêmes auteurs [32] 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.

Dans la deuxième partie, les auteurs [33] 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. [34] ont présenté une analyse théorique de la tour dont le régime d'écoulement est laminaire en convection naturelle et pour un cas stationnaire. Afin de prévoir le comportement thermo-hydrodynamique de l'air, les conditions de température à l'admission ont été imposées de façon à garantir un écoulement laminaire régulier le long du dispositif.

Bernardes et al. [35] 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 [36] 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 [37] 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 [38] 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. [39] 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 de hauteur et de 10 m de diamètre est capable de produire de 110 à 190 kW électrique.

Pastohr et al. [40] 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. [41] 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 [42], 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 [43] 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 [44] 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 [46] 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. [47] 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.

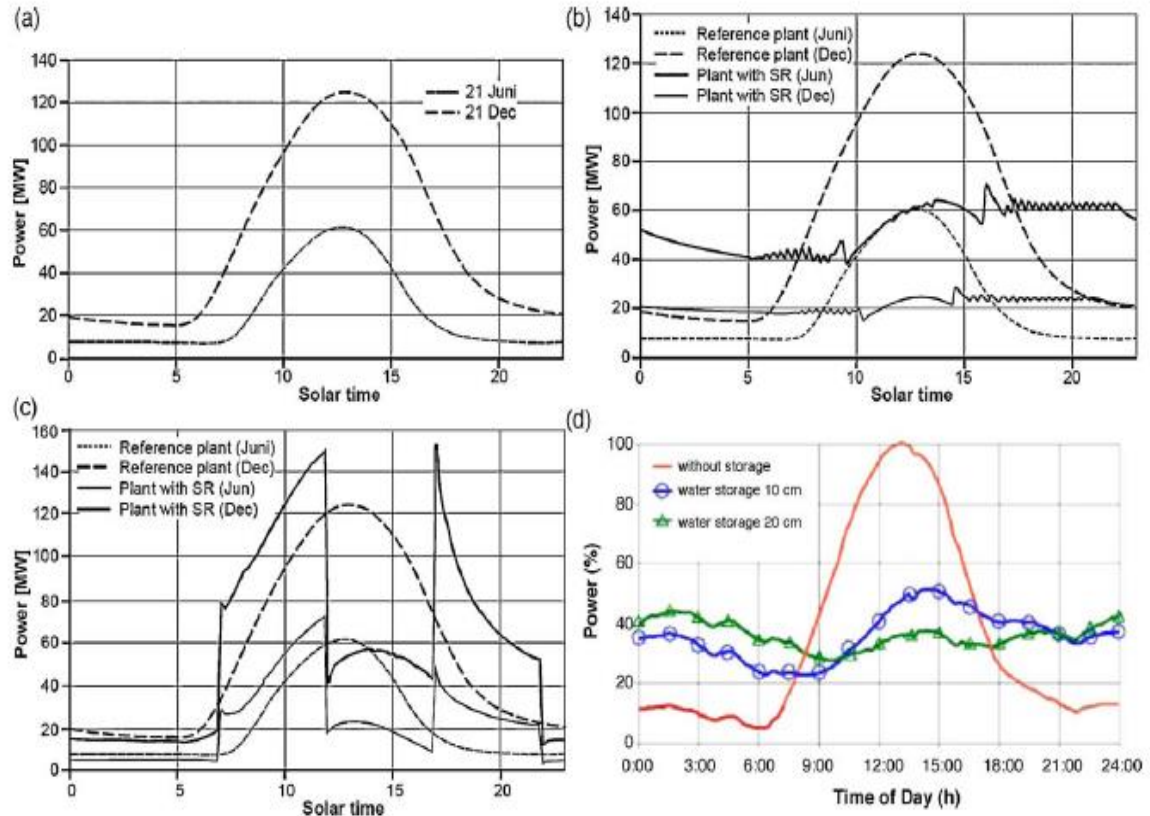


Fig. II.1. Profils de puissance à grande échelle à la fois la SCPP sans et avec une bonne performance du système de contrôle : (a) sans la performance du système de contrôle [45], (b) avec un toit intermédiaire secondaire en tant que charge de base; (c) avec toit intermédiaire secondaire comme charge 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.) [45] est illustré dans la **figure II.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 II.1b** et c [46].

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 [47].

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 [45] et l'installation de système de stockage thermique [48- 51]. 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. II.1**).

L'étude de Chergui et al. [52] 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 a 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. [53] ont étudié les performances d'une CCS pour l'application dans le sud algérien. Les résultats obtenus ont montré qu'une CCS similaire à celle de Manzanares, 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.

R. Petela [54] a introduit dans son modèle une analyse exergétique 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. [55] 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. [56] 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. [57] 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.

2.2 Etudes expérimentales :

Plusieurs prototypes expérimentaux de cheminée solaire de structures différentes, ont été conçus, réalisés et testés durant ces dernières décennies, 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 en Espagne (**Figure. II.2**). Avec 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.

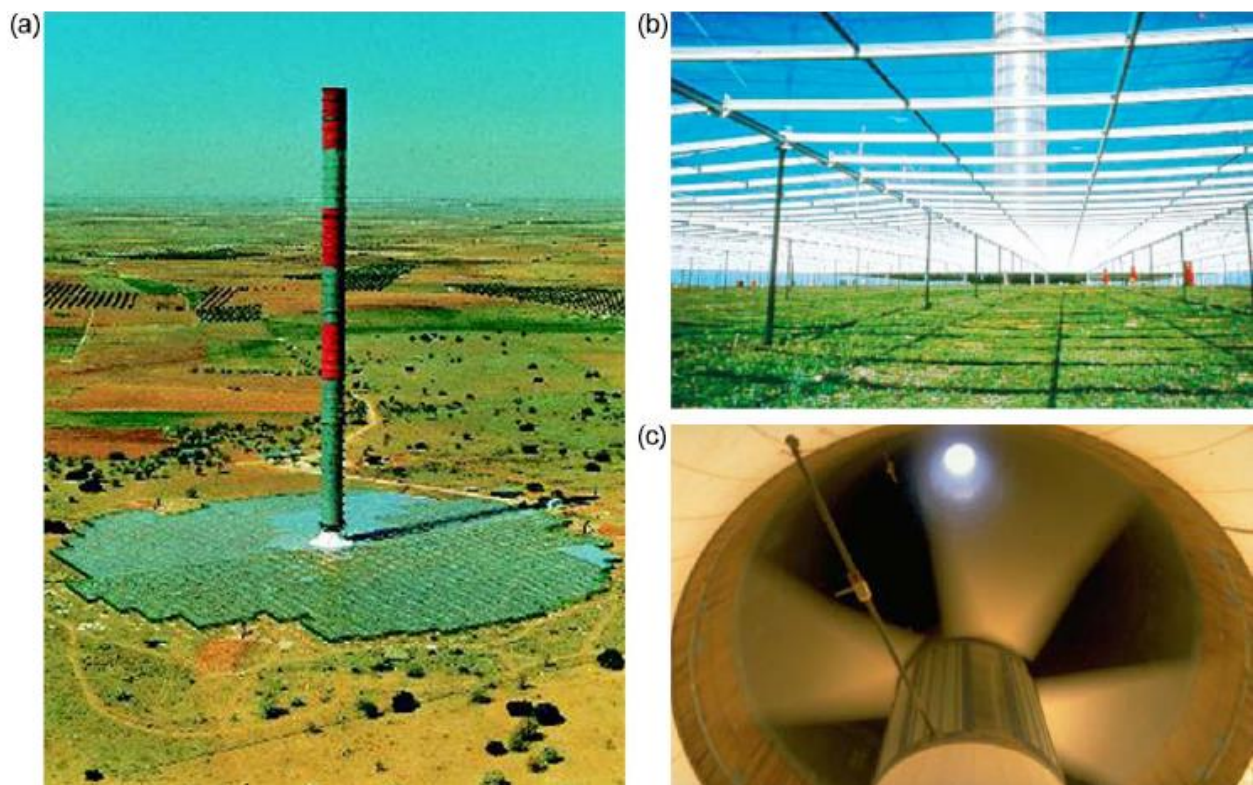


Figure II.2 : Photo de la CCS de Manzanares: a) vue globale de la centrale, b) Collecteur, c) Turbine [22]

Les principaux paramètres de l'usine de Manzanares sont présentés dans le **tableau II.1**. L'usine de Manzanares a été exploitée pendant huit ans de 1982 à 1989 [20, 22, 23]. 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 **Figure. II.3** [20].

Tableau 1. Les principaux paramètres de la CCS de Manzanares [22].

