



Les Techniques Cheminées Solaires – Une revue

Chergui T.*, Boualt Abd. H., Lebbi M., Boutina L., Laouar S. et Bouzahar T.

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER, Centre de Développement des Energies Renouvelables,
CDER, 47133, Ghardaïa, Algeria

*tchergui@uraer.dz

Abstract— Actuellement, une grande variété de technologies solaires pour la production d'électricité est disponible. L'utilisation de la technique cheminée solaire (SC) pour la production de l'énergie s'est avérée être une approche prometteuse pour des futures applications. Peu connue en Algérie, une description d'une Centrale Cheminée Solaire (CCS), ses processus physiques, un état de l'art sur les études expérimentales et théoriques, et une étude économie de cette technique. Nous cherchons dans ce papier à introduire cette technique en dessinant une image détaillée et complète sur la recherche et le développement de la technique cheminée solaire et plus exactement son application dans la production d'énergie, durant cette dernière décennie. On cherche donc à construire une plate forme permet l'information et l'orientation technico-économique des décideurs, des investisseurs algériens et des jeunes chercheurs par l'élaboration d'une série de travaux de référence dans le domaine de production d'électricité par voie solaire-thermique à basse température.

Keywords— Cheminée solaire, Performance énergétiques, modèle analytique, CFD, champs thermohydrodynamique, prototype.

I. INTRODUCTION

Avec un gisement solaire thermique de **169.44 TWh/an**, photovoltaïque de **13.9 TWh/an** et éolien de **35 TWh/an**, l'Algérie dispose d'un gisement solaire qui lui offre une place inéluctable dans l'économie énergétique mondiale semblable ou plus importante que celle qu'elle l'a toujours occupé dans l'aire des énergies fossiles [1].

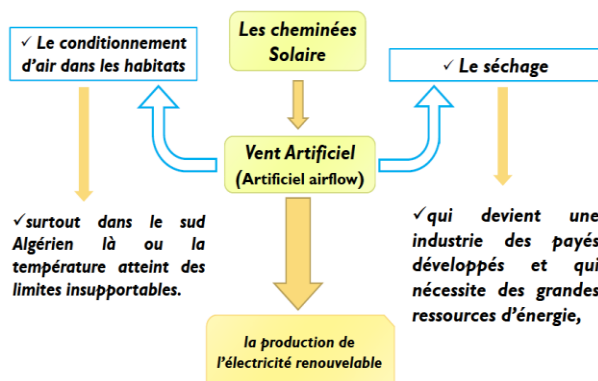


Fig. 1 Les différentes applications des techniques cheminées solaires.

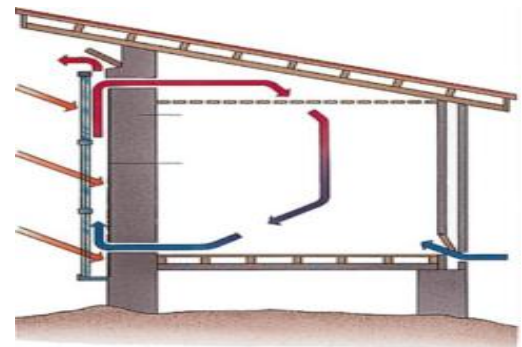


Fig. 2 Le confort thermique par les techniques cheminées solaires.

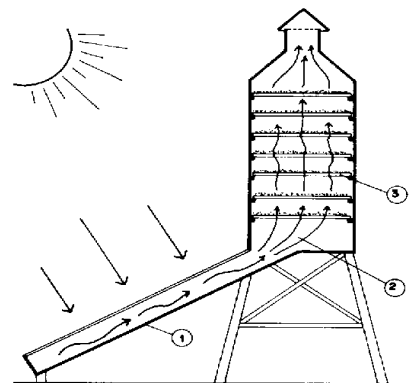


Fig. 3 le séchage solaire par les techniques cheminées solaires.

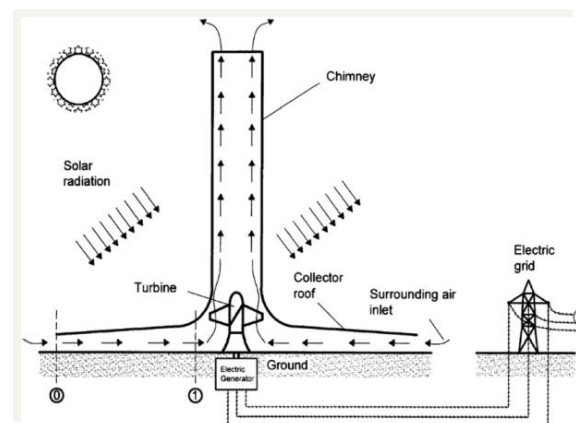


Fig. 4 Synoptique d'une centrale à cheminée Solaire CCS.



Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 4th International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 24 - 25 Octobre 2016



Composé essentiellement de plus de 85 % de zone aride et semi-aride faiblement peuplées et avec un immense gisement d'eau [2,3], l'Algérie représente l'environnement idéal pour l'implémentation des systèmes d'énergies renouvelables connus par leurs caractères de décentralisation. Les Centrales à Cheminée Solaire (CCS) ne constituent que des systèmes thermiques solaires qui viennent s'aligner avec d'autres systèmes d'origine renouvelable pour offrir des solutions alternatives ou complémentaires aux énergies fossiles, solutions tant attendues par un monde errant entre la compétitivité, la croissance économique et le confort vital par utilisation d'énergies propres. Les techniques de transports et de stockage représentent les problèmes cruciaux dans l'extension de la production d'électricité à grande échelle. Les CCS à grande échelles ne font pas l'exception à cette tendance. Quoique, les énergies renouvelables sont complémentaires et donc toute faiblesse déclarée dans un système est souvent surmontée par une procédure renouvelable. Les Techniques Cheminées Solaires (TCS) sont des systèmes thermiques solaires qui viennent s'aligner avec d'autres systèmes d'origine renouvelable pour offrir des solutions alternatives ou complémentaires aux énergies fossiles, solutions tant attendues par un monde errant entre la compétitivité, la croissance économique et le confort vital par utilisation d'énergies propres. Les techniques de transports et de stockage représentent les problèmes cruciaux dans l'extension de la production d'électricité à grande échelle. Les Centrales à Cheminée Solaire (CCS) à grande échelles ne font pas l'exception à cette tendance. Les **techniques cheminées solaires** constituent un élément essentiel dans la plus part des systèmes de **thermique solaires** à basse température (**Fig. 1**) comme le **conditionnement d'air** (le confort thermique **Fig. 2**) le **séchage** (**Fig. 3**) et/ou la **production de l'électricité solaire**. Les techniques cheminées solaires permettent la création d'écoulement d'air à débit et température contrôlés par voie solaire et donc elle permet un contrôle passif de l'écoulement. L'énergie cinétique de l'air en écoulement peut être transformée en énergie électrique en utilisant des aérogénérateurs. On parle alors des Centrales à cheminée solaire (CCS) (voir **Fig. 4**). Il devient bien clair que **l'énergie cinétique** produite constitue le fruit d'une installation cheminée solaire, donc : Une **minimisation** de sa **dégradation** constitue un objectif majeur dans la **conception des cheminées solaires**. La maîtrise des outils d'analyse technico-économique des Cheminées Solaires tels que ceux de la simulation énergétique ou thermo-hydrodynamique fait l'essence des différents travaux sur les cheminées solaires de la dernière décennie. Nous envisageons par ce travail la construction d'une plate forme d'analyse numérique et d'**optimisation** en se basant sur une série de travaux sur l'influence des différents paramètres géométriques et météorologiques sur la qualité du champ thermo-

hydrodynamique via le débit massique produit par les Cheminées Solaires. Les outils sont principalement : Le développement de **modèles analytiques** et de **codes de calcul**, réunissant l'efficacité et la simplicité, l'élaboration de **codes de calcul CFD** à la base des **Méthodes Volumes** et /ou **Eléments Finis FVM & FEM**, la maîtrise des codes de calcul CFD commerciaux tel que le Fluent et/ou le CFX. Tout doit se faire parallèlement à une **analyse dimensionnelle** et à des réalisations de plusieurs prototypes de différentes dimensions et/ou formes géométriques.

