



UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA
TECHNOLOGIE ET SCIENCES DE LA MATIÈRE

N° d'ordre :
N° de série :

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : Génie mécanique

Option : énergétique

Présenté par :

CHELOUFI Djassem

Thème

**Réalisation et expérimentation
d'une cheminée solaire**

Soutenu publiquement le : 08/06/2014

Devant le jury composé de :

Mr. D. DAMENE	President	Université Kasdi Merbah Ouargla
Mr. K. BENCHIKH	Examineur	Université Kasdi Merbah Ouargla
Mr. E. ACHOURI	Encadreur	Université Kasdi Merbah Ouargla

Année universitaire : 2013/2014

REMERCIEMENTS

Au moment d'écrire les dernières lignes de ce document, je tiens à remercier et exprimer ma profonde gratitude auprès des membres du Jury.

A Monsieur E.ACHOURI, Enseignant au sein du département de m'avoir proposé cet intéressant thème de recherche et d'avoir aidé à la définition, la réalisation et les interprétations de ce travail par ses nombreuses interventions. Qu'il soit assuré de ma profonde reconnaissance

A Madame le Président du Jury d'avoir accepté de présider ce Jury malgré ses nombreuses occupations ; qu'il soit assuré de ma grande reconnaissance

A Messieurs les enseignants qui me font l'honneur d'examiner ce travail de recherche ; qu'ils soient assurés de ma grande considération

A tous mes enseignants de l'université d'Ouargla qui ont participé à ma formation en exception M. Derghout, M. Boubekri et M^{me} Saifi

A tous mes camarades de promotion pour leur soutien et la bonne ambiance qu'ils ont créée tout au long des années de formation

A tous mes amis et particulièrement ceux qui ont participé activement à la confection et au montage du prototype de cheminée solaire en particulier BOUZEGAG Walid, BARIKA Hocine, AFFANE Boudkhil, CHAABI Bilal et MEFTAH Iyes.

A tous ceux et celles qui ont participé de près ou de loin à la concrétisation de ce travail de recherche.

DEDICACES

A cette formidable Maman qui a toujours cru en mes capacités et qui était toujours là pour me remettre sur rails lors des moments les plus difficiles.

A mon père pour ses soutiens multiples et ses encouragements sans limites.

A ma sœur, Docteure RANDA à qui je souhaite une belle aventure dans sa formation en Médecine Interne

A mes grands-parents, oncles, tantes, cousins et cousines

A tous mes amis Nooby, El-Yoo, El-Foo, El-Yaa, Choug, Dino, El-waz, Peck, Sifo, Melouka, Adem, Affane et a Ursa, Slark, SF et Roshane ...

Table des matières

Titre	Page
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables	
Introduction	4
1. L'énergie solaire	5
1.1. Le Soleil, source de vie	5
1.2. La conversion thermique à basses températures	5
1.2.1. Les serres	5
1.2.2. Les capteurs solaires	6
1.2.3. Les maisons solaires	6
1.3. La conversion thermique à hautes températures	7
1.3.1. Le four solaire	7
1.3.2. La centrale thermique	7
1.4. La conversion photovoltaïque	7
2. L'énergie de la biomasse	8
2.1. La conversion thermochimique	8
2.1.1. La combustion	8
2.1.2. La photosynthèse	8
2.1.3. La gazéification	8
2.2. La conversion biochimique	9
2.2.1. La fermentation éthylique	9
2.2.2. La fermentation méthylique	9
2.2.3. La fermentation anaérobie des déchets végétaux	9
2.2.4. D'autres conversions biochimiques	9
3. L'énergie des courants	10
3.1. L'énergie hydraulique	10
3.2. L'énergie éolienne	11
4. L'énergie géothermique	12
4.1. La géothermie de très basse énergie	12
4.2. La géothermie de basse énergie	12
4.3. La géothermie de moyenne énergie	13
4.4. La géothermie de haute énergie	13
5. Les énergies de récupération	13
6. Les autres sources d'énergies nouvelles	13
6.1 La pompe à chaleur	13
6.2 L'énergie de la mer	14
6.2.1 L'énergie marémotrice	14
6.2.2. L'énergie des vagues	15
6.2.3. L'énergie thermique des mers	15
6.3. La fusion thermonucléaire	15
6.4. Les pile à combustible	16
Chapitre II : La cheminée solaire	
1. Introduction	18
2. La tour solaire	18
2.1. Historique	18

2.2. Différentes parties d'une tour solaire	18
2.2.1. Le Collecteur	19
2.2.2. La Turbines	20
2.2.3. La cheminée	21
2.3. Principe de fonctionnement d'une tour solaire	22
2.4. Phénomène majeur : Le thermosiphon	23
3. Cycle thermodynamique de la cheminée solaire	24
3.1. Cheminée	25
3.2. Collecteur	27
3.3. Turbine	28
4. Le stockage d'énergie	28
4.1. Les différentes méthodes de stockage	28
4.1.1. Par chauffage du sable	28
4.1.2. Par chauffage de Galets	29
4.1.3. Par chauffage d'eau	29
5. Avantages et Inconvénients d'une tour solaire	30
5.1. Avantages	30
5.2. Inconvénients	30
6. Comparaisons avec d'autres types de centrales	31
6.1. Comparaison avec Puissance	31
6.2. Comparaison avec Prix du kWh	31
7. Le prototype de Manzanares	31
8. Les trois projets actuels de Tours Solaires	32
8.1. Le projet australien	32
8.1.1 Spécifications du projet	33
8.2. La Cheminée Solaire Espagnole	33
8.2.1. Spécifications du projet	34
8.3. La Cheminée Solaire Namibienne	34
9. Autres types de Cheminées solaires	35
9.1. Montagnes Solaires	35
9.2. Cheminées solaires « flottantes »	36
9.3. Tour Energétique	37
9.4. La Tour d'Energie Bidirectionnelle (Concept hybride)	38
9.5. Tornades artificielles, vortex	39

Chapitre III: Conception et méthodes de mesure

1. Introduction	42
2. Prototype de Téhéran (Iran)	42
2.1 Structure et composants	42
2.1.1 La Cheminée	42
2.1.2 Le collecteur	42
2.2 Résultats	42
3. Prototype de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, (France)	43
3.1 Structure et composants	44
3.1.1 La Cheminée	44
3.1.2 Le collecteur	44
3.2 Résultats	45
4. Prototype confectionné	46
4.1 Structure et composants	46
4.1.1 La Cheminée	46

4.1.2 Le collecteur	47
4.2. Paramètre étudiées	49
4.3. Instrument de mesures	50

Chapitre IV: Résultats & Discussions

1. Introduction	53
2. Résultats en fonction de la première variante (22 Mai 2014)	53
3. Résultats en fonction de la deuxième variante (24 mai 2014)	56
4. Résultats en fonction de la troisième variante (27 mai 2014)	59
5. Synthèse des résultats	61

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure (I-1):	Panneaux solaires photovoltaïques	5
Figure (I-2):	Maison solaire	6
Figure (I-3):	Centrale hydroélectrique	10
Figure (I-4):	Éolienne	11
Figure (I-5):	Champ géothermique	12
Figure (I-6):	Chauffage domestique	14
Figure (I-7):	Centrale électrique marémotrice	15
Figure (II-1):	La cheminée solaire	18
Figure (II-2):	Le collecteur	19
Figure (II-3):	Verrière du collecteur d'une cheminée solaire	19
Figure (II-4):	Turbine pour Cheminée Solaire de large diamètre	20
Figure (II-5):	Turbines verticales	20
Figure (II-6):	Petites turbines horizontales	20
Figure (II-7):	La cheminée	21
Figure (II-8):	Autoportantes	22
Figure (II-9):	Haubanées	22
Figure (II-10):	Toit transparent de la serre	22
Figure (II-11):	Schéma illustrant le fonctionnement de la cheminée solaire	23
Figure (II-12):	Schéma illustrant la circulation de l'air	24
Figure (II-13):	Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'un Thermosiphon	24
Figure (II-14):	Cycle réel de la cheminée solaire	26
Figure (II-15):	Principe du stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des galets	29
Figure (II-16):	Principe du stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des tubes noirs emplis d'eau	29
Figure (II-17):	La Cheminée solaire Manzanares	32
Figure (II-18):	Structure de La Cheminée solaire Manzanares	32
Figure (II-19):	La Cheminée Solaire Australienne	33
Figure (II-20):	La Cheminée Solaire de Ciudad Real	34
Figure (II-21):	La Cheminée Solaire Namibienne	34
Figure (II-22):	Taille comparée de divers projets de Cheminées solaires	35
Figure (II-23):	Parcours de l'air dans la Montagnes Solaires, projet ELIOTH	35
Figure (II-24):	Montagnes Solaires, projet ELIOTH	36
Figure (II-25):	Cheminées solaires « flottantes »	36
Figure (II-26):	Structure souple et flexible de la Cheminée Solaire Flottante	37
Figure (II-27):	Schéma illustratif de l'opération effectué par une Tour Énergétique	38
Figure (II-28):	Tour d'Énergie Bidirectionnelle Down Draft cycle	38
Figure (II-29):	Tour d'Énergie Bidirectionnelle UpDraft cycle	39
Figure (II-30):	Tour Tornades artificielles, vortex	39
Figure (III-1):	Cheminée solaire, Prototype de Téhéran	42
Figure (III-2):	Diagramme numérique de température pour les entrées de collecteur de 6, 8 et 12 cm à la hauteur de 2m de la cheminée et de diamètre de la cheminée de 20cm	43

<i>Figure (III-3): Distribution de vitesse numérique pour les entrées de collecteur de 6, 8 et 12cm à la hauteur de la cheminée de 2m et de diamètre de la cheminée de 20cm</i>	43
<i>Figure (III-4): Cheminée solaire Lola 3.0</i>	44
<i>Figure (III-5): Variation de la vitesse à la sortie de la cheminée en fonction du temps</i>	45
<i>Figure (III-6): Variation de la vitesse à la sortie de la cheminée en fonction du temps avec isolation de la cheminée</i>	46
<i>Figure (III-8): Support de Cheminée</i>	47
<i>Figure (III-9): Support de cheminée fixé sur la planche en bois ainsi que les tiges filetées</i>	48
<i>Figure (III-10): Bâche fixée sur le cadre métallique</i>	48
<i>Figure (III-11): Prototypage Cheminée Solaire</i>	49
<i>Figure (III-12): Emplacement des Thermocouples ainsi que l'Anémomètre</i>	51
<i>Figure (III-13): Anémomètre à fil chaud</i>	51
<i>Figure (IV-1): Vitesse d'écoulement en fonction du temps avec quatre ouvertures</i>	52
<i>Figure (IV-2): Différentes températures en fonction du temps avec quatre ouvertures</i>	53
<i>Figure (IV-3): Rayonnement en fonction du temps</i>	54
<i>Figure (IV-4): Vitesse en fonction du Rayonnement</i>	56
<i>Figure (IV-5): Vitesse en fonction du temps avec deux ouvertures</i>	57
<i>Figure (IV-5): Différentes températures en fonction du temps avec deux ouvertures</i>	57
<i>Figure (IV-6): Rayonnement en fonction du temps</i>	58
<i>Figure (IV-8): Vitesse en fonction du Rayonnement</i>	58
<i>Figure (IV-9): Vitesse en fonction du temps avec une seule ouverture</i>	59
<i>Figure (IV-10): Différentes températures en fonction du temps avec une seule ouverture</i>	60
<i>Figure (IV-11): Rayonnement en fonction du temps</i>	61
<i>Figure (IV-12): Vitesse en fonction du Rayonnement</i>	61
<i>Figure (IV-13): comparaison entre les vitesses des trois tests</i>	62

Liste des tableaux :

<i>Tableau (I-1): Comparaison avec Puissance</i>	30
<i>Tableau (I-2): Comparaison avec Prix du kWh</i>	30

Nomenclature

<i>Symbole</i>	Définition	<i>Unité</i>
η_{Turb}	Rendement de turbine	
E	Eclairement solaire	(w/m ²)
D_{coll}	Diamètre de collecteur	(m)
H_c	Hauteur de cheminée	(m)
η_c	L'efficacité de la cheminée	
η_{coll}	Efficacité du collecteur	
Q	Quantité de chaleur	(J)
A_{coll}	Surface du collecteur	(m ²)
G	Radiation solaire	(w/m ²)
m	Débit massique	(Kg/s)
C_p	Capacité calorifique spécifique de l'air	(J/Kg.k)
ΔT	Différence de température entre le collecteur et l'air sortant	(°C)
V_c	Vitesse de l'air à la sortie du collecteur (entrée de la cheminée)	(m/s)
A_c	Surface d'une coupe de la cheminée	(m ²)
T_a	représente la température de l'air	(°C)
$H^$	représente la hauteur du collecteur	(m)
T_e	Température à l'entrée du collecteur	(°C)
T_{ec}	Température sortie du collecteur (entrée de la cheminée)	(°C)
T_{cc}	Température au centre du collecteur	(°C)
Δh	Différence de l'enthalpie	(J/kg)
A_{coll}	Surface du collecteur	(m ²)
ρ_{coll}	La masse volumique	(kg/m ³)

Introduction:

A partir de la deuxième moitié du XXème siècle, les Energies Renouvelables connaissent un essor sans précédent. Jusque-là, les Etats, les industriels, et nous aussi consommateurs, avons longtemps négligé ces énergies naturellement offertes par la planète au profit d'énergies immédiatement plus rentables, mais aussi plus coûteuses pour l'environnement comme le nucléaire, le raffinage de pétrole ou encore le gaz. Or, ces dernières énergies connaissent depuis plusieurs années un épuisement inévitable de leurs ressources.

De plus, en 1992 lors de la conférence de Rio et plus tard, en 1997, lors du Protocole de Kyoto, la plupart des États ont pris des engagements pour lutter contre les émissions de gaz à effet de serre afin de contribuer à la préservation de l'environnement et de l'équilibre climatique. A partir de ce moment-là, un essor sans précédent des Energies Renouvelables à travers le monde apparaît. Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, la force de l'eau et les végétaux, ces nouvelles énergies sont inépuisables, la nature peut les reconstituer rapidement et elles n'engendrent pas de déchets ni d'émissions polluantes.

Ainsi, les énergies solaires, éoliennes, hydrauliques, géothermiques et la biomasse sont les formes les plus courantes des Energies Renouvelables. Lentement mais sûrement, elles trouvent des applications adaptées et économiquement viables dans de multiples domaines.

Comme nous pouvons le comprendre à travers l'intitulé de notre projet « cheminée solaire », l'énergie solaire est au centre de notre étude. Le but de ce projet est de comprendre le fonctionnement de ces tours, mais surtout, à travers une maquette réalisée par nos soins, d'optimiser au maximum ce système. De quelle manière pouvons-nous optimiser cette maquette afin de créer de l'énergie noble, l'électricité, à partir seulement de l'énergie du soleil

Pour ce faire, nous analyserons, en premier lieu, le fonctionnement d'une tour solaire et son évolution à travers le monde. Ensuite, nous nous focaliserons sur une partie théorique comprenant un bilan thermique de notre maquette et une explication sur le phénomène du tirage. Par la suite, nous nous pencherons sur un préliminaire à l'étude qui regroupe les conditions nécessaires à l'optimisation de notre maquette.

Le présent travail s'articule donc autour des points suivants

- Une présentation du cadre général de l'étude à travers une synthèse bibliographique détaillée sur les énergies renouvelables où l'énergie solaire est mise en évidence
- Une rétrospective sur un des moyens de domestication de l'énergie solaire à savoir la cheminée solaire ; il est fait essentiellement une présentation des différentes tours solaires à travers le monde ainsi que le principe et mode de fonctionnement d'une cheminée solaire

- Une description détaillée du protocole expérimental à travers les phases de conception du prototype de la cheminée solaire, le suivi et les différentes mesures des paramètres considérés dans le cadre de cette étude
- Une présentation détaillée des résultats obtenus accompagnés de discussions sur l'évolution des paramètres étudiés essentiellement celui ayant trait au rendement de la cheminée solaire
- Enfin, une conclusion générale où les résultats obtenus sont mis en relief.

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

Introduction :

Longtemps exploitées, bien avant le vingtième siècle pour certaines d'entre elles, les énergies renouvelables sont devenues, en 1973, sujet d'actualité lors du premier « choc pétrolier ». Bénéficiant de technologies plus performantes qu'autrefois, leur extension se heurte toutefois aussi bien à de piètres rendements qu'à des coûts d'exploitation trop élevés et des intérêts industriels bien installés.

Les énergies renouvelables s'opposent aux énergies non renouvelables (énergies fossile et nucléaire). Mais la disponibilité à l'infini de ces énergies n'a de sens qu'à l'échelle humaine. En effet, il ne faut jamais perdre de vue que l'énergie, quelle que soit sa forme, est un contenu propre à une substance ou à un système, et que toute utilisation d'énergie revient à l'en retirer irrémédiablement. D'autre part, si une partie de l'énergie consommée a effectivement servi, le reste est le plus souvent perdu et se retrouve dans l'environnement, c'est-à-dire l'air ambiant, qui sert de « poubelle énergétique ».

Si bon nombre de filières énergétiques ont été proposées comme ressources possibles et solutions idéales aux problèmes de nos sociétés industrielles, il ne faut pas oublier que le sujet concerne en premier lieu le physicien qui apporte la connaissance ; puis l'ingénieur et ses savoir-faire, l'économiste et ses bilans économiques, et enfin le politique à qui revient la décision.

Quant aux diverses formes d'énergie, certaines sont mieux adaptées que d'autres à un usage donné, et la conversion mutuelle entre formes d'énergie apparaît ainsi inévitable, même si le rendement en souffre souvent considérablement, ce qui est d'autant plus pénalisant pour des énergies peu concentrées

1. L'énergie solaire :

Ce que l'on désigne par énergie solaire est le rayonnement émis dans toutes les directions par le Soleil, et que la Terre reçoit à raison d'une puissance moyenne de $1,4 \text{ kW/m}^2$, pour une surface perpendiculaire à la direction Terre-Soleil. Ce flux solaire est atténué lors de la traversée de l'atmosphère par absorption ou diffusion, suivant les conditions météorologiques et la latitude du lieu ; au niveau du sol, la puissance restante est de l'ordre de 1 kW/m^2 . La quantité d'énergie utilisable varie entre 800 et 2 500 $\text{kWh/m}^2/\text{an}$, encore suivant le lieu [20].



Figure (I-1): Panneaux solaires photovoltaïques.

1.1. Le Soleil, source de vie :

Le rayonnement solaire est à l'origine de la plupart des formes d'énergie que nous exploitons ; les combustibles fossiles, charbon, pétrole et gaz naturel, en sont issus, mais ne sont pas renouvelables à l'échelle de l'humanité. C'est le rayonnement solaire qui est à l'origine des cycles hydrologiques qui alimentent les cours d'eau et les flux aériens, ainsi que les marées océaniques (en liaison avec la Lune) ; c'est lui aussi qui fournit aux végétaux, la biomasse, l'énergie nécessaire à leur développement par photosynthèse. En plus de ces sources d'origine solaire indirecte, il existe des possibilités d'utilisation directe du rayonnement solaire par conversion du rayonnement en chaleur. Mais si le Soleil constitue indéniablement un énorme réservoir d'énergie, inépuisable à l'échelle humaine, son exploitation se heurte au fait qu'elle est diffusée irrégulièrement, qu'elle est de faible densité, et que le rendement de conversion est loin d'être favorable.

1.2. La conversion thermique à basse température :

1.2.1 Les serres :

Le rayonnement solaire, seule forme d'énergie transmissible à grande distance sous forme d'ondes électromagnétiques, est absorbée (inégalement) par les objets qui y sont exposés, et est converti en chaleur. Si de plus on expose des objets au rayonnement solaire à travers une paroi de verre, les fréquences correspondant au rayonnement infrarouge sont arrêtées, « piégées » par le verre : c'est ce que l'on connaît sous le nom d'effet de serre.

Les serres pour cultures florales ou maraîchères sont connues depuis longtemps ; elles assurent des récoltes précoces. L'effet de serre peut être avantageusement complété au moyen d'un réchauffage par ruissellement sur les parois, en faisant appel à la géothermie basse

température ou à la récupération de rejets industriels, ceux des centrales électronucléaires par exemple [21].

1.2.2. Les capteurs solaires:

Les capteurs solaires plans sont constitués d'un caisson fermé par un couvercle en verre, et renfermant une canalisation parcourue par de l'eau (fluide caloporteur). Tout l'intérieur est peint en noir de façon à absorber le maximum de rayonnement ; le rendement d'un capteur bien réalisé dépasse 50 % et permet de produire l'eau chaude sanitaire d'une habitation. La température atteinte ne dépasse pratiquement pas 80 °C. Le couplage de capteurs solaires avec un chauffe-eau électrique assure la fourniture d'eau chaude quelles que soient les conditions d'ensoleillement ; le gain d'un tel chauffe-eau solaire peut être estimé à environ 50 % de la dépense annuelle, avec un amortissement du surcoût d'installation sur une dizaine d'années.

Les capteurs à concentration permettent d'atteindre des températures supérieures à 150 °C ; une surface réfléchissante de forme cylindrique concentre le rayonnement solaire sur un récepteur parcouru par le fluide caloporteur. L'eau chaude produite peut être utilisée directement pour le chauffage de locaux, de serres, de piscines, ou à des fins industrielles. Elle peut aussi être transformée en travail mécanique ou électrique de façon très classique, avec toutefois un faible rendement dû à la température trop basse de la source chaude[21].

1.2.3. Les maisons solaires:

Le rayonnement solaire peut aussi servir à chauffer directement des locaux d'habitation ; des maisons solaires ont été expérimentées dans des sites variés, les meilleurs étant ceux qui correspondent à un ensoleillement annuel maximal. La construction doit être fermée vers le nord, ouverte au sud ; la collecte de l'énergie se fait par les murs, des panneaux solaires, et éventuellement par une serre ; un système de chauffage d'appoint doit être prévu. Les difficultés proviennent de l'irrégularité du rayonnement, suivant la latitude du lieu, la saison, l'heure de la journée, et l'état de l'atmosphère ; de plus, le soleil manque essentiellement quand on en a le plus besoin, de l'automne au printemps. Un stockage de la chaleur est donc primordial, et de préférence sur une longue période, afin d'utiliser en hiver la chaleur captée et stockée pendant l'été [21].

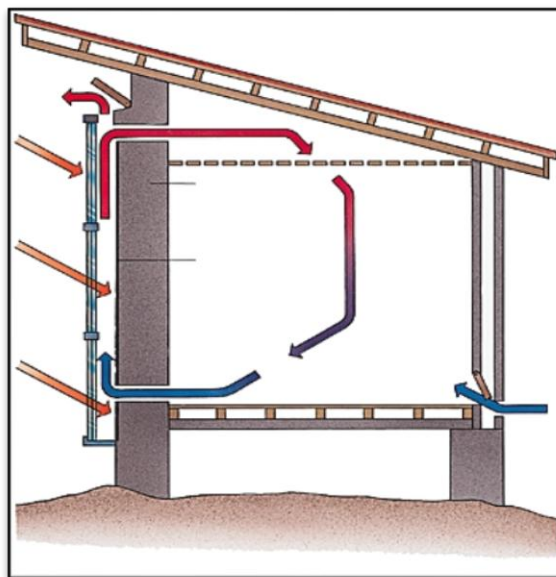


Figure (I-2): Maison solaire.

1.3. La conversion thermique à haute température:

1.3.1. Le four solaire:

Le principe mis en œuvre est la concentration du rayonnement, mais avec un facteur multiplicateur beaucoup plus grand que dans le cas précédent. Le meilleur exemple en est le four solaire d'Odeillo, créé en 1968 en Cerdagne, successeur de celui de Lavoisier, après les fours de Meudon (1946) et de Montlouis (1949). À Odeillo, le rayonnement solaire est capté par un « champ » de 63 miroirs plans orientables de 45 m² chacun, puis réfléchi sur un miroir parabolique formé de 9 500 miroirs élémentaires de 0,45 m de côté courbés par contrainte mécanique. Le faisceau convergent ainsi obtenu permet d'atteindre une puissance de 1 MW, soit 1 000 fois la puissance reçue au sol ; les matériaux exposés à ce rayonnement peuvent être portés à des températures de 1 500 à 3 800 °C. Les recherches portent sur les réactions à hautes températures, les propriétés mécaniques et électriques des matériaux, la préparation d'oxydes réfractaires de grande pureté [22].