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

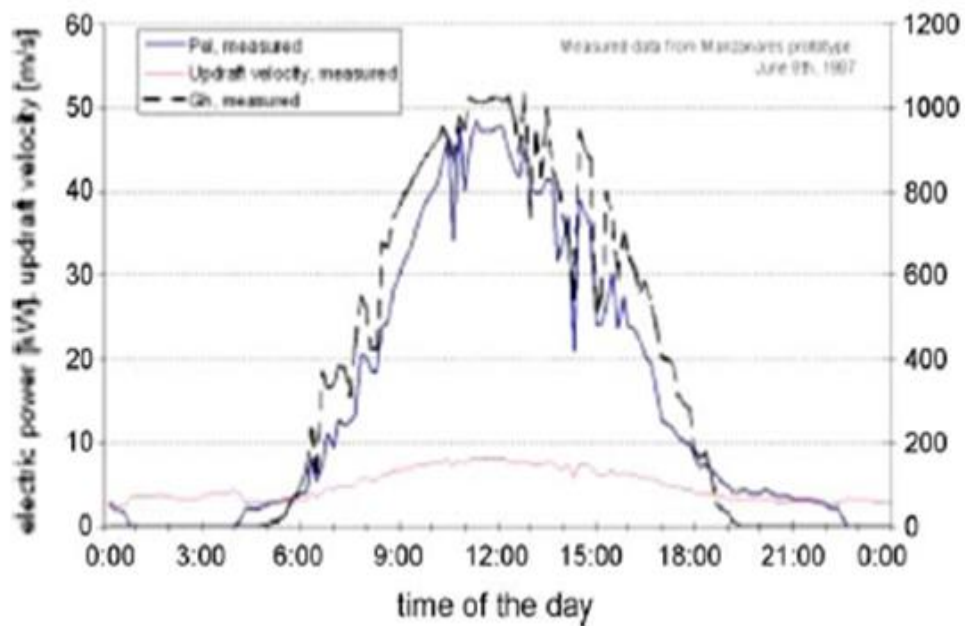


Figure. II.3. Relevé des vitesses d'air ascendant et la puissance développée de la CCS de Manzanares pour une journée typique (08 Juin 1987) [5].

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].

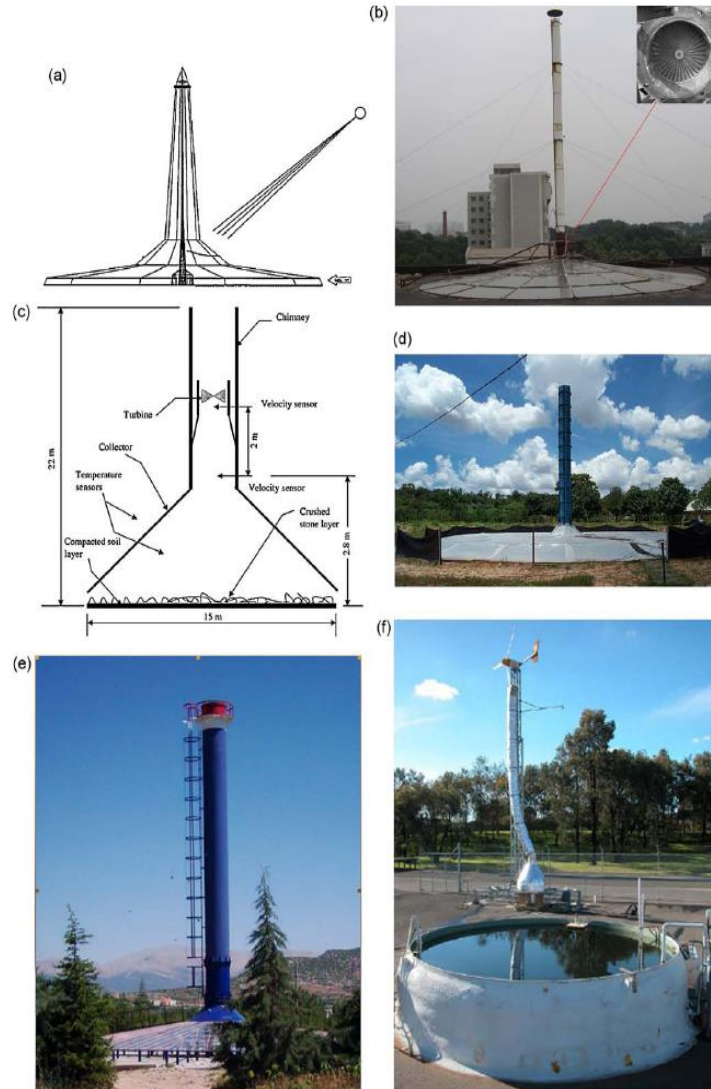


Figure.II.4. Figures et schéma de prototypes de CCS expérimentaux : (a) Sherif et al. [48] ; (b) Zhou et al. [53] ; (c) Ketlogetswe et al. [54] ; (d) Ferreira et al. [55]; (e) Koyun et al. [52] ; (f) Golder et al. [47].

En 1983, Krisst [57] 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 [58]

En 1997, un dispositif de centrale à cheminée solaire a été mis en place par Pasur marthiet Sherif [48] 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 utilisés 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.

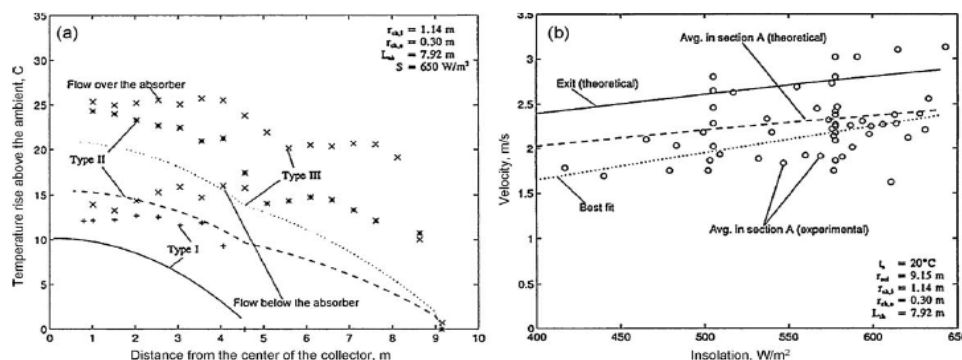


Figure.II.5. Mesures prises du prototype test de Sherif et al. [48] : (a) Le profil de température pour la configuration des trois collecteurs ; (b) La vitesse versus l'irradiation pour la 3ème configuration du collecteur.

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.II.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 constatée 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 [48].

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.II.6) [59] 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.

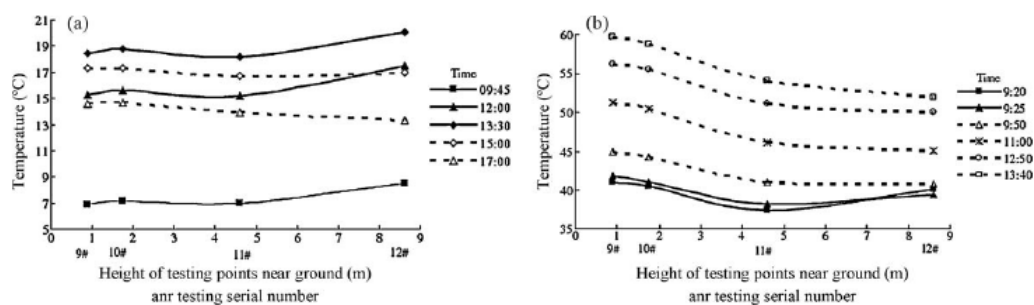


Figure.II.6. Evolution des températures de l'air dans la CS en fonction de sa hauteur pour le prototype test de Zhou et al.[59].

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 [60]. La CS a été fabriquée à partir de matériaux en polystyrène forcé en fibre de verre, dont le diamètre intérieur était de 2m et une hauteur de 22m. Le toit du

collecteur soutenu par un cadre en acier, est d'un verre clair de 5 mm d'épaisseur. L'aire du collecteur a atteint les 160m².

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 500W/m², la vitesse de l'air augmente progressivement pour atteindre une valeur élevée et rester alors presque constante jusqu'à environ 14:00 h, malgré l'augmentation de l'insolation vers 12:00 h, à un pic maximum de 950W/m². Environ 47% de l'énergie solaire incidente est absorbée et stockée par le sol et libéré 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 2,5m/s avec l'installation du diffuseur et de 2 à 4m/s avec diffuseur désinstallé.

Une installation électrique à CS a été construite avec une CS de 11m de hauteur et 1m 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 25m et une hauteur de 0,5 m a été construit à partir d'un film en plastique soutenue 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 15m de haut et 1,2 m de diamètre et un collecteur de 16 m de diamètre avec une toiture en verre [59].

BOUALLEG.S. M & al [44]. Ont réalisé une analyse des performances énergétiques des centrales cheminées solaires (CCS) par utilisation de différents modèles mathématiques issus de la littérature tels : le modèle de Schlaich et al., de Dai et al. Et par l'utilisation de modèles plus développés tel que le modèle de Gannon et 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. Dans une étude ultérieure,

Salim Mekki Boualleg et al. [60] ont étudié l'influence du vieillissement des matériaux utilisés dans les CCS sur les performances du système dans sa globalité.

2.3 Conclusion :

Plusieurs approches ont été présentées pour la simulation et l'étude des centrales à cheminée solaire. Dans ce travail nous proposons l'étude de deux modèles de la centrale à cheminée solaire afin de prédire ces performances en comparant les deux modèles. Les résultats issus de ces modèles seront analysés et discutés.

Chapitre 3 : Modélisation de la centrale a cheminée solaire

3 Modélisation

3.1 Introduction :

L'ensemble de la centrale solaire à cheminée fonctionne en un système ouvert. Il existe plusieurs facteurs qui peuvent influencer sur les performances du système. Ceux-ci peuvent être les conditions environnantes du site d'implantation, les dimensions, les matériaux utilisés pour la construction des composants de la tour et du capteur solaire, la nature du sol sous le collecteur. 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 constituant les CCS en définissant les paramètres influents sur la puissance générée.

Dans ce chapitre, On utilise deux modèles mathématiques 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.

3.2 Modèle de J. Schlaich et al. [20] :

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 (Collecteur, Aéro-Turbine, Cheminée) et permet de déduire l'influence des principales variables caractéristiques de la centrale sur son rendement global et analyse les limites de performances de celle-ci.

