

RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET
POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ ABOU-BEKR BELKAÏD - TLEMCEM

FACULTÉ DES SCIENCES - DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

Résumé de la Thèse de Doctorat

de

Monsieur NACEUR Rabie

PRODUCTION D'ÉNERGIE PAR UTILISATION DES FILMS
POLYMERES DANS LES CENTRALES A CHEMINEES
SOLAIRES

Introduction Générale

La consommation mondiale d'énergie ne cesse d'augmenter, influencée par le développement technique, l'accroissement de la population et la croissance économique qui en résulte. Ainsi le 20^{ième} siècle a vu la population mondiale multipliée par 4 et la consommation énergétique multipliée par 20 !.

La recherche et le développement de technologies basées sur les énergies renouvelables sont reconnus comme essentiels. La centrale thermique à cheminée solaire offre un moyen de générer de grandes quantités d'énergie électrique à partir de l'énergie solaire. Aussi parfois appelée tour solaire à courant ascendant, la SCPP (Solar Chimney Power Plant) est une centrale solaire à grande échelle adaptée au déploiement dans le désert.

Les cheminées thermiques solaires ont des exigences de fonctionnement et de maintenance minimales. Les usines des SCPP ont prédit des durées de vie opérationnelles allant jusqu'à 100 ans. La SCPP peut générer de l'énergie à partir de très basses différences de température.

La centrale solaire à cheminée génère de l'énergie sur la base de deux principes de base : l'effet de serre et le phénomène de la flottabilité. L'irradiation solaire passe à travers la vitre du collecteur, celle-ci est absorbée par le sol en dessous. Par effet de serre, l'air sous le collecteur est chauffé, comme la densité de l'air à l'intérieur du système est inférieure à celle de l'environnement à la même hauteur, une convection naturelle affectée par la flottabilité, qui agit comme la force motrice, est créée. En raison de l'existence de la cheminée qui est érigée au milieu du collecteur, la flottabilité cumulée entraîne une grande différence de pression entre le système et l'environnement. L'air chauffé monte ensuite très rapidement dans la cheminée. Une turbine placée dans la cheminée et raccordée à un générateur approprié capte l'énergie cinétique de l'air en mouvement et produit de l'énergie électrique.

I. Éléments de base sur la conception et le développement des centrales à cheminée solaire

1. Le contexte énergétique mondial

La production d'électricité dans les tours solaires à effet cheminée suit le principe de la transformation de chaleur en électricité. On transforme la chaleur en énergie mécanique, sous la forme d'un vent créé à le gradient de température entre l'environnement et à l'intérieur de centrale qui fait tourner une turbine localisée aux bouchures de la cheminée.

Selon les estimations préliminaires de l'AIE (Agence Internationale d'Énergie), la demande mondiale d'énergie a augmenté de 2,1% en 2017, soit plus de deux fois le taux de croissance de 2016. La demande mondiale d'énergie a atteint environ 14 050 millions de tonnes d'équivalent pétrole (Mtep) en 2017, contre 10 035 Mtep en 2000.

2. Quelques technologies des systèmes solaires

Alors que le monde s'éloigne des combustibles fossiles, la recherche sur différents types de technologies utilisant des énergies renouvelables progresse rapidement. Parmi les sources d'énergie renouvelables disponibles, l'énergie solaire est l'une des plus prometteuses.

Beaucoup de concepts ont été sujets de recherches dans le but d'exploiter l'énergie du soleil, dont les plus remarquables étant les suivants :

- ❖ Les tours solaires à concentration
- ❖ Les centrales photovoltaïques
- ❖ Les centrales thermiques cylindro-paraboliques
- ❖ Les centrales électriques à cheminée solaire

3. La conception d'une cheminée solaire

La centrale thermique à cheminée solaire offre un moyen de générer de grandes quantités d'énergie électrique à partir de l'énergie solaire. Aussi parfois appelée tour solaire à courant ascendant, la SCPP (Solar Chimney Power Plant) est une centrale solaire à grande échelle adaptée au déploiement dans le désert.

Les cheminées thermiques solaires ont des exigences de fonctionnement et de maintenance minimales. Les usines des SCPP ont prédit des durées de

vie opérationnelles allant jusqu'à 100 ans. La SCPP peut générer de l'énergie à partir de très basses différences de température.

3.1. Principe de fonctionnement

La centrale solaire à cheminée génère de l'énergie sur la base de deux principes de base : l'effet de serre et le phénomène de la flottabilité. L'irradiation solaire passe à travers la vitre du collecteur, celle-ci est absorbée par le sol en dessous. Par effet de serre, l'air sous le collecteur est chauffé, comme la densité de l'air à l'intérieur du système est inférieure à celle de l'environnement à la même hauteur, une convection naturelle affectée par la flottabilité, qui agit comme la force motrice, est créée.