II. PROJETS DE CENTRALE A CHEMINEES SOLAIRES

A. Prototype de Manzanares

Le premier prototype expérimental d'une centrale à cheminée solaire a été conçu par le bureau d'études Schlaich Bergermann et Partner de Stuttgart [4]. Le distributeur d'électricité espagnol « Union Electrica Fenosa » a proposé le site de Manzanares (ville espagnole située à 180 kilomètres au sud de Madrid) et le ministère allemand de recherche (BMFT) a financé le projet. La construction du prototype a été terminée en 1982 et a fonctionné pendant plus de 7 ans. Sur la **Fig 9.**, on montre des photos du prototype expérimental de **Mansanares**.

B. La Centrale de Jinshawan-Chine

Réalisée à Jinshawan, en Mongolie intérieure (voir **Fig. 6**) Chine du Nord, c'est une installation de production d'électricité combinant l'énergie solaire et l'énergie éolienne [5]. Fonctionnelle depuis le 10 Décembre 2010, cette unité de production de 200 kW de puissance peut fournir jusqu'à 400.000 kWh électrique par an, épargnant ainsi des émissions équivalentes à de 100 tonnes de CO₂ charbon et économisant 900 tonnes d'eau, par rapport à la production d'énergie au moyen d'une centrale thermique. Ce projet n'occupe du désert que des terres incultes. L'exploitation et l'entretien est également très simples et l'usine solaire ne produira aucune pollution. Cette tour solaire affiche d'excellentes performances en matière de protection de l'environnement.

C. La Centrale de Kerman-Iran

L'intensité d'irradiation solaire moyenne à Kerman, Iran (latitude 30 ° 17 'Nord et la longitude 57 ° 5' Est), est plus de 2000 ans kWh/m² et l'ensoleillement est d'environ 2800 h en un an. Afin d'évaluer la faisabilité de la CCS en tant que source d'énergie applicable pour l'environnement, une centrale pilote dans cette région désertique a été construite sur la base des évaluations initiales (**Fig. 11**). La centrale pilote de Kerman, dotée d'une tour d'environ **60 m** de hauteur et de **3 m** de diamètre et d'un collecteur à simple vitre d'environ 40 m de diamètre est capable de produire près de **400 Watts** de puissance électrique pour une insolation de **800 W/m²** [6].

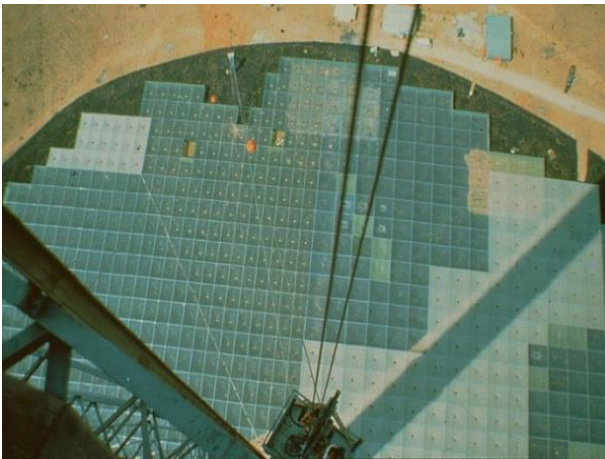
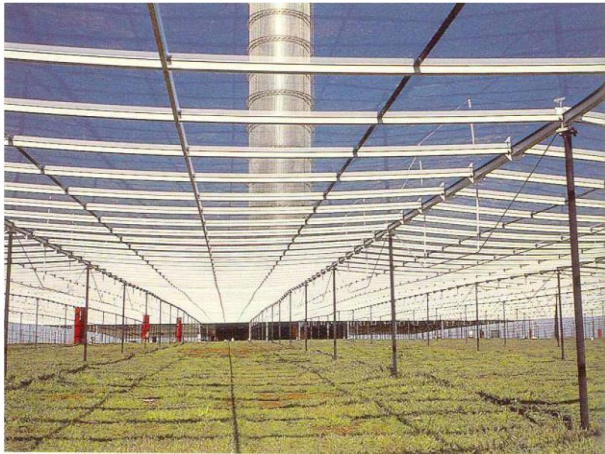


Fig. 5 Photo des différents compartiments de la centrale à cheminée solaire de Manzanara, (a) Photo globale, (b) la tour, c. le collecteur et (c) la turbine éolienne



Fig. 6 Photo de la centrale à cheminée solaire de Jinshawan, en Mongolie en Chine.



Fig. 7 Photo de la centrale à cheminée solaire pilote de Kerman en Iran [6]



III. COÛTS DE PRODUCTION DE L'ÉNERGIE

Avec l'aide et la collaboration de la compagnie du **BTP**, de l'industrie verrière et des fabricants de turbines, un coût estimatif très précis pour une Centrale à Cheminée Solaire CCS de 200 MW a pu être déterminé et calculé. Ils ont chargé le cabinet "Energie Baden Württemberg" de déterminer les coûts de production comparatifs d'usines de production d'électricité à charbon et à cycle combiné sur la base de méthodes communes et identiques. **Le Tableau 1** résume une comparaison entre les coûts de l'énergie produite par trois types de centrale de 200 MW, la première est solaire (CCS) la seconde conventionnelle (une centrale à charbon) et une troisième à cycle combiné, d'après les données disponibles en 2002. **Il est à noter que** La durée de vie d'une centrale à cheminée solaire est de 80-100 ans. Cependant, la durée de vie d'une usine au charbon et/ou d'une usine à cycle combiné est de 10-30 ans [7,8].

IV. ETAT DE L'ART

Cette étude a été présentée selon la nature de l'étude quelle soit à la base d'une réalisation expérimentale, selon un modèle analytique simple ou selon une étude de CFD. Cette revue est en quelque sorte un update des revues présentées dans les rapports antérieurs (excepté pour les travaux expérimentaux).

Les travaux entrepris par cette revue ce sont les travaux publiés à compter de 2012 (voir pour les travaux antérieurs les Réf. [9,10].

A. Les Etudes Expérimentales

En 2002, une installation pilote d'une CCS (**Fig. 8a**) composée d'un collecteur d'air de 10 m de diamètre et d'une tour de 8 m de hauteur a été construite à Wuhan en Chine [11], puis elle a été modifiée en plusieurs reprises.

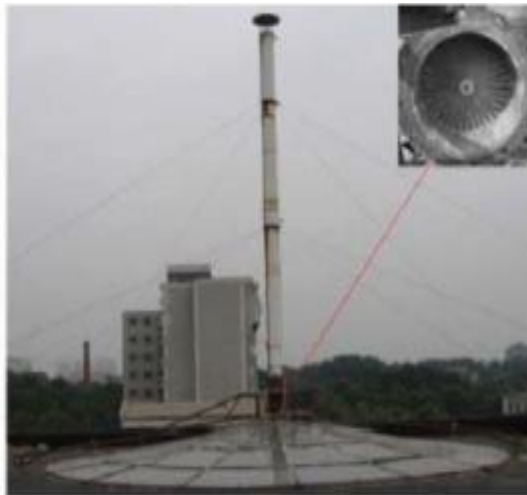


Fig. 8 Prototypes (2002) de hauteur de : (a) 8.8m à Wuhan, China [11]; (b) 8m à Bundoora, Australia [12].



Fig. 9 Prototypes (2004), 15m de hauteur, à Isparta, Turkey [13];



Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 4th International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 24 - 25 Octobre 2016



TABLE I
COUTS DE L'ENERGIE PRODUITE PAR TROIS TYPE DE CENTRALES

Proportion de	Cheminée solaire Cent/kWh	Charbon Cent/kWh	2x.C.C Cent/kWh
Investissement	5.79	1.99	1.08
carburant	0.00	1.98	3.36
personnel	0.05	0.39	0.16
Entretien	0.25	0.47	0.42
Assurance	0.01	0.14	0.06
Autre couts actives	0.00	0.59	0.02
taxe	1.07	0.35	0.19
Total	7.17	5.91	5.29

La toute dernière structure est composée d'un collecteur de couvercle en verre de 4.8 millimètres d'épaisseur et d'une tour en PVC. Un petit prototype faisant la combinaison d'un bassin solaire d'approximativement 4.2 m de diamètre et de 1.85 m de profondeur et d'une CCS d'une tour de 8 m de hauteur et de 0.35 m de diamètre (**Fig. 8b**) a été construit par **Golder [12]** dans le campus de l'université de RMIT, à Bundoora en Australie en 2002. Une installation pilote d'une CCS de 15 m de hauteur et d'un collecteur de 16 m de diamètre a été également montée dans le campus de l'université de Suleyman Demirel, à Isparta en Turquie [13]. Une autre installation pilote d'une CCS de 12.3 m de hauteur et d'un collecteur de 25m mètre de diamètre (**Fig. 9**) a été construite dans le campus universitaire de Universida de Federal de Minas Gerais, à BeloHorizonte, **Brazil [14]**. Sa tour est un ensemble de 05 modules en bois de forme cylindrique de 2.2 m de hauteur chacun, couverts intérieurement et extérieurement de fibres de verre. Son collecteur de 25 m de diamètre et de 0.5 m fabriqué en utilisant un film de plastique soutenue par une structure tubulaire en acier. On donne dans ce qui suit des images de quelques prototypes d'expérimentation qui ont été réalisés et testés un peu à travers le monde (**Fig. 8-13**). Pour plus d'information et de donnée expérimentale sur les installations CCS Ghalamchi et al. [21] ont modifié l'installation pilote déjà construite pour tester l'influence du matériau absorbant et les dimensions géométriques. Les résultats obtenus ont montré qu'un absorbeur à base d'aluminium et plus efficace en transfert de chaleur comparé à un absorbeur en fer. Le gradient de température mesuré entre la sortie du collecteur et la température ambiante est de 27 °C. La vitesse maximale de l'air enregistrée dans la tour de 3m de hauteur est de 1,7 m/s, 55,3% de plus par rapport à la vitesse maximale produite par une tour-cheminée de 2 m de hauteur [22].