3.2.1 Le collecteur :

Dans le collecteur et la cheminée les pertes par frottement sont considérées négligeables.

$$\dot{m} = \rho_c A_c V_c \quad (3-1)$$

Où A_c représente la section perpendiculaire à l'axe de la cheminée, V_c la vitesse de l'air chaud à l'intérieur de la cheminée et ρ_c la densité de l'air à la sortie du collecteur et l'entrée de la cheminée.

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

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T \quad (3.2)$$

Avec :

$\Delta T = T_c - T_0$: Différence de température entre l'entrée et la sortie

du collecteur.

T_0 : Température à l'entrée du collecteur.

T_c : Température à la sortie du collecteur.

$\dot{Q}$: La chaleur reçue par l'air au niveau du collecteur.

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

c_p : Capacité calorifique de l'air.

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

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{Q}}{A_{coll} I_0} \quad (3-3)$$

Avec :

I_0 : Le rayonnement solaire incident.

A_{coll} : La surface de la toiture du collecteur.

En combinant les équations (3.2) et (3.3), On obtient :

$$\eta_{coll} = \frac{\rho_c A_c V_c \Delta T}{A_{coll} I_0} \quad (3-4)$$

Avec :

ρ_c : La masse volumique de l'air à la sortie du collecteur (entrée de la cheminée).

A_c : la section de sortie du collecteur (entrée de la cheminée).

V_c : La vitesse de l'air à la sortie du collecteur (entrée de la cheminée).

3.2.1.1 Flux de chaleur transmise par le collecteur au fluide :

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

$$\dot{Q} = \alpha A_{\text{coll}} I_0 - \beta \Delta T A_{\text{coll}} \quad (3-5)$$

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 conduction du sol.

Finalement en combinant les équations (3-3) et (3-5) on obtient :

$$\eta_{\text{coll}} = \alpha - \frac{\beta \Delta T}{I_0} \quad (3.6)$$

3.2.1.2 Vitesse de l'air au niveau du collecteur :

Des équations (3-2), (3-3) et (3-4) et (3-5) on peut déduire l'expression de la vitesse de l'air au niveau du collecteur :

$$V_c = \frac{\alpha A_{\text{coll}} G - \beta \Delta T A_{\text{coll}}}{\rho_c A_c V_c \Delta T} \quad (3-7)$$

3.2.2 La cheminée :

Le rôle de la cheminée est de convertir la chaleur reçue par le 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 III.1).

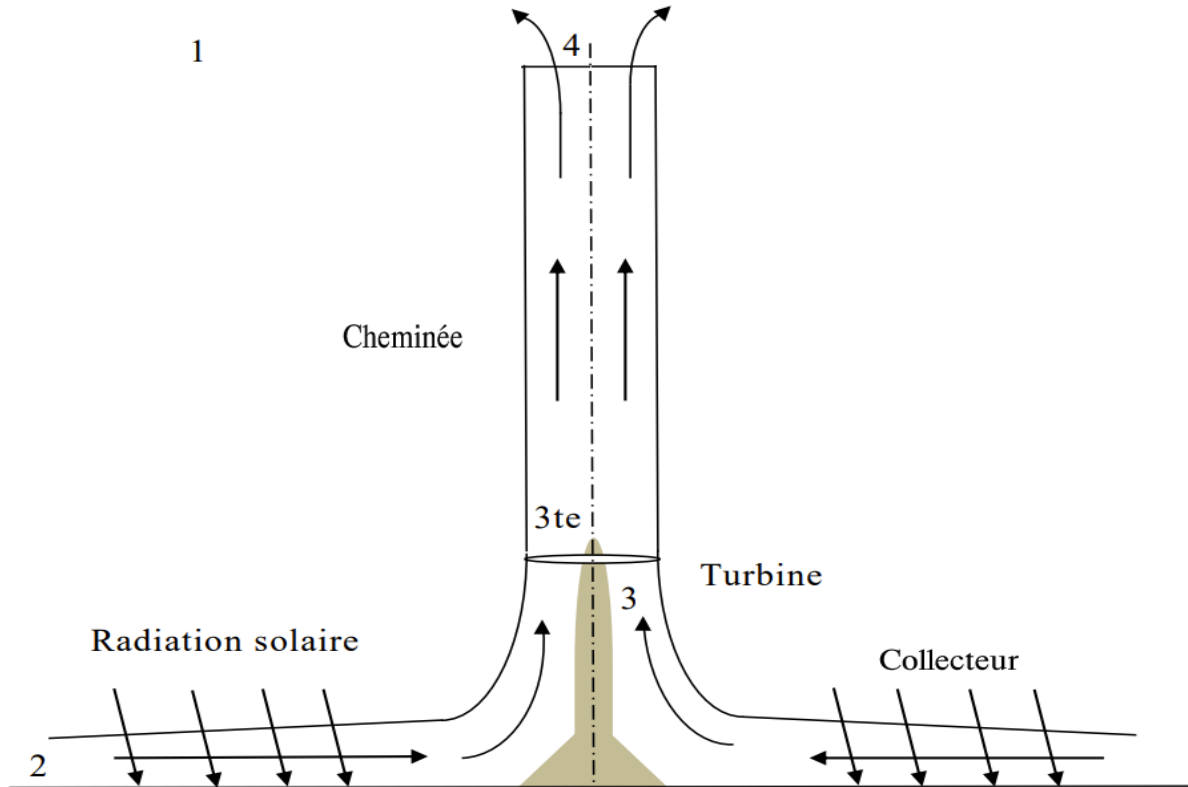


Figure III.1. Représentation schématique de la centrale a cheminée solaire

3.2.2.1 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 :

$$\rho_v \frac{d(v)}{d(z)} = -\frac{dp}{dz} - (\rho - \rho_0)g \quad (3-8)$$

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

$$V_c = \sqrt{\frac{2 \int_0^{H_c} dp - \int_0^{H_c} (\rho - \rho_0) g dz}{\rho}} \quad (3-9)$$

En éliminant dans une première phase la turbine afin d'obtenir la vitesse maximale dans la cheminée. Les pertes par frottement étant négligé, la vitesse maximale du fluide sera alors :

$$V_{\text{cmax}} = \sqrt{\frac{-2 \left(\int_0^{H_c} (\rho - \rho_0) g dz \right)}{\rho}} \quad (3-10)$$

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

$$V_{\text{cmax}} = \sqrt{2 g H_c \frac{\Delta T}{T_0}} \quad (3-11)$$

Avec :

T_0 : Température ambiante à l'entrée du collecteur.

$$\beta_b = \frac{\sigma \left(\frac{1}{\rho} \right)}{\sigma T} \text{ et } \frac{(\rho_0 - \rho)}{\rho_0} = \beta_b (T - T_0)$$

Pour un gaz parfait $\beta_b = \frac{1}{T}$.

3.2.2.2 Rendement de la cheminée

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

$$\eta_c = \frac{P_{\text{tot}}}{\dot{Q}} \quad (3-13)$$

Avec :

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

$\dot{Q}$: La chaleur reçue par l'air au niveau du collecteur.

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

$$\Delta p_{tot} = g \int_0^{H_c} (\rho_e - \rho_c) dh \quad (3-14)$$

Avec

g : Accélération pesanteur.

H_c : Hauteur de la cheminée.

ρ_e : Désignent la masse volumique de l'air dans l'environnement extérieur.

ρ_c : La masse volumique de l'air dans la cheminée.

Δp_{tot} : Est proportionnel à la hauteur de la cheminée.

La différence de pression peut être divisée en une composante statique et une composante dynamique, en négligeant les pertes par frottement.

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_s + \Delta p_d \quad (3-15)$$

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 :

$$P_{tot} = \Delta p_{tot} V_{cmax} A_c \quad (3-16)$$

La différence de pression statique (Δp_s) représente la chute de pression à travers la turbine, et la différence de pression dynamique (Δp_d) décrit l'énergie cinétique de l'air. Dans le cas d'absence de turbine, toute la différence de pression est utilisée pour accélérer l'air, et elle est donc convertie en énergie cinétique.

$$P_{tot} = \frac{1}{2} \dot{m} V_{cMax}^2 \quad (3-17)$$

En combinant les équations (3-15), (3-16), (3-17) le rendement de la cheminée

Deviendra :

$$\eta_c = \frac{g H_c}{T_0 c_p} \quad (3-18)$$

3.2.2.3 Puissance et perte de charge totale :

La puissance totale peut être déduite comme suit :

$$P_{tot} = \eta_c \dot{Q} = \frac{g h_c}{T_0} \rho_c A_c V_c \Delta T \quad (3-19)$$

En combinant (3-16) et (3-20) :

$$\Delta p_{tot} = \frac{g h_c}{T_0} \rho_{coll} \Delta T \quad (3-20)$$

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

$$\Delta p_{tot} = \rho_{coll} g h_c \quad (3-21)$$

3.2.3 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 :

$$\Delta p_S = \Delta p_{tot} - \Delta p_d \Rightarrow \Delta p_S = \Delta p_{tot} - \frac{1}{2} \dot{m} V_{cMax}^2 \quad (3-22)$$

La puissance théorique de la turbine étant :

$$P_{tw} = A_c V_c \Delta p_S \quad (3-23)$$

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

De l'équation (3-22) et (3-23), on peut déduire :

$$\dot{V} = \sqrt{\frac{P_k}{2} (\Delta p_{tot} - \Delta p_S)} \quad (3-24)$$

3.2.3.1 La puissance maximale développée :

En combinant les équations (3-23) et (3-24) on aura :

$$P_{wt} = \sqrt{\frac{\rho k}{2} (\Delta p_{tot} - \Delta p_s) \Delta p_s} \quad (3-25)$$