En raison de l'existence de la cheminée qui est érigée au milieu du collecteur, la flottabilité cumulée entraîne une grande différence de pression entre le système et l'environnement. L'air chauffé monte ensuite très rapidement dans la cheminée. Une turbine placée dans la cheminée et raccordée à un générateur approprié capte l'énergie cinétique de l'air en mouvement et produit de l'énergie électrique.

3.2. Description de la cheminée solaire

Une tour à cheminée solaire consiste en un capteur solaire (collecteur) qui génère de l'air flottant ; une haute cheminée par laquelle l'air flottant monte ; et une turbine et un groupe électrogène qui extraient l'énergie de la différence de pression qui l'entraîne, générant de l'électricité.

3.2.1. Le collecteur

Le collecteur d'air solaire ouvert (une sorte de serre) d'un SCPP est l'échangeur de chaleur de la centrale électrique où le rayonnement solaire est absorbé et converti en énergie thermique. Il est composé d'une matrice de support, d'une structure en colonne, d'un toit transparent et du sol.

3.2.2. La cheminée

La cheminée est la caractéristique principale de la tour à cheminée solaire. La cheminée est située au centre du collecteur et constitue le moteur

thermique de l'installation. Elle crée un différentiel de température entre l'air froid en haut et l'air chauffé en bas. La variation de la température de l'air induit un différentiel de pression qui chasse l'air du bas de la cheminée.

3.2.3. La turbine

Les turbines sont souvent positionnées à la base de la cheminée. L'utilisation des turbines permet d'extraire une quantité d'énergie disponible dans l'air en écoulement, sous forme d'énergie mécanique de rotation. Des générateurs couplés aux turbines permettent la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

3.3. Avantages et inconvénients

- ❖ Comme toutes les centrales vues auparavant, c'est une source d'énergie inépuisable et gratuite.
- ❖ Les centrales ne polluent pas
- ❖ Le système fonctionne jour et nuit et sans intermittence car la chaleur est toujours présente sous la serre même la nuit.
- ❖ Elles ne demandent que très peu d'entretien grâce à la simplicité du fonctionnement.
- ❖ Ces centrales demandent un investissement très important.
- ❖ Etant donné l'immensité des tours, certaines personnes y voient un gâchis du paysage.

4. Projets et développement de la cheminée solaire

Le concept de la cheminée solaire a été proposé depuis plus de 100 ans. En 1903, Isidoro Cabanyes, un colonel de l'armée espagnole, a proposé à l'origine une centrale solaire à cheminée figure, dans le magasin « La energia eléctrica ». En 1931, un chercheur allemand, Hanns Günther a avancé une technologie de génération d'énergies de cheminée solaires.

4.1. Le projet de Manzanares

Dans les années 1981-1982, un prototype d'une centrale électrique à cheminée solaire, d'une puissance maximale de 50 KW a été construite à Manzanares, en Espagne (environ 150 km au sud de Madrid).

La hauteur et le diamètre de la cheminée 194.6 m et 5.06 m ; le diamètre de collecteur 240 m ; surface du collecteur toit en verre 6000m².

4.2. Le projet Australien de Borunga

En 2001, une compagnie appelée « EnviroMission » a annoncé qu'elle prévoyait construire une cheminée solaire (*Borunga*) de 200 Mégawatts dans le sud-ouest de l'Australie, ce qui pourrait générer 4000 fois plus d'énergie que le système Manzanares. Mais pour obtenir ce type de puissance, « EnviroMission » devait construire une cheminée solaire de 130 m de diamètre et de 1000 m de hauteur, soit plus de 11 fois la hauteur de la Statue de la Liberté.

4.3. Le projet Chinois

La région de Jinsha Bay Wuhai en Mongolie intérieure (Chine) a construit un prototype de cheminée solaire expérimental de 200 kW. La capacité totale prévue jusqu'en décembre 2013 de ce projet était 27,5 MW, représentant un total de 2,78 millions de m² de désert occupé par des serres en tant que collecteur et un investissement total de 1,38 milliards de yuans.

II. Prototype Expérimental et Outils de Simulation

1. Les Polymères

Un polymère est une matière organique de poids moléculaire important constituant une grosse molécule avec des motifs répétitifs liés entre eux avec des liaisons chimiques covalentes. Ainsi cette grosse molécule est appelée macromolécule.

1.1. Les différents types de polymères

On peut classer les polymères en deux types en fonction de leur réaction à la chaleur : les thermoplastiques et les thermodurcissables.

1.2. Les Polyéthylènes

Les PE (polyéthylènes) font partie des thermoplastiques parmi toutes les matières plastiques. C'est-à-dire qu'ils ont des propriétés qui leur confèrent une malléabilité à chaud et une thermo plasticité réversible. Mais ils sont de natures différentes selon les modes de polymérisation :

- ❖ à partir d'une méthode à haute pression, on obtient un polymère très ramifié appelé le polyéthylène basse-densité PEbd.
- ❖ à l'inverse on utilise un procédé à basse pression pour obtenir le polyéthylène à haute densité PEhd.