Grâce au financement de la Research Corporation for Science Advancement en partenariat avec the Catalina High School, Un modèle d'échelle 1:30 du prototype de Manzanares a été conçu et construit entre 2012 et 2013. Une partie importante de la conception préliminaire et de l'analyse

du désigne ont été effectués par des étudiants en visite de l'ENSMA (Poitiers, France) et SUPMECA (Paris, France).

B. Les étude Energétiques - Modèles Analytiques Simples

Au stade d'une étude de faisabilité, il est très important d'avoir une étude théorique simple, néanmoins précise, pour une évaluation de premier ordre des performances et de guider, par la suite, le concepteur vers une meilleure conception et le décideur vers le meilleur choix énergétique. Un modèle est jugé fiable s'il possède un mécanisme permettant une représentation naturelle du couplage thermomécanique (prise en compte du rayonnement solaire) sans avoir recourt à la supposition d'un accroissement arbitraire de la température à travers le collecteur en plus de l'estimation de la variation de la pression dans le collecteur qui est due au changement de la section de passage et à la chaleur absorbée. Généralement un modèle analytique repose sur le fait que une CCS est constituée de trois compartiments principales qui seront modélisés en première étape séparément - le capteur solaire, la cheminée et la turbine. Ces modèles de composants sont ensuite couplés ensemble pour simuler l'installation toute entière en utilisant un processus itératif de sorte que l'entrée et la sortie de chaque composant convergent vers des valeurs stables. A commencer par les études menées en 2012 par Asnaghi et Ladjevardi [27] ont étudié les performances d'une CCS et par conséquent la quantité d'énergie électrique produite à travers respectivement, la région du golfe Arabique et l'Iran. Koonsrisuk [28] pense que le collecteur en pente peut jouer le rôle de la tour et compenser ainsi l'effet thermosiphon. Par conséquent la hauteur de la tour peut être réduite et le coût de construction serait réduit également. Pour cela, ils ont développé un modèle mathématique basé sur des équations simplifiées de transport et l'équation d'état. Par ailleurs, une évaluation approximative du coût, y compris une approximation de l'investissement total a été réalisée.

Koonsrisuk et Chitsomboon [29] ont développé un modèle mathématique simplifié pour étudier la relation entre le rapport de la pression et du débit massique du système, ainsi que l'influence de l'élévation de la température à travers le collecteur sur la puissance générée dans une cheminée solaire à grande échelle. Dans leur modélisation ils ont omis la turbine et ils se sont limités à un cas de flux de chaleur constant transmet à l'air par le collecteur. Cependant, ils ont prouvé l'importance de l'inclinaison du toit du collecteur par rapport à un toit horizontale en gains de puissance. **Cao et al. [30]** ont effectué une analyse économique et comparé l'aptitude des CCS conventionnelles à celles dotées d'un toit incliné placées à Lanzhou, nord-ouest de la Chine. Dans leur étude, ils ont examiné l'influence du coût d'investissement, la période de récupération prévu, le taux d'inflation, et le coût de l'électricité moyen actualisé LEC (levelised electricity cost).

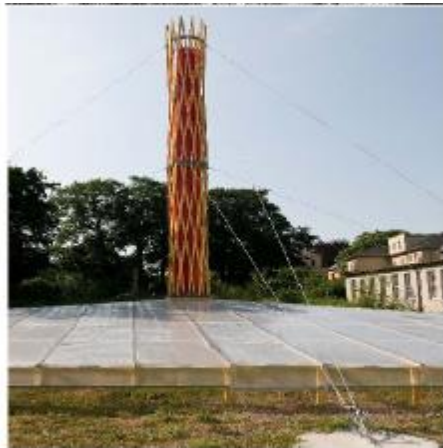


Fig. 10 Prototypes (2008) de hauteur de 12.3m à Belo, Brazil [14]; (b) 22m à Gaborone, Botswana [15]; (c) 12m à Weimar, Germany [16]; 3.5m à Adrar, Algérie [17].



Fig. 11 Prototype (2010) de 17.5m de hauteur à Adiyaman, Turkey [18]

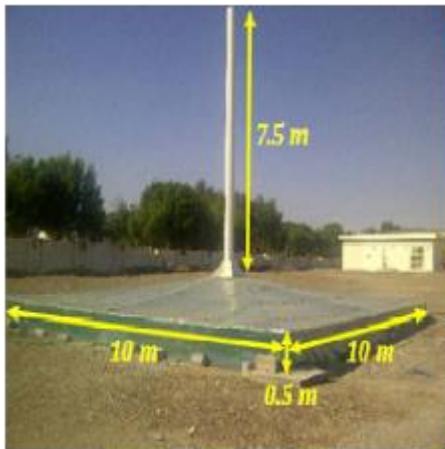


Fig. 12 Prototypes (2011), hauteur de (a) 8.25m à Al Ain, UAE [19]; (b) 9m à Damascus Syria [20]



Fig. 13 Prototypes (2013), 2m de hauteur, à Tehran, Iran [21]

Guo et al. [31] ont analysé les effets des rayons du collecteur et de la tour sur la puissance de sortie de la CCS. Leurs résultats ont montré qu'il existe une limite pour le rayon de collecteur pour une puissance maximale délivrée. Ensuite, quatre conceptions de CCS de 100 MW avec différentes combinaisons des rayons du collecteur et de la tour ont été proposées pour choisir la combinaison la plus rentable. La puissance annuelle délivrée par la CCS choisie et installée dans la région de Hami en Chine. Récemment, Cottam et al. [32] ont développé un modèle analytique pour décrire avec précision la thermodynamique du capteur solaire sous un régime permanent. Ils se sont intéressés à l'évaluation de l'impact des différentes conceptions (formes géométriques et autres) du toit du collecteur sur les performances d'une CCS.

Leurs résultats montrent que l'élévation du couvercle du collecteur a un effet significatif sur la performance de l'installation, il doit être donc suffisamment élevé en s'approchant à la jonction collecteur-tour pour assurer l'énergie cinétique maximale à l'entrée de la tour. Une nouvelle conception avec un profil de collecteur partiellement incliné a été proposée.

Il a été aperçu que cette nouvelle conception donne des puissances maximales similaires à celles délivrées par d'autres configurations existantes mais avec plus de robustesses à effectuer à des niveaux similaires de puissance maximale aux plus performants des conceptions de la canopée existantes, et d'être robuste dans diverses conditions environnementales.



Fig. 14 Prototype de 1:30 scale du prototype de Manzanares, sur le toit de l'Aerospace and Mechanical Engineering Department at University of Arizona, USA [24,25].

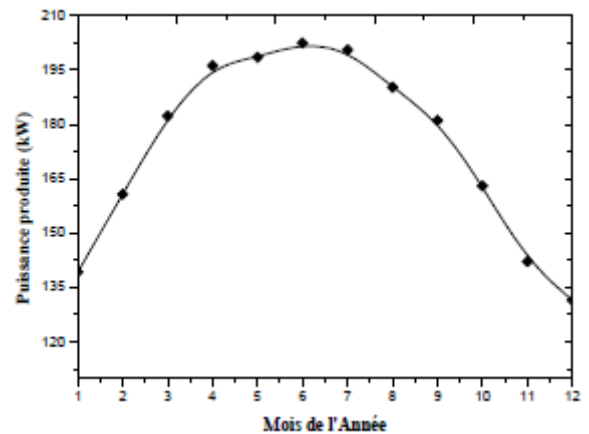


Fig. 17 Evolution des puissances moyennes mensuelles délivrées par la centrale cheminée solaire au cours du temps.