En dérivant cette équation afin de trouver son point optimum :

$$\frac{\sigma P_{wt}}{\sigma \Delta p_s} = 0 \Rightarrow \Delta p_s = \frac{2}{3} \Delta p_{tot} \quad (3-26)$$

La puissance P_{wt} est maximale entre les deux extrémités de la surface du rectangle représentatif de la puissance, le point optimal étant :

$$\Delta p_s = \frac{2}{3} \Delta p_{tot} ,$$

d'où :

$$V_{c,ppm} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\Delta p_{tot}}{\rho c}} \quad (3-27)$$

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 (3-25), (3-26) et (3-27) la puissance maximale à l'arbre de la turbine est :

$$P_{wt,max} = \frac{2}{3} \frac{g H_c}{T_0 c_p} \eta_{coll} A_{coll} \quad (3-28)$$

3.2.3.2 Puissance fournie au réseau :

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

$$P_{électrique} = \eta_{tw} P_{wt,max} \quad (3-29)$$

3.2.4 Rendement global de Centrale a cheminée solaire :

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

$$\eta_{\text{glob}} = \frac{\text{Puissance a l'arbre de la turbine}}{\text{énergie solaire reçue}} \quad (3-30)$$

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, commentétant le produit du rendement de chaque composant de la CCS :

$$\eta_{\text{glob}} = \eta_{\text{coll}} \cdot \eta_c \cdot \eta_{tw} \quad (3-31)$$

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

3.3 Modèle de L. B. Mullett :

La force motrice de la colonne d'air dans la cheminée dérive de la différence de densité de l'air à l'intérieur et à l'extérieur de la cheminée. Si la hauteur de la cheminée est telle que la variation normale de la pression et de la température de l'atmosphère peut être négligée, ainsi que les changements de température dans la cheminée, particulièrement celle due à l'expansion adiabatique différence de pression dans la cheminée est donnée par : [61]

$$\Delta p = (\rho_0 - \rho_c) g H_c \quad \text{en } \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Pour $T_0 = 293.15$ (i.e. $T_0 = 20^\circ\text{C}$):

$$\Delta p = \rho_c g \left(1 - \frac{T_0}{T_c}\right) H_c \quad (3-32)$$

T_0 : Température de l'air ambiant.

T_c : Température à la sortie du collecteur / entrée cheminée.

g : Accélération de la pesanteur.

H_c : Hauteur de la cheminée.

3.3.1.1 Vitesse :

En négligeant les pertes dans la cheminée (une hypothèse raisonnable pour une cheminée de diamètre supérieur à $\frac{1}{20}$ de sa hauteur), la Vitesse au sommet d'une cheminée peut être obtenu en assimilant le travail effectué dans l'élévation section de la colonne d'air par la hauteur de la cheminée et de l'énergie cinétique résultante de la colonne d'air [61].

$$\frac{1}{2} \rho_1 H_c v^2 = \Delta p H_c$$

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho_1}} \sqrt{\Delta p} \quad \text{m/s}$$

en éliminant Δp :

$$V = \sqrt{\frac{2g\Delta T H_c}{T_0}} \quad (3-33)$$

3.3.1.2 Puissance nominale:

La puissance mécanique nominale peut être obtenue en calculant l'énergie cinétique au sommet de la cheminée.

$$P_m = \frac{1}{2} \dot{m} v^2$$

$$P_m = \frac{1}{2} \rho_1 v^3$$

$$P_m = \rho_1 \sqrt{2} \left[\frac{\Delta T_g H_c}{T_0} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (3-34)$$

3.3.1.3 Emplacement de l'aéro-turbine.

La vitesse uniforme à l'intérieur de la cheminée suggère un emplacement beaucoup plus souhaitable au fond. L'analyse peut alors se poursuivre, d'abord pour la cheminée ouverte représentative de l'éolienne au repos, et ensuite pour la turbine à pleine puissance.

3.3.1.4 Le rendement globale :

Le rendement globale de la conversion de l'ensoleillement en production mécanique dépend de trois facteurs:

$$\eta_{glob} = \eta_{coll} \cdot \eta_c \cdot \eta_{tw} \quad (3-35)$$

η_{coll} : Rendement du collecteur.

η_c : Rendement de la cheminée.

η_{tw} : Rendement de la turbine à air.

η_{glob} : Rendement globale de la centrale a cheminée solaire.

Le rendement globale dépendra de la géométrie et des conditions de fonctionnement du collecteur. Pour une surface de collecteur donnée, le diamètre de la cheminée et la hauteur de la couverture au-dessus du sol peuvent être choisis pour obtenir des combinaisons souhaitables de ΔT et v .

3.3.1.5 Rendement de la cheminée (Aero-Turbine au repos):

$$\eta_c = \frac{1}{2} \frac{v^2}{c_p \Delta T}$$

$$\eta_c = \frac{g H_c}{c_p T_0} \quad (3-36)$$

il est également indépendant de I_0 (pour une hauteur de cheminée H_c donné).

3.3.1.6 Température et vitesse :

En expérimentant le bilan énergétique au niveau du collecteur :

$$\eta_{coll} A_{coll} I_0 = \dot{m} C_p \Delta T$$

$$\eta_{coll} \frac{A_{coll} I_0}{A_c} = C_p \rho_0 v \Delta T \left(\frac{T_0}{T_1} \right) \quad (3-36)$$

$$\eta_{coll} \frac{A_{coll} I_0}{A_c} = C_p \rho_0 \frac{v \Delta T}{1 + \frac{\Delta T}{T_0}} \quad (3-37)$$

$$v = \left[\frac{2 \Delta T g H_c}{T_0} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-38)$$

3.4 Résolution numérique du modèle de J. Schlaich :

Les systèmes d'équations représentant le modèle de J. Schlaich ont été résolu par combinaison et substitution des inconnus, dans les différentes équations (3-2), (3-1), (3-5) et (3-11). On parvient à une équation de troisième degré qui sera résolu sous environnement MATLAB, pour obtenir l'inconnu ΔT .

$$Cst1 \Delta T + Cst2 \Delta T + Cst3 \Delta T + Cst4 = 0 \quad (3-39)$$

$$Cst1 = \left(\frac{\sqrt{2 g H_c} \rho_0 A_c C_p}{A_{coll}} \right)^2 \frac{1}{T_0}$$

$$Cst2 = -\beta^2$$

$$Cst3 = 2\alpha I_0 \beta$$

$$Cst4 = (\alpha I_0)^2$$

Après résolution et obtention de la valeur du ΔT les autres variables sont déduites en conséquence. (Voir l'organigramme ci-dessous montrant les différentes étapes du calcul.)

3.5 Résolution numérique du modèle de L. B. Mullett :

Pour le modèle de L. B. Mullett par combinaison et substitution des inconnus des équations (3-37) et (3-33) on obtient une équation de troisième degré qui sera résolu pour

obtenir l'inconnu ΔT . Après l'obtention du ΔT on peut résoudre les différentes équations du modèle de L. B. Mullett. Voir l'organigramme ci-dessous montrant les différentes étapes du calcul.

$$\text{Cst5 } \Delta T^3 + \text{Cst6 } \Delta T^2 + \text{Cst7 } \Delta T + \text{Cst8} = 0 \quad (3-40)$$

$$\text{Cst5} = (C_p \rho_0 \sqrt{2gH_c})^2 \frac{1}{T_0}$$

$$\text{Cst6} = - \left(\eta_{\text{coll}} \frac{A_{\text{coll}} I_0}{A_c T_0} \right)^2$$

$$\text{Cst7} = - \left(\eta_{\text{coll}} \frac{A_{\text{coll}} I_0}{A_c} \right)^2 \frac{2}{T_0}$$

$$\text{Cst8} = - \left(\eta_{\text{coll}} \frac{A_{\text{coll}} I_0}{A_c} \right)^2$$