1.2.1. Propriétés Physico-chimiques

Le polyéthylène présente une stabilité chimique, en d'autres termes une très bonne résistance aux acides faibles, aux bases faibles et fortes, une résistance moyenne pour les acides non oxydants et les solvants organiques. Il est insoluble dans l'eau et particulièrement adaptable à l'utilisation alimentaire (pas de toxicité). Par contre, il est très sensible aux radiations Ultraviolets. Ses propriétés électriques sont excellentes.

2. Prototype expérimental

Notre prototype expérimental a été réalisé par une équipe de recherche (Conception of materials and electronic devices in diagnostic in veterinary medicine, Reproduction of farm animals Laboratory, Veterinary sciences institute, Ibn Khaldoun University.) au niveau de l'Université Ibn Khaldoun à Tiaret (35 ° 21'00.0 "N 1 ° 18'47.2" E) (Figure (2.3), il se compose des parties suivantes :

- ✓ Un Collecteur incliné avec un angle égal à 30° et 3 m de diamètre et qui est recouvert de polyéthylène basse densité (LDPE) afin d'obtenir un effet de serre. Le point de fusion du LDPE commercial est typique de 105 à 115 (°C).
- ✓ Des matériaux en plastique noir et en aluminium ont été utilisés comme absorbeurs sous le collecteur en raison de leurs propriétés thermiques intéressantes et de leur qualité de haute réflexion optique respectivement.
- ✓ Une cheminée de 6 m de hauteur, 110 mm de diamètre et 3,2 mm d'épaisseur a été fabriquée en polychlorure de vinyle (PVC) en raison de sa haute résistance au transfert de chaleur. Des détails sur la cheminée solaire.

3. Instruments de mesure et acquisition des données

3.1. Mesures de la température

On a utilisé le dispositif électronique « LM35 », c'est un capteur de température à circuit intégré, avec une tension de sortie linéairement proportionnelle à la température Centigrade. Le LM35 est conçu pour fonctionner sur une plage de température de -55°C à $+150^{\circ}\text{C}$, il a un auto-échauffement très faible, moins de $0,1^{\circ}\text{C}$ dans l'air calme.

3.2. Mesure de l'irradiation solaire

BH1750 est un capteur de lumière numérique. Il est capable de détecter une large gamme de rayons avec une grande sensibilité. Ce capteur a des avantages tels que :

- ✓ Conversion de l'ensoleillement vers des datas numériques
- ✓ Large gamme et haute sensibilité. (1 - 65535 lux).
- ✓ Faible courant par la fonction de mise hors tension.
- ✓ 50Hz / 60Hz Fonction de rejet de bruit léger.
- ✓ Il est possible de détecter min. 0,11 lx, max. 100000 lx en utilisant cette fonction.

3.3. Mesure de la vitesse de l'air et de l'humidité

Le thermo-Hygro-Anémomètre PCE-THA 10 a été utilisé pour mesurer la température, l'humidité et la vitesse de l'air avec le logiciel fourni et le câble USB à l'ordinateur.

4. Méthode de modélisation

La modélisation est une conséquence directe du développement de méthodes de calcul avancées ainsi que des énormes progrès des ordinateurs numériques en termes de processeurs et de puissance de traitement graphique. La combinaison de méthodes des calculs de mathématiques appliquées et de puissants ordinateurs a créé un outil précieux pour les chercheurs et les scientifiques spécialisés dans la modélisation de leurs conceptions.

Le modèle mathématique peut être un système d'équations algébriques, d'équations différentielles ordinaires (ODE), d'équations différentielles partielles (PDE), ou une forme plus complexe d'équations différentielles intégrales sous la forme d'une fonctionnelle.

4.1. La méthode des éléments finis

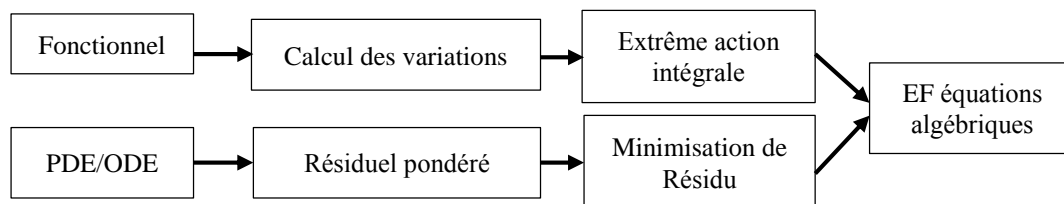
La méthode des éléments finis (MEF) est une méthode de calcul dominante dans le domaine des sciences appliquées. Il existe également d'autres méthodes telles que les volumes finis, les différences finies, les éléments finies qui sont utilisés dans la pratique.