1.3.2. La centrale thermique:

La centrale thermique *Thémis*, construite en 1976, à Targassonne, dans les Pyrénées-Orientales a permis d'étudier les problèmes liés à la conversion du rayonnement solaire en électricité. La concentration d'énergie était obtenue par des miroirs plans orientables sur une chaudière placée au sommet d'une tour. Avec comme fluide caloporteur des sels fondus portés à 450 °C et un système de stockage indispensable, la puissance électrique était de 2,5 MW. L'exploitation de *Thémis* a été arrêtée en 1986 (le prix de revient du kWh était alors de 10 F contre 0,23 F pour le kWh nucléaire), mais les installations sont utilisées pour des expériences d'astrophysique. En Californie, huit centrales d'une puissance totale de 275 MW produisent de l'électricité à une période de la journée qui correspond à une forte utilisation des climatiseurs, et sont relayées par des centrales thermiques au gaz [22].

1.4. La conversion photovoltaïque:

C'est la transformation directe du rayonnement solaire en électricité dans une photopile. L'effet photovoltaïque découvert en 1839 par Antoine Becquerel est produit généralement dans des disques très minces de silicium monocristallin dont des zones superposées sont dopées par des atomes de bore et de phosphore ; une tension de 0,6 V apparaît entre ces zones. Les photons incidents entrent en collision avec les atomes de la cellule et provoquent un mouvement des charges (électrons) entre les deux zones. L'intensité du courant continu fourni est de 0,03 A/cm² de cellule.

Avec un prix de revient de l'ordre de cinq (5) euros le watt installé, un rendement de l'ordre de 15 % pour les photopiles industrielles, une durée de vie de 15 à 20 ans, et une grande sensibilité à l'humidité, ce type de convertisseur d'énergie est principalement intéressant pour les installations difficilement raccordables à un réseau de distribution électrique : balises, signalisation routière aérienne ou maritime, relais hertziens, systèmes de pompage, habitations isolées. Le développement des photopiles passe par une amélioration du rendement de conversion et un abaissement substantiel du prix de revient. Des matériaux autres que le silicium cristallin font l'objet de recherches et/ou de développements, tel le silicium amorphe qui revient moins cher (utilisé dans les calculettes, montres, détecteurs, capteurs) et le silicium poly cristallin à l'arséniure de gallium. Il reste que, en France, un module photovoltaïque bien orienté (exposition Sud, inclinaison d'environ 30°, sans ombre

portée au module) de 1 m² fournit une puissance d'environ 100 Wc (watt crête). Une installation de 20 m² (2 kWc), qui produira environ 2 000 kWh par an, revient en moyenne à 15 000 € TTC pose comprise. Les recettes annuelles dues à la vente du courant ne dépassent pas 300 €, l'investissement n'est donc rentable qu'après 50 ans !

Des centrales électriques sont en cours d'expérimentation en Allemagne, en Suisse, en Espagne, ainsi qu'en Italie qui détient la plus puissante pour l'Europe : 2 600 000 cellules pour une puissance de 3,3 MW [22].

2. L'énergie de la biomasse:

La biomasse est tout ce que produisent la terre et les milieux aquatiques sous l'action du rayonnement solaire : arbres, plantes, algues. Les végétaux contiennent de l'énergie ; ils ont d'ailleurs constitué pendant des millénaires l'unique source d'énergie utilisée par l'homme : les aliments de l'homme lui-même et du bétail qui étaient les seuls moteurs, et le bois, seul combustible connu, employé avec un rendement énergétique désastreux jusqu'à la découverte des combustibles fossiles [26].

2.1. La conversion thermo-chimique:

2.1.1. La combustion:

Le bois peut être employé tel quel, comme *combustible* ; c'est de loin la forme d'énergie de la biomasse la plus utilisée. En France, le bois est essentiellement utilisé pour chauffer les habitations individuelles ; près de la moitié d'entre elles y ont recours, surtout en milieu rural où il est souvent peu onéreux, voire gratuit. Rappelons que la forêt recouvre 25 % de la superficie de la France. À la *combustion directe* s'ajoute également la *pyrolyse* ou carbonisation : en chauffant le bois, on obtient un gaz combustible, des produits condensables (eau et goudrons), et un résidu solide, le charbon de bois (production annuelle en France : 60 000 t). Ce charbon de bois est intéressant par sa faible densité, mais il ne contient que 30 à 50 % de l'énergie initiale du bois pyrolyse. Cependant, des installations à haut rendement, telle celle de Framatome-Cemagref implantée à Clamecy, permettent d'approcher un rendement de 90 % [26].

2.1.2. La photosynthèse:

En ce qui concerne le reste de la biomasse, il faut d'abord constater qu'il s'agit d'une ressource considérablement dispersée à la surface du globe, dont la « récolte » est souvent difficile (océans, zones arides). La production végétale est liée à l'action de la lumière ; la photosynthèse réalise la conversion directe de la lumière (spectre visible du rayonnement solaire) en énergie chimique sous forme de matériaux carbonés utilisables comme aliments, fibres, matières premières industrielles, et combustibles. En moyenne, le rendement énergétique de conversion de l'énergie solaire incidente en substance végétale ne dépasse guère 2 % ; il varie selon les plantes et la région considérée.

2.1.3. La gazéification :

La gazéification à l'air consiste à chauffer à haute température des déchets végétaux ou des ordures organiques ; on obtient un gaz combustible composé essentiellement de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Ce gaz peut alimenter les brûleurs de chaudières pour le chauffage collectif, ou être utilisé dans des moteurs à combustion interne de type Diesel ou essence, modifiés [26].

La gazéification sous oxygène, technologie plus récente, permet d'obtenir de meilleurs rendements.

2.2. La conversion biochimique:

Il s'agit de divers procédés de fermentation des végétaux.

2.2.1. La fermentation éthylique:

Elle est connue depuis la plus haute antiquité ; elle fait intervenir une levure, s'applique à des jus sucrés (fruits, betterave) et produit de l'éthanol ou alcool éthylique.

2.2.2. La fermentation méthylique:

Elle utilise, toujours sous l'action de levures, des déchets végétaux riches en amidon (ou éventuellement sucrés), et produit du méthanol ou alcool méthylique. Pour les végétaux non sucrés, la transformation préalable de l'amidon en sucres est indispensable ; elle s'obtient par traitement acide mais est très coûteuse. Éthanol et méthanol peuvent être utilisés comme carburants (biocarburants) dans les moteurs d'automobiles adaptés, après épuration (élimination de CO_2 et H_2S). En 2004, 33 millions de tonnes de bioéthanol ont été produites, essentiellement par le Brésil et les États-Unis qui se partagent 95 % du marché, et 2 millions de tonnes de biodiesel, essentiellement en Europe.

2.2.3. La fermentation anaérobie des déchets végétaux:

Elle permet d'obtenir un biogaz composé de méthane CH_4 (50 à 65 %) et de dioxyde de carbone CO_2 ; ce même gaz est connu depuis longtemps : le gaz des marais ou feu follet se forme naturellement dans la vase sous l'action de micro-organismes et en l'absence d'air ; il se forme également par décomposition des déchets animaux, tels le fumier et le purin. La fermentation méthanique peut être obtenue artisanalement (au niveau d'une exploitation agricole par exemple) dans des digesteurs, cuves légèrement chauffées dans lesquelles on introduit le fumier avec circulation continue du purin. Le chauffage des locaux de l'exploitation peut être assuré avec un troupeau de 30 bovins ou 500 porcs. Ce procédé concourt en même temps à la dépollution de l'environnement.

2.2.4. D'autres conversions biochimiques:

La fermentation acétonobutylique consiste à traiter des jus sucrés, de topinambour par exemple, ou riches en cellulose (pomme de terre, betterave, sorgho, canne à sucre, bois, paille, papier) ; on obtient un mélange d'acétone, d'éthanol et de butanol. Le pouvoir calorifique de ce biogaz est peu élevé, et ses inconvénients ne manquent pas dans son emploi comme carburant moteur : départs à froid difficiles, importante corrosion due au méthanol qui, de plus, est toxique.

L'*éthyle-tertio-butyl-éther* (ETBE) est obtenu en ajoutant de l'isobutane à l'éthanol ; il remplace le plomb comme antidétonant dans l'essence sans plomb (il augmente l'indice d'octane du carburant).

Le *Diester* (appellation commerciale, acronyme de *Diesel* et *ester*) est obtenu à partir du colza et du tournesol ; mélangé au gazole au taux de 5 %, il peut être utilisé sans modification dans les moteurs Diesel de faible puissance et dans les chaudières de chauffage central. Pour les installations de grande puissance, le taux de mélange peut atteindre 50 % ;

les émissions de fumée sont réduites de moitié, et de plus c'est un carburant exempt de soufre. En France, plusieurs villes d'importance diverse ont équipé leur parc automobile pour l'utilisation du Diester.

La bioconversion directe est l'utilisation du rayonnement solaire pour obtenir directement des composés chimiques, sans passer par les étapes des conversions vues plus haut ; la *photosynthèse artificielle* par exemple permettrait, en raccourcissant la chaîne énergétique, d'élever sensiblement le rendement de conversion. On pourrait obtenir des biocarburants, tels l'hydrogène, dont on perçoit les immenses possibilités dans l'avenir, ou des molécules spécifiques à usage pharmaceutique par exemple [23].

3. L'énergie des courants:

Le rayonnement solaire est à l'origine des flux atmosphériques et des précipitations qui ont pour principales conséquences la formation et la circulation des cours d'eau. Ressources hydrauliques et surtout éoliennes sont les énergies les plus anciennement utilisées pour produire directement un travail mécanique[23].

3.1. L'énergie hydraulique

Les roues hydrauliques ont animé pendant longtemps les moulins à céréales, mais aussi des installations artisanales ou industrielles. L'invention de la turbine hydraulique puis de la dynamo et enfin de l'alternateur ont ouvert une voie importante vers l'hydroélectricité qui constitue la source d'énergie renouvelable la plus utilisée dans le monde. Le principe consiste à créer une retenue d'eau en barrant le cours d'une rivière, et à utiliser l'énergie potentielle de l'eau accumulée. Suivant la hauteur de chute, on distingue les usines de haute chute, de moyenne chute, et les usines au fil de l'eau. Différents types de turbines sont adaptés au fonctionnement optimal selon le type de chute. La production d'électricité d'origine hydraulique est d'une grande souplesse ; elle participe à la production de base des réseaux, mais peut venir également en complément aux heures de pointe grâce à sa rapidité de mise en œuvre. Si son prix de production est bas, il faut tenir compte du coût particulièrement élevé des investissements. Les barrages hydroélectriques participent également à l'écroulement des crues.

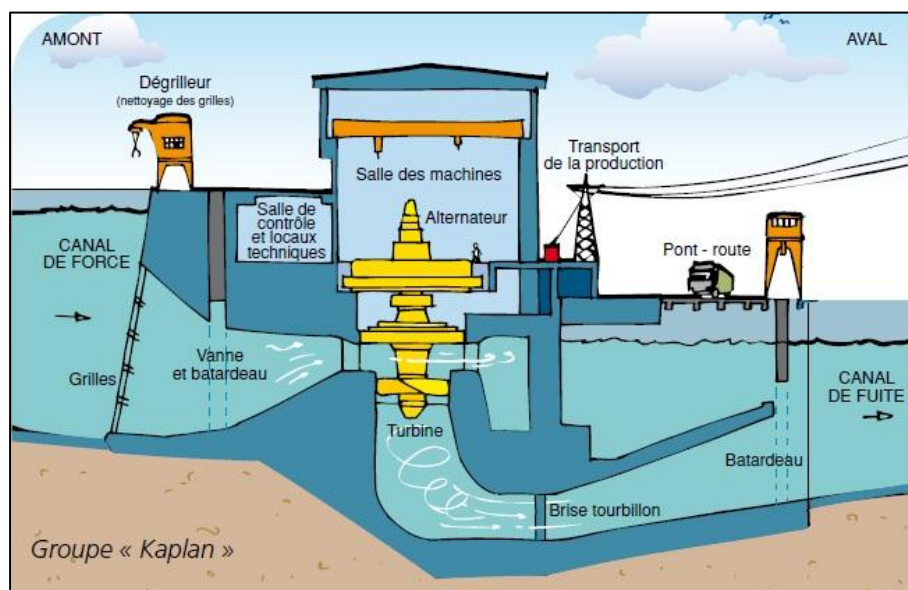


Figure (I-3): Centrale hydroélectrique.

3.2. L'énergie éolienne

L'énergie éolienne a animé les moulins depuis plus longtemps encore que l'énergie hydraulique ; c'est elle également qui gonfle les voiles des navires. Cette forme d'énergie est exploitée actuellement par des éoliennes, et est utilisée soit directement pour actionner des pompes, soit indirectement en produisant du courant électrique (aérogénérateurs). Surtout installées en milieux isolés non alimentés par un réseau de distribution, les éoliennes ont fait depuis déjà longtemps l'objet de recherches en vue de développer les aérogénérateurs. De 1947 à 1950, des études menées en liaison avec le Service des phares et balises ont permis de mieux connaître les caractéristiques du vent dans nos régions. On sait ainsi que le vent est surtout abondant près des côtes, plus fort en hiver qu'en été et le jour plus que la nuit, deux faits très intéressants pour la production électrique.



Figure (I-4): Éolienne

Une éolienne est constituée d'une sorte d'hélice à arbre horizontal, orientable par rapport à la direction du vent selon un axe vertical. De nombreuses éoliennes de construction extrêmement simple sont installées un peu partout dans le monde, et beaucoup actionnent un système de pompage de l'eau nécessaire aux usages domestiques ou agricoles ; une réserve d'eau peut d'ailleurs être facilement constituée afin d'en régulariser la disponibilité.

Les aérogénérateurs modernes à axe horizontal sont dotés d'hélices dont les pales ont un profil semblable à celui d'une voilure d'avion ; le vent naturel et celui dû à la rotation des pales donnent naissance à une force résultante dont l'une des composantes provoque la rotation de l'hélice tandis que l'autre est appliquée au pylône. Des aérogénérateurs à axe vertical ont été réalisés ; leur « voilure » tournante de forme générale ovoïde a également un

profil d'aile d'avion, et son fonctionnement est indifférent à la direction du vent ; ils ont l'inconvénient d'être coûteux, et leur rendement est assez médiocre.

4. L'énergie géothermique

Le noyau de la Terre contient des éléments radioactifs tels que l'uranium dont la désintégration produit de la chaleur (radioactivité). Mis à part les manifestations naturelles parfois violentes que constituent les volcans, cette chaleur se propage vers la surface, et chauffe des nappes aquifères situées entre 500 et 2 000 m de profondeur. Ce sont les nappes les plus profondes qui sont portées à la température la plus élevée ; le gradient géothermique, qui est de l'ordre de 3 °C par 100 m, peut atteindre 100 °C par 100 m dans les zones limites de plaques. Suivant la profondeur des nappes et la température de l'eau disponible, on distingue la géothermie de très basse, basse, moyenne, et haute énergie.

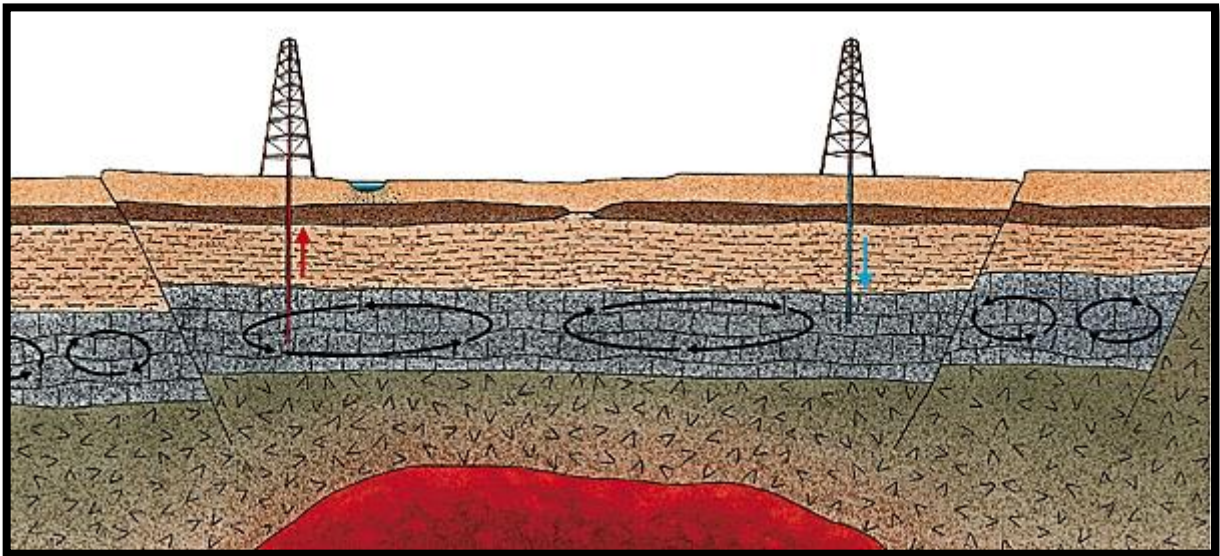


Figure (I-5): Champ géothermique

4.1 La géothermie de très basse énergie

Elle est susceptible de fournir une eau à une température comprise entre 30 et 50 °C, suffisante pour assurer le chauffage de serres, et de piscines, et même le chauffage des locaux à condition de le compléter par l'appoint d'une autre source d'énergie. Étant donné la faible profondeur des nappes, les coûts de forage sont peu élevés ; la Maison de la Radio à Paris est chauffée de cette manière.

4.2 La géothermie de basse énergie

Elle exploite des nappes plus profondes : entre 1 500 et 2 000 m, et fournit de l'eau à des températures situées entre 50 et 90 °C, directement utilisable pour le chauffage. Le plus souvent, ces eaux sont fortement minéralisées, ce qui oblige à les réinjecter dans la nappe après extraction de l'énergie, et entraîne une augmentation des coûts d'exploitation ; mais cela a l'avantage de maintenir constants la pression du réservoir ainsi que le débit. Le Bassin parisien présente 38 000 km² de nappes d'eaux salines situées entre 1 600 et 2 000 m de profondeur, représentant une puissance de 300 kW pour un débit de 100 m³/h.

4.3 La géothermie de moyenne énergie

Les nappes de moyenne énergie sont situées entre 2 000 et 2 500 m de profondeur et fournissent de l'eau entre 90 et 150 °C. En France, les principaux gisements sont en Alsace et dans les Limagnes. Mis à part le chauffage, ces nappes pourraient être utilisées pour produire de l'électricité en employant un fluide intermédiaire à bas point d'ébullition (ammoniac ou isobutane par exemple).

4.4. La géothermie de haute énergie

C'est une ressource liée au volcanisme ; elle fournit de la vapeur ou de l'eau sous pression à une température comprise entre 150 et 350 °C qui peut être directement utilisée pour actionner un turbo-alternateur. La puissance totale disponible à l'échelle mondiale est estimée à 300 000 MW, et actuellement 6 000 MW sont installés dont 45 % aux États-Unis. Les coûts d'installation et d'exploitation sont réduits et le kilowatt produit est moins cher que celui obtenu par les combustibles fossiles.

5. Les énergies de récupération

Une partie des déchets provenant des activités humaines peut être transformée de façon à utiliser l'énergie qu'ils contiennent. Les déchets combustibles (papier et cartons, bois, certaines matières plastiques) sont incinérés ; la chaleur produite permet de chauffer des locaux : la moitié des villes françaises de plus de 100 000 habitants sont chauffées ainsi.

La récupération de certains objets ou matériaux, à défaut de produire directement de l'énergie, permet d'en économiser : par exemple, les bouteilles de verre récoltées grâce au tri sélectif mis en place dans la plupart des localités permettent d'économiser de la matière première (sable et calcaire principalement), et aussi l'énergie nécessaire pour élaborer le verre car le calcin résultant du recyclage du verre fond à 1000 °C au lieu de 1500 °C pour le mélange des matières premières. De plus, l'environnement y trouve son compte.

Les activités industrielles consomment de grandes quantités d'énergie et en rejettent dans l'environnement. Ces rejets se font essentiellement à basse température, par exemple dans le cas des centrales électriques thermiques classiques ou nucléaires. Leur fonctionnement nécessite une source froide qui est soit l'eau d'un cours d'eau ou de la mer, soit l'atmosphère ; dans le premier cas, la température des eaux de rejet n'excède pas 20 °C ce qui présente peu d'intérêt, mais dans le second, elle est d'au moins 24 °C, même en saison froide ; on peut alors l'utiliser pour le chauffage de serres et même des sols[23].

6. Les autres sources d'énergies nouvelles

6.1 La pompe à chaleur

C'est une machine thermodynamique qui a pour fonction de transférer de l'énergie, sous forme de chaleur, d'un milieu extérieur à basse température et contenant de l'énergie bon marché vers un milieu intérieur à température plus élevée pour en accroître la température. Ce principe de fonctionnement est exactement semblable à celui d'un réfrigérateur ou d'un congélateur, les milieux (ou sources) froid et chaud étant permutés.

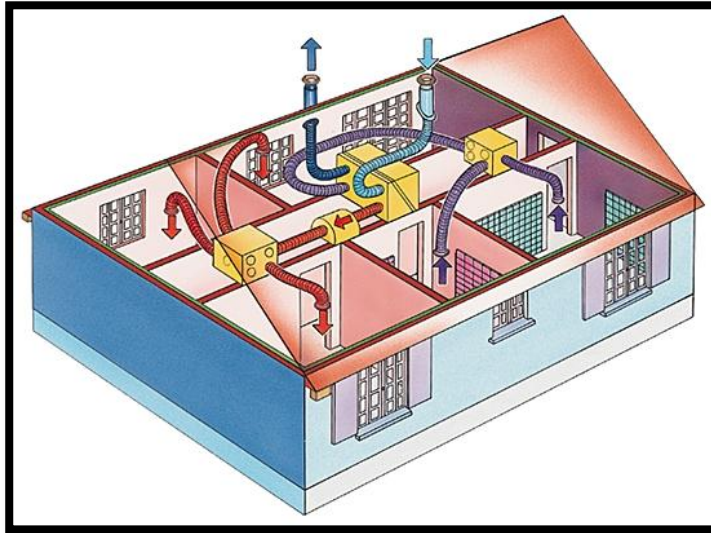


Figure (I-6): Chauffage domestique

Une pompe à chaleur est constituée d'un circuit fermé parcouru par un fluide caloporteur qui subit des alternances de vaporisation et de condensation grâce au fonctionnement d'un compresseur. Dans l'évaporateur, ce fluide passe de l'état liquide à l'état gazeux en prélevant de l'énergie au milieu (source froide), sous forme de chaleur ; dans le condenseur, il passe de l'état gazeux à l'état liquide en cédant de l'énergie au milieu à chauffer (source chaude). La source froide peut être l'air extérieur, de l'air intérieur extrait, l'eau d'un cours d'eau ou d'un lac, ou encore le sol ; le milieu intérieur peut être l'eau d'une installation de chauffage central, ou l'air d'une installation à air pulsé. On parle de pompe à chaleur de type air-eau, ou eau-eau, etc.

Le compresseur consomme une certaine quantité d'énergie, le plus souvent sous forme d'électricité fournie par le réseau de distribution, et qui est transmise à la source chaude ; mais au résultat cette source chaude reçoit plus d'énergie que ce que le compresseur a consommé ; la différence provient de la source froide, dont l'application est généralement gratuite. L'efficacité d'une pompe à chaleur s'exprime par le coefficient de performance (COP) ; c'est le rapport entre l'énergie totale fournie à la source chaude et la quantité d'énergie fournie au compresseur ; une pompe à chaleur de type air-eau a un COP voisin de 2 ; il atteint 3,5 pour le type eau-eau, la difficulté étant de trouver une source d'eau à proximité des locaux à chauffer [25].

6.2 L'énergie de la mer.

Elle peut prendre diverses formes ; celle des marées est à la fois d'origine solaire et lunaire ; celle des vagues résulte de l'action du vent ; et enfin le gradient de température entre les eaux de surface et celles des fonds est source d'énergie thermique [24].

6.2.1 L'énergie marémotrice

Elle ne pourrait utilement être exploitée que dans une vingtaine de sites répartis dans le monde ; il faut en effet que la différence de niveau entre basse mer et haute mer soit suffisante. En France, l'usine marémotrice de la Rance mise en service en 1966 est constituée d'un long barrage de 750 m, et haut de 27 m fermant l'estuaire de la Rance ; l'usine, interne au barrage, renferme 24 groupes bulbes réversibles de 10 MW chacun. À marée montante

comme à marée descendante, l'eau traverse chaque groupe et produit de l'électricité ; pour une année, la production moyenne est de l'ordre de 550 GWh.