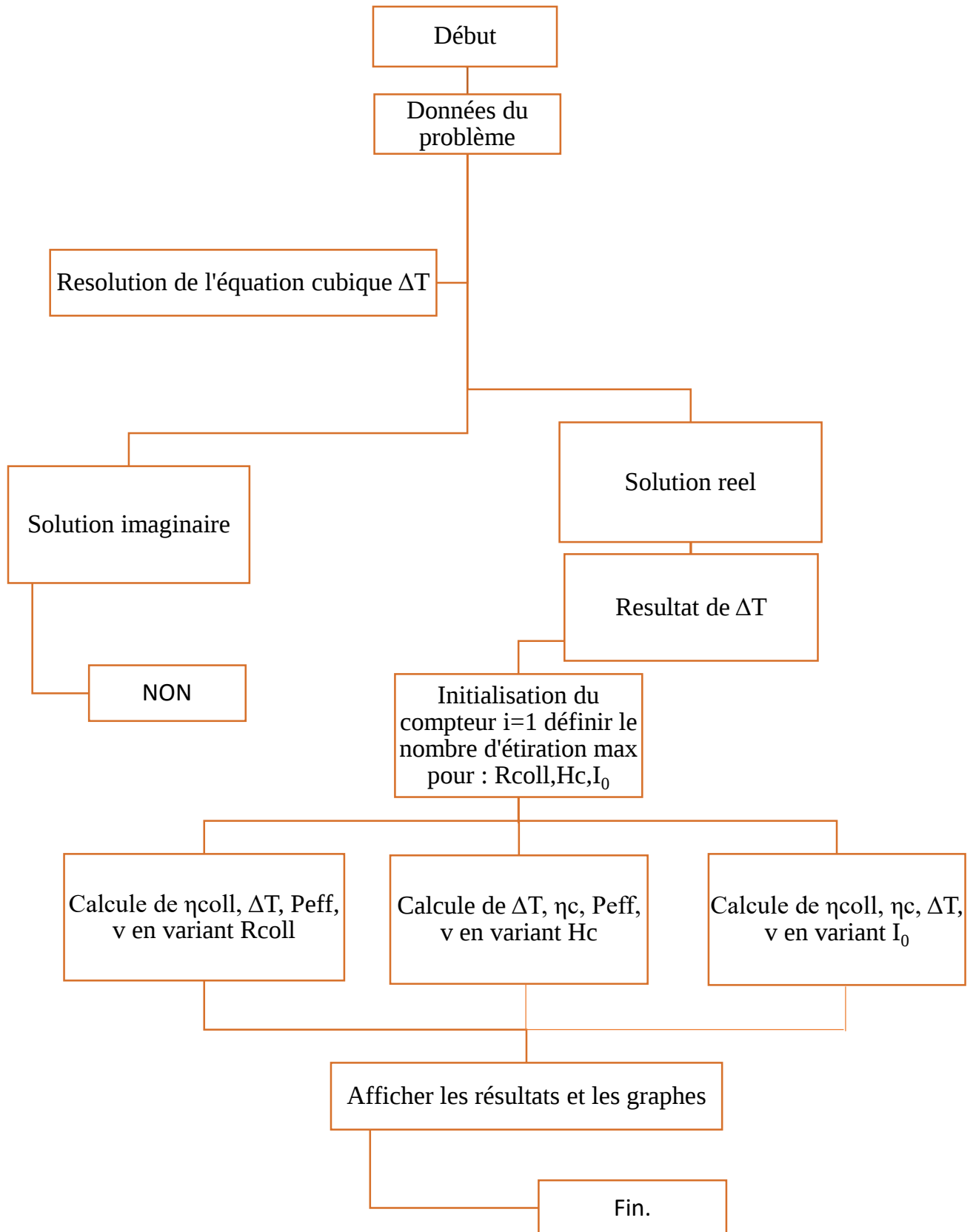


Figure III.2. Organigramme montrant les différentes étapes du calcul sous MATLAB

Chapitre 4 : Résultats & Interprétation

4 Résultats & Interprétation

4.1 Validation :

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'analyse des performances énergétiques des centrales à cheminée solaire, et la comparaison des deux modèles précédemment décrits. Les performances énergétiques ont été analysées dans le but de déterminer l'influence de certains paramètres prépondérants dans les transferts énergétiques.

Le prototype de Manzanares sera pris comme référence les dimensions du ce prototype sont :

Rayon du collecteur : $R_{coll} = 122\text{m}$

Rayon de la cheminée : $R_{CH} = 5.08\text{m}$

Hauteur de la cheminée : $H_{ch} = 195\text{ m}$

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

Irradiation solaire : $I_0 = 1000\text{ W/m}^2$

	Manza- nares	J. Schlaich		L. B. Mullett	
	Résultats	Résultats	Erreur relative	Résultats	Erreur relative
ΔT	20	20.033910	0.17%	23.5094	17.54%
v	15	16.1698	7.60%	17.5163	16.77%

Tableau IV.1. Les résultats expérimentaux de la CCS de Manzanares comparés aux résultats de la simulation.

En comparant les résultats mesurés par les chercheurs de la centrale a cheminée solaire de manzanares et les résultats obtenus par simulation, il est constatable :

- Une erreur relative inferieure a 18% pour la ΔT avec une meilleure prédiction pour le modèle de Schlaich.
- Une erreur relative inferieure a 17% pour la vitesse dans la cheminée avec une meilleure prédiction pour le modèle de Schlaich.

4.2 Influence de la variation de l'irradiation solaire I_0 :

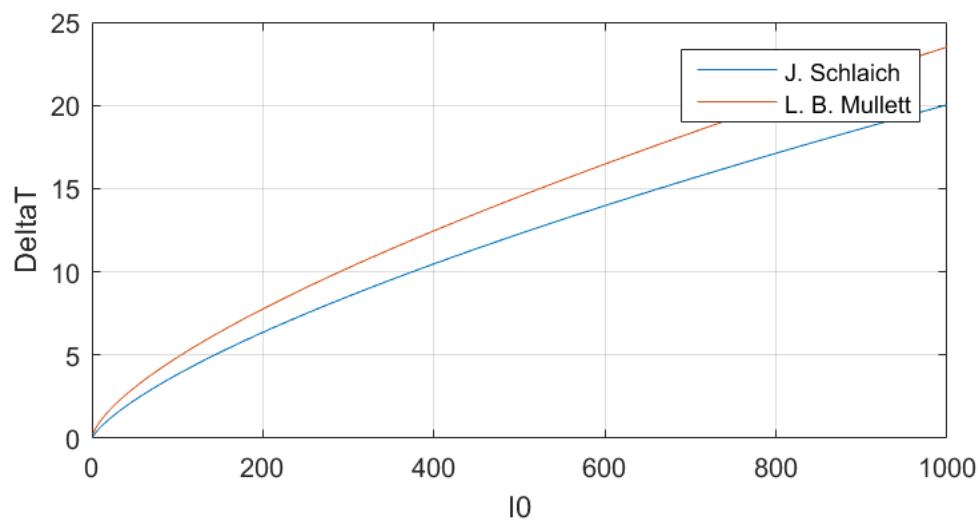


Figure IV.1. Influence de l'irradiation solaire sur le gain thermique du collecteur de la centrale a cheminée solaire.

Il est constaté que le gain thermique dans le collecteur ΔT augmente en fonction de l'irradiation solaire pour les deux courbes. Plus I_0 augmente plus l'écart s'accroît. Voir équations (3-39) et (3-40).

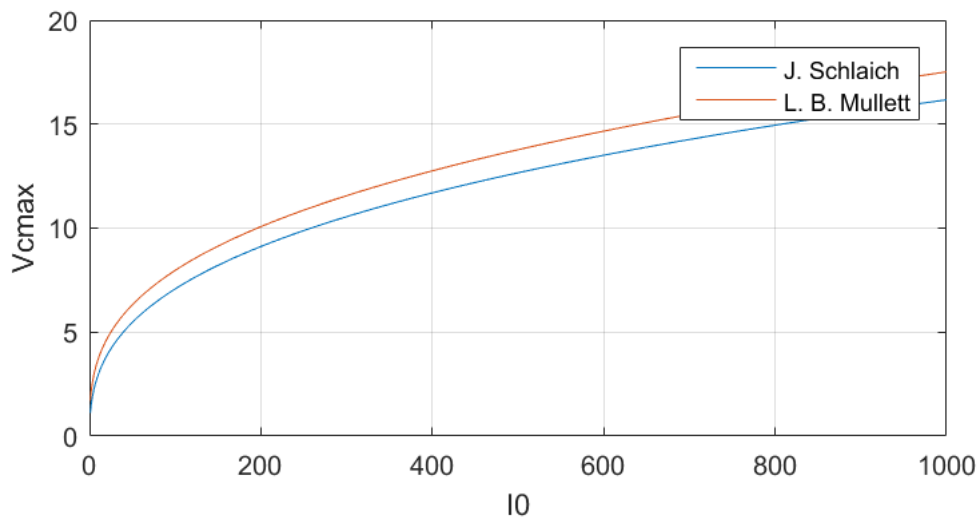


Figure IV.2. Influence de l'irradiation solaire sur la vitesse maximale dans la cheminée de la CCS

La vitesse maximale dans la cheminée augmente en fonction de l'irradiation solaire. En comparant les deux courbes des deux modèles, des résultats du modèle de Mullett sont plus élevés par rapport à ceux de Schlaich, l'écart entre les deux courbes s'accroît avec l'augmentation de I_0 . Puisque le gain thermique de Mullett est plus important par rapport au modèle de Schlaich et la vitesse est proportionnelle à ΔT , la marge peut s'expliquer par les équations (3-38) et (3-11).

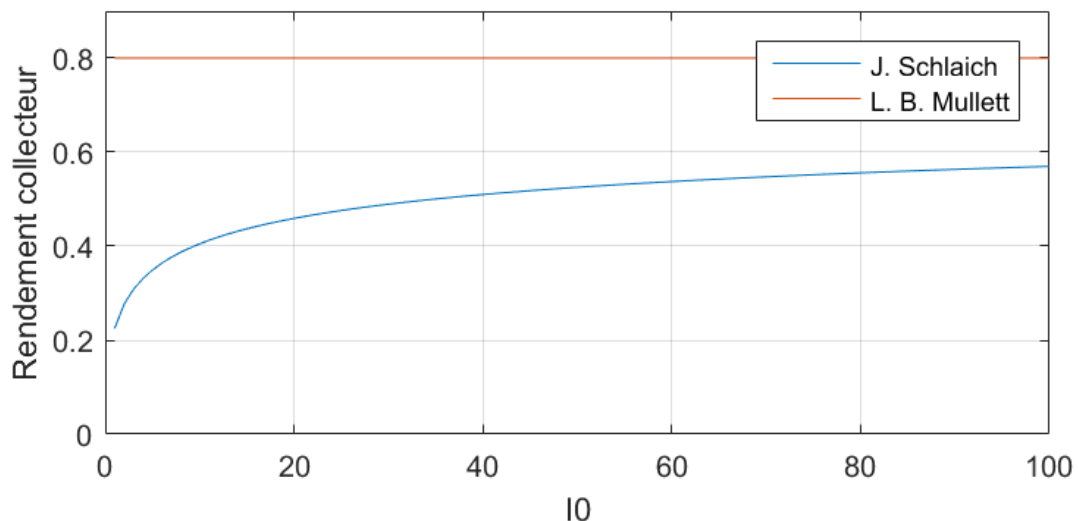


Figure IV.3. Influence de l'irradiation solaire sur le rendement du collecteur de la centrale à cheminée solaire.