Nous utilisons la MEF pour trouver des solutions, cette méthode devient plus utile lorsqu'un problème a une géométrie complexe et des conditions aux limites complexes.

La procédure de calcul MEF commence par diviser la géométrie du problème en plusieurs sous-divisions. Cette étape du processus s'appelle le maillage. Les sous-divisions ou éléments sont de simples formes géométriques, telles que des triangles, des quadrilatères, des tétraèdres ou des hexagones. Ensuite, la variation de la quantité en question qui est régie par la PDE et ODE pertinente par exemple, température, pression de fluide), est approché à l'aide de fonctions simples avec les valeurs des variables dépendantes aux nœuds des éléments.

Les équations obtenues pour chaque élément sont ensuite collectées pour former le système global d'équations algébriques qui peuvent être résolues à l'aide des solveurs standard et avancés disponibles. Les solutions sont les valeurs nodales de la quantité en question (c'est-à-dire le déplacement, la température, la pression).

L'organigramme de la formulation par éléments finis, illustre le processus :



5. L'environnement de simulation : COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreux phénomènes physiques et applications en ingénierie, et tout

particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques, il dispose d'une interface utilisateur graphique bien développée.

Son histoire remonte à l'époque où ce code de calcul s'appelait FEMLAB et était écrit sur la base de MATLAB, alors que les versions les plus récentes sont des paquets autonomes. Le maillage avec COMSOL est presque transparent et «automatique», mais il offre aux utilisateurs le choix d'avoir un maillage personnalisé pour des types structurés et non structurés.

5.1. L'interface graphique

Après l'installation du logiciel COMSOL sur un ordinateur et lors de son lancement, une fenêtre similaire à celle illustrée s'ouvre. Cette fenêtre comporte trois parties principales :

- Grâce aux fonctions de l'assistant de modèle (Model Wizard), l'utilisateur peut choisir la dimension géométrique du modèle (0D à 3D), y compris les problèmes axisymétriques 1D ou 2D.
- Un utilisateur peut passer à la fenêtre suivante pour choisir la bonne configuration physique pour le modèle. Les modules de physique disponibles dépendent de la licence logicielle achetée. Des caractéristiques supplémentaires peuvent être ajoutées à la licence de base.
- En cliquant sur la flèche dans le coin en haut à droite, l'utilisateur passera à la fenêtre suivante pour choisir le type d'étude. Plusieurs études sont disponibles sur la base des caractéristiques de la licence achetée ainsi que le code physique choisi.
- Chacune de ces fenêtres principales comporte des onglets permettant aux utilisateurs de modifier le contenu de la fenêtre correspondante, si nécessaire, et de les déplacer, de les détacher à partir de la fenêtre principale ou modifier la mise en page.
- En utilisant les outils de dessin pour créer une géométrie relativement simple dans COMSOL, ou en important une géométrie à partir d'un logiciel de CAO commercial.

- le module principal permettant d'importer un fichier de géométrie de manière transparente s'appelle Interfaces LiveLink et doit être acheté dans le cadre de la licence utilisateur.

6. Conclusion

Les centrales solaires à effet cheminées constituent la solution parfaite dans la matrice des énergies renouvelable. Non seulement elles permettront de produire de l'électricité en masse et à un coût particulièrement bas, mais elles garantiront le développement durable en n'utilisant aucun combustible fossile. Le danger environnemental des centrales solaires à effet cheminées est nul.

Les polyéthylènes, toutes densités confondues, sont les plus usités des thermoplastiques à l'échelle mondiale (près de 45%). Nos besoins matériels sont en pleine recrudescence mais c'est surtout le fait qu'il soit plus pratique (coût, légèreté, résistance aux chocs, sécurité et autres avantages par rapport à des matériaux plus classiques) que le polyéthylène et tous les plastiques en général voient actuellement un réel engouement de la part des consommateurs ce qui par ailleurs incite les recherches scientifiques dans ce sens.

Une simulation numérique par l'utilisation le logiciel COMSOL peut représenter des phénomènes physiques complexes dont la description repose sur un modèle mathématique comportant des équations aux dérivées partielles.

L'ordinateur résout alors ces équations numériquement en utilisant la méthode des éléments finis. C'est le cas, pour la modélisation un prototype de la cheminée solaire, nous utilisant plusieurs codes physique comme l'écoulement d'air avec plusieurs types, le transfert de chaleur et la radiation solaire.

III. Fondements théoriques et modèle mathématique

1. Introduction

Le système de cheminée solaire (SCPPS) se compose du collecteur, de la cheminée et de la turbine. L'objectif principal du collecteur est de collecter

le rayonnement solaire pour réchauffer l'air à l'intérieur. Comme la densité de l'air à l'intérieur du système est inférieure à celle de l'environnement à la même hauteur, la convection naturelle est affectée par le phénomène de la flottabilité. Une force donc se crée grâce au gradient de température et qui assure la continuité de l'écoulement d'air.