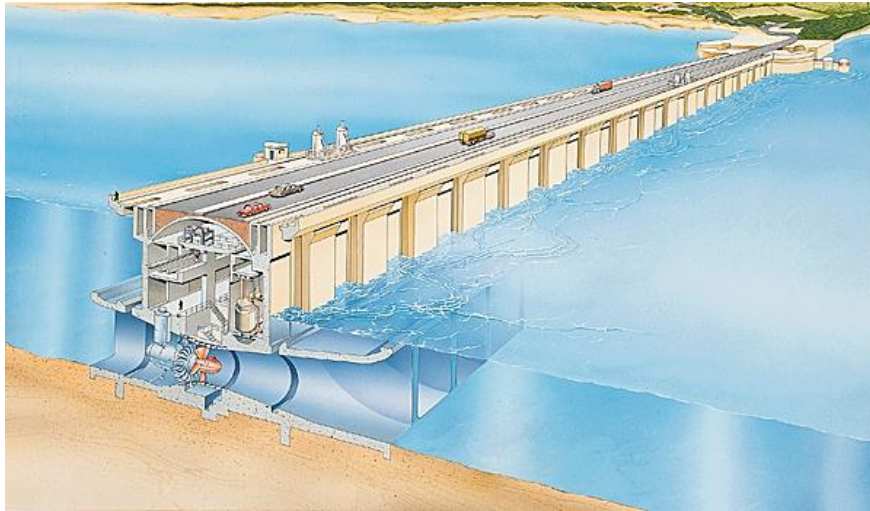


Figure (I-7): Centrale électrique marémotrice

6.2.2. L'énergie des vagues

Différents procédés ont été expérimentés pour récupérer l'énergie des vagues : caissons flottants, radeaux articulés, colonnes oscillantes ; les difficultés sont nombreuses mais les résultats sont prometteurs. À Monaco, la houle actionne une pompe alimentant l'aquarium du Musée océanographique.

6.2.3. L'énergie thermique des mers

L'idée d'exploiter l'énergie thermique des mers revient au professeur Jacques Arsène d'Arsonval et a été expérimentée dans les années 1930 par le physicien français Georges Claude sur un cargo afin de fabriquer de la glace. Les projets, nombreux, font appel à des technologies diverses, mais la différence de température entre source froide (le fond) et source chaude (la surface) n'est que de 24 °C au mieux, et dans les mers tropicales seulement.

6.3. La fusion thermonucléaire

Des recherches sont menées dans quelques pays (États-Unis, Union européenne, Russie) sur la fusion thermonucléaire ; des noyaux légers de deutérium et tritium (isotopes de l'hydrogène) en fusionnant les uns avec les autres donnent des noyaux plus lourds d'hélium ainsi que des neutrons, la réaction s'accompagnant d'une libération d'énergie colossale (17,6 MeV). Les réactions de fusion thermonucléaire sont nombreuses dans l'Univers : elles se produisent dans les étoiles et sont à l'origine du formidable rayonnement qu'émet notre Soleil par exemple. Mais elles nécessitent des températures très élevées, de l'ordre de 100 000 000 °C, et un gaz à l'état de plasma contenu par un procédé de confinement magnétique ou inertiel. Malgré d'énormes difficultés, la communauté scientifique espère disposer, d'ici la fin du XXI^e siècle, d'une source d'énergie quasiment inépuisable (l'hydrogène étant très abondant) et parfaitement propre. Les espoirs de réaliser la fusion thermonucléaire reposent sur le réacteur expérimental ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) – projet international réunissant l'Union européenne, la Russie, le Japon, la Chine, la

Corée du Sud et les États-Unis, en construction depuis 2007 à Cadarache, en France, et dont la phase d'exploitation devrait commencer en 2018[23].

6.4. Les piles à combustible

Ce sont des générateurs électriques qui convertissent directement l'énergie chimique contenue dans un combustible (l'hydrogène par exemple) en électricité ; le rendement est voisin de 60 %. Le prix de revient très élevé réserve, pour l'instant, ce procédé aux missions spatiales de longue durée. Toutefois, avec l'attention portée à la protection de l'environnement et les craintes suscitées par l'appauvrissement progressif des ressources énergétiques fossiles, la pile à combustible fait l'objet d'intenses recherches. Non polluante (pas de rejets de gaz à effet de serre), silencieuse et d'un excellent rendement énergétique, elle présente d'importants atouts pour contribuer, dans le futur, à la production d'énergie (électricité et chaleur) et à la propulsion des véhicules automobiles [18].

CHAPITRE 2 :

LA CHEMINEE SOLAIRE

1. Introduction:

Dans beaucoup de régions à travers le monde on voit naître une conscience du fait que des ressources énergétiques alternatives pourraient avoir un rôle important à jouer dans la production de l'électricité.

Cependant, il n'y a que l'énergie solaire qui soit une ressource inépuisable, totalement non polluante et qui puisse être économiquement rentable pour assurer les besoins énergétiques actuels et futurs de l'homme.

Il y a beaucoup de méthodes pour exploiter l'énergie solaire : la Tour Solaire exploite l'une de ces méthodes (figure II-1).



Figure (II-1): Cheminée solaire

2. La tour solaire:

2.1. Historique:

Cela fait plus d'un siècle que des scientifiques et chercheurs comme le Colonel espagnol Isidoro Cabanyes, l'allemand Hanns Günther ou encore le français Edgard Nazare se penchent sur le sujet des tours solaires [3]

Mais ce n'est qu'en 1981 qu'un premier prototype de cheminée solaire fut construit à Manzanares (ville espagnole à 150 kilomètres de Madrid) sous la direction de l'ingénieur allemand Jörg Schlaich. Cette cheminée mesurait 194 mètres de haut et possédait une serre de 15 hectares à ses pieds. De plus le diamètre de la cheminée était de 5 mètres. Elle fonctionnait à une puissance de 50kW pour un fonctionnement d'environ 9 heures par jour et a fonctionné jusqu'en 1989. Elle fut arrêtée en raison d'un coût du kilowattheure, cinq fois plus élevé qu'une centrale thermique classique.

2.2. Différentes parties d'une tour solaire:

Les différentes parties d'une tour solaire sont : le collecteur, la turbine et la cheminée [2]:

2.2.1. Le Collecteur:

Le collecteur est la partie qui est employée pour produire l'air chaud par effet de serre. Sa hauteur va de 2 à 6 mètres et recouvre une vaste surface de plusieurs milliers de m² comme on le voit sur la *Figure (II-2)*.



Figure (II-2): Collecteur de cheminée solaire

Comme le poids du verre augmente la masse du toit, les collecteurs doivent avoir une structure avec des tiges assez résistantes et attachées comme sur la *Figure (II-3)*.



Figure (II-3): Verrière du collecteur d'une cheminée solaire

Par ailleurs, Il n'y a aucune limitation pour la superficie du collecteur : plus grande est la surface, plus grande est la quantité d'énergie produite par la tour solaire. La hauteur sous la serre doit progressivement augmenter de l'extérieur vers le centre afin de diminuer les pertes par frottement et divers matériaux peuvent constituer le dessus de la serre comme du verre ou des films plastiques.

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

2.2.2. La Turbines:

Des turbines, comme sur la *Figure (II-4)*, servent à convertir le courant d'air ascendant en énergie mécanique, puis électrique

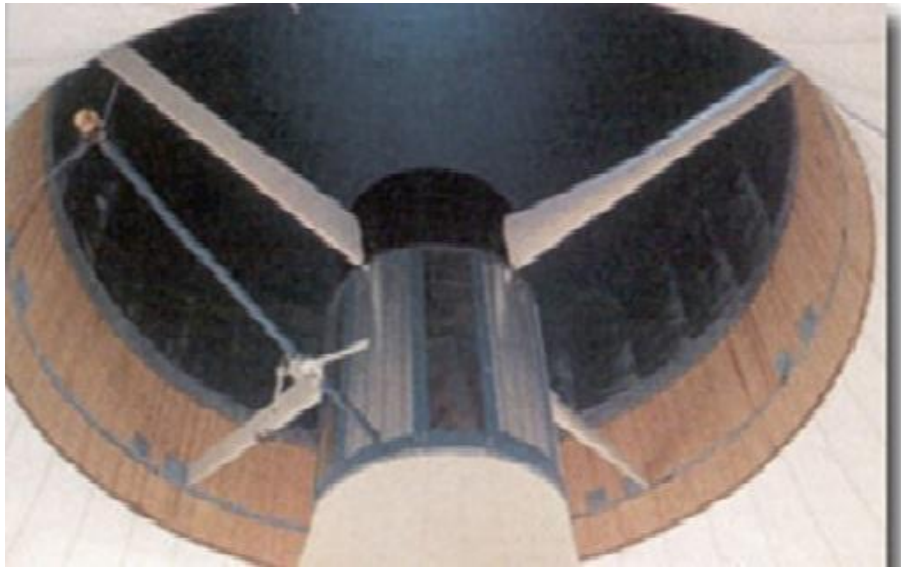


Figure (II-4): Turbine pour Cheminée Solaire de large diamètre

Les turbines sont placées soit verticalement dans le collecteur *Figure (II-4)*, soit horizontalement dans la cheminée *Figure (II-6)*. Afin d'obtenir le maximum d'énergie à partir de l'air chauffé, les lames des turbines doivent couvrir toute la section de la cheminée. Pour cela, une grande turbine ou plusieurs petites turbines devraient être utilisées au pied de la cheminée, comme montré sur les *Figures [(II-5)-(II-6)]*

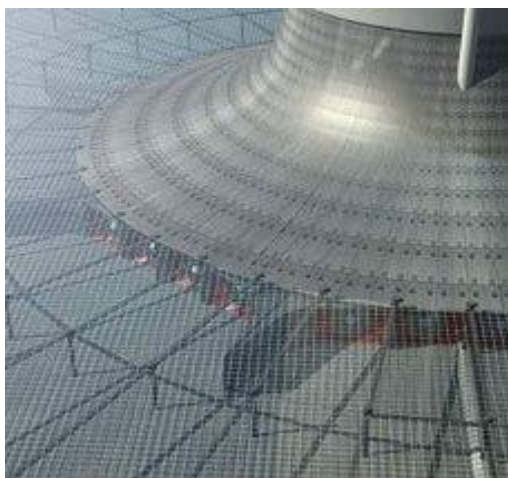


Figure (II-5): Turbines verticales



Figure (II-6): Petites turbines horizontales

2.2.3. La cheminée

La partie la plus importante de la tour solaire c'est la cheminée, qu'on voit sur la *Figure (II-7)*, elle agit comme une machine thermique. Les pertes par friction étant minimales dans la cheminée, celle-ci agit comme un tube de pression.

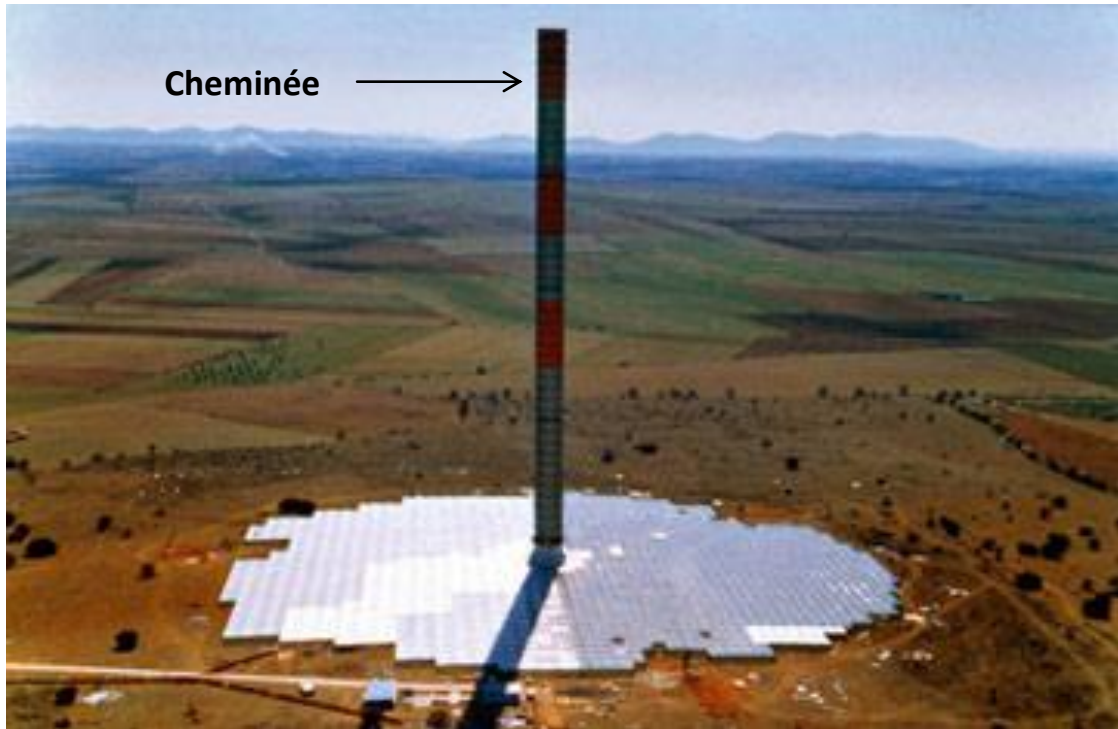


Figure (II-7): La cheminée

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

Deux principaux types de cheminées sont possibles :

- autoportées: construites en dur "béton ou acier" *Figure (II-8)*
- les cheminées haubanées: structures plus légères faites de tubes "habillés" *Figure (II-9)*



Figure (II-8): Autoportantes



Figure (II-9): Haubanées

La durée de vie des cheminées en béton est bien supérieure à celle des cheminées en membranes plastiques (une centaine d'années contre quelques années à peine)[7].

2.3. Principe de fonctionnement d'une tour solaire

Le toit transparent de la serre, qu'on voit sur la *Figure (II-10)*, laisse passer les faibles longueurs d'onde de la radiation solaire et retient le rayonnement de grandes longueurs d'onde. [2] Donc une partie du rayonnement solaire chauffe directement l'air sous la serre et l'autre partie est absorbée par le sol qui la restitue ensuite sous forme de chaleur.



Figure (II-10): Toit transparent de la serre

Comme l'air est "chauffé" il se dilate et commence à monter et à se déplacer sous la serre vers la cheminée comme illustré sur la *Figure (II-11)*. Il acquiert aussi progressivement de la vitesse.

L'air chauffé sous la serre pénètre dans la cheminée placée en son centre et crée un courant d'air ascendant. Au pied de la cheminée des turbines équipées de générateurs produisent de l'électricité

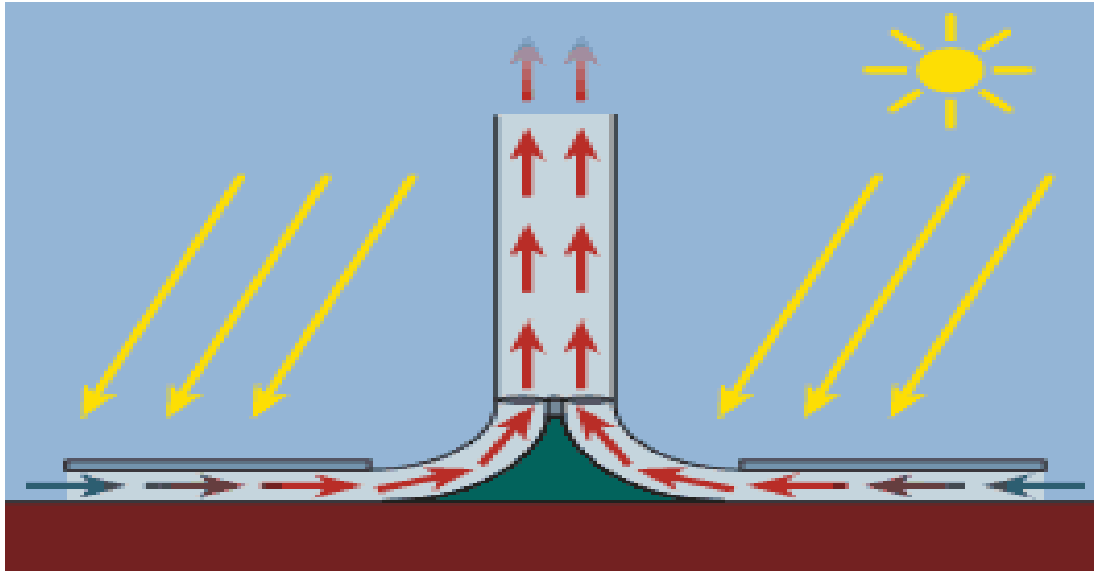


Figure (II-11): Schéma illustrant le fonctionnement de la cheminée solaire

2.4. Phénomène majeur : Le thermosiphon.

Le phénomène de thermosiphon, présent dans une cheminée tour solaire, est primordial à son fonctionnement. Ce système repose sur le principe de la poussée d'Archimède qui est caractéristique d'une variation de masse volumique [9].

En effet, l'air chaud et froid ont des masses volumiques différentes et l'air chaud est plus léger que l'air froid : l'air chaud est donc poussé dans la cheminée par l'air de température strictement inférieure, et s'élève ainsi

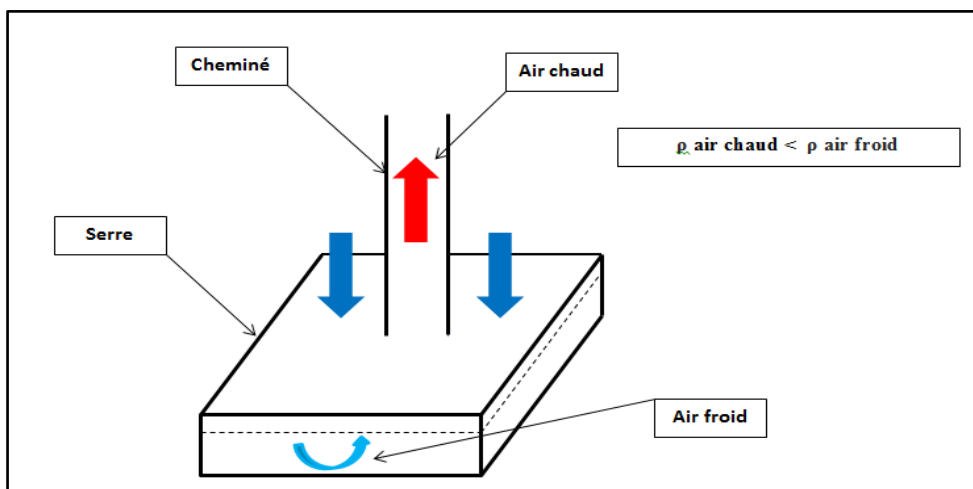


Figure (II-12): Schéma illustrant la circulation de l'air

Par définition, le thermosiphon est un système de pompage des fluides (gaz ou liquide) basé sur la dilatation et la poussée d'Archimède.

Un thermosiphon se compose d'une chambre de chauffage du fluide, d'une entrée basse et d'un conduit vertical (cheminée) positionné en haut de cette chambre. Le fluide chauffé s'élève et sort de la chambre par la cheminée et aspire alors le fluide froid sortant du conduit bas.

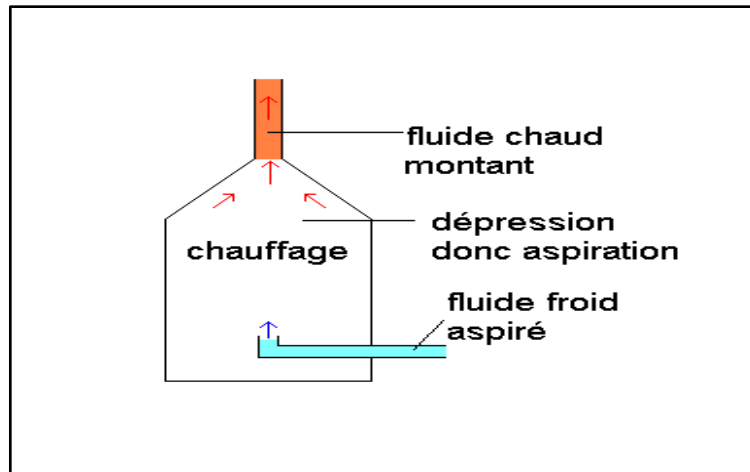


Figure (II-13): Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'un Thermosiphon

Dans notre étude, la chambre de chauffage du fluide est la serre qui permet de chauffer l'air froid entrant. L'entrée basse est donc représentée par les ouvertures d'air situées entre le socle et la serre et le conduit vertical est donc la cheminée.

Le principe du thermosiphon est utilisé dans les installations de chauffage et de production solaire. Le déplacement du fluide caloporteur s'effectue uniquement grâce à la convection. Un fluide caloporteur est un fluide chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de températures. De plus, la convection naturelle est un phénomène de la mécanique des fluides qui se produit lorsqu'une zone change de température et qu'elle se déplace alors verticalement sous l'effet de la poussée d'Archimède. Le changement de température d'un fluide influe en effet sur sa masse volumique, qui se trouve modifiée par rapport à la masse volumique du fluide environnant. De tels déplacements s'appellent des mouvements de convection. Nous remarquons que toutes ces explications théoriques sont spécifiques à notre fonctionnement de cheminée tour solaire. Ainsi, le phénomène de thermosiphon est donc indispensable à tout bon fonctionnement de cheminées solaire.

3. Cycle thermodynamique de la cheminée solaire:

Le fonctionnement de la cheminée solaire exige la présence de l'air, qui transporte la chaleur obtenue dans le collecteur à partir des rayons solaires vers l'ensemble des dispositifs qui sont capables d'exploiter cette énergie thermique, en la transformant en énergie cinétique. L'air sort de la cheminée, ce qui permet d'introduire l'air frais au collecteur pour subir le cycle suivant. Donc l'air peut être considéré comme un fluide de fonctionnement d'un cycle d'une

machine thermodynamique. L'analyse du cycle du fluide de fonctionnement de la cheminée solaire se fait sous les hypothèses suivantes: [4]

- Le fluide de fonctionnement est l'air sec et il est considéré comme un gaz parfait.
- Le flux de chaleur dans le système est le gain net par l'air.
- Le débit massique de l'air est constant.
- Les conditions atmosphériques à l'entrée et à la sortie sont constantes.
- La différence de pression ΔP_{23} dans le collecteur est nulle (elle est négligeable devant celle entre l'entrée et la sortie de cheminée).

Les différentes transformations du cycle théorique de la cheminée solaire sont(*Figure II-14*):

- 1-2: Compression isentropique dans l'atmosphère (Augmentation de la pression et de la température dans l'atmosphère vers le bas).
- 2-3: Echauffement isobare dans le collecteur par les rayons solaires.
- 3-3_{st}: Détente isentropique dans la turbine.
- 3_{st}-4: Détente isentropique dans la cheminée.

Le Cycle réel montre les pertes engendrées dans les différents organes de la cheminée solaire. On utilise ce cycle pour déterminer les efficacités de ces organes et par la suite déterminer la puissance électrique que la cheminée solaire peut produire. illustre les différents processus du cycle réel de la cheminée solaire.