Le rendement du collecteur de modèle de Mullett reste constant puisque le modèle lui-même suppose une valeur constante pour η_{coll} .

Pour le modèle Schlaich le rendement du collecteur augmente en fonction de I_0 . Il dépend de α, β et l'irradiation solaire I_0 de l'équation (3-6).

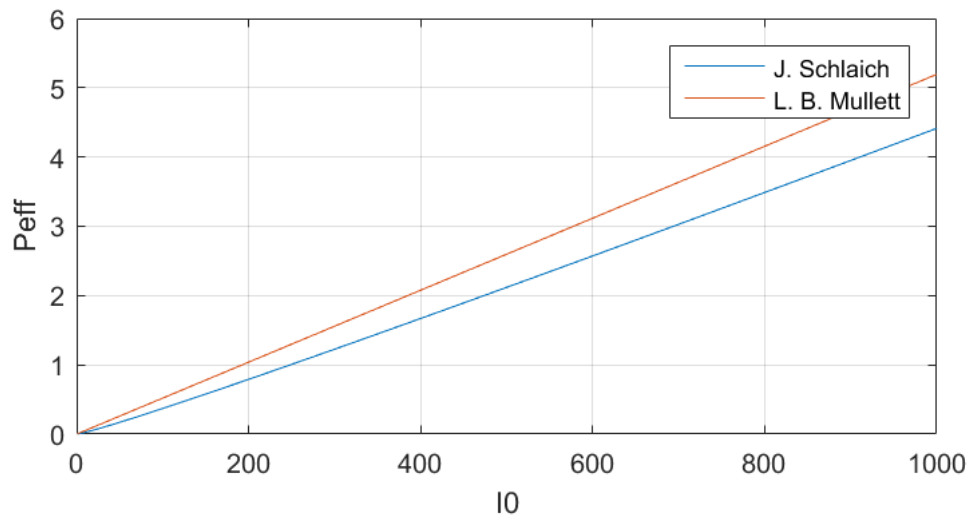


Figure IV.4. Influence de l'irradiation solaire sur la puissance effective

La puissance effective P_{eff} augmente linéairement ainsi que l'écart entre les deux modèles avec l'augmentation de l'irradiation solaire I_0 , cela peut s'expliquer par la différence dans le rendement des collecteurs des deux modèles. Comme on peut le voir dans l'équation suivante :

$$P_{eff} = \eta_{coll} \eta_c I_0 \quad (4-1)$$

4.3 Influence de la variation de la hauteur de la cheminée H_{ch} :

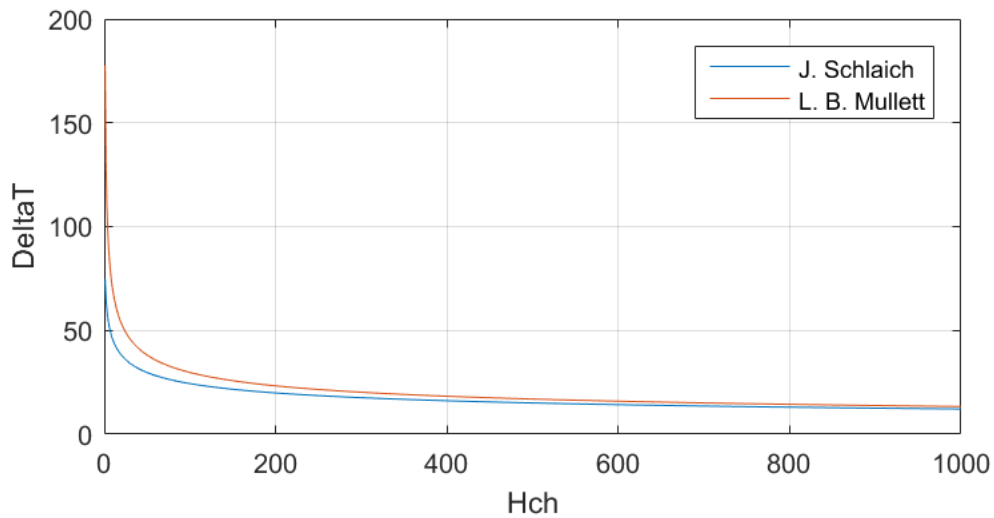


Figure IV.5. Influence de la hauteur de la cheminée sur la différence de température entre l'entrée et la sortie du collecteur

On remarque que la différence de température entre l'entrée et la sortie du collecteur diminue avec l'augmentation de la hauteur de la cheminée pour les deux modèles. Avec la hausse de la hauteur de la cheminée la vitesse augmente à ce moment en conséquence le débit massique croît ce qui se répercute sur le gain thermique. Voir équations (3-39) et (3-40).

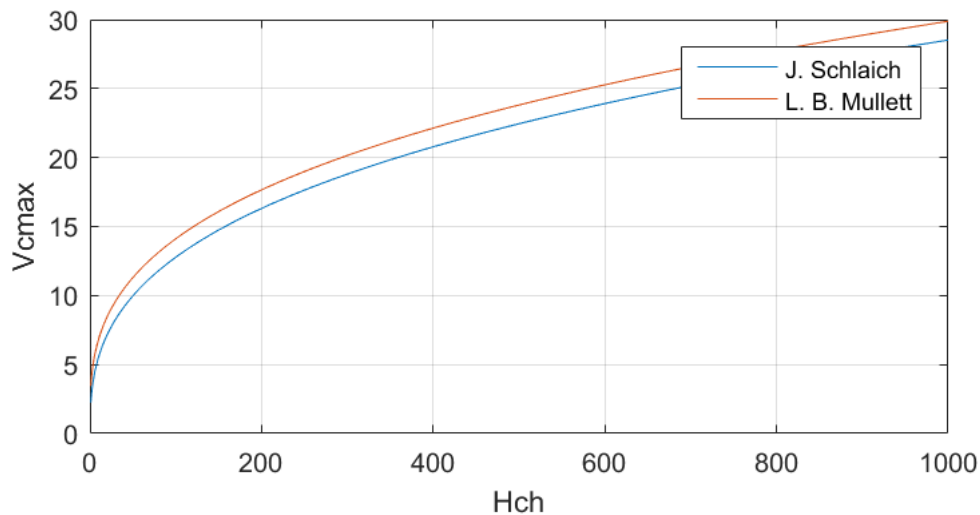


Figure IV.6. Influence de la hauteur de la cheminée sur la vitesse maximale dans la cheminée

La vitesse augmente en fonction de la hauteur de la cheminée. Les deux courbes varient de manière similaire avec des résultats plus élevés pour le modèle de Mullett.

La marge entre les deux courbes augmente avec la H_{ch} . la différence entre les deux modèles est liée à la ΔT , qui est plus importante pour le cas Mullett. Équations (3-38) et (3-11).

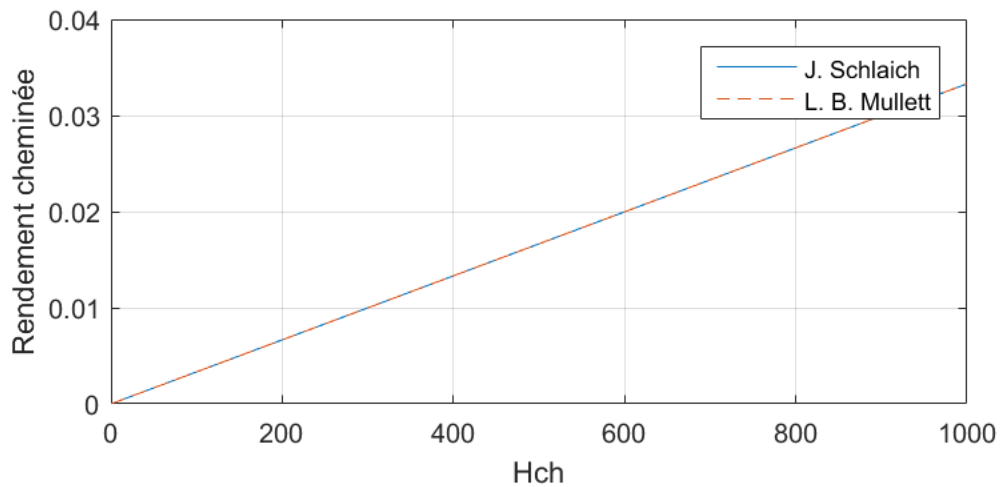


Figure IV.7. Influence de la hauteur de la cheminée sur le rendement de la cheminée.

Les deux courbes pour les deux modèles sont superposés. Le rendement de la cheminée des deux modèles est identique avec une augmentation linéaire en fonction de la hauteur de la cheminée. Équations (3-18) (3-36).