En raison de l'existence de la cheminée, le cumul de l'air chaud dans le collecteur entraîne une grande différence de pression entre le système et l'environnement. L'air chauffé monte par conséquent dans la cheminée à grande vitesse. Si une turbine basée sur un axe est placée à l'intérieur de la cheminée en cas de perte de charge importante, le potentiel et l'énergie thermique de l'air peuvent être convertis-en énergie cinétique et finalement en énergie électrique.

2. Principes généraux

L'utilisation d'une centrale à effet cheminée est basée sur la combinaison de quatre forces et effets naturels en vue d'une production massive et permanente d'énergie électrique à bas coût, sans pollution, sans consommation de ressources naturelles limitées et sans être pénalisée par l'irrégularité du régime des vents comme dans le cas des éoliennes, Les forces et effets naturels utilisés sont :

- L'effet cheminée
- L'effet de serre
- l'effet de convection naturelle
- L'effet Venturi

2.1. Le cycle thermodynamique

Les processus thermodynamiques d'une centrale solaire à effet cheminée (SCPPS). Les états du flux d'air sont :

- l'état de l'entrée du collecteur
- l'état de la sortie du collecteur, qui est aussi l'état de l'entrée de la turbine
- l'état de l'entrée de la cheminée, qui est aussi l'état de la sortie de la turbine

- l'état de la sortie de la cheminée
- l'état de l'environnement à la même hauteur que la sortie de la cheminée

Le cycle thermodynamique de l'air peut être basé sur l'analyse de simplifié dans les quatre processus thermodynamiques de base suivants:

- ❖ Processus 1-2 se réfère au processus d'addition de chaleur à pression constante à l'intérieur du collecteur.
- ❖ le processus 2-4 fait référence au processus de dilatation isentropique à la condition que la puissance de sortie de la turbine alors qu'aucune puissance de l'arbre n'est sortie de la cheminée.
- ❖ le processus 4-5 fait référence au processus de rejet de chaleur à pression constante au cours duquel l'air circule de la sortie de la cheminée vers l'air supérieur.
- ❖ Le processus 5-1 fait référence au processus de compression isentropique au cours duquel l'air circule de l'air ambiant supérieur vers l'entrée du collecteur.

Les quatre processus ci-dessus composent un cycle thermodynamique fermé.

2.2. L'efficacité thermique

L'efficacité idéale de la centrale solaire à effet cheminée (SCPPS) est donc exactement égale à celle du cycle de Brayton classique. Quand l'air chaud coule du bas à travers la cheminée, la même masse d'air froid provient de l'environnement situé à la même hauteur en sortie de la cheminée jusqu'à l'entrée du collecteur, le transfert d'énergie peut être écrit

comme suit :

$$\eta_i = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} = \frac{gH}{C_p T_1} \quad (1)$$

2.3. La pression statique relative

Pour les prototypes de la cheminée solaire à petite échelle, on peut supposer que la densité à l'intérieur de la cheminée et dans l'environnement est constante. Alors l'équation peut être écrite comme :

$$S_0 = -(\rho_0 - \rho)gH \quad (2)$$

Bien que l'expression de S se déduit dans la cheminée, elle peut également être utilisée dans l'ensemble du SCPPS. Comme l'air est constamment chauffé à l'intérieur du collecteur, la densité peut être inférieure à celle de l'environnement à la même hauteur. Ainsi, S a également une distribution de valeur négative à l'intérieur du collecteur.

Dans le collecteur, la vitesse de l'air n'étant pas très grande, la résistance visqueuse peut être négligée. A partir de l'équation de continuité et de Bernoulli, nous obtenons :

$$p_{i,r} + \rho_r g x + \frac{1}{2} \rho v_r^2 = \text{const} \quad (3)$$

Comme la hauteur et la vitesse ne changent que légèrement le long du sens d'écoulement d'air à l'intérieur du collecteur, la pression statique change également légèrement. Mais à la sortie du collecteur et à l'entrée de la cheminée, lorsque la section d'écoulement d'air change de manière significative, S peut changer de manière significative aussi.

2.4. La force motrice

La force motrice dépend de la hauteur de la cheminée et des propriétés du fluide. Cependant, cela dépend aussi beaucoup de l'énergie solaire et des dimensions de la tour, telles que le rayon de la cheminée et le rayon du collecteur.

$$\Delta p = \left(\frac{g^2}{2C_p} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\rho_0^2 \beta_0^2}{\rho} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{H}{r_{\text{chim}}^2} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot R_{\text{coll}}^{\frac{4}{3}} \cdot q^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

2.5. Puissance et Efficacité

L'efficacité maximale de la centrale à cheminée solaire peut être exprimée par :

$$\eta_{\text{max}} = \frac{P_{\text{max}}}{Q} = \frac{P_{\text{max}}}{\pi R_{\text{coll}}^2 q} \quad (5)$$

$$\eta_{\text{max}} = \frac{\rho_0}{\rho} \frac{gH}{C_p T_0} \quad (6)$$

L'équation démontre la dépendance fonctionnelle de l'efficacité maximale du système SCPPs à la densité de l'air, la température d'entrée et à la hauteur de la cheminée.