3.1. Cheminée

La cheminée convertit l'énergie thermique rapportée au collecteur en énergie cinétique et en énergie potentielle. La différence de la densité de l'air causée par l'augmentation de température entraîne un mouvement d'air. L'efficacité de la cheminée est définie par:

$$\eta_c = \frac{\text{la puissance utile}}{\text{la puissance solaire rapportée au collecteur}}$$

$$\eta_c = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{solaire}}}$$

$$Q = P_{\text{solaire}} = m \cdot C_p \cdot (T_3 - T_2) = m \cdot C_p \cdot \Delta T_{23} \text{ (II-1)}$$

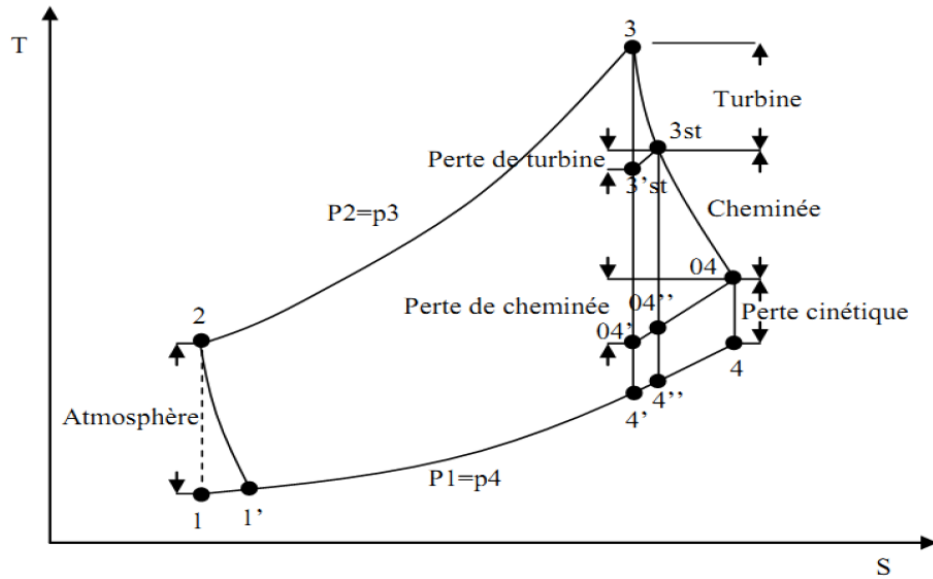


Figure (II-14): Cycle réel de la cheminée solaire [5]

La puissance (3-4) n'est pas exploitée en toute sa totalité, il y a une quantité P_{3st-4} exigée pour élever l'air vers le haut de la cheminée.

$$P_{3-4} = m \cdot C_p \cdot (T_3 - T_4)$$

$$P_{3st-4} = m \cdot C_p \cdot (T_{3st} - T_4) = m \cdot \Delta h_L \text{ l'équation de conservation d'énergie est :}$$

$$dh = \partial w + \partial q - g dz \text{ (II-2)}$$

Pour la transformation (3st-4) on a $\partial w = 0$ et $\partial Q = 0$ alors la relation (I-2) devient :

$$dh = -g dz \Leftrightarrow C_p \cdot dT = -g dz \text{ (II-3)}$$

La chute de l'enthalpie de 3st-4 est la même que celle de 1-2. Donc d'après la relation (II-3):

$$\Delta h = g \cdot \Delta z = C_p \cdot (T_2 - T_1)$$

$$P = m \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) = m \cdot C_p \cdot (T_{3st} - T_4) = m \cdot \Delta h$$

$$\begin{aligned} P_{utile} &= m \cdot C_p \cdot (T_3 - T_4) - m \cdot C_p \cdot (T_{3st} - T_4) \\ &= m \cdot C_p \cdot (T_3 - T_4) - m \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) \end{aligned}$$

En remplaçant dans les équations (I-1) et (I-4) la proportion $c = T_2 / T_1 = T_3 / T_4$, donc l'efficacité de la cheminée sera :

$$\eta_c = \frac{P_{utile}}{Q} = 1 - \frac{1}{c} \text{ (II-4)}$$

Et de même pour la relation de l'équation (I-3).

$$\Delta h = g \cdot \Delta z = C_p \cdot (T_2 - T_1) = C_p \cdot T_2 \left(1 - \frac{1}{c}\right) \Rightarrow 1 - \frac{1}{c} = \frac{g \cdot \Delta z}{C_p \cdot T_2}$$

$$\text{Alors : } \eta_c = 1 - \frac{1}{c} = \frac{g \cdot \Delta z}{C_p \cdot T_2}$$

$$\text{On a aussi : } P_{\text{utile}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_c^2$$

$$\text{Alors : } \eta_c = \frac{P_{\text{utile}}}{Q} \Leftrightarrow \frac{g \cdot \Delta z}{C_p \cdot T_2} = \frac{\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_c^2}{m \cdot C_p \cdot \Delta T_{23}} \text{ avec } \Delta T = H_c$$

$$v_c = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_c \cdot \frac{\Delta T_{23}}{T_2}}$$

La puissance utile peut être écrite aussi comme suit:

$$P_{\text{utile}} = \eta_c \cdot Q = \frac{g \cdot H_c}{C_p \cdot T_2} \cdot \rho_{\text{coll}} \cdot A_c \cdot V_c \cdot \Delta T_{23}$$

$$P_{\text{utile}} = \Delta P_{\text{tot}} \cdot V_c \cdot A_c \Rightarrow \Delta P_{\text{tot}} = \frac{P_{\text{utile}}}{V_c \cdot A_c}$$

Alors, la différence de pression totale qui est produite entre l'entrée et la sortie de la cheminée est :

$$\Delta P_{\text{tot}} = \rho_{\text{coll}} \cdot g \cdot H_c \cdot \frac{\Delta T_{23}}{T_2} \text{ (II-5)}$$

3.2. Collecteur

Le collecteur convertit les rayons solaires incidents sur sa surface en chaleur rapportée à l'air. On peut exprimer l'efficacité du collecteur par le rapport suivant:

$$\eta_{\text{coll}} = \frac{Q}{(A_{\text{coll}} \cdot E)}$$

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T_{23}$$

$$m = \rho_{\text{coll}} \cdot V_c \cdot A_c$$

Donc l'efficacité du collecteur devient:

$$\eta_{\text{coll}} = \frac{\rho_{\text{coll}} \cdot V_c \cdot A_c \cdot C_p \cdot \Delta T_{23}}{A_{\text{coll}} \cdot E}$$

On a aussi :

$$Q = \alpha^* \cdot A_{\text{coll}} \cdot E - K \cdot \Delta T_a \cdot A_{\text{coll}}$$

$$\Delta T_a = \frac{1}{2} \cdot \Delta T_{23}$$

$$\eta_{coll} = \alpha^* - k \cdot \frac{\Delta T_a}{E}$$

3.3. Turbine

La turbine convertit l'énergie cinétique d'écoulement d'air en énergie mécanique, et le générateur entraîné par la turbine convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. La chute de pression dans la turbine est deux tiers la différence de pression totale[8].

$$\Delta p_{Turb} = \frac{2}{3} \cdot \Delta p_{tot}$$

$$\Delta p_{Turb,max} = \frac{2}{3} \cdot \Delta p_{tot} \cdot V_c \cdot A_c$$

En remplaçant la relation (1-5) de Δp_{tot} , on trouve :

$$\Delta p_{Turb,max} = \frac{2}{3} \cdot \rho_{coll} \cdot g \cdot H_c \cdot \left(\frac{\Delta T_{23}}{T_2} \right) \cdot V_c \cdot A_c$$

$$\Delta p_{Turb,max} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\eta_{coll} \cdot A_{coll} \cdot E \cdot H_c}{C_p \cdot T_2}$$

Donc la puissance transformée au générateur est :

$$p_e = \frac{2}{3} \cdot \frac{\eta_{coll} \cdot A_{coll} \cdot \eta_{Turb} \cdot G \cdot E \cdot H_c}{C_p \cdot T_2}$$

4. Le stockage d'énergie

La cheminée solaire fonctionne en présence du rayonnement solaire c'est à dire qu'elle fonctionne pendant le jour. L'absence du rayonnement (la nuit), va créer un arrêt de la cheminée c'est pour cela qu'on utilise le rayonnement du jour pour faire fonctionner la cheminée pendant la nuit par la méthode du stockage d'énergie.[2]

4.1. Les différentes méthodes de stockage

On a plusieurs méthodes de stockage d'énergie pendant la nuit et actuellement on utilise les méthodes suivantes:

4.1.1. Par chauffage du sable

Le sable chauffe et absorbe la chaleur du soleil, le flux d'air chaud transmis à la cheminée assure la production d'électricité en faisant tourner la turbine à l'intérieur de la tour [6].

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

Le tour de force de cette installation est qu'une porte à air a été ajoutée afin d'intégrer l'énergie éolienne dans le réseau électrique, ce qui permet au système de fonctionner en hiver

même quand il y a un minimum de soleil. De cette façon, le système peut fonctionner 24h autour de l'horloge, 365 jours d'une année.

4.1.2. Par chauffage de Galets :

Afin d'optimiser cette production nocturne, nous pouvons placer sous la serre des galets qui ont un pouvoir de stockage de chaleur très important. *Figure (II-15)*:

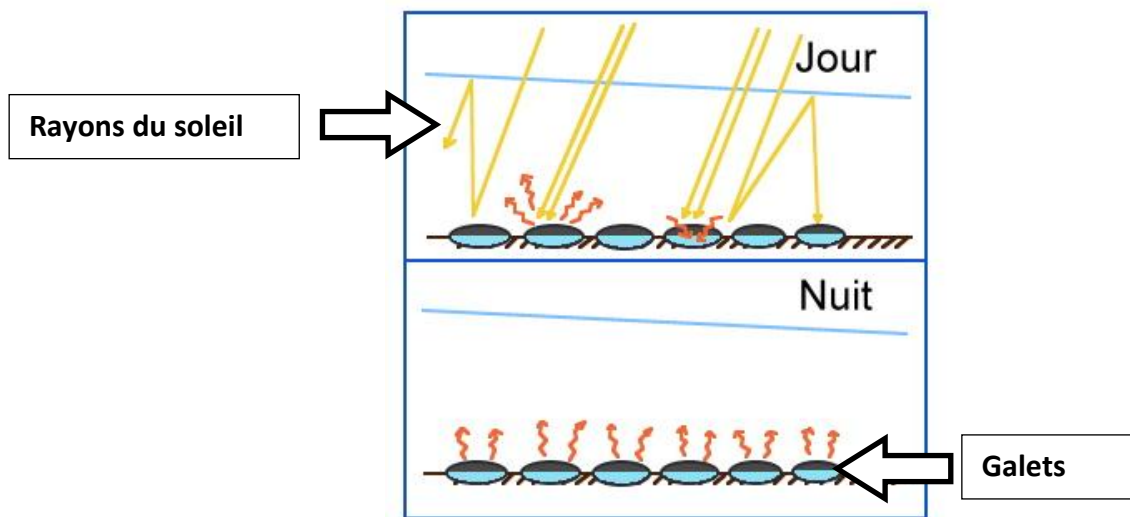


Figure (II-15): Principe du stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des galets

En effet, durant la journée, ces galets sont exposés constamment aux rayons du soleil et donc emmagasinent cette chaleur afin de la restituer durant la nuit.

4.1.3. Par chauffage d'eau:

Comme les collecteurs produisent de l'air chaud par effet de serre, pour produire de l'électricité durant la nuit, des réservoirs noirs tubulaires remplis d'eau sont placés sous la serre comme montré dans la *Figure (II-16)*.

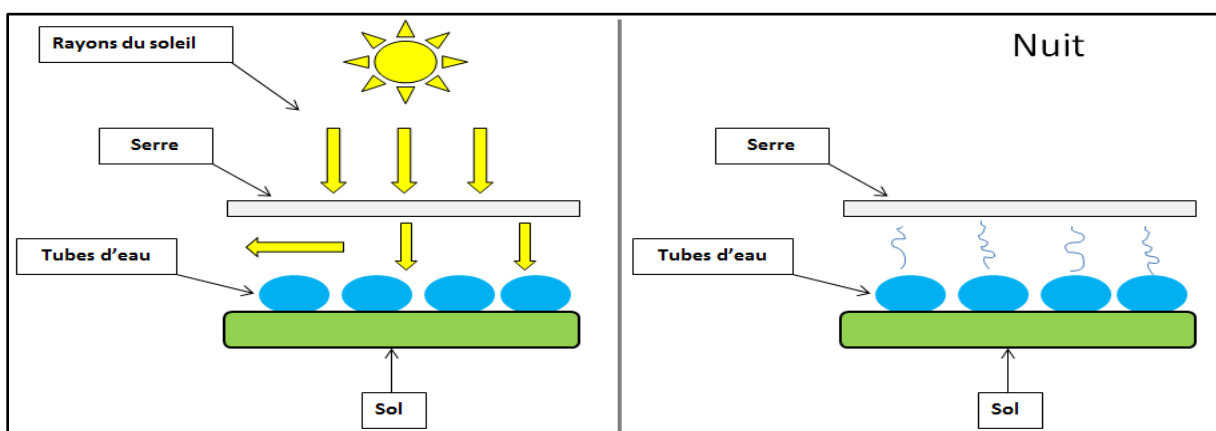


Figure (II-16): Principe du stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des tubes noirs remplis d'eau

Les poches à eau accumulent de la chaleur le jour et la restituent à l'air la nuit.

Ces tubes sont remplis une seule fois pour toutes, il ne faut plus d'eau ensuite puisque les tubes sont hermétiquement clos après le remplissage. Le volume d'eau dans les tubes est calculé pour correspondre à une hauteur d'eau de 5 à 20 cm en fonction de la puissance désirée de production nocturne, l'énergie stockée pour la nuit diminuant la production de la journée. Un ajustement de la production peut être effectué aux heures de pointe où l'électricité se vend 3 à 10 fois plus cher qu'aux heures creuses, améliorant ainsi la rentabilité[9].

5. Avantages et Inconvénients d'une tour solaire:

Nous représentons les avantages et les inconvénients comme suit [2] [12]:

5.1. Avantages:

- Les Cheminées Solaires sont particulièrement adaptées à la production d'électricité dans les déserts et les terres arides sans valeur, mais riches en soleil.
- Elles produisent de l'électricité 24 heures par jour à partir d'énergie solaire uniquement.
- Aucun carburant n'est nécessaire.
- Elles ne nécessitent pas d'eau de refroidissement et sont adaptées à des régions où règne une sécheresse extrême (pour mémoire, même les centrales solaires à concentration CSP ont besoin d'eau comme source froide !).
- La Tour Solaire est particulièrement fiable et nécessite peu de maintenances comparativement aux autres usines de production d'électricité.
- Les matériaux nécessaires à la construction d'une Cheminée Solaire: béton, verre et acier, sont disponibles en quantités suffisantes partout dans le monde.
- Leur construction ne provoque pas de dommages écologiques et peut employer la main d'œuvre locale.
- Leur fonctionnement ne consomme pas de ressources.
- Exploitation pour l'agriculture

5.2. Inconvénients:

- Quelques estimations disent que les coûts d'investissement pour la production d'électricité à partir de Cheminées Solaires est 5 fois plus important que celui à partir d'une turbine à Gaz.
- Bien qu'aucun carburant fossile ne soit nécessaire les investissements nécessaires pour une Tour Solaire sont importants.
- La structure elle-même est massive et requiert beaucoup d'expertise en ingénierie et de matériaux pour sa construction.
- Impact visuel négatif (certains y voient une dégradation du paysage).

6. Comparaisons avec d'autres types de centrales:

6.1. Comparaison avec Puissance:

C'est une comparaison avec le photovoltaïque et le nucléaire qui, indique un avantage au profit du nucléaire (*Tableau I-1*)

Tableau (I-1): Comparaison avec Puissance [3]

<i>Tour solaire</i>	<i>Photovoltaïque</i>	<i>Nucléaire</i>
<i>Manzanares : 50 kW</i>	<i>Ordinaire : 5 MW Les plus grandes : 60 MW Andasol 1, 2, 3 : 3*50 MW</i>	<i>Ordinaire : 1000 MW par réacteur</i>
<i>Ciudad Real : 40 MW</i>		<i>Civaux : 2*1450 MW</i>
<i>Australie : 200 MW</i>		
<i>Namibie : 400 MW</i>		<i>EPR :(European Pressurised Reactor) 1600 MW</i>

6.2. Comparaison avec Prix du kWh:

Cet autre niveau de comparaison avec le photovoltaïque et le nucléaire sur le plan prix du kWh produit indique un avantage au profit des Tours solaire *Tableau (I-2)*:

Tableau (I-2): Comparaison avec Prix du kWh [3]

<i>Tour solaire</i>	<i>Photovoltaïque</i>	<i>Nucléaire</i>
<i>Estimations : 7 € cents pour une centrale de 200 MW 20 € cents pour une centrale de 5 MW Greentower : 2 € cents</i>	<i>Amareleja (Portugal) : 28 € cents (46 MW) Andasol (Espagne) : 27 € cents (50 MW) Mildura (Australie) : 9 € cents (154 MW)</i>	<i>Plus vague : 11 € cents, sans compter le prix de l'élimination des déchets, des assurances accidents, et du démentiellement des centrales.</i>

7. Le prototype de Manzanares :

Une tour expérimentale a été construite en 1982 par le bureau d'étude allemand Schlaich Bergermann & Partners. Elle était composée d'une cheminée cylindrique de 195 m de haut, de 10 m de diamètre, au centre d'un collecteur solaire circulaire de 250 m de diamètre (6000 m² de vitrages à 2 m au-dessus du sol) et permettant de chauffer l'air. Sa puissance était de 50 KW (*Figures II-17 et II-18*)



Figure (II-17): La Cheminée solaire Manzanares



Figure (II-18): Structure de La Cheminée solaire Manzanares

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

8. Les trois projets actuels de Tours Solaires:

8.1. Le projet australien

Un projet de tour solaire, appelé Projet de Buronga, est actuellement développé en Australie par la société « Enviromission ». La cheminée aurait 990 mètres de hauteur, 70 mètres de diamètre (*Figure II-19*).

La centrale fournirait 200 MW de puissance électrique, de quoi approvisionner en électricité environ 200 000 logements. Il s'agit d'un des projets les plus ambitieux de la planète pour la production d'énergie renouvelable sûre et propre, les centrales solaires existantes ou en projet sont plutôt de l'ordre de 10 MW, soit 20 fois moins. L'énergie produite

reste largement inférieure à celle d'un réacteur nucléaire moderne (soit encore 7 fois plus), mais soutient la comparaison

Le coût d'investissement serait d'environ 400 millions d'euros, ce qui implique un coût d'investissement de 2 €/W. Par comparaison, un système photovoltaïque de 2008 coûte environ le triple, tandis que la récente centrale solaire thermodynamique (11 MW) a coûté 3,2 €/W, soit 1,6 fois plus. Le kWh fourni resterait néanmoins toujours cinq fois, plus cher que l'électricité de charbon, qui représente 95% de la production en Australie[10].

8.1.1 Spécifications du projet :

- Une cheminée de 990 m de haut.
- Un collecteur de 7 km de diamètre, soit 38,5 km² de verre et de plastique.
- Température de l'air chauffé dans la cheminée : 70 °C.
- Vitesse de l'air dans la cheminée : 15 m/s (54 km/h).
- 32 turbines.
- Puissance produite : 200 MW.

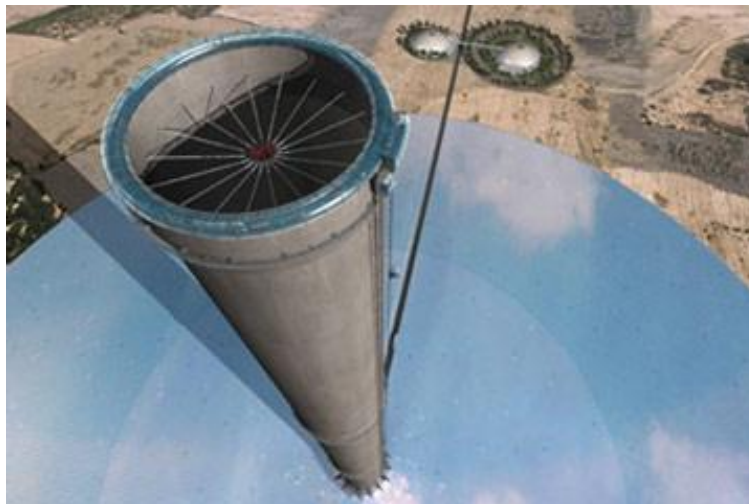


Figure (II-19): La Cheminée Solaire Australienne

Le coût de construction de la Tour Solaire est estimé à \$395 millions de dollars. (Approximativement 14% de plus que pour une usine équivalente au charbon, et environ 70% plus par mégawatt installé qu'une ferme éolienne comparable).

Le gouvernement Australien avait pour objectif de produire en 2010, 2% de son énergie à partir de sources renouvelables (9500GWh): but aisément atteignable.

8.2. La Cheminée Solaire Espagnole:

Un projet ambitieux en Espagne prévoit l'installation d'une tour solaire de 750 mètres, dans la localité de Fuente el Fresno, un village de la Province de Ciudad Real et les travaux devraient être menés en collaboration avec des entreprises espagnoles. Cette tour de 750 mètres de hauteur serait dès lors la plus haute de ce genre et aurait un diamètre de 3km de serre couvrant 350 hectares dont 250 hectares pourraient être utilisés pour la culture de légumes sous serre. La vitesse de l'air à l'intérieur de la cheminée serait de 12m/s (*Figure II-20*)[10].

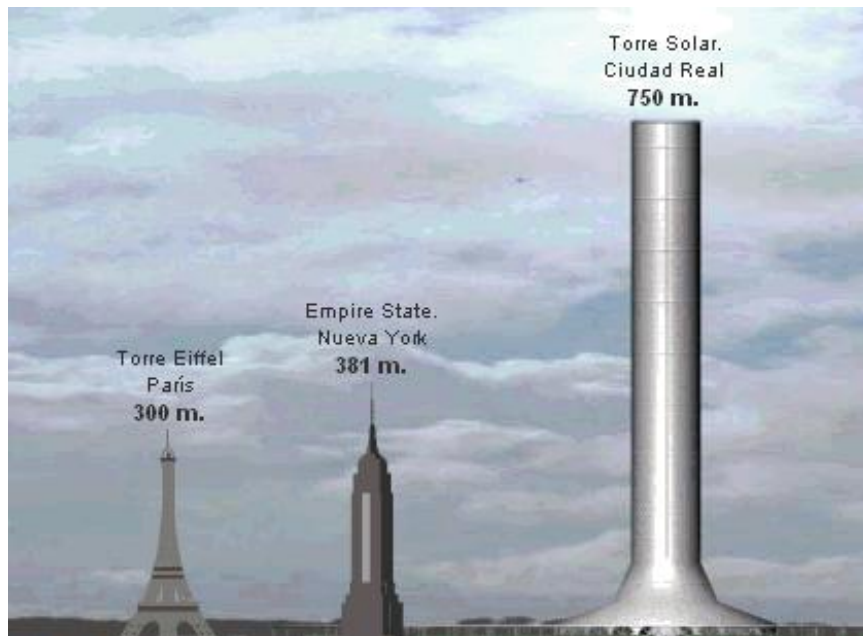


Figure (II-20): La Cheminée Solaire de Ciudad Real

8.2.1. Spécifications du projet :

- Une cheminée de 750 m de haut.
- Un collecteur de 3 km de diamètre, couvrant 350 hectares, dont 250 hectares pourraient être utilisés pour la culture de légumes sous serre.
- Vitesse de l'air dans la cheminée : 43 km/h.
- Puissance de l'installation : 40 MW, soit la demande en électricité d'environ 120 000 personnes.
- Coût du projet : 240 millions d'euros.