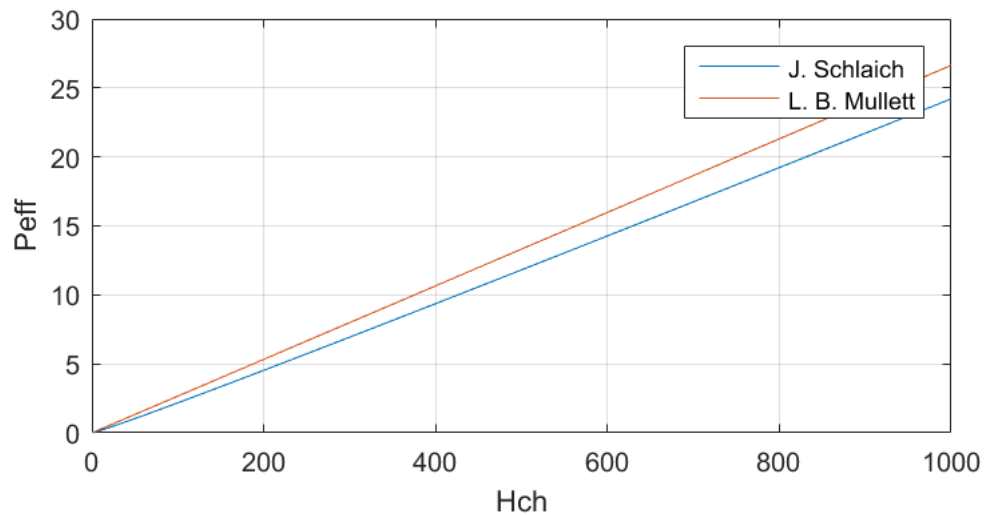


Figure IV.8. Influence de la hauteur de la cheminée sur la puissance disponible.

La puissance effective augment en fonction de la hauteur de la cheminée, les deux courbes varient d'une manière similaire. L'écart entre les deux modèles s'accroît avec l'augmentation de la H_{ch} . Cela est dû au rendement fixe du collecteur pour le modèle de Mullett. Équation (4-1).

4.4 Influence de la variation du rayon du collecteur R_{coll} :

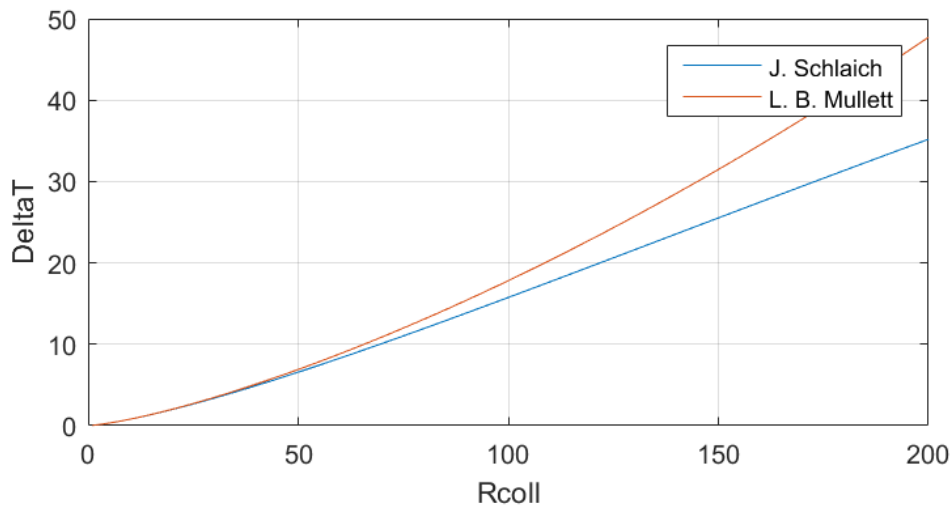


Figure IV.9. Influence du rayon du collecteur sur le gain thermique dans le collecteur.

La différence de température ΔT dans collecteur, augmente proportionnellement avec le rayon de ce dernier. Le décalage entre les deux courbes augmente avec l'augmentation du R_{coll} . Voir équations (3-39) et (3-40).

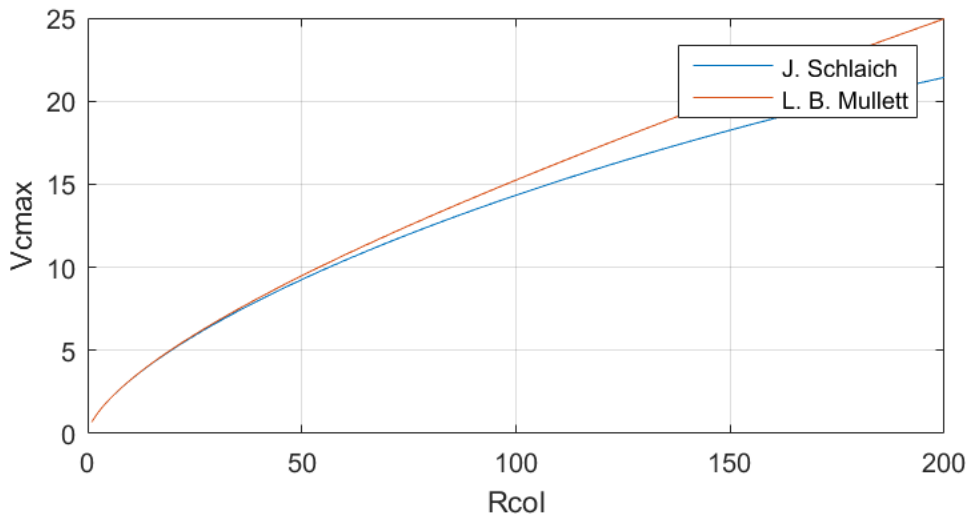


Figure IV.10. Influence du rayon du collecteur sur le rendement du collecteur.

La vitesse maximale dans la cheminée augmente au regard du rayon du collecteur. Les deux courbes varient d'une manière identique. L'écart entre les deux courbes s'accroît avec l'augmentation R_{coll} . Équation (3-38) et (3-11).

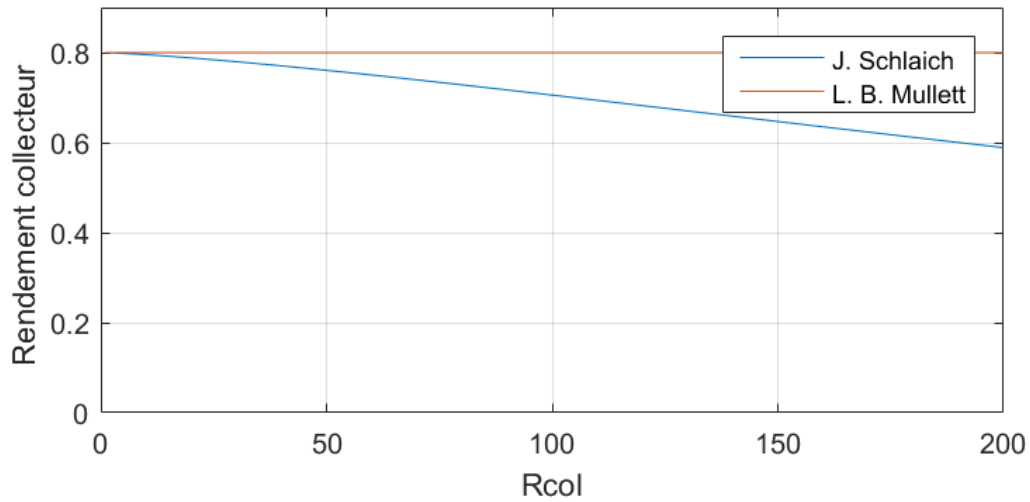


Figure IV.11. Influence du rayon du collecteur sur le rendement du collecteur.

Le rendement du collecteur du modèle de Mullett reste constant, du moment que le modèle lui-même suppose une valeur fixe pour le rendement η_{coll} .

Pour le modèle de Schlaich la courbe diminue avec l'augmentation du rayon du collecteur qui s'explique par l'équation (3-6).

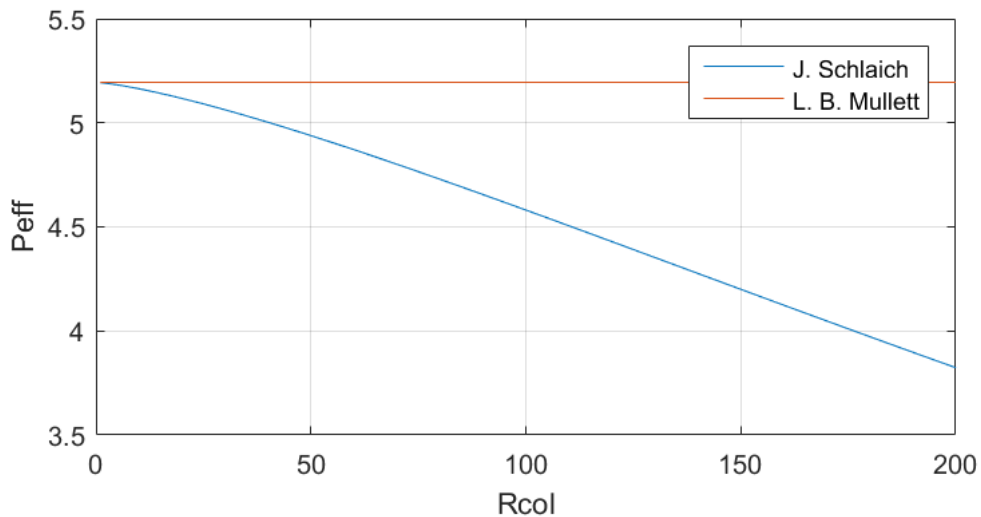


Figure IV.12. Influence du rayon du collecteur sur la puissance effective.

Pour le modèle de Mullett la courbe de la puissance effective reste constante et pour le modèle de Schlaich la puissance effective diminue avec l'augmentation de R_{coll} . Voir l'équation (4-1). Puisque la puissance effective est relative au rendement du collecteur

conséquemment les résultats de P_{eff} suivent les résultats précédant du rendement en fonction R_{coll} .