3. Modèle mathématique

Le phénomène physique devient compliqué. Il convient donc de faire des hypothèses permettant d'arriver à un temps de calcul correct. Le choix est porté un domaine tridimensionnel, et les hypothèses utilisées sont les suivantes :

- ❖ Un écoulement de fluide incompressible
- ❖ Le fluide de travail qui est de l'air est supposé visqueux, newtonien et conformer l'approximation de Boussinesq

En convection naturelle, la force du flux induit par la flottabilité est mesurée par le nombre de Rayleigh, défini comme suit :

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\alpha} \quad (7)$$

En conséquence, le modèle mathématique comprenant l'équation de continuité, l'équation de Navier-Stocks, l'équation d'énergie et les équations k-ε utilisées pour décrire le problème sont les suivantes :

✚ Equation de continuité

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

✚ Equation de mouvement

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \rho g\beta(T - T_\infty) + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (11)$$

✚ Equation de chaleur

$$\frac{\partial(\rho cT)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho c v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho c w T)}{\partial z} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (12)$$

3.2. Equations $k - \varepsilon$

La simulation numérique sur la base des équations moyennées (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations, ou RANS) s'est avérée, jusqu'à aujourd'hui, indispensable pour la grande majorité des problèmes industriels. L'expression de la viscosité turbulente donnée par la relation suivante :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (13)$$

Deux équations de transport sont utilisées : une pour l'énergie cinétique de turbulence k et l'autre pour le taux de dissipation de l'énergie cinétique ε .

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho k v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho k w)}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \mu_t G \\ & - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \varepsilon v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \varepsilon w)}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_{1\varepsilon} \\ & + C_{1\varepsilon} \mu_t G \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (15)$$

Les résultats de calcul dépendent fortement de la valeur des constantes empiriques: $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$. Cela constitue une faiblesse de ce modèle, bien que les auteurs admettent le plus souvent les mêmes valeurs.

Les valeurs utilisées sont : $C_{1\varepsilon}=1.44$; $C_{2\varepsilon}= 1.92$; $\sigma_k=1.3$; $\sigma_\varepsilon = 1$.

4. Description du modèle du prototype de la cheminée solaire en 3D

Pour réaliser nos simulations, nous avons choisi d'utiliser le code de calcul COMSOL Mutiphysics, ce code a été développé pour modéliser les écoulements des fluides et les transferts thermiques. Ce logiciel utilise la méthode des éléments finis pour résoudre les systèmes d'équations.

Le modèle physique s'agit d'une cheminée solaire avec 3 m de diamètre du collecteur, une cheminée de 6 m de hauteur et 11 cm de diamètre, et 1 m de distance entre le toit du collecteur et la surface du sol.

Le solveur de COMSOL permet de définir numériquement les conditions opératoires (gravité, pression, vitesse...) dans lesquelles, est effectuée la simulation, ainsi que la spécification des conditions aux limites, il permet de choisir le processus itératif, en proposant plusieurs schémas numériques pour la discrétisation spatiale et temporelle, et pour le couplage de vitesse et de pression.

5. Conditions aux limites et méthode de solution

Les conditions aux limites sont définies comme suit :

Pour le toit du collecteur, nous tenons compte de la limite de convection et le coefficient de convection est fixé à $10 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$, ce qui peut être accepté lorsque la vitesse de l'air ambiant n'est pas très grande, est, 0.1 jusqu'à 0.5 (m/s).

La température de l'environnement est fixée à 293 K, l'entrée du collecteur est définie comme limite pression-entrée, le mur de la cheminée peut être défini comme une limite adiabatique ; la sortie de cheminée est définie comme limite de sortie de pression, le bas de la couche de stockage d'énergie est défini comme la constante de température limite, dont la valeur est de 300K. De plus, nous considérons l'entrée du collecteur et la sortie de la cheminée à la fois comme des limites de pression et que leur pression est fixée à 0 (Pa).

La méthode standard de la fonction de paroi est appliquée, l'algorithme simple est utilisé pour le couplage pression-vitesse, et l'équation du mouvement, l'équation de l'énergie et d'autres équations.

6. Conclusion

Une analyse de l'écoulement d'air comme fluide caloporteur dans les différentes parties de la centrale solaire à effet de cheminée (SCPPs).

Un cycle thermodynamique se résume par l'entrée de l'air froid dans le collecteur, ensuite passant par le collecteur vers l'entrée de la cheminée, s'évacuant alors en dehors de la cheminée puis revenant de l'environnement à l'entrée du collecteur.