8.3. La Cheminée Solaire Namibienne:

Cette tour solaire, baptisée Greentower sera d'1,5 km de hauteur et de 280 mètres de diamètre et va fonctionner en générant un courant d'air ascendant, produisant 400 MW d'électricité. La superficie de la serre sera de 38,5 km² (7 km de diamètre) et d'un coût total prévu 01 milliard de dollars (*Figure II-21*) [7]:

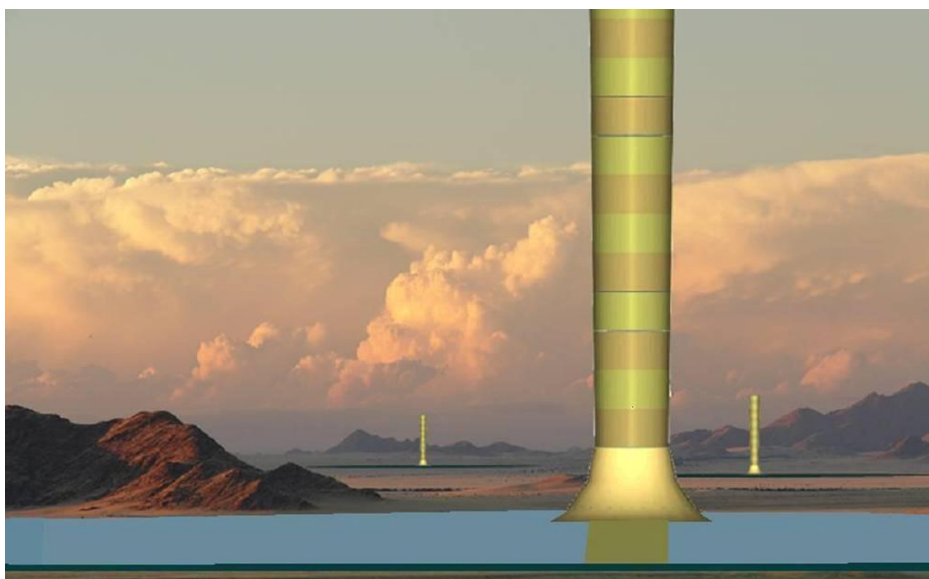


Figure (II-21): La Cheminée Solaire Namibienne

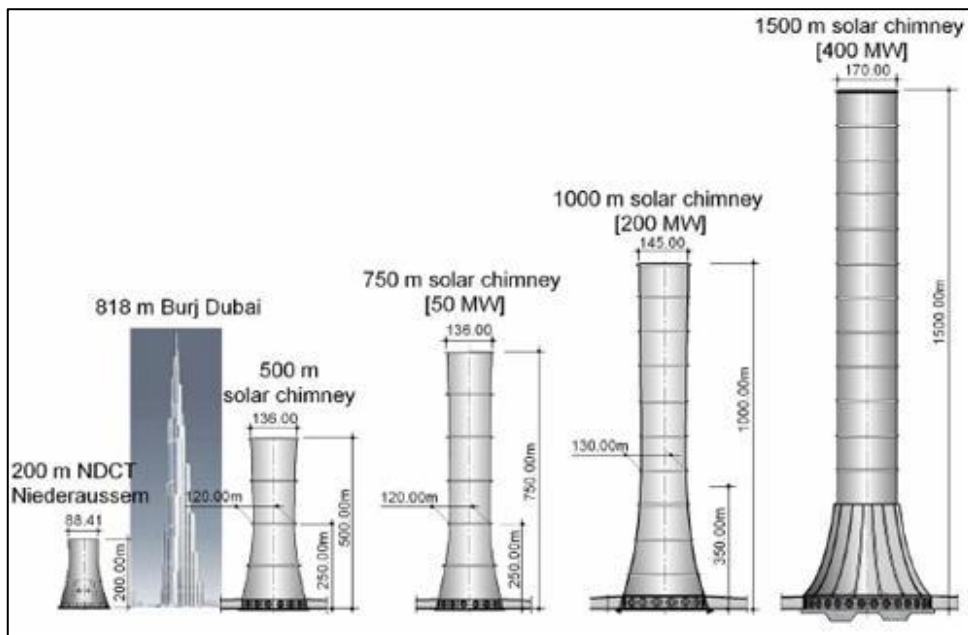


Figure (II-22): Taille comparée de divers projets de Cheminées solaires

9. Autres types de Cheminées solaires :

9.1. Montagnes Solaires :

Le projet ELIOTH, est un système de tour solaire inclinée épousant la forme des montagnes permettant son intégration dans le paysage naturel. La surface du globe fournit des appuis naturels grâce au relief, dès lors, monter à 1000 ou 3000 mètres ne représente plus un exploit technique majeur, dans la mesure où le conduit de la cheminée épouse le relief et prend appui régulièrement sur le sol[14]:

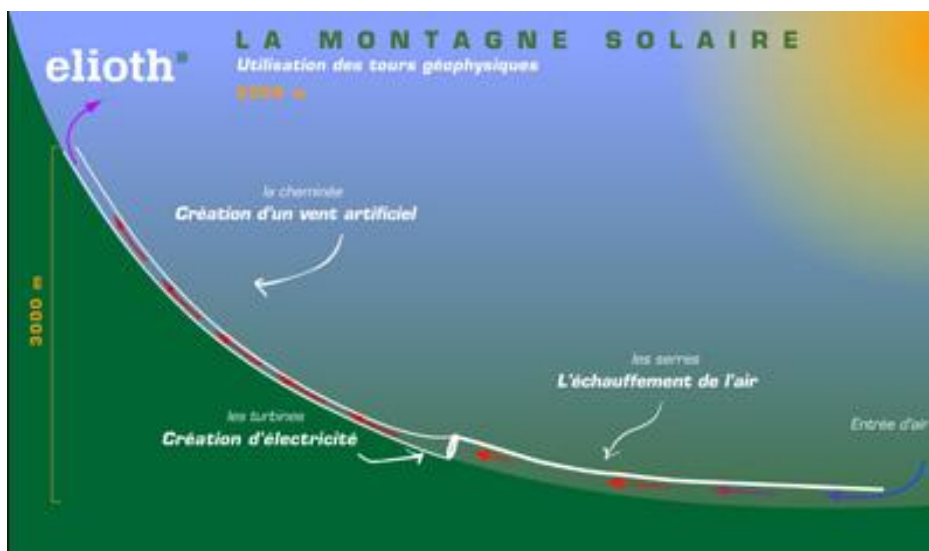


Figure (II-23): Parcours de l'air dans la Montagnes Solaires, projet ELIOTH

Ce projet s'inspire de l'invention de 1926 de l'ingénieur Français Bernard DUBOS.



Figure (II-24): Montagnes Solaires, projet ELIOTH

9.2. Cheminées solaires « flottantes » :

L'idée est de diminuer le coût de construction d'une tour solaire classique, à l'aide d'une structure plus légère que l'air, gonflée par exemple à l'hélium.

Une partie fixe et lourde au sol permet son inclinaison, la partie montante et légère étant constituée de « boudins gonflés » (Figure II-25).

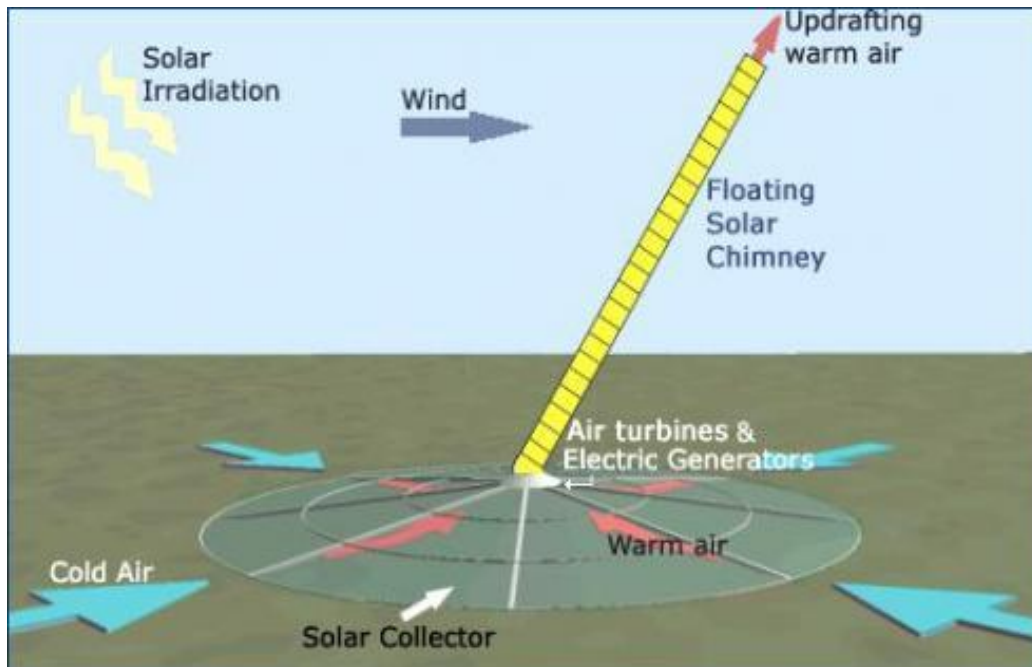


Figure (II-25): Cheminée solaire « flottante »

Le projet de tour solaire de cet inventeur Grec « **ChristosPapageorgiou** » est appelée « flottante », mais en fait il s'agit d'une structure souple et flexible **fixée au sol** dans un désert « sec » (*Figure II-26*) [11].

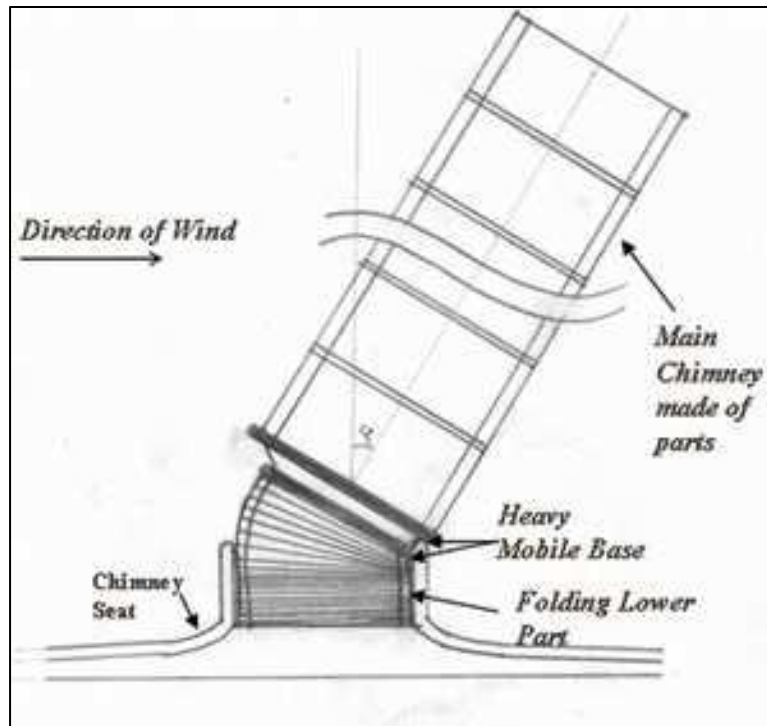


Figure (II-26): Structure souple et flexible de la Cheminée Solaire Flottante

9.3. Tour Energétique:

Un autre des concepts est basé sur le phénomène inverse : l'air froid descend, ce qui fait que cette tour marche à l'envers des autres. Les anglophones l'ont dénommé downdraft « Energy Tower » (*Figure II-27*).

Une Tour Energétique est une centrale à énergie renouvelable construite de manière à évaporer de l'eau de mer en haut d'une cheminée en la vaporisant l'aide de buses, sprays, micronisateurs, asperseurs ou nébulisateurs. Cela va refroidir l'air, qui va devenir plus dense et de ce fait va descendre, afin d'actionner des turbines situées en bas de la tour pour produire de l'électricité, mais aussi de l'humidité \Rightarrow cela peut servir pour de l'irrigation. L'un des avantages est qu'il n'y a pas besoin de construire de serre au pied de la tour. Ce concept, inventé par Phillip R. Carlson en 1975 [15].

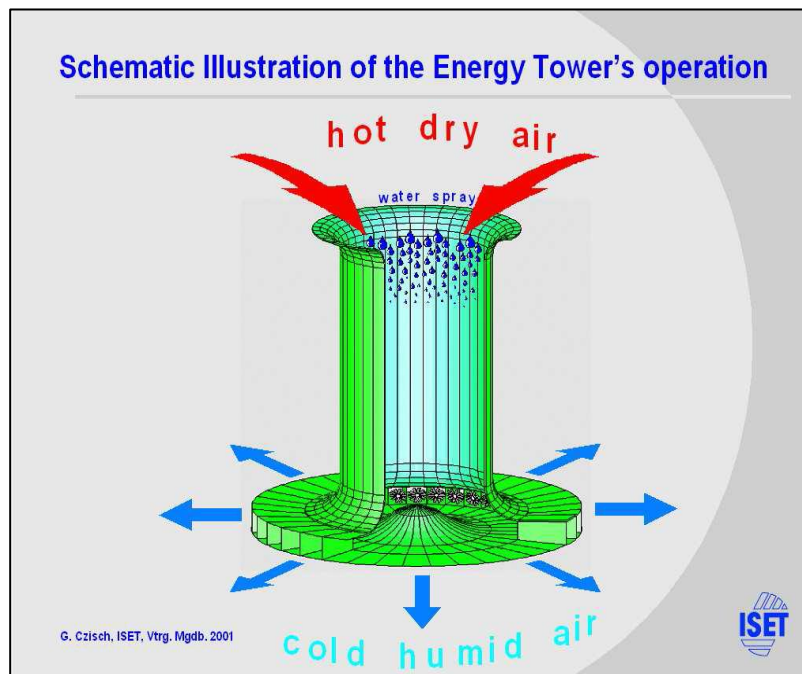


Figure (II-27): Schéma illustratif de l'opération effectuée par une Tour Énergétique

9.4. La Tour d'Énergie Bidirectionnelle (Concept hybride) :

Selon le temps, la température de l'air ambiant est supérieure ou inférieure à celle du sol et la chaleur est transférée de l'air vers le sol ou du sol vers l'air[16].

Cette chaleur est utilisée pour faire tourner un engin thermique contenant un gaz à faible point d'ébullition. L'air ou le sol sont utilisés en tant que méthode de refroidissement pour l'échangeur dont le changement de température cause la convection dans la tour. L'énergie contenue dans cette convection est aussi récupérée à l'aide de turbines à air (Figures II-28 et II-29).

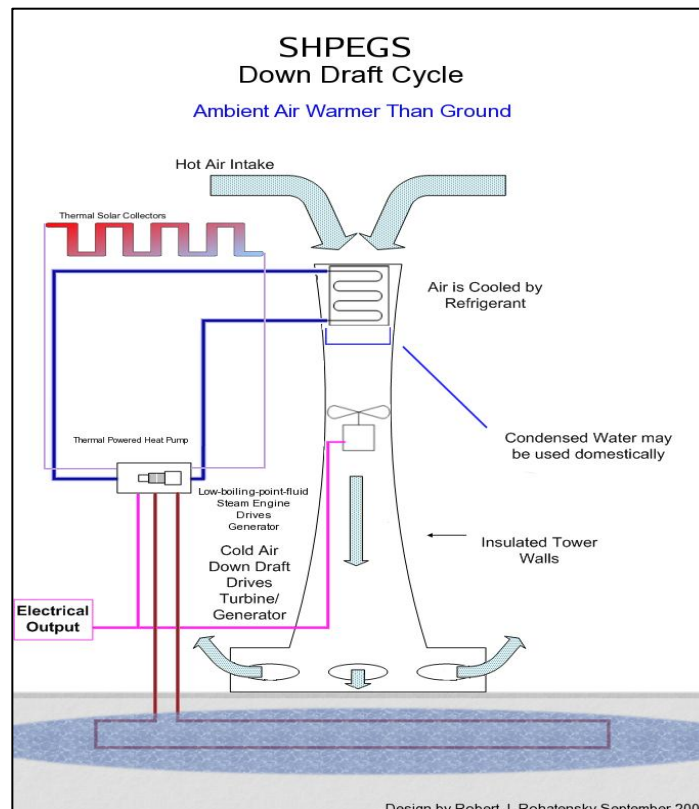


Figure (II-28): Tour d'Énergie Bidirectionnelle Down Draft cycle

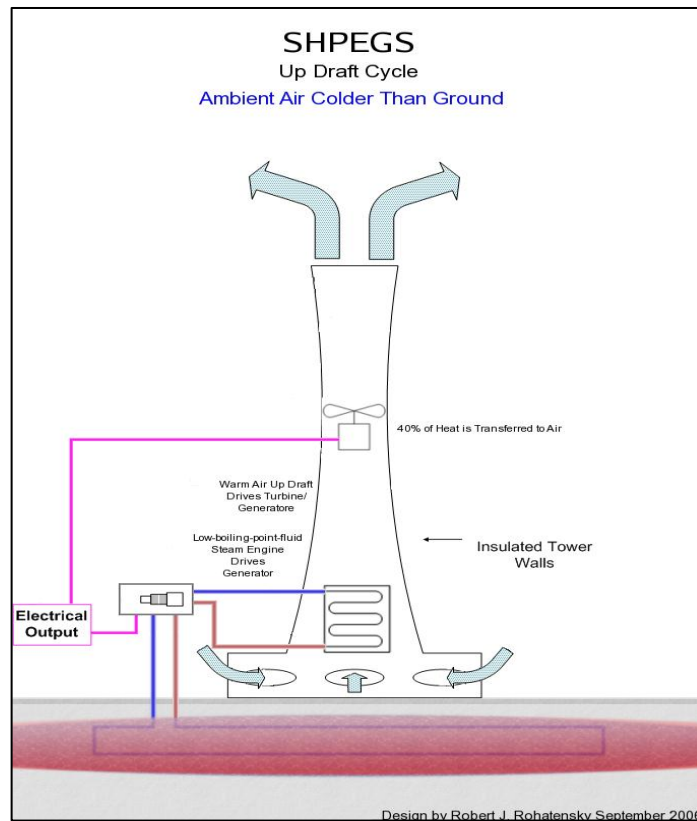


Figure (II-29): Tour d'Énergie Bidirectionnelle UpDraft cycle

9.5. Tornades artificielles, vortex

C'est une tour en forme de tuyère de Laval qui n'est utilisée que pour amorcer un phénomène atmosphérique cyclonique. Il a été construit en 1997 une maquette de 6 m de haut et la prochaine étape serait de passer à 60 m ou plus (*Figure II-30*).



Figure (II-30): Tour à tornades artificielles, vortex

A hauteur égale, les puissances prévues pour ces deux projets sont très différentes. Pour une tour vortex de 500 m par exemple, SUMATEL annonce plus de 1500 Mw alors que les projets allemands de tours solaires en Australie ou en Espagne avancent le chiffre de 50 MW. Cette différence de performance s'explique par la différence de hauteur du phénomène atmosphérique exploité.

Le procédé Nazare permettrait de générer un tourbillon atmosphérique telle une trombe ou une tornade qui peut atteindre 20km de haut, alors que les projets australien et espagnol exploitent l'effet de tirage d'une simple cheminée. La cheminée virtuelle de 20km de haut aurait un tirage, donc un rendement, beaucoup plus important. Dans les deux cas les lois de Carnot sont respectées. La différence de température entre les couches basses et hautes de l'atmosphère serait beaucoup plus importante dans le projet de Vortex [13].

CHAPITRE 3

CONCEPTION ET METHODE DE MESURE

1. Introduction :

Actuellement plusieurs projets de fabrication de cheminées solaires à petites échelles sont expérimentée à travers le monde afin d'étudier et d'optimiser le rendement de ces dernières dans le but de les rendre plus rentables.

Pour la création de notre prototype " Cheminée Solaire " nous avons pris comme référence les deux projets d'Iran et France qui ont donnés des résultats très encourageants malgré une divergence de conception.

2. Prototype de Téhéran (Iran):

Dans un objectif expérimental, une cheminée solaire à petite échelle a été construite à l'Université de Téhéran (*Figure III-1*) [19].



Figure (III-1): Cheminée solaire de Téhéran

2.1 Structure et composants :

2.1.1 La Cheminée : La hauteur et le rayon de la cheminée sont respectivement de 02 m et 20 cm ; elle est construite à partir de polycarbonate d'une épaisseur de 4 mm

2.1.2 Le collecteur : Le diamètre et l'angle du capteur solaire sont respectivement de 03 m et zéro, des verres ont été utilisés en tant que matériau de toiture du collecteur ; la structure de mise en place a été inclus 17 morceaux de 3x3 d'un profil d'acier.

Une combinaison de panneaux d'aggloméré bois avec une épaisseur de 8 mm et d'acier avec une épaisseur de 2 mm ont été utilisés comme absorbeur du collecteur.

2.2 Résultats :

La distribution de la température et de la vitesse du fluide ont été analysés pour différentes hauteurs d'entrée du collecteur. Les données de sortie du collecteur avec lestailles d'entrée de 6 cm, 8 cm et 12 cm ont donnés des résultats qui sont présentés dans les figures III-2 et III-3. Les résultats indiquent des maximum de températures de l'air de l'ordre de 323,6k, 321,3k et 319,6k respectivement pour les entrées de collecteur de 6, 8 et 12 cm.

l'entrée du collecteur a la configuration, qui peut être modifiée dans la plage de 6 à 12 cm, l'analyse a été effectuée

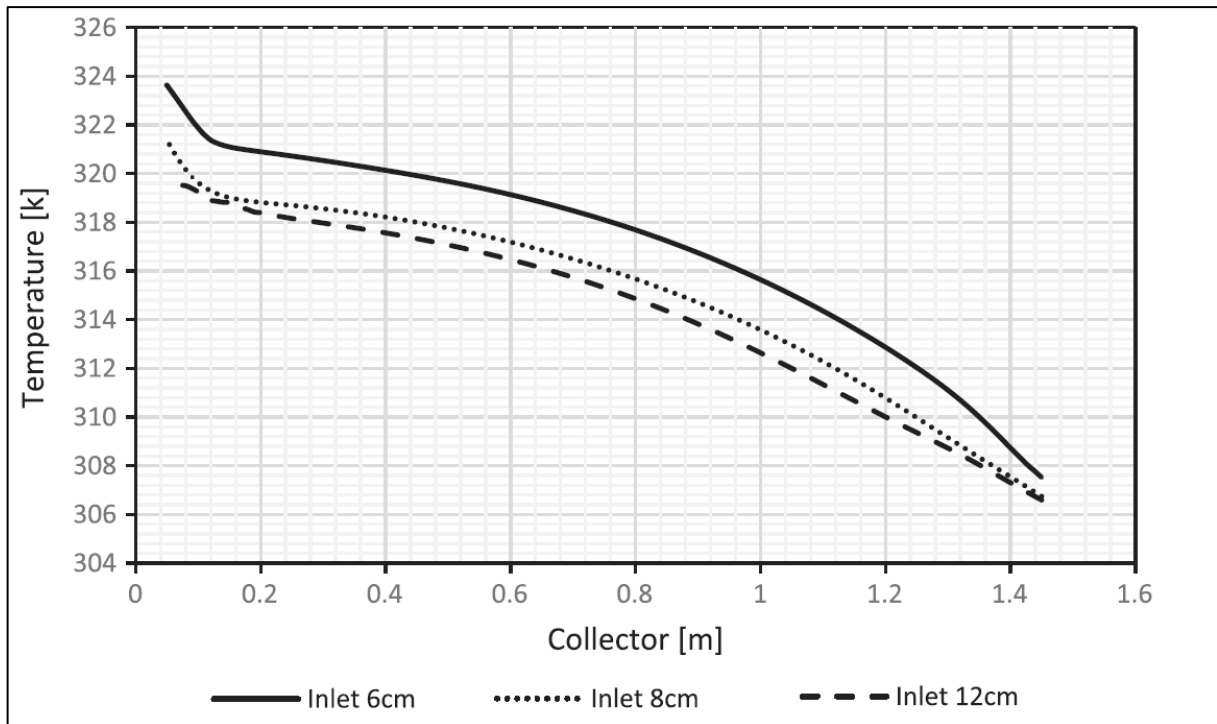


Figure (III-2): Diagramme numérique de température pour les entrées de collecteur de 6, 8 et 12 cm à la hauteur de 2m de la cheminée et de diamètre de la cheminée de 20cm.

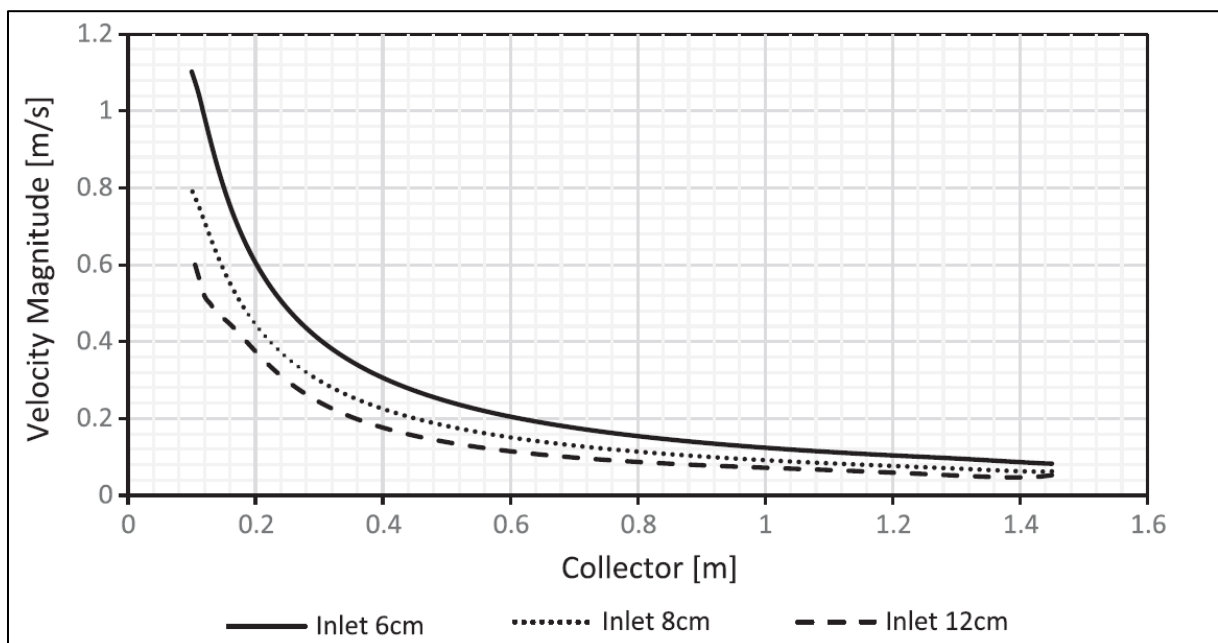


Figure (III-3): Distribution de vitesse numérique pour les entrées de collecteur de 6, 8 et 12 cm à la hauteur de la cheminée de 2m et de diamètre de la cheminée de 20cm.