4.5 Conclusion :

Il est constatable des écarts entre les deux modèles pour les variations de paramètre significatif ainsi que des similarités sont remarquées pour certains paramètres Exp (η_c). Ces constatations sont résumées dans la conclusion générale.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Les centrales solaires à cheminée (CSC) peuvent être une solution appropriée pour atténuer les problèmes liés à la pollution et un palliatif aux énergies fossiles.

Le travail présenté dans ce mémoire est relatif à l'analyse des performances énergétiques des centrales à cheminée solaire en comparant deux différents modèles mathématiques issus de la littérature. L'analyse des résultats obtenus, nous a permis de conclure :

- Les différences de résultats entre les deux méthodes est dû aux hypothèses adoptées. par exemple le modèle de Mullett fixe le rendement du collecteur malgré les variations des paramètres (R_{coll} et I_0). La méthode de Schlaich considère que le rendement du collecteur dépend des paramètres α et β .

- Avec l'augmentation de la hauteur de la cheminée, la vitesse de l'air dans le système augmente en conséquence une augmentation du débit massique augmente ce qui se répercute sur le gain thermique entre l'entrée et la sortie du collecteur.

- La fixation du rendement du collecteur par Mullett influence les résultats (ΔT , V_{cmax} et P_{eff}). En effet une surestimation des résultats en comparaison avec la méthode de Schlaich est constatée. Le modèle de Mullett néglige les déperditions dans le collecteur, celle-ci ne sont pas comptabilisés en fonction des dimensions du collecteur.

- Des similitudes dans certains résultats sont constatées, comme le rendement de la cheminée qui varie linéairement pour les deux méthodes. En effet le rendement de la cheminée dépend uniquement de H_{ch} , T_0 et C_p .

- puisque la hauteur de la cheminée augmente le rendement de la cheminée tout en diminuant le gain thermique ΔT , un compromis doit être trouvé entre la hauteur de la cheminée et le rayon du collecteur pour avoir les meilleures performances possibles.

- Le présent travail peut être étudié par une simulation numérique en utilisant un logiciel de CFD. Les résultats pourront être confrontés aux résultats de la CFD.

Références Bibliographiques

- [1]. ↑ a, b, c et d (en) [PDF] Agence internationale de l'énergie (AIE - en anglais : International Energy Agency - IEA) Key World Energy Statistics 2016 [archive], 16 octobre 2016.
- [2]. <https://www.irena.org/energytransition>
- [3]. Ministère de la Transition Energétique et des Energies Renouvelables. Consulté le 8 Mai. 2021 <https://www.mteer.gov.dz/index.php/fr/politique-de-la-transition-energetique/modele-energetique>
- [4]. Centre de Developpement des Energies Renouvelables. Consulté le 8 Mai. 2021. <https://www.cder.dz/spip.php?rubrique225>
- [5]. Agence internationale de l'énergie (AIE - en anglais : International Energy Agency - IEA). <https://www.irena.org/bioenergy>
- [6]. Observ'ER. http://www.energies-renouvelables.org/solaire_photovoltaique.asp#
- [7]. Étude « Solar Heat Worlwide » 2014, AIE
- [8]. Observ'ER. http://www.energies-renouvelables.org/solaire_thermique_ht.asp. Consulté le 28 Juin. 2021
- [9]. Frédéric POITIERS «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation yrelée au réseau» Thèse de Doctorat Université de Nantes, 2003.
- [10]. AFHYPAC. www.afhypac.org
- [11]. <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/tout-savoir-lhydrogene>
- [12]. Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida. <https://www.sktm.dz/?page=article&id=11>
- [13]. elwatan. Disponible sur : <https://www.elwatan.com/edition/economie/creation-dune-societe-enr-mixte-sonatrach-sonelgaz-que-deviendra-le-programme-solaire-des-1000-megawatts-22-04-2021#>
- [14]. Jörg Schlaich, Rudolf Bergermann, Wolfgang Schiel, Gerhard Weinrebe Schlaich, Bergermann und Partner (sbpgmbh), Hohenzollernstr. 1, 70178 Stuttgart, Germany. Design of Commercial Solar updraft tower systems –Utilization of Solar Induced convective Flows for Power generation, 2003.
- [15]. Kreetz, H., Theoretische Untersuchungen und Auslegung eines temporären, Diplomarbeit TU Berlin, Berlin, 1997.
- [16]. Sheldon J., Ripples from the Gulf of Mexico, International Energy Law Review, Vol. 1, pp. 12- 18, 2011

- [17]. <http://dissertationsenligne.com/Sciences-et-Technologies/Les-%C3%89nergies-DHier-Et-De/29118.html>
- [18]. Foster R., Ghassemi M., Cota A., Solar Energy, Renewable Energy and the Environment, Taylor and Francis Group Edition, New York, USA, 2009.
- [19]. Schlaich, J., The Solar Chimney, Axel Menges Edition, Stuttgart, Germany, 1995.
- [20]. Schlaich, J. And Schiel, W., Solar Chimneys. Encyclopedia of Physical Science and Technology, pp.99-109, 2004.
- [21]. Schlaich, J., Bergermann, 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.
- [22]. 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.
- [23]. Haaf, W., Solar chimneys, part II: preliminary test results from the Manzanares pilot plant. Int. J. Solar Energy, Vol.2, pp.141–161 1984.
- [24]. Mullet, L.B., The solar chimney overall efficiency, design and performance.Int. J. Ambient Energy, Vol. 8, pp.35–40, 1987.
- [25]. E. Gholamalizadeh, S.H. Mansouri. A comprehensive approach to design and improve a solar chimney power plant: A special case – Kerman project. Applied Energy 102: 975–982. 2013.
- [26]. F.J. Hurtado, A.S. Kaiser, B. Zamora. Evaluation of the influence of soil thermal inertia on the performance of a solar chimney power plant. Energy 47: 213-224. 2012.
- [27]. Padki, M.M., Sherif, S.A., A mathematical model for solar chimneys. In: Proceedings of International Renewable Energy Conference, Amman, Jordan, 1992.
- [28]. Padki, M. M., Sherif, S. A., On a Simple Analytical Model for Solar Chimneys. Int. J. Energy Res., Vol. 23, pp. 345-349, 1999.
- [29]. 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.
- [30]. Kreetz H. Theoretische Untersuchungen und Auslegung eines temporären Wasserspeichers für das Aufwindkraftwerk. Diplomarbeit. Berlin: Energie und Verfahrenstechnik der TU Berlin, 1997.
- [31]. 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.

- [32]. 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.
- [33]. 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
- [34]. 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.
- [35]. BernardesM.A. dos S.,Weinrebe, A. Voß G., Thermal and technical analyses of solar chimneys, *Solar Energy*, Vol. 75, pp. 511–524, 2003.
- [36]. 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.
- [37]. 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.
- [38]. Gannon A.J, Von Backström T.W., Solar chimney turbine part 1 of 2: design. In: *International solar energy conference*, Houston, USA, 2002.
- [39]. 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.
- [40]. 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.
- [41]. 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.
- [42]. 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.
- [43]. Pretorius J.P., Optimization and control of a large-scale solar chimney power plant. Ph.D. Thesis, University of Stellenbosch. South Africa, 2007.
- [44]. Pretorius J.P, Kröger D.G., Solar chimney power plant performance. *J. Solar Energy Eng.*, Vol. 128, pp. 302–311, 2006.

- [45]. Pretorius, J.P., Kröger, D.G., Critical evaluation of solar chimney power plant performance. *Solar Energy*, Vol.80, pp. 535–544, 2006.
- [46]. 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.
- [47]. Kulunk H., A prototype solar convection chimney operated under Izmit conditions. In: *Proceedings of the 7th Miami international conference on alternative energy sources*, 1985.
- [48]. 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
- [49]. 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.
- [50]. Davey R.C., Device for generating electricity from solar power. WO 2008/022372 A1, February 2008.
- [51]. 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.
- [52]. 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.
- [53]. Petela R., Thermodynamic study of a simplified model of the solar chimney power plant. *Solar Energy*, Vol. 83, pp. 94–107, 2009.
- [54]. Zhou X., Yang J., Xiao B., Hou G., Xing F., Analysis of chimney height for solar chimney power plant. *ApplThermEng*, Vol. 29, pp. 178- 185, 2009.
- [55]. 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.
- [56]. Koonsrisuk A., Lorente S., Bejan A., Constructal solar chimney configuration. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp.327–333, 2010.

- [57]. Krisst R.J.K. Energy transfer system. Alternat. Sources Energy, Vol. 63, pp.8–11, 1983.
- [58]. Koyun A, Üçgül, Acar M, Senol R. Günes , BacasıSistemininTermalÖzetDizaynı. TesisatMühendisligiDergisi 2007;98: 45-50. available at: <http://www.mmoistanbul.org/yayin/tesisat/98/6>
- [59]. BOUALLEG.SALIM, Mekki. Analyse des performances énergétiques des centrales cheminées solaires par utilisation de différents modèles mathématiques. Thèse de Magister. Ecole Nationale Polytechnique: 2012.
- [60]. Salim Mekki Boualleg, Salah Larbi, Amor Bouhdjar, Dalila Amokrane, Abdallah Sofiane Berrouk, Influence of environment and aging materials on the performance of solar chimney power plants, Renew. Energy Environ. Sustain. 6, 11 (2021).
- [61] Jackson, Kenneth R. "Sizing Considerations for Chimneys up to 80 metres high" Proceedings of the International Chimney Symposium, Edinburgh. 1976.