Ce chapitre nous a permis également d'évaluer la distribution de la pression statique et la force motrice de la centrale à cheminée solaire théoriquement. La pression statique relative a été développée pour analyser la corrélation de la pression statique entre le système et l'environnement, pour estimer la différence de pression et la force motrice du système.

La pression statique relative dans tout le système est négative et la valeur minimale se situe au bas de la cheminée. La différence de pression peut devenir plus importante en rétrécissant la section de passage à la jonction du collecteur et de la cheminée.

La force motrice est la valeur absolue de la valeur minimale de la pression statique relative. Le rayonnement solaire et la géométrie de la cheminée solaire, tels que le rayon du collecteur, la hauteur de la cheminée et le rayon de la cheminée, peuvent avoir des effets importants sur la force motrice du système.

La puissance maximale fournie est fonction du rayonnement solaire, du rayon du collecteur, de la hauteur de la cheminée et de son rayon. De même, le maximum de la puissance du système augmente avec l'augmentation du rayonnement solaire, du rayon du collecteur et de la hauteur de la cheminée, mais diminue légèrement avec l'augmentation du rayon de la cheminée.

L'efficacité maximale est également relative à la densité de l'air et de la hauteur de la cheminée. La densité de l'air est fonction du rayonnement solaire, du rayon du collecteur, de la hauteur de la cheminée et de son rayon.

IV. Résultats et Discussions

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

L'objectif principal de notre étude a été d'atteindre une plus grande vitesse possible d'écoulement au sein de la cheminée afin d'utiliser cette vitesse pour faire tourner une turbine. Notre prototype de la cheminée solaire a été installé au niveau de l'université Ibn Khaldoun de Tiaret.

Pour cette étude, nous avons optimisé le nombre des entrées de l'air et le matériau utilisé comme absorbeur. Les mesures sont prises pendant une journée complète.

Les résultats obtenus montrent que le plastique noir est le bon choix par rapport au l'Aluminium, grâce à ses propriétés thermique qui aide à stocker plus de chaleur dans le jour et la restituer dans la nuit.

La vitesse de l'air à l'entrée de la cheminée est très importante, elle se varie au cours de la journée et culmine vers 12h:30. La vitesse maximale enregistrée est de l'ordre de 2.8 m/s pour deux entrées de l'air.

Plusieurs sont les facteurs qui agissent sur la variation de la vitesse à l'entrée de la cheminée parmi eux la variation de la température au fil du temps à différents endroits du prototype. A cet effet, nous avons considéré quatre températures soit la température ambiante, la température d'entrée du collecteur, la température du centre du collecteur et la température à l'entrée de la cheminée. Les résultats obtenus attestent d'une augmentation significative de la température ambiante pour atteindre des maximas à l'entrée de la cheminée en passant respectivement par la température d'entrée du collecteur et la température au centre du collecteur.

Par ailleurs, le rayonnement suit une cinétique avec un point culminant vers 12h:30 où il atteint la valeur maximale. La mesure du rayonnement durant la journée indique une évolution de même allure que la température. A ce niveau d'analyse, l'influence du rayonnement sur les températures puis sur la vitesse d'écoulement est confirmée.

Les résultats obtenus militent en faveur d'une poursuite des recherches sur la tour solaire avec plus de variantes comme :

- ❖ Isolation thermique de la cheminée.
- ❖ Variation du diamètre d'admission du collecteur.
- ❖ Variation de la hauteur et le diamètre de la cheminée.
- ❖ Augmentation de l'effet de serre en changeant les matériaux de base de la cheminée comme bâche et bois respectivement par verre et cuivre.
- ❖ Prolongation de la durée de fonctionnement par l'utilisation de différentes techniques de stockage de l'énergie thermique.

Les caractéristiques climatiques de l'Algérie offrent de très bonnes conditions permettant certainement d'atteindre de bons rendements au niveau d'une cheminée solaire.

La simulation réalisée le prototype par logiciel COMSOL, le calcule conclus les mesures tel que la température, la vitesse de l'air et la distribution de la pression sous le collecteur et dans la cheminée.

La partie de simulation expliqué l'écoulement de l'air entre le collecteur et le cheminée, par le fait de l'échauffé celui-ci avec l'augmentation de la température sous le collecteur.

Les vitesses de l'air augmentent avec l'augmentation de la température sous le collecteur et les valeurs maximales sont situées à la base de la cheminée.

La distribution de la pression entre le collecteur et la cheminée conformément au principe de Bernoulli, le déséquilibre de pression produit le flux d'air dans chaque système, le déséquilibre de pression étant responsable du flux d'air et de la vitesse.