3. Prototype de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, (France) :

Cette nouvelle expérience constitue la continuité logique d'une précédente maquette (Lola 3.0) qui avait donné des résultats plutôt probants avec une vitesse maximale en haut de la tour de 0,86 m/s, pour une température à la base d'environ 55 °C (*Figure III-4*) [9].

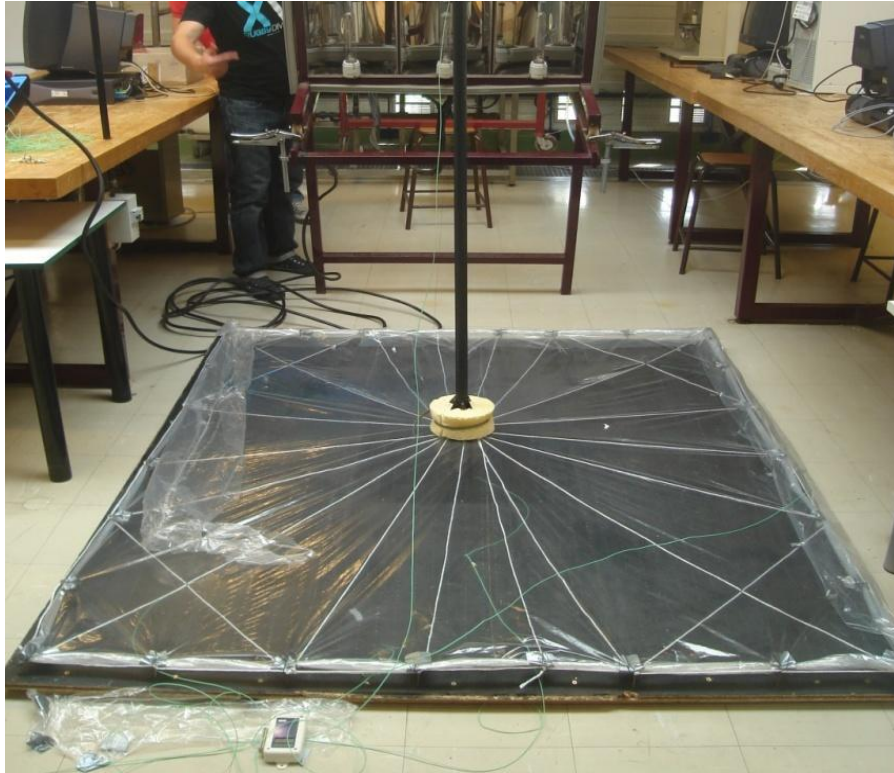


Figure (III-4): Cheminée solaire Lola 3.0

3.1 Structure et composants :

3.1.1 La Cheminée :

La cheminée est d'une hauteur de 1,85 m pour un diamètre de 2,7 cm, fabriqué en PVC.

3.1.2 Le collecteur :

Il est d'une longueur de 1,775 sur 2,06 m d'où une superficie à la base de 3,65 m². Le collecteur est recouvert d'une bâche qui est maintenue par un réseau de ficelles. Le plancher en bois de 2cm d'épaisseur et recouvert d'une peinture noire mate.

Le prototype a été installé au niveau d'un hall thermique, chauffé, il permettait d'avoir une température ambiante à peu près identique tout au long de l'année (environ 20°C). Pour ce qui est de la puissance de chauffe, elle est fournie par un banc de lumière d'une puissance de 1100W.

3.2 Résultats :

La vitesse du flux à la sortie de la cheminée et les températures dans différents points de la maquette ont été analysées sur plusieurs expériences avec des modifications du système.

- a- Pour la première expérience aucune modification du système. Ne sachant pas quel était le nombre d'ouvertures optimales pour l'admission d'air, deux ouvertures (une ouverture étant un côté de la maquette) correspondantes à la moitié de la possibilité d'ouvertures.

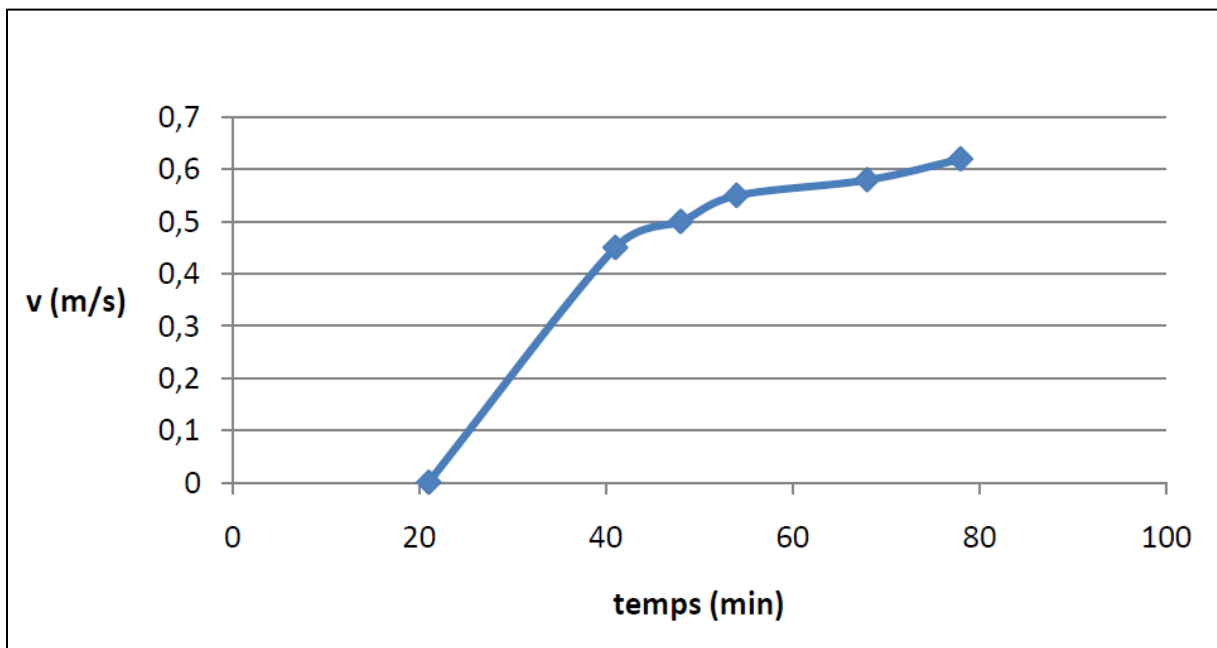


Figure (III-5): Variation de la vitesse à la sortie de la cheminée en fonction du temps

Les résultats obtenus en sortie de tour en fonction du temps attestent de l'obtention d'une vitesse maximale de l'ordre de 0,62 m/s pour une température à la base de 39°C (Figure III-5).

Plusieurs modifications ont été apportées au système à chaque test afin de connaître quels sont les paramètres à appliquer sur leur maquette dont :

- Changement d'armature
- Nouvelle bâche
- Isolation de la tour
- Augmentation de la température à la base de la tour
- Dimensionnement des entrées d'air
- Dimensionnement du diamètre de la tour et de sa hauteur

b- Isolation extérieure le long de la cheminée :

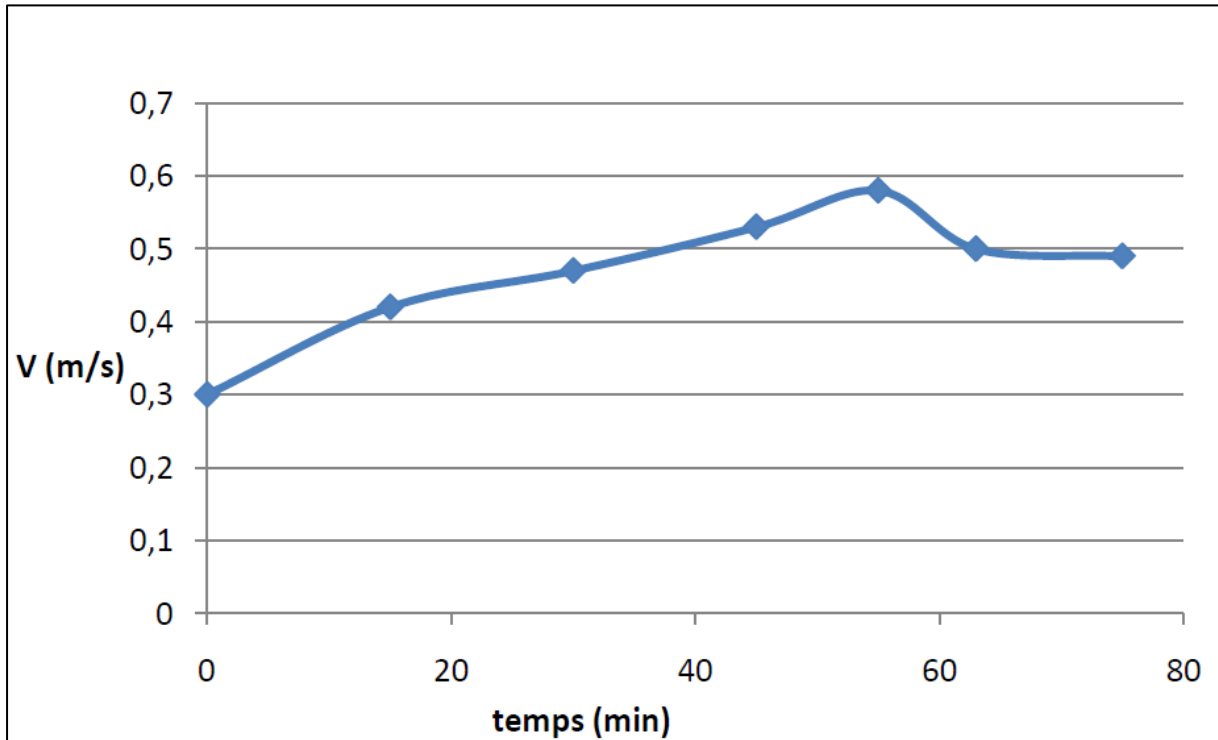


Figure (III-6): Variation de la vitesse à la sortie de la cheminée en fonction du temps avec isolation de la cheminée

Lors de ce test, une vitesse de 0,58 m/s a été obtenue après 55 minutes de temps pour une température au niveau du collecteur de seulement 33,2 °C (Figure III-6).

4. Prototype confectionné :

A partir des prototypes de cheminée solaire cités ci-dessus, nous avons imaginé une conception qui soit à la fois simple, efficace et rigide.

4.1 Structure et composants :

4.1.1 La Cheminée :

La Cheminée est d'une longueur de 02m et 4.5cm de diamètre fabriquée en PVC vu sa solidité et sa maniabilité en cas de modification ainsi que sa bonne résistivité thermique. Le tube (Cheminée) est fixé sur un support fabriqué en acier qui est à son tour fixé sur une planche en bois comme le montre la (figure III-7) ci-dessous :



Figure (III-7): Support de Cheminée

4.1.2 Le collecteur :

Le collecteur qui a comme rôle de chauffer l'air admit est composé de plusieurs parties :

La plateforme sur laquelle est fixé le support métallique fabriqué sur mesure et doté d'un orifice dans lequel s'insère la cheminée fixée à l'aide de quatre boulons. La plateforme a été fabriquée en bois vu sa solidité et son coût, cette dernière est peinte en noir afin de favoriser l'absorption des rayons solaires.

Vu que la plateforme est faite en plusieurs planches de bois raccordées entre elles avec d'autres planches transversales, on a remarqué qu'après un certain temps passé sous le soleil des fissures ont commencées à apparaitre, ce qui nous a conduits vers l'utilisation de silicone afin de colmater ces fissures. Sur cette plateforme ont été installées des tiges filetées qui ont servi de supports réglables en hauteur pour le cadre métallique comme le montre la (*Figure III-8*)ci-dessous:



Figure (III-8): Support de cheminée fixé sur la planche en bois ainsi que les tiges filetées

Le cadre métallique à une largeur et longueur identique à la planche en bois donc (2x1.8 m) fabriqué en acier de forme carré de 4.5 cm sur 5cm et est perforé afin de s'insérer dans les tiges filetées. Ces dernières ont été choisies vu le réglage exacte qu'elles nous offrent afin d'ouvrir les surfaces d'admission à une valeur égale sur les quatre côtés

Le dernier élément est la bâche transparente qui recouvre le cadre métallique auquel elle est fixée à l'aide de baguettes en bois à leur tour fixées avec des vis à tête perforée comme le montre la (*figure III-9*) ci-dessous:



Figure (III-9): Bâche fixée sur le cadre métallique

Quatre câbles d'acier sont fixés sur le support et le cadre métallique avec comme rôle principal de soulever la bâche au niveau des coins faibles.

Après avoir rassemblé les différentes parties de la cheminée (*figure III-10*), nous avons lancé l'expérimentation et procédé aux différentes mesures prévues.



Figure (III-10): Prototype Cheminée Solaire

4.2. Paramètre étudiées :

A travers cette étude expérimentale, il est recherché une grande vitesse d'écoulement possible du flux (air) à l'entrée de la cheminée afin d'alimenter éventuellement une turbine qui peut être ajouté à notre prototype dans une autre étude complémentaire.

A ce niveau d'étude, nous avons considéré trois variantes à savoir :

- Première variante : Collecteur ouvert des quatre cotés
- Deuxième variante : Collecteur avec deux ouvertures opposées soit celles d'orientation Est-Ouest.
- Troisième variante : Collecteur avec une seule ouverture d'orientation Est.

Nombreux sont les paramètres qui agissent sur le fonctionnement de la cheminée solaire essentiellement :

- T_a : Température ambiante ($^{\circ}\text{C}$)
- T_e : Température à l'entrée du collecteur ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{ec} : Température au centre du collecteur ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{ec} : Température à l'entrée la cheminé ($^{\circ}\text{C}$)
- R : Rayonnement du soleil ($\text{W}\cdot\text{m}^2$)
- V : Vitesse de l'écoulement à l'intérieur de la cheminée (m/s)

4.3. Instrument de mesures :

Les paramètres utiles à notre étude étaient les températures à différents endroits de la maquette et la vitesse de l'air à l'entrée de la tour. Pour obtenir ces données, nous avons utilisé plusieurs thermocouples, les trois capteurs furent positionnés à des endroits déterminants de la maquette (*Figure III-11*).

Thermocouple 1 : Température ($^{\circ}\text{C}$) entrée du collecteur

Thermocouple 2 : Température ($^{\circ}\text{C}$) entrée de la cheminée

Thermocouple 3 : Température ($^{\circ}\text{C}$) dans la cheminée

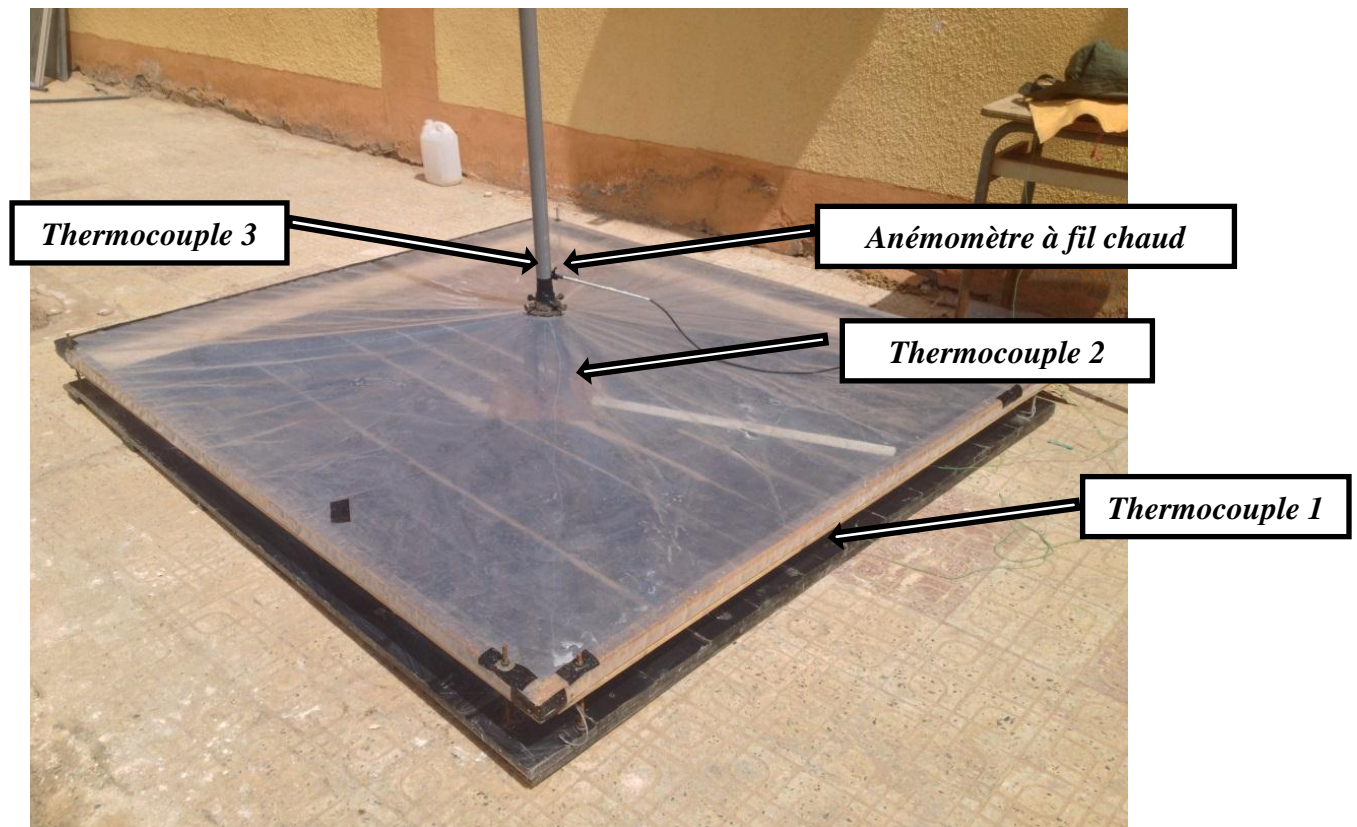


Figure (III-11): Emplacement des Thermocouples ainsi que l'Anémomètre

Pour ce qui est de la vitesse à l'intérieur de la cheminée, il était nécessaire d'avoir un instrument de mesure ayant la meilleure précision possible, le choix se porta alors sur un anémomètre à fil chaud permettant de faire des mesures au dixième de mètre par seconde (Figure III-12).



Figure (III-12): Anémomètre à fil chaud.

CHAPITRE 4

RESULTATS & DISCUSSIONS

1. Introduction

Le prototype de « cheminée solaire » conçu par nos soins mais inspiré d'autres prototypes de France et d'Iran, a été installé au niveau de la faculté et suivi durant trois jours de la fin du mois de Mai. A ce sujet, il faut signaler la coïncidence avec des perturbations atmosphériques essentiellement le vent et le passage de nuages durant une période de la journée.

Pour cette expérimentation, nous avons considéré trois variantes à partir desquelles et par comparaison des résultats nous tirerons des conclusions en matière de performance de la cheminée solaire. Les différentes mesures ont été réalisées de 09h30 à 16h00 avec des pas de temps de 30 minutes.

2. Résultats en fonction de la première variante (22 Mai 2014)

Pour cette première expérience, nous avons procédé à aucune modification du système. Ne sachant pas quel était le nombre d'ouvertures ainsi que le diamètre d'ouverture du collecteur optimales pour l'admission d'air, nous avons opté pour quatre ouvertures (une ouverture de chaque côté de la maquette) avec une ouverture du collecteur de 8cm en hauteur.

Les résultats obtenus attestent d'une vitesse d'écoulement acceptable mais variable au cours de la journée oscillant entre $0,65$ et $0,86$ m/s (*Figure IV-1*).

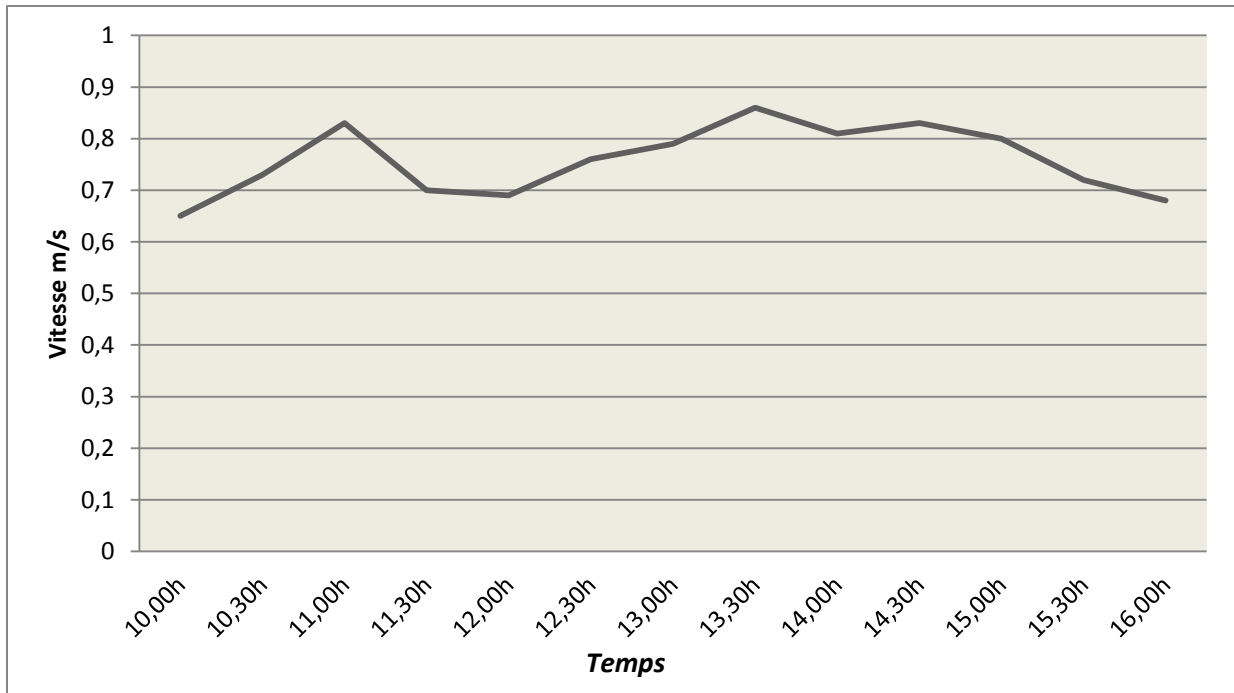


Figure (IV-1): Vitesse d'écoulement en fonction du temps avec quatre ouvertures

Les résultats indiquent une vitesse d'écoulement au point de départ de 0.65m/s à 10h00, 0.83m/s vers 11h00 et connaît une baisse jusqu'à la valeur de 0.69m/s à 12h00. La valeur maximale de 0.86m/s est atteinte à 13h30 puis l'on assiste à une régression jusqu'au point final à 16h00 pour atteindre la valeur de 0.68m/s soit approximativement la valeur du point de départ.

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 (T_a), la température d'entrée du collecteur (T_e), la température du centre du collecteur (T_{cc}) et la température entrée de la cheminée (T_{ec}).