V. EXEMPLE DE CALCUL ÉNERGÉTIQUE

A. Application au site de l'URAER Ghardaïa –

Le site de l'URAER-Ghardaïa se situe au sud de l'Algérie où le gisement solaire est appréciable. L'énergie annuelle du rayonnement solaire est d'environ 2,0 MWh/m²/an et la photopériode atteint une moyenne de 10 heures par jour pour toute l'année avec un maximum estival de 12 à 13 heures (Gairra et Bakelli [33,34]). Les résultats d'analyse montrent que la production de puissance par la CCS est digne d'intérêt dans cette région. Le modèle utilisé dans ces calculs est une amélioration de l'approche utilisée par Larbi et al. [35] dans la modélisation de la jonction de transition collecteur-tour en plus du modèle utilisé pour la tour. Cependant, le modèle mathématique du collecteur de forme circulaire développé par Chergui [36] a été maintenue. Le code de calcul associé à cette simulation a été développé et testé sous l'environnement "Matlab".

La Fig. 15 montre la variation de la température de l'air traversant le collecteur en fonction du rayon du collecteur pour un rayonnement de 800 W/m² et une température ambiante de 25 °C. La Fig. 16 donne les variations moyennes mensuelles de l'irradiation solaire et de la température ambiante au site de l'URAER-Ghardaïa. Il est à remarquer que la température moyenne mensuelle minimale, d'environ 17.5 °C, se produit en Janvier tandis que la température moyenne mensuelle maximale, qui atteint les 41°C, se produit en Juillet. La variation de l'irradiation solaire est différente de celle de la température moyenne mensuelle. Ghardaïa possède la meilleure insolation solaire en Mai avec une valeur d'environ 620 W/m² et le minimum d'insolation en Décembre avec une valeur d'environ 380 W/m². La Fig. 17 montre l'évolution de la production de puissance au cours du temps. La capacité de production d'électricité se situe entre 130 et 200 kW pendant toute l'année. La CCS peut produire plus de puissance, de Mars à Septembre, car le rayonnement solaire

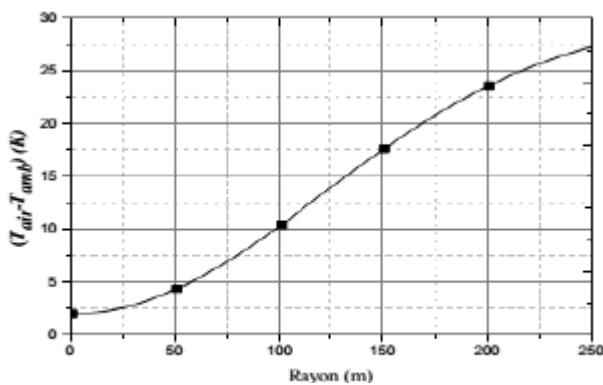


Fig. 15 Variation de la température de l'air à travers le collecteur

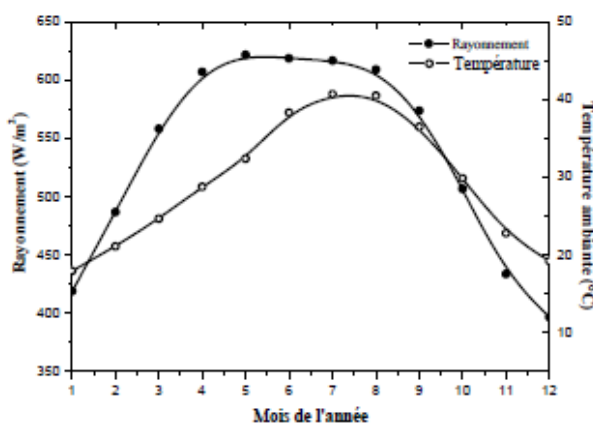


Fig. 16 Evolution des irradiances et des températures moyennes mensuelles au cours du temps



Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables The 4th International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algeria 24 - 25 Octobre 2016



est élevé en cette période. En outre, il est possible de noter d'après les figes (16) et (17) que les variations de l'irradiation solaire et de la production d'énergie se comportent de la même manière : plus l'irradiation solaire est importante, plus la capacité de production d'énergie est haute.

VI. ETUDE DE CFD

Par études de CFD on entend dire analyse des systèmes cheminées solaires en utilisant la dynamique des fluides numériques CFD (Computational Fluid Dynamique). ces études sont de caractères fondamentales la où les équations de transports en 2 ou 3 dimensions et plus exactement les équations de Navier-stokes sont résolues numériquement par la méthode de volumes finis FVM ou d'éléments finis FEM ou tout autre méthode. Ce type d'étude a commencé en 1999 par les travaux de Bernardes et al. [37] et Gannon and Backström [38]. L'utilisation de la CFD dans l'analyse des CCS a connu une croissance en matière de publication (voir Réf. [36-44]).

Chergui et al. [45] ont développé un code numérique de CFD basé sur la méthode des éléments finis. Des études sur l'influence de l'élévation du toit du collecteur et du diamètre de la tour sur le contrôle du champ thermohydrodynamique, la variation de la force d'entraînement de l'écoulement (gradient de température) a été ont été prises en compte à travers la variation du nombre de Rayleigh, ainsi le champ de vitesse et la distribution de la température, dans le système, ont été évalués en fonction de Ra. Chergui et al. [46] ont introduit le concept de minimisation de la production d'entropie EGM (Entropy Generation Minimisation) dans leur étude d'optimisation de la configuration géométrique d'un système à cheminée solaire. Ils ont rapporté, pour différents nombre de Rayleigh, les taux de production locale et globale de l'entropie pour une convection naturelle de l'air dans une cheminée solaire. Tayebi T. and Djeddar [47,48] ont étudié numériquement la convection naturelle laminaire et permanente de l'air dans une cheminée solaire. les équations bidimensionnelles régissant l'écoulement ont été résolues numériquement en utilisant un code maison basé sur la méthode des volumes finis et sur une formulation mathématique de type vorticité-fonction de courant en coordonnées hyperboliques. Comme conditions aux limites thermiques, les parois du collecteur ont été supposées isothermes, paroi chaude pour l'absorbeur et paroi froide pour le toit. Lebbi et al. [49,50] ont entrepris une étude sur la possibilité d'optimiser géométriquement la CCS considérée comme la source d'énergies dans un processus de production d'Hydrogène.

Comme uniquement le modèle BBM (Boussinesq Buoyancy Model) peut être activé en Fluent Ming et al. [51,52] et Putkaradze et al. [53], Guo et al. [55] et Zou et al. [54] ont été

contraint d'utilisé ce modèle pour mener des études de CFD sur les CCS. Par contre Patel et al. [57] ont mené le même travail en utilisant le BBM en plus du FBM (Boussinesq Buoyancy Model) en utilisant le CFX qui donne la possibilité d'activer ce modèle de FBM. Ils [50-55] ont montré que la forme géométrique d'une cheminée solaire influence ses performances de la CCS. Par la suite, ils ont trouvé que l'angle de divergence optimale de la tour est de 2 ° Chergui et al. [58] se sont intéressés à l'influence de la température ambiante sur le champ thermo hydrodynamique dans les cheminées solaires. Ils ont montré que l'augmentation de la température ambiante fait baisser légèrement le débit massique et par contre élever la température maximale dans le collecteur. L'influence de la température ambiante sur les performances globales des cheminées solaires, tels que la puissance cinétique ou électrique, est pratiquement négligeable.