Conclusion Générale

Dans ce travail, qui revêt un caractère expérimental et théorique, nous avons installé un prototype d'une station solaire à effet cheminée conçu par nos soins au niveau de l'Université Ibn Khaldoun à Tiaret (Algérie) ($35^{\circ} 21'00.0''$ N $1^{\circ} 18'47.2''$ E). Le Collecteur est incliné avec un angle de 30° et de 3 m de diamètre. Il est recouvert de polyéthylène basse densité (LDPE) afin d'obtenir un effet de serre. Le point de fusion du LDPE commercial est typique de 105 à 115 ($^{\circ}$ C). La cheminée est de 6 m de hauteur, 110 cm de diamètre et de 3,2 mm d'épaisseur. Elle a été fabriquée en polychlorure de vinyle (PVC) en raison de sa haute résistance au transfert de chaleur.

Deux paramètres ont été choisis pour être optimisés : Le nombre des entrées de l'air ainsi que le matériau de l'absorbeur. Le nombre d'entrées de l'air varie entre 01 et 05 et qui sont localisé dans la direction opposée au vent dominant. L'aluminium et le plastique noir ont été utilisés comme matériau absorbant à l'intérieur de la cheminée. L'aluminium possède une forte réflexion des rayons du soleil ($> 90\%$) par ailleurs le plastique noir est un bon absorbeur de chaleur qui aide à Conservé la chaleur de l'air dans l'intérieur de la station.

Les Instruments de mesure utilisée ont été fabriqués par nos soins de la conception à la finition. L'utilisation du plastique noir faire augmenter et stabiliser la température de l'air, où elle peut dépasser les 78 ($^{\circ}$ C) entre 10h00 et 18h00. Par contre avec l'aluminium, la température de l'air augmente rapidement à l'intérieur du collecteur où elle atteint 70 ($^{\circ}$ C) en raison de sa propriété de réflexion élevée, avec une perturbation remarquable de l'évolution de la température de l'air.

Nous avons conclu que le choix de 02 entrées d'air est le meilleur pour cette étude où la température varie de 74($^{\circ}$ C) à 78($^{\circ}$ C), et une vitesse maximale de l'air d'une valeur de 2,5 (m/s) à 2,8 (m/s). L'évolution de la vitesse de l'air a la même topologie avec l'évolution de la température de l'air.

Nous avons conclu aussi que l'humidité est inversement proportionnelle à la température de l'air. En pleine journée, nous

remarquons une diminution de l'humidité due à l'augmentation de la température de l'air, en même temps il y a une augmentation de la vitesse de l'air. Dans la nuit, le phénomène inverse se produit ; la température de l'air basse accompagnée d'une forte humidité qui entraîne une diminution de la vitesse de l'air. En conséquence, nous pouvons dire que l'humidité joue un rôle négatif dans le rendement ou la productivité de la centrale solaire à cheminée.

Pour la partie de simulation réalisé par COMSOL, La température augmente dans le collecteur de l'entrée vers le centre, ceci est expliqué par le fait que l'air dans celui-ci s'échauffe près du sol et s'élève vers le toit pour se refroidir, comme l'illustre bien les trois niveaux de température bien distincts sur les figures susmentionnées. Ensuite elle diminue dans la partie cheminée en allant vers la sortie. Les vitesses de l'air augmentent avec l'augmentation de la température sous le collecteur et les valeurs maximales sont situées à la base de la cheminée. Pour différents nombres des trous, le champ de vitesse est caractérisé par un écoulement stratifié, le long de la cheminée et du collecteur, sauf dans la surface du l'absorbeur et de l'entrée du collecteur, où différentes zones de recirculation ont été observées en raison de l'instabilité de l'écoulement dans ces zones.

Les valeurs de la vitesse montrent une augmentation sensible de la circulation et les valeurs maximales sont toujours situées à la base de la cheminée. La valeur de la vitesse est supérieure à celle calculée dans les cinq cas et sa valeur maximale est située à l'entrée de la cheminée. Une grande zone de recirculation de l'écoulement inversée est située au-dessous de la jonction (à la base de la cheminée) et les valeurs maximales de la vitesse se déplacent vers le haut de la cheminée.

La distribution de la vitesse de l'air pour différentes formes de cheminée a été étudiée. Les résultats montrent que le flux de l'air à l'intérieur du prototype SCPP relié avec deux paramètres important le première paramètre la pression et le deuxième la vitesse de l'air.

Ce travail est loin d'être terminé pour les deux aspects du doctorat que ce soit pour la partie théorique et la partie expérimentale. Les résultats

obtenus militent en faveur d'une poursuite des recherches sur la tour solaire avec plus de variantes comme : Isolation thermique de la cheminée. Variation du diamètre d'admission du collecteur. Variation de la hauteur et le diamètre de la cheminée. Prolongation de la durée de fonctionnement par l'utilisation de différentes techniques de stockage de l'énergie thermique. Les caractéristiques climatiques du Sahara algérien offrent de très bonnes conditions permettant certainement d'atteindre de bons rendements au niveau d'une cheminée solaire.