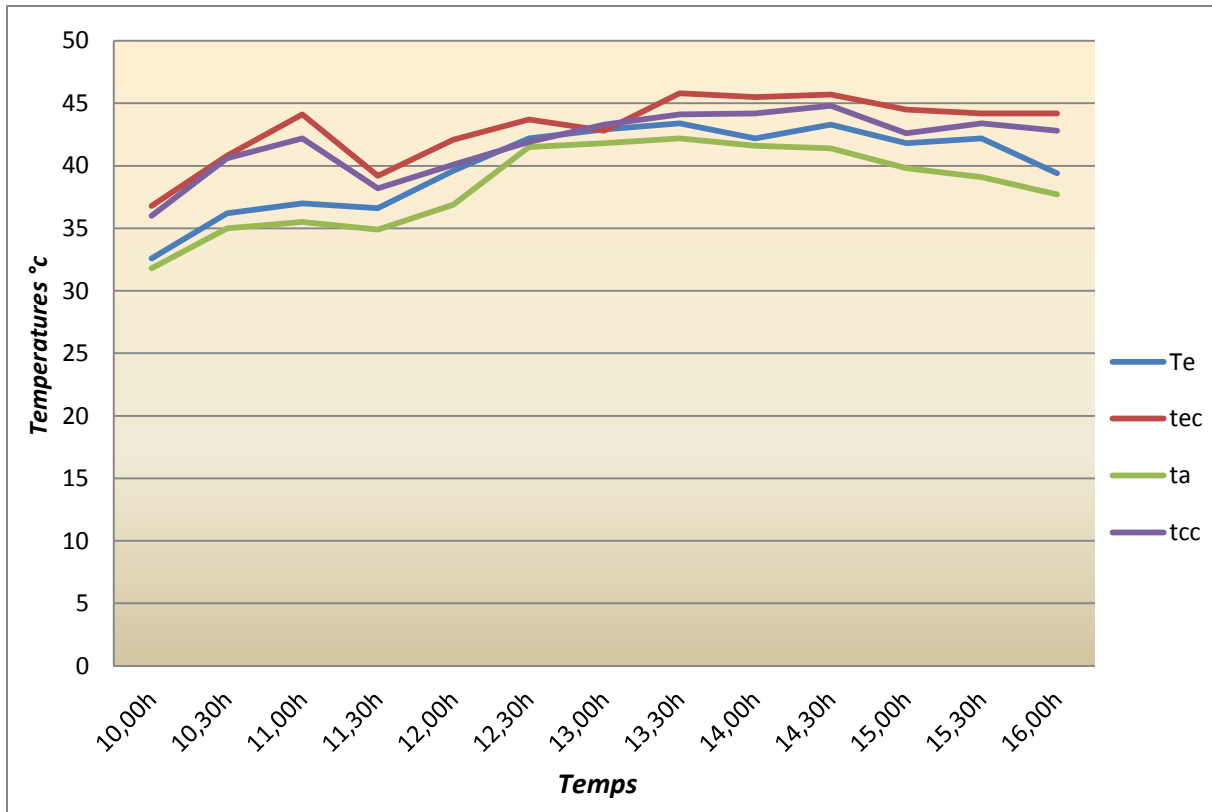


Figure (IV-2): Températures en fonction du temps avec quatre ouvertures

Des résultats obtenus (figure IV-2), nous tirons les conclusions suivantes :

- Nous remarquons une augmentation significative de la température ambiante pour atteindre les maximas à l'entrée de la cheminée en passant respectivement par la température d'entrée du collecteur et la température au centre du collecteur.
- Ces températures culminent vers 14h30 et affichent les valeurs suivantes : $T_a=41.4^{\circ}\text{C}$, $T_e=43.3^{\circ}\text{C}$, $T_{cc}=44.8^{\circ}\text{C}$ et $T_{ec}=45.7^{\circ}\text{C}$.
- L'évolution de ces températures expliquent les liens qui existent entre-elles mais surtout leurs influences sur la cinétique de la vitesse d'écoulement.

Par ailleurs, le rayonnement comme la température, suit une cinétique avec un point culminant vers 13h30 où il atteint la valeur maximale de 970 w.m^2 (figure IV-3)

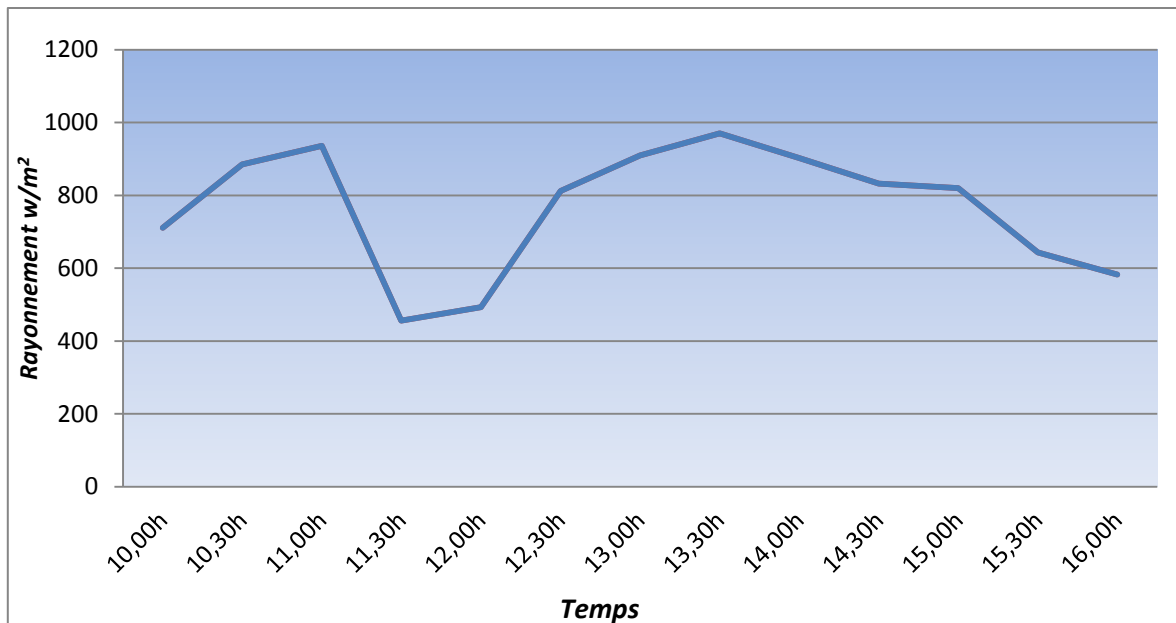


Figure (IV-3): Rayonnement en fonction du temps.

Le rayonnement à 10h00 est de $711w.m^2$, il augmente d'une façon progressive avec le temps jusqu'à atteindre sa valeur maximale de $970 w.m^2$ vers 13h30 ; à partir de ce moment le rayonnement commence à s'affaiblir.

Les valeurs minimales obtenues entre 11h30 et 12h00 sont dues au passage de nombreux nuages qui ont couvert le soleil. Ce faible rayonnement s'est aussi traduit durant cet intervalle de temps par une baisse significative des différentes températures relevées à l'intérieur du collecteur (figure IV-2) et par conséquent sur la vitesse d'écoulement figure IV-1

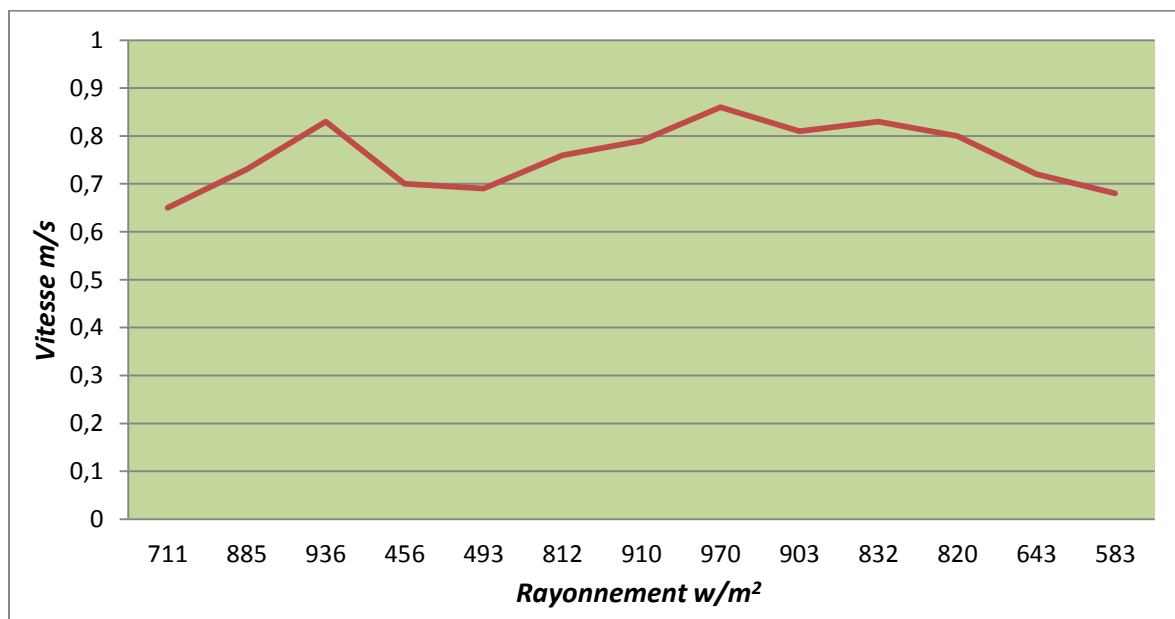


Figure (IV-4): Vitesse en fonction du Rayonnement.

3. Résultats en fonction de la deuxième variante (24 mai 2014)

Pour cette deuxième expérience, nous avons réduit de moitié les ouvertures soit deux sur les quatre possibles.

Les résultats obtenus attestent d'une vitesse d'écoulement acceptable, voire mieux que la première variante, mais variable au cours de la journée oscillant entre $0,62$ et $1,45$ m/s (Figure IV-5).

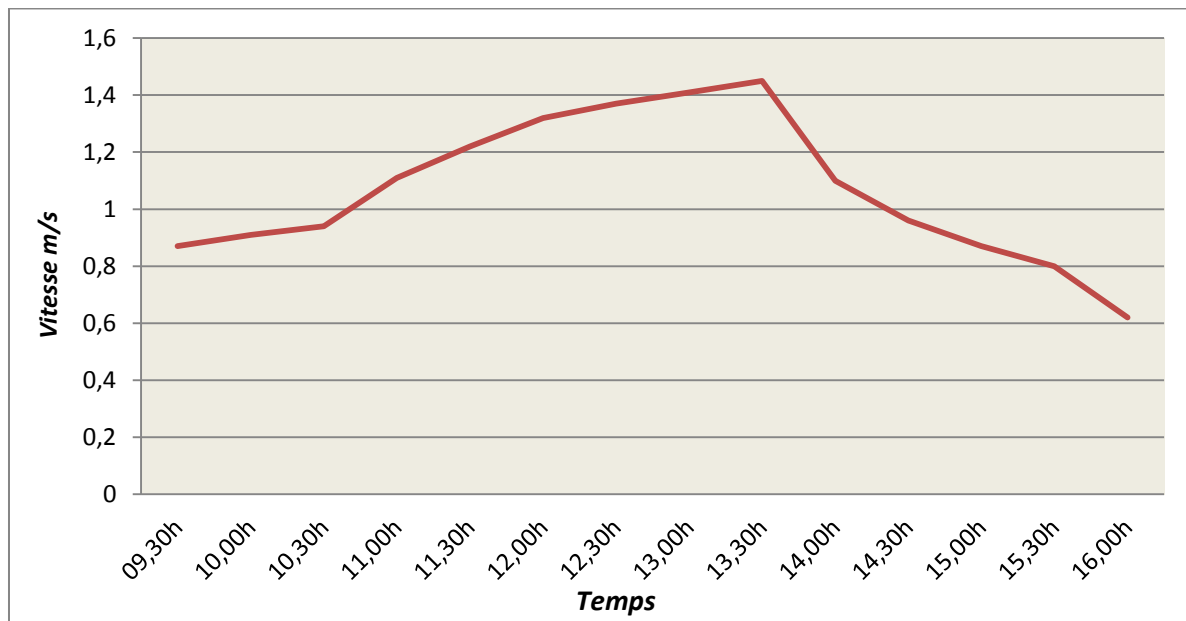


Figure (IV-5): Vitesse en fonction du temps avec deux ouvertures.

L'écoulement à l'entrée de la cheminée débute avec une vitesse de $0,87$ m/s au début de l'expérience soit 9h30 et suit une progression jusqu'à atteindre une vitesse maximale $1,45$ m/s à 13h30 puis une amorce de baisse régulière jusqu'à atteindre la valeur de $0,62$ m/s à 16h00.

Comme signalé précédemment, nous avons mesuré les quatre températures caractéristiques soit la température ambiante (T_a), la température d'entrée du collecteur (T_e), la température du centre du collecteur (T_{cc}) et la température entrée de la cheminée (T_{ec})

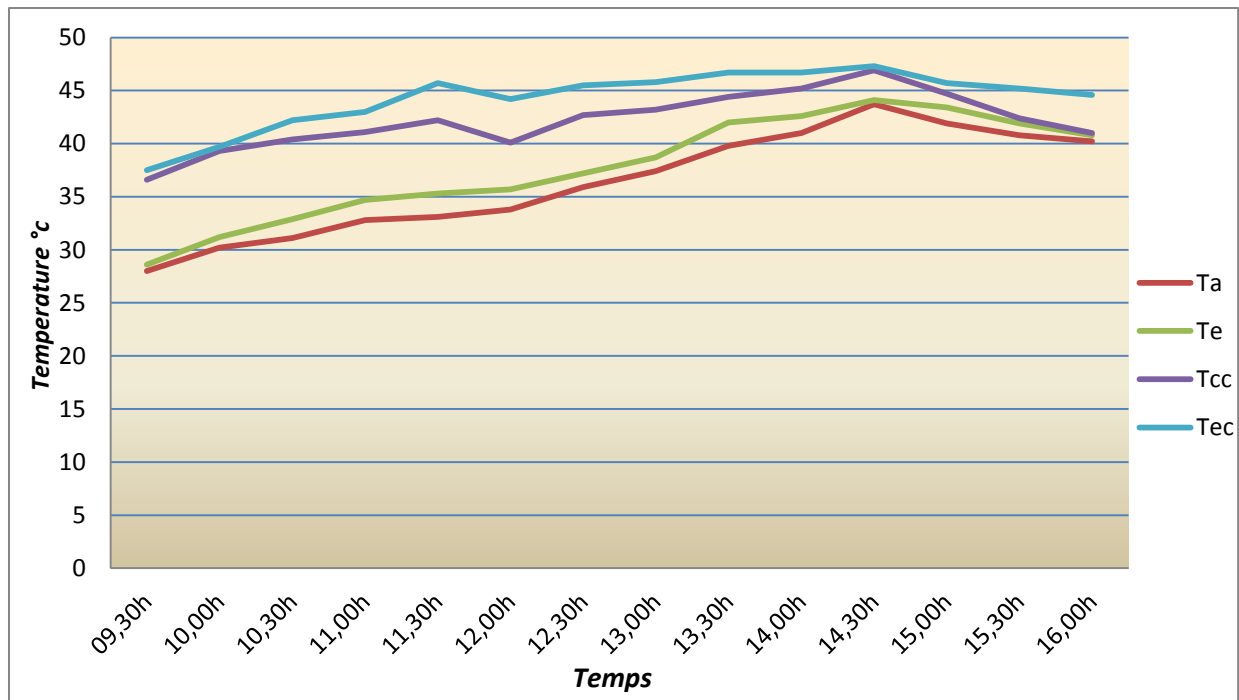


Figure (IV-6): Différentes températures en fonction du temps avec deux ouvertures.

Des résultats obtenus (figure IV-6), nous tirons les conclusions suivantes :

- Nous remarquons une augmentation significative de la température ambiante pour atteindre les maxima à l'entrée de la cheminée en passant respectivement par la température d'entrée du collecteur et la température au centre du collecteur.
- Ces températures culminent vers 14h30 et affichent les valeurs suivantes : $T_a=43,7^{\circ}\text{C}$, $T_e=44,1^{\circ}\text{C}$, $T_{cc}=45,7^{\circ}\text{C}$ et $T_{ec}=46,9^{\circ}\text{C}$.
- L'évolution de ces températures expliquent les liens qui existent entre-elles mais surtout leurs influences sur la cinétique de la vitesse d'écoulement.

La mesure du rayonnement durant la journée indique une évolution de même allure que la température, le point culminant est atteint vers 13h00 avec une valeur de l'ordre de où il atteint la valeur maximale de 953 w.m^2 (figure IV-7)

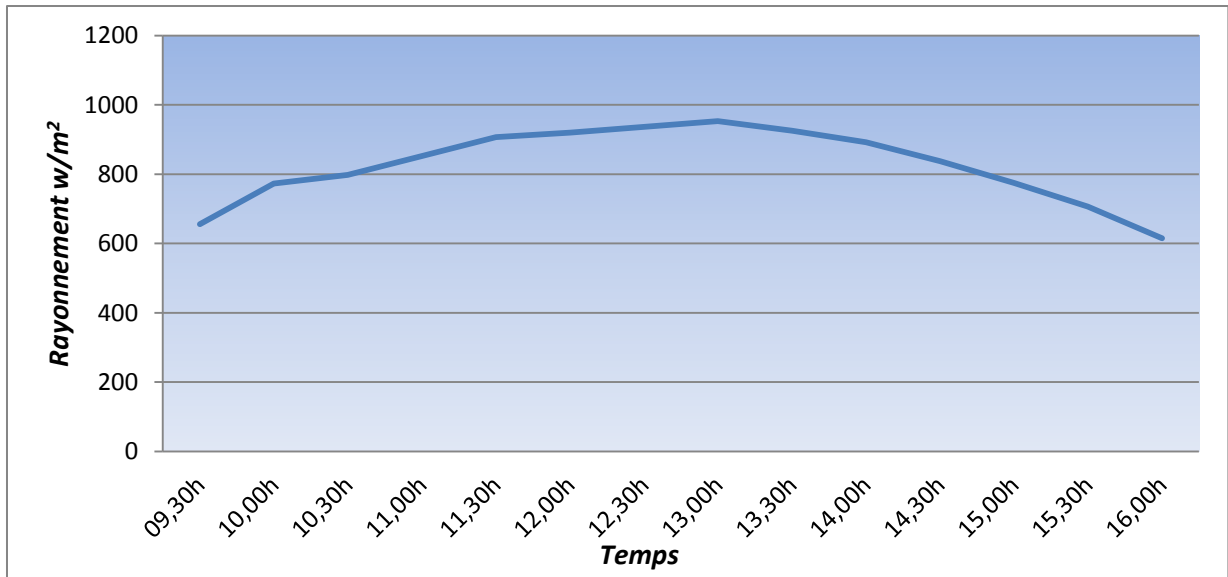


Figure (IV-7): Rayonnement en fonction du temps.

Le rayonnement à 09h30 est de $656 w.m^2$, il augmente d'une façon progressive avec le temps jusqu'à atteindre sa valeur maximale de $953 w.m^2$ vers 13h00 ; à partir de ce moment le rayonnement commence à s'affaiblir.

A ce niveau d'analyse, l'influence du rayonnement sur les températures puis sur la vitesse d'écoulement est confirmée. Par ailleurs, l'allure parfaite de la courbe de rayonnement est le résultat d'un ciel dégagé toute la journée contrairement au premier jour.

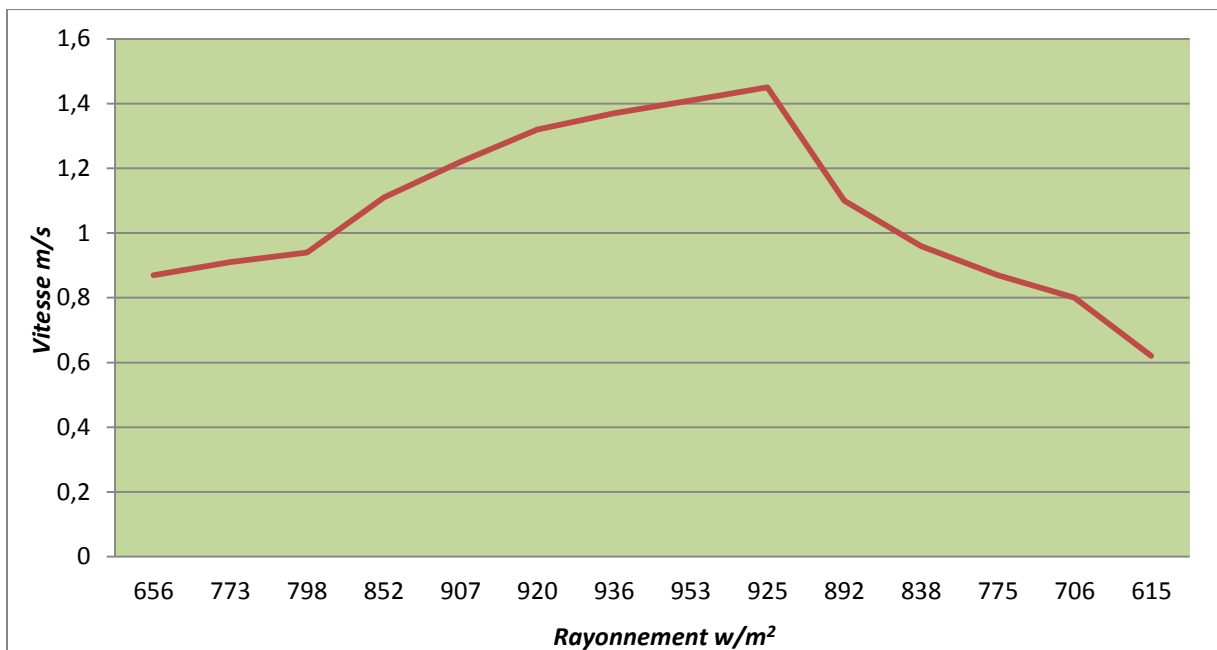


Figure (IV-8): Vitesse en fonction du Rayonnement.

4. Résultats en fonction de la troisième variante (27 mai 2014)

Pour cette troisième expérience, nous avons réduit de trois-quarts les ouvertures soit une sur les quatre possibles.

Les résultats obtenus attestent d'une vitesse d'écoulement très acceptable par rapport aux deux précédentes variantes ; celle-ci, a oscillé entre $0,69$ et $1,83$ m/s (Figure IV-9).

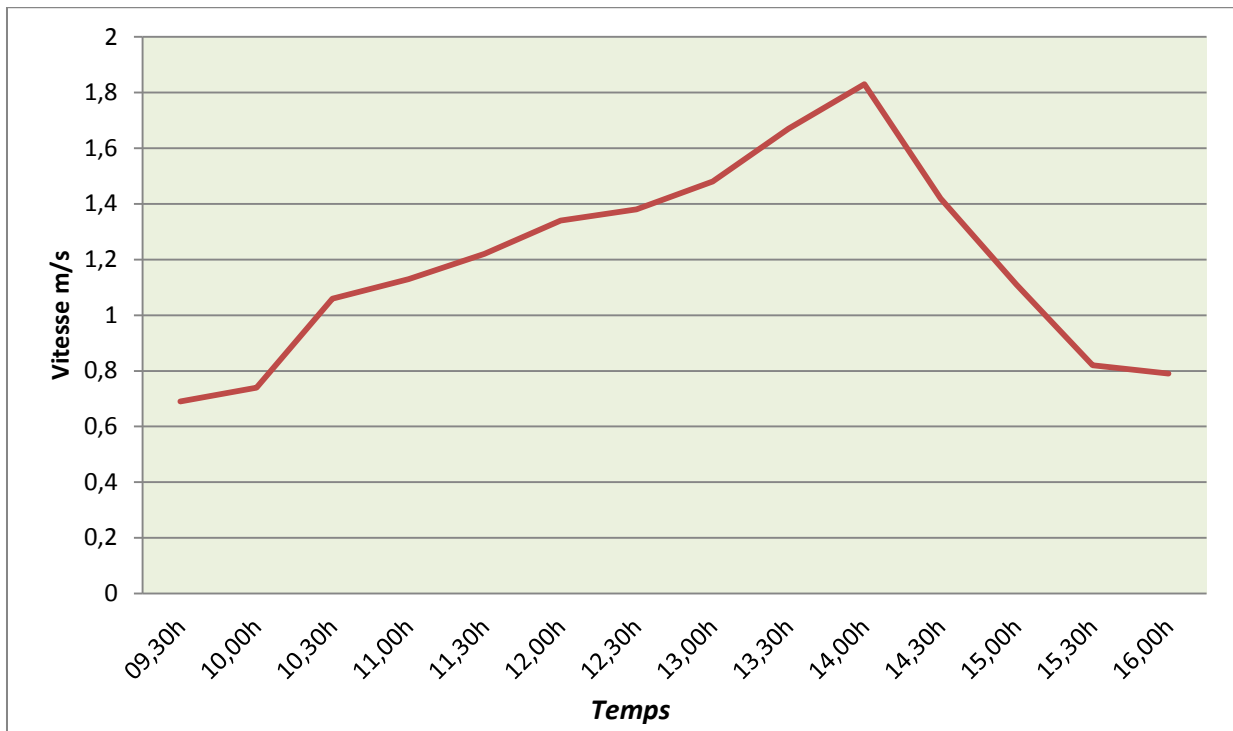


Figure (IV-9): Vitesse en fonction du temps avec une seule ouverture

L'écoulement à l'entrée de la cheminée débute avec une vitesse de $0,69$ m/s au début de l'expérience soit 9h30 et suit une progression jusqu'à atteindre une vitesse maximale $1,83$ m/s à 14h00 puis une amorce de baisse régulière jusqu'à atteindre la valeur de $0,79$ m/s à 16h00.