Lebbi et al. [59,60] ont analysé les caractéristiques thermohydrodynamiques de l'écoulement dans une cheminée solaire via la variation du nombre de Rayleigh. Ils suggèrent l'amélioration de ce champ par le contrôle de l'appariation des vortex de Rayleigh-Benard-Poiseuille initialement stratifié et uniforme. Ces vortex à caractère dissipatif réduits significativement le débit masse en présentant des obstacles fictifs à l'écoulement. Les auteurs ont présenté les lignes de la fonction de courant pour quelques nombres de Rayleigh variant de 10^4 à 10^8 . Sur la Fig. nous pouvons voir l'appariation des instabilités de Rayleigh-Benard-Poiseuille pour un Rayleigh critique Ra_c . Lebbi et al. [61] ont mené une étude de CFD en utilisant le code commerciale Fluent dans le but d'analyser l'influence du rapport de des rayons sortie/entrée de la tour sur les l'écoulement turbulent dans une cheminée solaire tout en cherchant le rapport optimale qui maximise la vitesse et le débit massique produit par le système. les valeurs du rapport de rayon $Rt^*=R_{out}/R_{in}$ examinées varient de 0.5 à 6. ils ont montré que ce rapport possède une valeur optimale à ne pas dépassée. Chergui et al. [62] se sont particulièrement intéressés à l'effet de la forme de certaines parties d'un cheminée solaire comme la forme de la jonction collecteur-tour, ou la tour de forme tronconique convergente ou divergente. A cet effet, les équations de transport de flux ont été modélisées et résolus numériquement pour différentes formes géométriques à l'aide de la méthode des volumes finis en coordonnées généralisées. Ils ont constaté que quelques configurations géométriques générés des perturbations, qui reflétaient sur les comportements thermo-hydrodynamiques de l'écoulement. Ils ont conclu que des modifications sur la forme géométrique peuvent éliminer cette perturbation dissipation. En utilisant Fluent, Djimilia et Chaker [63] ont conduit une étude d'analyse sur le champ thermohydrodynamique d'une cheminée solaire en fonction du nombre de Rayleigh . Tayebi et Djeddar [64] ont présenté une étude numérique pour donner plus de détail sur le collecteur.



ils ont choisi la région d'Adrar en sud ouest de l'Algérie comme exemple de site d'installation de leurs système pour examiner l'effet du rayonnement aussi bien que la température ambiante sur leur système.

VII. EXEMPLE DE CALCUL CFD

Dans le but de pouvoir comparer entre les différentes configurations et donc conclure sur la configuration optimale avant la phase de réalisation, Chergui et al. [62] se sont particulièrement intéressés par l'effet de la forme de certains compartiments d'une cheminée solaire comme la forme de la jonction collecteur-tour, ou la forme tronconique de la tour quelle soit convergente ou divergente (**Fig. 18**).

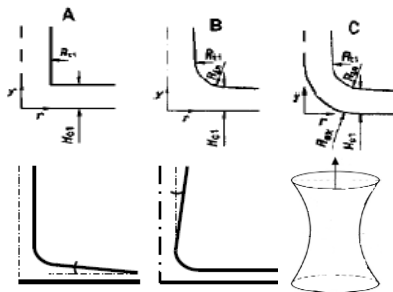


Fig. 18 les différentes configurations étudiées

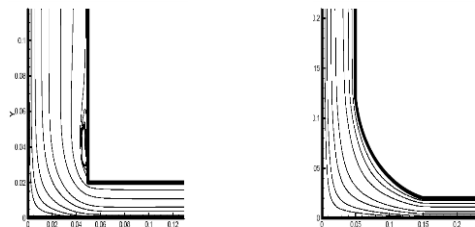


Fig. 19 Les lignes de la fonction de courant pour les deux configurations de la jonction (a) Jonction droite (b) Jonction courbée pour un Rayleigh de $Ra=10^8$.

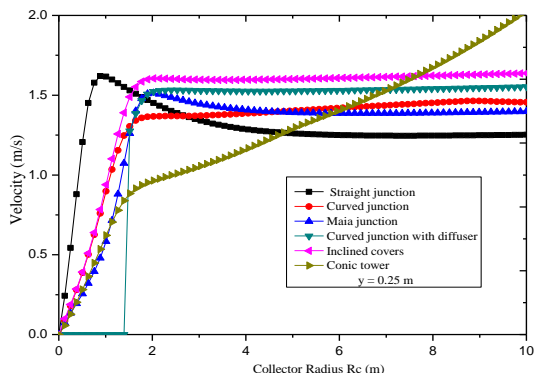


Fig. 20 Influence de la configuration (forme) des différent compartiments d'une cheminée solaire sur l'évolution de la vitesse le long de la tour .

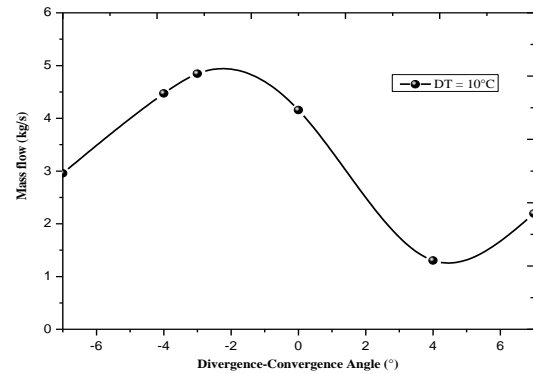


Fig. 21 Influence de la configuration divergente convergente de la tour sur le débit massique produit par une cheminée solaire.

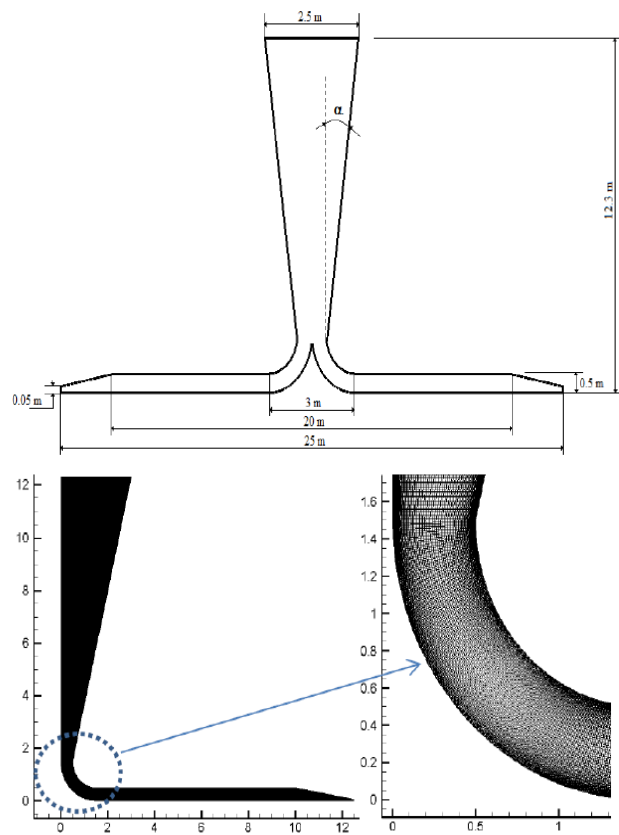


Fig. 22. Model Physique du problème et maillage (96x1238 VC).

La configuration droite de la jonction montre la création de vortex à la base de la tour (**Fig. 19a**). Une jonction de forme courbée supprime ce phénomène dissipatif et par conséquence permet des débits de masse plus élevés (**Fig. 19b**). La **Fig. 20** montre l'évolution de la vitesse le long de l'axe de la tour pour les six configurations analysées. De cette figure on note que dans tous les cas étudiés, la vitesse a atteint sa valeur maximale à l'entrée de la tour.

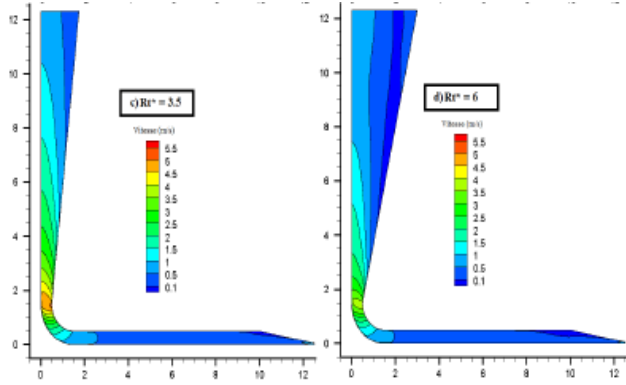


Fig. 23. Iso vitesses pour différents rapports sortie/entrée du rayon .

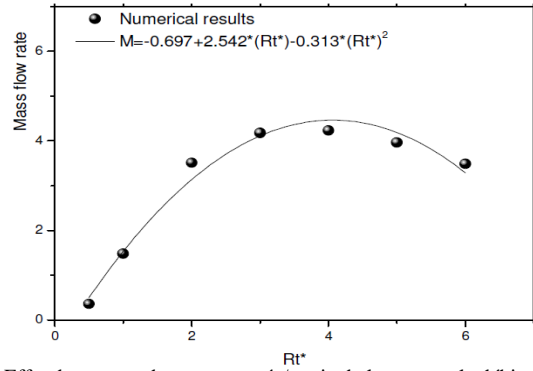
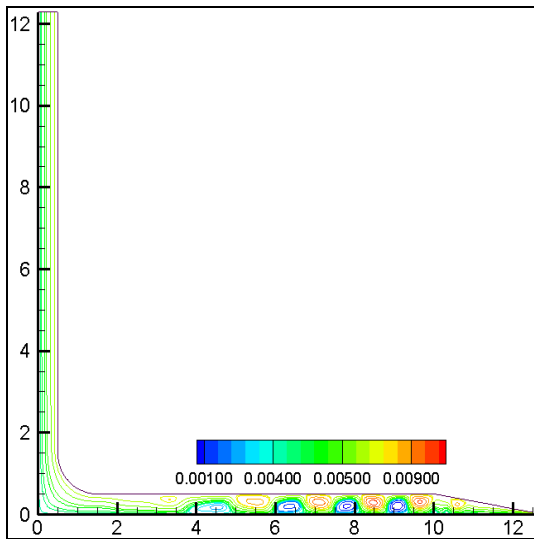
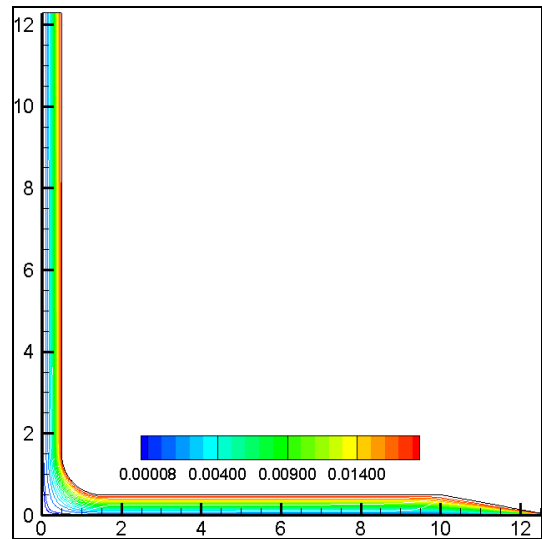


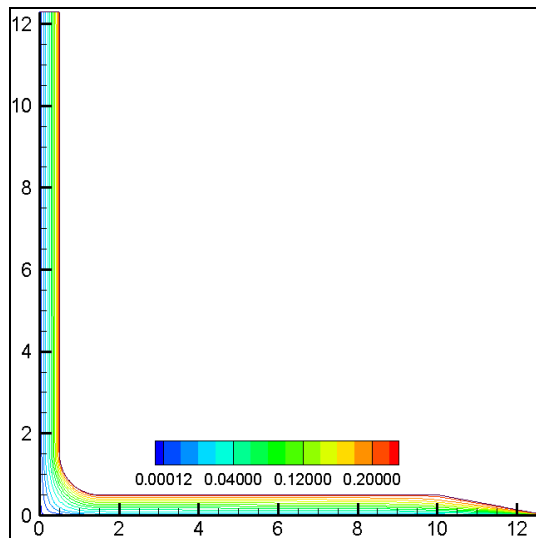
Fig. 24 Effet du rapport de rayon entrée/sortie de la tour sur le débit massique produit



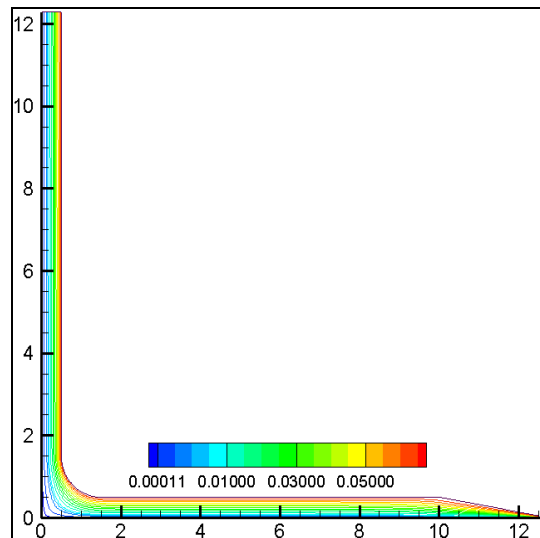
a) $Ra=4.5 \cdot 10^4, \Psi$



c) $Ra=10^6, \Psi$



c) $Ra=10^7, \Psi$



d) $Ra=10^8, \Psi$

Fig. 25 Ligne de courant vs nombre de Rayleigh



Elle reste pratiquement constant dans les cas CJC, CJDC et SCC. Dans les cas SJC MJC, le fluide est essentiellement plat et dispose d'un obstacle fictif constitué par les vortex créés par la jonction de forme droite. Cette obstacle fictif a pratiquement construit un convergente-divergente fictive qui a augmenté la vitesse d'écoulement par la contraction de la section de passage. Cette vitesse va baisser légèrement à une valeur asymptotique et reste invariante jusqu'à la sortie de la tour.

de passage d'écoulement pour atteindre sa valeur maximale à la sortie de la tour. Il a été démontré [14,51,65] que les dimensions de la tour représentent les paramètres géométriques les plus importants dans le contrôle du champ hydrodynamique d'une cheminée solaire. Pour cette raison, une importance particulière à la forme de la tour a été donnée. Le maintien de la même hauteur et un diamètre hydraulique équivalent à celui de la tour cylindrique déjà étudié.

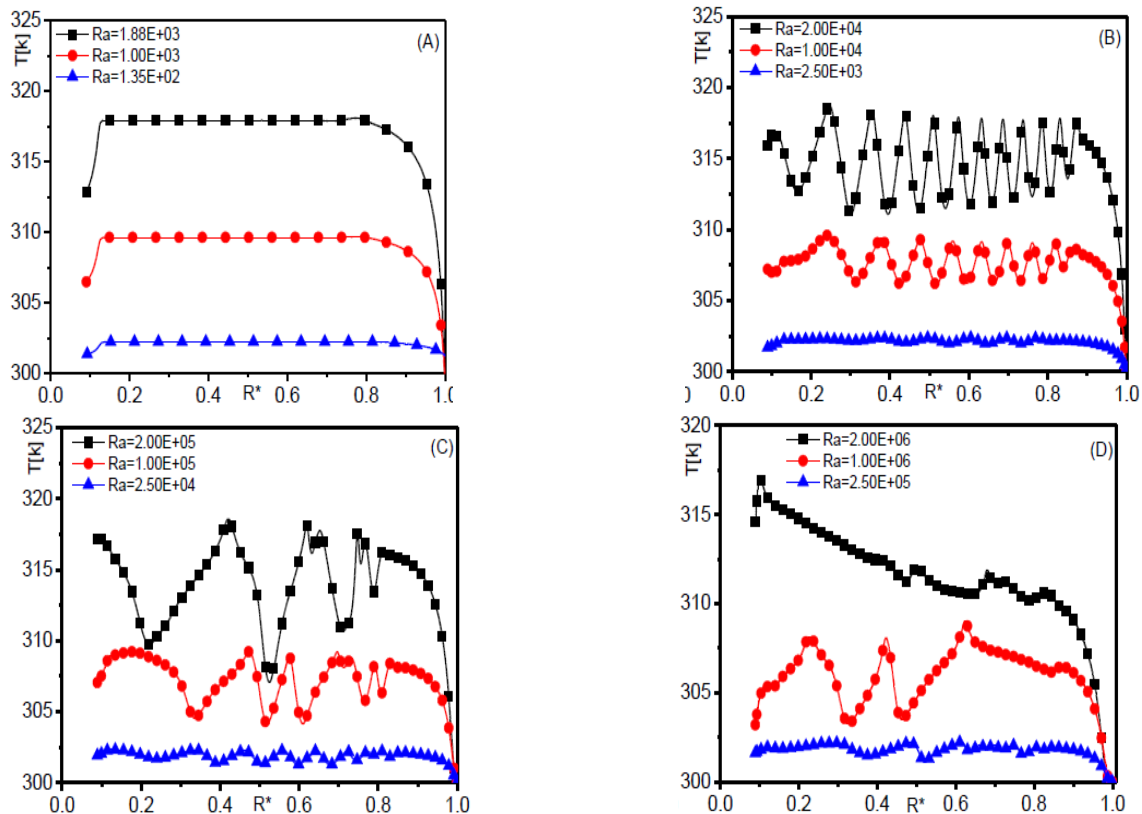


Fig. 26 Influence of the Rayleigh number on the temperature evolution along the collector, $y=0.025m$.