Comme signalé précédemment, nous avons mesuré les quatre températures caractéristiques soit la température ambiante (t_a), la température d'entrée du collecteur (T_e), la température du centre du collecteur (T_{cc}) et la température entrée de la cheminée (T_{ec})

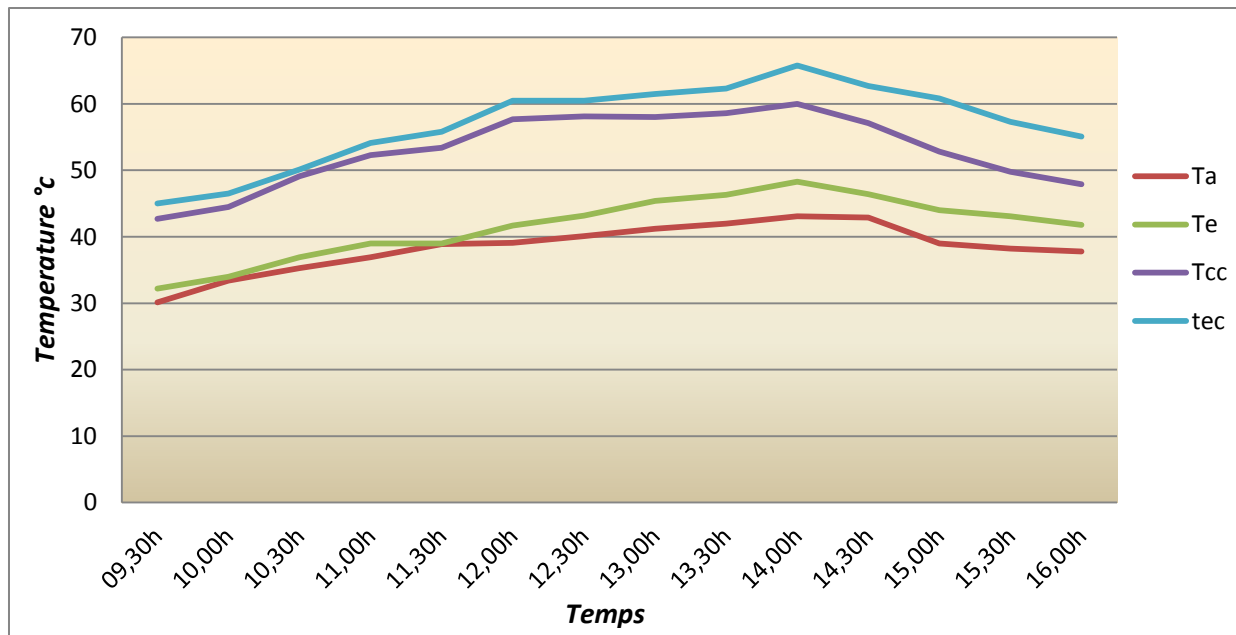


Figure (IV-10): Différentes températures en fonction du temps avec une seule ouverture

Des résultats obtenus (figure IV-10), nous tirons les conclusions suivantes :

- Nous remarquons une augmentation significative de la température ambiante pour atteindre les maximas à l'entrée de la cheminée en passant respectivement par la température d'entrée du collecteur et la température au centre du collecteur. Contrairement aux deux premières variantes, le gain en chaleur est plus important.
- Ces températures culminent vers 14h00 et affichent les valeurs suivantes : $T_a=43,1^{\circ}\text{C}$, $T_e=48,3^{\circ}\text{C}$, $T_{cc}=60^{\circ}\text{C}$ et $T_{ec}=65,3^{\circ}\text{C}$. Contrairement aux deux premières variantes, le gain en chaleur est plus important soit $22,2^{\circ}\text{C}$ ($T_{ec}-T_a$)
- L'évolution de ces températures expliquent les liens qui existent entre-elles mais surtout leurs influences sur la cinétique de la vitesse d'écoulement.

La mesure du rayonnement durant la journée indique une évolution de même allure que la température, le point culminant est atteint vers 13h30 avec une valeur de l'ordre de où il atteint la valeur maximale de 1022 w.m^2 (figure IV-11)

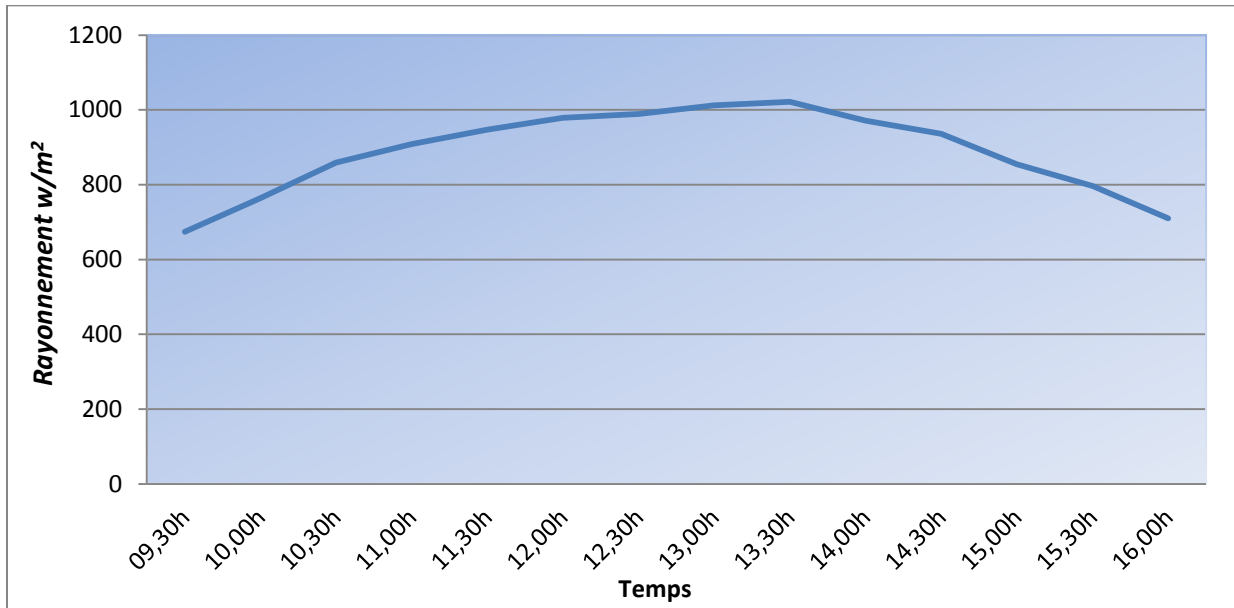


Figure (IV-11): Rayonnement en fonction du temps.

Le rayonnement à 09h30 est de $674 w.m^2$, il augmente d'une façon progressive avec le temps jusqu'à atteindre sa valeur maximale de $1022 w.m^2$ vers 13h30 ; à partir de ce moment le rayonnement commence à s'affaiblir pour afficher $710 w/m^2$ à 16h00.

A ce niveau d'analyse, l'influence du rayonnement sur les températures puis sur la vitesse d'écoulement est confirmée. Par ailleurs, l'allure parfaite de la courbe de rayonnement est le résultat d'un ciel dégagé toute la journée contrairement au premier jour, similaire à celle du deuxième jour

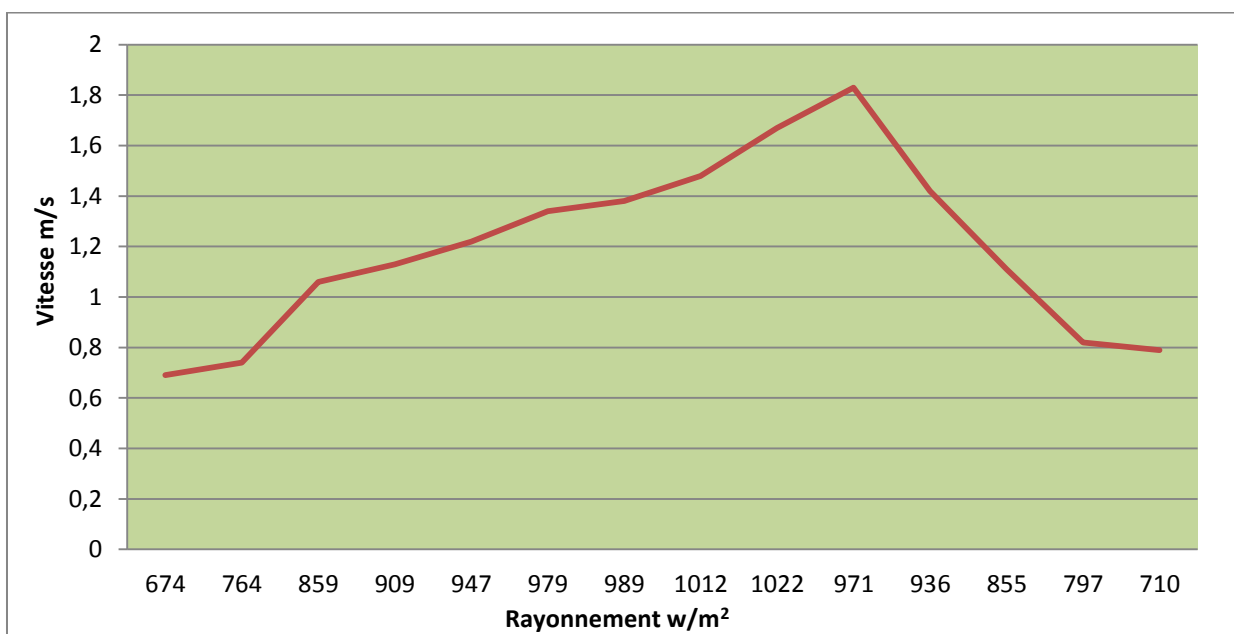


Figure (IV-12): Vitesse en fonction du Rayonnement.

5. Synthèse des résultats

A partir des résultats obtenus en fonction des trois variantes considérées dans cette étude (04 ; 02 et 01 ouvertures), l'on peut conclure de l'acceptable efficacité du prototype 'cheminée solaire' mis en place.

A l'échelle du prototype, les vitesses d'écoulement affichées sont très encourageantes ; le meilleur rendement est obtenu au niveau de la troisième variante où l'échange thermique et gazeux avec l'environnement de la cheminée ne s'est fait que par un seul côté du carré considéré (*figure IV-13*).

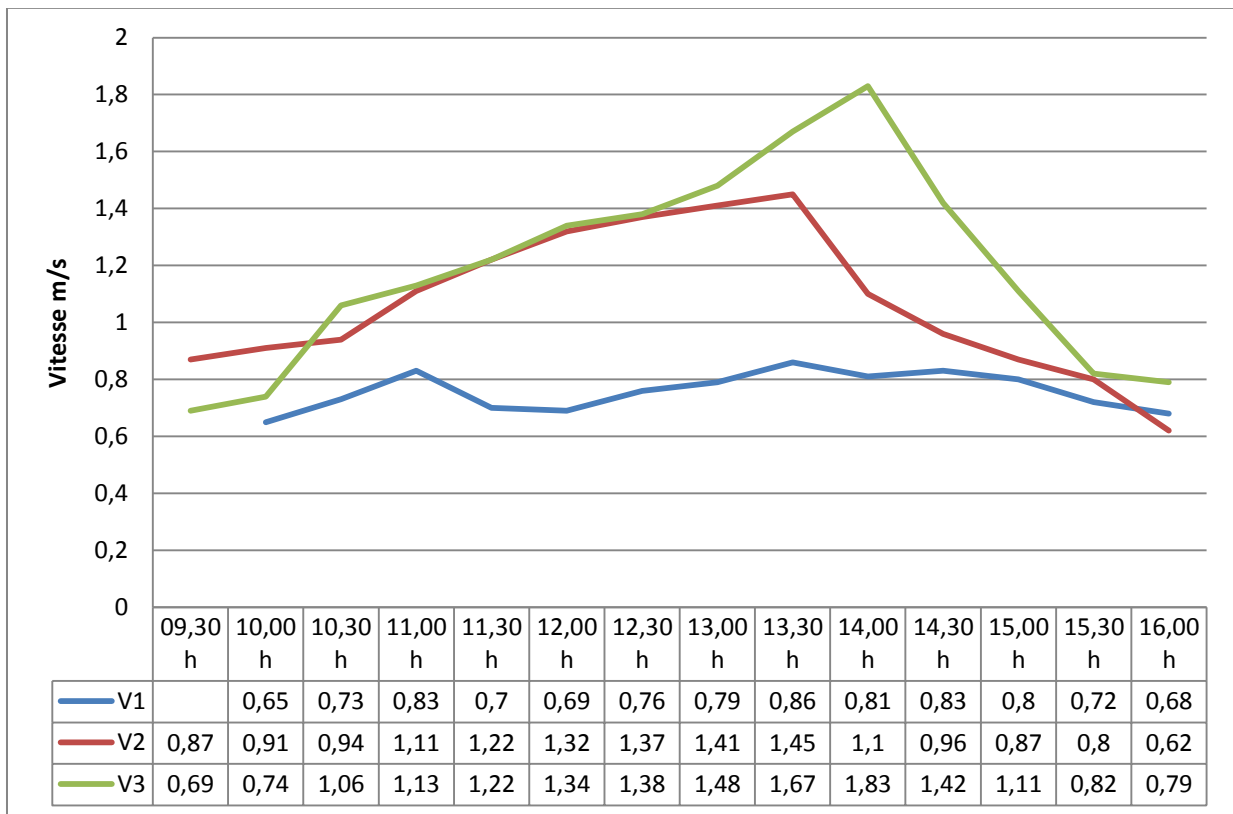


Figure (IV-13): vitesse d'écoulement en fonction du temps et selon les trois variantes.

Les trois plus grandes vitesses d'écoulement dans le cas des trois variantes ont été affichées entre 13h30 et 14h00, période de la journée où la température est à son maximum ainsi que l'intensité lumineuse : la corrélation entre les trois paramètres est significativement établie.

Conclusion générale

De toute évidence, les énergies renouvelables seront de plus en plus présentes dans un futur proche et c'est grâce à leurs multiples qualités de coût, simplicité et durabilité qu'elles s'imposeront face aux énergies traditionnelles.

Avec plusieurs sources inépuisables et durables comme le vent, la géothermie, la biomasse, l'énergie des mers et surtout le soleil ; ce dernier, a vu naître plusieurs techniques afin de s'approvisionner de son énergie et parmi eux la cheminée solaire. Cette cheminée constitue d'abord un moyen très intéressant de produire de l'énergie électrique renouvelable en utilisant différentes réactions physiques connues et maîtrisées par l'homme depuis quelques dizaines d'années (Effet thermosiphon, convection, effet de serre).

Les investissements de départ sont importants mais prévisibles ainsi que les matériaux nécessaires à sa construction (béton, verre, acier) sont disponibles en grandes quantités, et d'un point de vue financier, la tour solaire est moins onéreuse qu'une centrale nucléaire. De plus, la production perdure jour et nuit ; ainsi, une seule tour produirait suffisamment d'énergie électrique pour près de 200 000 foyers, mais ces avantages ne cachent pas les contraintes majeures qui inhibent le développement du projet de tour solaire à l'échelle mondiale.

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. Le désert algérien 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 sien de la cheminée afin d'utiliser cette vitesse pour faire tourner une turbine. Le prototype de « cheminée solaire » conçu par nos soins mais inspiré d'autres prototypes de France et d'Iran, a été installé au niveau de la faculté et suivi durant trois jours de la dernière décade du mois de Mai 2014.

Pour cette expérimentation, nous avons considéré trois variantes en matière d'ouverture du collecteur et avons procédé aux différentes mesures de 09h30 à 16h00 avec des pas de temps de 30 minutes

Les résultats obtenus attestent d'une vitesse d'écoulement à l'entrée de la cheminée très importante, elle est variable au cours de la journée et culmine vers 13h30 -14h00. Les rendements maxi en matière de vitesse d'écoulement sont largement améliorés en fonction des variantes considérées : 0,86 m/s pour la première variante (quatre ouvertures), 1.45m/s (deux ouvertures) et 1.83m/s (une seule ouverture).

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

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. Les températures maximales sont obtenues entre 14h00 et 14h30, celles des trois variantes à l'entrée de la cheminée étaient de 45.7, 46.9 et 65,3°C respectivement pour les trois variantes quatre, trois et une ouverture.

Par ailleurs, le rayonnement suit une cinétique avec un point culminant vers 13h00-13h30 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 du Sahara algérien offrent de très bonnes conditions permettant certainement d'atteindre de bons rendements au niveau d'une cheminée solaire

Références bibliographiques

- [1] T. CHERGUI, H. BOUALIT, S. LARBI ET A. BOUHDJAR, “**Technologie de la cheminée solaire pour la production de l’énergie**“, *Revue des Energies Renouvelables SIENR’12*, pp83–94, Ghardaïa 2012.
- [2] JÖRG SCHLAICH, “**The solar chimney: electricity from the sun**“, *Edition Axel Menges, Novembre 2004*.
- [3] M. KALTSCHMITT, W. STREICHER, “**Renewable energy:Technology economics and environment**“, *Edition Springer, 2007*.
- [4] B. NEGROU, “**Conception et analyse de fonctionnement d’une turbine éolienne installée dans une cheminée solaire**“, *Mémoire de magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, Novembre 2007*.
- [5] S. NIZETIC, B. KLARIN, “**A simplified analytical approach for evaluation of the optimal ratio of pressure drop across the turbine in solar chimney power plants**“, *Applied Energy, Mai 2009*.
- [6] <http://www.tour-solaire.fr/nouvelles-infos.php>, 30 avril 2014.
- [7] A. DHAHRI, A. OMRI, “**A Review of solar Chimney Power Generation Technology**“, (IJEAT), *February 2013*
- [8] ELIAS PAEZ ORTEGA, “**Analyzes of Solar Chimney Design**“, *University of Science and Technology, Norwegian, July 2011*.
- [9] M.ULIAN, M. RICARD, B. LASMARRIGUES, M. LELAIDIER Mathias, “**Cheminée tour solaire**“, *Université de Pau et des Pays de l’Adour, 2010/2011*.
- [10] PABLO GONZALEZ GASCON Y MARIN, “**Les tours solaires, deux approches pour utiliser l’énergie du soleil, Énergies renouvelables**“, ENSTA, *Paris 05.01.2011*.
- [11] C.D. PAPAGEORGIOU, “**Floating Solar Chimney Technology**“, *National Technical University of Athens, Greece 2011*.
- [12] T. TAYEBI, “**Processus de la convection naturelle laminaire dans une cheminée solaire**“, *magister en physique, faculté des sciences exactes, département de physique, Université Mentouri Constantine 06 / 07 /2010*.
- [13] F. MAUGIS, “**Portail d’information dédié aux énergies renouvelables**“, *France Nancy 2014*,
- [14] <http://www.ecolopop.info/2006/07/500-mw-solaires-pour-un-brevet-adeveloper/442>
28 février 2014

- [15] <http://www.solar-tower.org.uk/patents-energy-towers.php?PHPSESSID=9d826017b752c3400e7cf46367226ff4> 16 mars 2014.
- [16] http://www.peswiki.com/index.php/Directory:Bi-Directional_Energy_Tower 04 mars 2014.
- [17] SCHLAICH BERGERMANNUND PARTNER, “The Solar Chimney“, Germany 2002
- [18] CEA, “Les trois voies de l’énergie solaire“, Saclay France 2012.
- [19] A. KASAEIAN, M. GHALAMCHI, M. GHALAMCHI, “Simulation and optimization of geometric parameters of a solar chimney in Tehran“, *Energy Conversion and Management* 83 pp28–34, (2014).
- [20] D. WILGENBUS, “L’énergie solaire“, *La main à la pâte – Société française de physique*, Paris lion 2012.
- [21]S. BONNET, M. ALAPHILIPPE, P. STOUFFS, “Conversion Thermodynamique de l’Energie Solaire dans des Installations de Faible ou de Moyenne Puissance : Réflexions sur le Choix du Meilleur Degré de Concentration“, *Journées Internationales de Thermique*,pp 73-80, (2003).
- [22]A.OUBARRA, “Conversion de l’énergie solaire“, *Maroc Bouznika 11 – 15 Mai 2010*.
- [23]V. PEETERS, “Les énergies renouvelables“, février 2010.
- [24] ECRIN, “Énergie des mers“, *Groupe de Travail Energies Alternatives. Année 2010*
- [25]SYNDICAT DES ENERGIES RENOUVELABLES, “Principes de fonctionnement de la pompe à chaleur“, *Paris octobre 2012*.
- [26] N. BOUKHETAIA, J. FYOT, H. HOLIN, “Biomasse énergie“, *L’industrie des énergies décarbonées*, 2010.

Résumé :

Le prototype de « cheminée solaire » installé au niveau de la faculté a été suivi durant trois jours de la dernière décade du mois de Mai 2014. Pour cette expérimentation, nous avons considéré trois variantes (une, deux et quatre ouvertures du collecteur) et réaliser les différentes mesures de 09h30 à 16h00 avec des pas de temps de 30 minutes.

Les valeurs maximales en matière de vitesse d'écoulement dans la cheminée, de températures et de rayonnement sont obtenues dans l'intervalle temps 13h00-14h30. En fonction des variantes considérées (une, deux et quatre ouvertures), la vitesse d'écoulement passe respectivement de 1.83 à 0,86 m/s. Il en est de même pour la température d'entrée de la cheminée qui passe de 65,3 à 45,7°C ; ce qui démontre que le facteur ouverture a toute son importance.

A ce niveau d'analyse, l'influence du rayonnement sur les températures puis sur la vitesse d'écoulement dans la cheminée est confirmée.

Mots-clés : cheminée solaire, vitesse écoulement, température, rayonnement, Sahara-Algérie

Résumé :

The "solar chimney" prototype that was set in the university was monitored for 3 days of the last decade of the month of May 2014. For this experimentation, we have considered three variants (one, two and four manifold openings) and achieved the different measures from 09h30 to 16h00 with time steps of 30 minutes.

The highest values in terms of flow rate inside the chimney, of temperature and of radiance are gotten in the interval 13h00 - 14h30. Based on the considered variants (one, two and four openings), the flow rate passes respectively from 1.83 to 0.86 m/s. The same happens to the temperature of the manifold's entrance too where it goes from 65.3 to 45.7°C; which shows that the factor of the openings has all of its importance.

At this level of analysis, the radiance's influence on the temperatures then the flow rate inside the chimney is confirmed.

Key-words: solar chimney, flow rate, temperature, radiance, Sahara-Algeria

ملخص

إن نموذج (المدخنة الشمسية) الذي تم وضعه على مستوى الكلية في الثلاث ايام من العشرية الأخير من شهر ماي 2014، و خلال هذه التجربة، اعتمدنا على ثلاث متغيرات (فتحة واحدة للجامع، اثنان، ثم أربعة فتحات)، حيث انجزنا عدة قياسات ما بين الساعة 09:30 صباحا إلى غاية الساعة 16:00 مساء و ذلك كل 30 دقيقة .

حيث تم تسجيل القيم العظمى لكل من سرعة التدفق داخل المدخنة، الحرارة، الإشعاع في الفترة ما بين 13:00 و 14:30. بدلالة المتغيرات (فتحة واحدة للجامع، اثنان، ثم أربعة فتحات)، و كانت سرعة التدفق متغير ما بين 1.83 و 0.86 م/ثا، وكذلك بالنسبة للحرارة عند مدخل الجامع كانت ما بين 65.3° و 45.7° و هذا يبين أن عملية الفتح تلعب دوراً هاماً.

عند هذا المستوى من التحليل، نجد تأثير الإشعاع على الحرارة و سرعة التدفق داخل المدخنة أكيد.

الكلمات المفتاحية : المدخنة الشمسية، سرعة التدفق، الحرارة، الإشعاع، صحراء الجزائر.