Chergui et al. [62] ont testé l'influence des différentes formes de la tour à savoir une forme tronconique (avec différents angles de divergence ou de convergence). Il a été démontré qu'une tour de forme divergente augmente le débit massique jusqu'à un certain angle de divergence là où le débit massique commence à chuter. Cependant une tour de forme convergente donne des résultats inverses en diminuant le débit massique, malgré la vitesse à la sortie est supérieure en raison de la section transversale d'écoulement de contrat.

Dans le cas d'une tour tronconique convergente, la vitesse augmente en permanence suite à la contraction de la section

Lebbi et al. [61] se sont intéressé à l'influence du rapport entrée/sortie de la tour sur les performances hydrodynamique d'une cheminée solaire (Fig. 22) en cherchant un point optimale pour une vitesse et un débit maximums. Les auteurs ont conclu qu'un débit maximum de débit peut être atteint pour un rapport d'entrée/sortie du diamètre de la tour bien précis (Fig. 24). Lebbi et al. [59,60] ont analysé les caractéristiques thermo-hydrodynamiques de l'écoulement dans une cheminée solaire via la variation du nombre de Rayleigh. Ils suggèrent l'amélioration de ce champ par le contrôle de l'appariation des vortex de **Rayleigh-Benard**.



Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 4th International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 24 - 25 Octobre 2016



Poiseuille initialement stratifié et uniforme. Ces vortex à caractère dissipatif réduits significativement le débit masse en présentant des obstacles fictifs à l'écoulement. Les auteurs ont présenté les lignes de la fonction de courant pour quelques nombres de Rayleigh variant de 10^4 à 10^8 . Sur la **Fig. 25** nous pouvons voir l'appariation des instabilités de Rayleigh-Benard-Poiseuille pour un Rayleigh critique Rac. On montre sur la **Fig. 26** l'évolution de la température le long du collecteur pour une élévation du sol de $y = 0.025$ m et pour différents nombre de Rayleigh.

VIII. CONCLUSIONS

Ce travail est le résumé d'une expérience qui a duré une quinzaine d'années sur quoi nous avons lancé une série d'études sur l'influence des différents paramètres géométriques et météorologiques sur la qualité du champ thermo-hydrodynamique via le débit massique produit par les cheminées solaires. Nous projetons par ce fait la construction d'une plate forme d'analyse numérique et d'optimisation. La maîtrise des outils d'analyse technico-économique des Cheminées Solaires tels que ceux de la simulation énergétique ou thermo-hydrodynamique fait l'essence de notre projet. L'idée repose sur le fait que l'énergie cinétique générée est la mission fondamentale d'une cheminée solaire pour concevoir ce que nous sommes intéressés à connaître son évolution à travers l'évolution du débit massique de l'écoulement ainsi que la vitesse dans les différents compartiments. On présume avoir construit une plate forme permettant l'information et l'orientation technico-économique des décideurs, des investisseurs algériens et des jeunes chercheurs par l'élaboration d'une série de travaux de référence dans le domaine de production d'électricité par voie solaire-thermique à basse température.

REFERENCES

- [1] Negrou B, Setrou N, Chennouf N, Dokkar B. 2011. Valuation and development of the solar hydrogen production. *Int J Hydrogen Energy*; 36:4110-6.
- [2] Amrani D., Cherouati D.E. and Cherchali M.E.H., 2000. Groundwater radon measurements in Algeria. *Journal of Environmental Radioactivity*; 51, 173-180.
- [3] Boutelhig A., Bakelli Y., Hadj Mahammed I., Hadj Arab A., 2012. Performances study of different PV powered DC pump configurations for an optimum energy rating at different heads under the outdoor conditions of a desert area. *Energy*; 39, 33-39.
- [4] Schlaich J., R. Bergermann, W. Schiel and G. Weinrebe, 2005. Design of Commercial Solar Updraft Tower Systems- Utilization of Solar Induced Convective Flows for Power Generation. *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 127, N°1, pp. 117 – 124.
- [5] Al-Kayiem H.H., Aja O.C., 2016. Historic and recent progress in solar chimney power plant enhancing technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1269–1292.
- [6] Gholamalizadeh E. and Mansouri S.H., 2013. A comprehensive approach to design and improve a solar chimney power plant: A special case – Kerman project, *Appl. Energy*, vol. 102, pp. 975–982.
- [7] Nizetic, S., Ninic, N., Klarin, B., 2008. Analysis and feasibility of implementing solar chimney power plants in the Mediterranean region. *Energy* 33, 1680–1690.
- [8] Li, W.B., Wei, P., Zhou, X.P., 2014. A cost-benefit analysis of power generation from commercial reinforced concrete solar chimney power plant. *Energy Convers. Manage.* 79, 104–113.
- [9] Chergui T., Boualit Abd. H., Larbi S. et Bouhdjar A., 2012. Technologie de la cheminée solaire pour la production de l'énergie. *Revue des Energies Renouvelables SIENR'12 Ghardaïa*, 83 – 94 83
- [10] Zhou, X.P., Wang, F., Ochieng, R.M., 2010b. A review on solar chimney power technology. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14, 2315–2338. Zhou, X.,
- [11] Yang, J., Xiao, B. and Hou, G., 2007. Experimental study of temperature field in a solar chimney power setup. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, pp. 2044– 2050
- [12] Golder K., 2003. Combined Solar Pond And Solar Chimney. Final year Mechanical Engineering Project. School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering, Bundoora Campus, RMIT University, Melbourne, Australia.
- [13] Koyun A., Üçgül I., Acar M., Şenol R. and Güneş R., 2007. *Bacası Sisteminin Termaal Özet Dizaynı*. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, Vol. 98, pp. 45 – 50. Available at: <http://www.mmoistanbul.org/yayin/tesisat/98/6>.
- [14] Maia, C.B, Ferreira, A.G., Valle, R.M. and Cortez, M.F.B., 2009. Theoretical evaluation of the influence of geometric parameters and materials on the behavior of the air flow in a solar chimney. *Computers and Fluids*, Vol. 38, pp. 625–636
- [15] Motsamai O., Bafetanye L., Mashaba K. and Kgaswane O., 2013. Experimental Investigation of Solar Chimney Power Plant. *Journal of Energy and Power Engineering* 7, 1980-1984 Botswana
- [16] Hartung C., Marschetzky H., Link T., Bauer M., Kunzel M., Ellwanger M., Thanh T.P. and Dang L.N., 2008. Solar power plant, Germany.
- [17] Adrar.
- [18] BUĞUTEKİN A., 2012. An experimental investigation of the effect of periphery height and ground temperature changes on the solar chimney system. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 32, 1, 51-58, 2012. *J. of Thermal Science and Technology*.
- [19] Mohammad O.H., Obada R., 2012. Experimental Solar Chimney Data with Analytical Model Prediction, *World Renewable Energy Forum*, Denver, Colorado.
- [20] Shadi Kalasha, Wajih Naimeh, 2014. Experimental Investigation of a pilot Sloped Solar Updraft Power Plant Prototype Performance Throughout a Year, *Energy Procedia*, 50, 624-633.
- [21] Kasaeian, A., Ghalamchi, M., Ghalamchi, M., 2014. Simulation and optimization of geometric parameters of a solar chimney in Tehran. *Energy Convers. Manage.* 83, 28–34.
- [22] Ghalamchi M., Kasaeian A., Ghalamchi M. and Mirzahassemi A. H., 2016. An experimental study on the thermal performance of a solar chimney with different dimensional parameters. *Renewable Energy*, 91 477-483.
- [23] <https://dept-wp.nmsu.edu/activities/sample-page/solar/>
- [24] Fasel, H., Meng, F., and Gross, A., 2015. Numerical and Experimental Investigation of a Solar Chimney Power Plant Model. *HEFAT2015*, Kruger National Park, South Africa, 20-23 July 2015.
- [25] Asnaghi, A., Ladjevardi, S.M., 2012. Solar chimney power plant performance in Iran. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 3383–3390.
- [26] Koonsrisuk, A., 2012. Mathematical modeling of sloped solar chimney power plants. *Energy* 47, 582–589.
- [27] Asnaghi, A., Ladjevardi, S.M., 2012. Solar chimney power plant performance in Iran. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 3383–3390.
- [28] Koonsrisuk, A., Chitsomboon, T., 2013b. Effects of flow area changes on the potential of solar chimney power plants. *Energy* 51, 400–406.
- [29] Cao F, Li H, Zhao L, Guo L., 2013. Economic analysis of solar chimney power plants in North west China. *J. Renew. Sustain. Energy*; 5 : 021406.



Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 4th International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 24 - 25 Octobre 2016



- [30] Guo P.H., Li J.Y., Wang Y., 2014. Annual performance analysis of the solar chimney power plant in Sinkiang, China. *Energy Conversion and Management* 87, 392–399.
- [31] Cottam P.J., Duffour P., Lindstrand P. et Fromme P., 2016. Effect of canopy profile on solar thermal chimney performance. *Solar Energy*, 129, 286–296.
- [32] Gairaa K., Bakelli Y., 2013. Solar Energy Potential Assessment in the Algerian South Area: Case of Ghardaïa Region. *Journal of Renewable Energy*.
- [33] Gairaa K., Benkacalia S., 2008. Modélisation numérique des irradiances globale et diffuse au site de Ghardaïa. *Revue des Energies Renouvelables* 11 (1), 129-136.
- [34] Larbi, S., Bouhdjar, A. and Chergui, T., 2010. Performance analysis of a solar chimney power plant in the southwestern region of Algeria. *Renewable Sustain Energy Rev.*, Vol.14, 470–477.
- [35] Chergui, T., 2007. Modélisation des Écoulements dans les Cheminées Solaires. Mémoire de Magister. Ecole Nationale Polytechnique ENP, Alger, Algeria.
- [36] Bernardes, M.A dos S., Valle, R. M., Cortez, M.F.B., 1999. Numerical analysis of natural laminar convection in a radial solar heater. *Int. J. Therm. Sci.*, 1999, Vol.38, pp. 42-50.
- [37] Gannon, A.J., Von Backström, T.W., 2000. Compressible flow through solar power plant chimneys. *J Solar Energy Eng.*, 2000, Vol.122, pp.138–145.
- [38] Pastohr H., Kornadt, O., Gürlebeck, K., 2004. Numerical and analytical calculations of the temperature and flow field in the upwind power plant. *Int. J. Energy Res.* 28, 495–510.
- [39] Ming, T.Z., Liu, W., Pan, Y. and Xu G.L., 2008. Numerical analysis of flow and heat transfer characteristics in solar chimney power plants with energy storage layer. *Energy Conversion and Management*, Vol.49, pp. 2872–2879.
- [40] Tingzhen, M., Weia, L., Guoling, X., Yanbin, X., Xuhu, G. and Yuan, P., Numerical simulation of the solar chimney power plant systems coupled with turbine. *Renew Energy*, Vol. 33, pp. 897–905, 2008.
- [41] Zhou, X.P., Yang, J.K., Wang, J.B., Xiao, B., Hou, G.X. and Wu, Y.Y., 2009. Numerical investigation of a compressible flow through solar chimney, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 30, pp.670–676.
- [42] Maia CB, Ferreira AG, Valle RM, Cortez MFB., 2009. Theoretical evaluation of the influence of geometric parameters and materials on the behaviour of the airflow in a solar chimney. *Comput. Fluids*; 38:625–36.
- [43] Chergui T., Larbi S. and Bouhdjar A., 2010. Thermo-Hydrodynamic Aspect Analysis of Flows in Solar Chimney Power Plants - A Case Study. *RSER*, Vol. 14, N°5, pp. 1410 – 1418.
- [44] Chergui T., Larbi S. and Bouhdjar A., 2011. Configuration Aspect Analysis in Solar Chimney Power Plants Using Finite Element Method, Proceeding of the Eleventh World Renewable Energy Congress, WREC2011, Linköping, Sweden, May 08-13.
- [45] Chergui T., Boualit Abd. H., Larbi S. et Bouhdjar A., 2012. Contrôle du champ Thermo-hydrodynamique dans une centrale cheminée solaire. CNMF12-Congrès national de mécanique des fluides 25-26 septembre 2012- USTHB - Alger, Algeria.
- [46] Chergui T., Bouhadjar A., Boualit Abd. H., Larbi S. et 2012. Entropy Generation Analysis of the Solar Chimney Power Plant. *World Renewable Energy Forum*, WREF 2012. 13- 17 May 2012, Denver, Colorado, USA.
- [47] Tayebi T. and Djezzar M., 2012. Numerical Simulation of Natural Convection in a Solar Chimney," *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 2, pp. 712-717.
- [48] Tayebi T. and Djezzar M., 2013. Numerical Analysis of Flows in a Solar Chimney Power Plant with a Curved Junction," *International Journal of Energy Science*, vol. 3.
- [49] Lebbi M., Chergui T., Boualit H., Boutina I., 2014. Influence of geometric parameters on the hydrodynamics control of solar chimney. *Int J Hydrogen Energy* 39. 15246-15255.
- [50] Lebbi M., Chergui T., Boualit H., Boutina I., 2014. Influence des paramètres géométriques sur le contrôle thermo-hydrodynamique d'une centrale à cheminée solaire. *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 17 N°3 (2014) 377 – 386.
- [51] Ming, T.Z., de Richter, R.K., Meng, F.L., Pan, Y., Liu, W., 2013a. Chimney shape numerical study for solar chimney power generating systems. *Int. J. Energy Res.* 37, 310–322.
- [52] Ming, T.Z., Gui, J.L., de Richter, R.K., Pan, Y., Xu, G.L., 2013b. Numerical analysis on the solar updraft power plant system with a blockage. *Sol. Energy* 98, 58–69.
- [53] Putkaradze, V., Vorobieff, P., Mammoli, A., Fathi, N., 2013. Inflatable free-standing flexible solar towers. *Sol. Energy* 98, 85–98.
- [54] Guo, P.H., Li, J.Y., Wang, Y., Liu, Y.W., 2013. Numerical analysis of the optimal turbine pressure drop ratio in a solar chimney power plant. *Sol. Energy* 98, 42–48.
- [55] Zou, Z., Guan, Z.Q., Gurgenci, H., 2014. Numerical simulation of solar enhanced natural draft dry cooling tower. *Sol. Energy* 101, 8–18.
- [56] Patel, S.K., Prasad, D., Ahmed, M.R., 2014. Computational studies on the effect of geometric parameters on the performance of a solar chimney power plant. *Energy Convers. Manage.* 77, 424–431.
- [57] Chergui T., M. Lebbi, Abd. H. Boualit, L. Boutina, A. Bouhdjar, S. Larbi, 2014. Analyse de l'effet de la Température Ambiante sur le champ Thermo-hydrodynamique des Cheminées Solaires. 19-21 Dec. CIER2014. Monastir, Tunisia.
- [58] Lebbi M., H. Boualit, T. Chergui, L. Boutina, A. Bouabdallah, H. Oualli, 2014. Rayleigh Number Effect On The Natural Laminar Convection In A Solar Chimney. 19-21-Dec. CIER2014. À Monastir, Tunisie.
- [59] Chergui T., Lebbi M., Boualit Abd. H. et Boutina L., 2016. Numerical analysis of the airflow inside a solar chimney. la première conférence nationale sur les CFD et la technologie, centre de recherche nucléaire de (la CFD & Tech 2016, May 2016), Draria- Algiers, Algeria.
- [60] Lebbi M., Boualit Abd. H., Chergui T., Boutina L., 2015. Tower outlet/inlet radii ratio effects on the turbulent flow control in a solar chimney. 6th International Renewable Energy Congress (IREC15). March. INSPEC 15144396-10.1109/IREC.2015.7110972-IEEE
- [61] Chergui T., Boualit Abd. H., Lebbi M., Boutina L., 2015. Improved Thermo-hydrodynamic Field Quality in the Solar Chimneys. . 6th International Renewable Energy Congress (IREC15). March. INSPEC 15144396-10.1109/IREC.2015.7110972-IEEE
- [62] Djimlia S. and Chaker A., 2015. Numerical analysis of the turbulent heat transfer at 2D in a solar chimney. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*. vol. 4, no. 4.
- [63] Tayebi T. and Djezzar M., 2016. Effect of varying ambient temperature and solar radiation on the flow in a solar chimney collector. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*.
- [64] Chergui T., 2013. Etude des écoulements avec transfert de chaleur dans les centrales à cheminées solaires. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Polytechnique. Alger, Algérie.
- [65] S. M. Metev and V. P. Veiko, *Laser Assisted Microtechnology*, 2nd ed., R. M. Osgood, Jr., Ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1998.
- [66] J. Breckling, Ed., *The Analysis of Directional Time Series: Applications to Wind Speed and Direction*, ser. Lecture Notes in Statistics. Berlin, Germany: Springer, 1989, vol. 61.
- [67] S. Zhang, C. Zhu, J. K. O. Sin, and P. K. T. Mok, "A novel ultrathin elevated channel low-temperature poly-Si TFT," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 20, pp. 569–571, Nov. 1999.