



UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité: Energétique

THÈME

**Etude de l'effet des matériaux utilisé comme collecteur
sur le rendement d'une station solaire à effet de
cheminée**

Présenté par BEKKOUCHE Mohamed

Devant le Jury :

NOM et Prénom	Lieu d'exercice	Grade	Qualité
1. ABED Belkacem	UIK Tiaret	M.C.A	Président
2. MEKROUSSI Said	UIK Tiaret	M.C.B	Examineur
3. BOUSSEMAHA Mohamed	UIK Tiaret	M.C.B	Invité
4. DJEKHADANE Khaled	UIK Tiaret	M.C.B	Invité
5. KARAS Aek	UIK Tiaret	M.C.A	Encadreur
6. BEZZEROUK Mohamed Amine	UIK Tiaret	M.C.B	Co-Encadreur

Dédicace

Je tiens à dédier ce modeste travail à :

Mes très chers parents.

Mes sœurs qui m'ont encouragé.

A tous mes amis

Mes collègues de Ma petite promotion

2016/2017.

Mohamed

Remerciements

*Merci avant tout au bon dieu **ALLAH**, le clément, le miséricordieux, le plus puissant....*

*Au terme de notre travail sur ce modeste projet qui a été réalisé au niveaux de la faculté d'Ibn Khaldoun, Tiaret, je tiens tout d'abord à remercier mon encadreur, Le docteur ; **Mr A. KARAS** et mon Co-encadreur le docteur ; **Mr M. BEZZERROUK** qui a bien voulu accepter de diriger ce travail avec ses précieux conseils, ses encouragements et qui avait manifesté un intérêt particulier pour mener au terme.*

*Je tiens à remercier aussi, l'équipe de recherche ; **M. Bezzerrouk, M. Boussemaha, K. Djekhdane, R. Nacer** pour la réalisation du prototype de la cheminée solaire*

*Je tiens à remercier aussi le Président **ABED BELKACEM***

ET L'Examineur MEKROUSSI SAID

*Je tiens à remercier Mr le chef département de génie mécanique **GUEMOUR**, et tous mes enseignants au niveaux de la département pendant mes années universitaires.*

A ma famille qui a porté avec moi le poids de mes soucis et mes difficultés. Que mes parents et mon frère trouvent ici l'expression de mon plus profond attachement et de ma gratitude infinie.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé à mettre ce travail à terme de près ou de loin.

A tous ceux que je n'ai pas cités, qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère gratitude.

Sommaire

Dédicaces

Remerciements

Sommaire

Nomenclature

Introduction générale 1

Chapitre -I-

Généralité sur les énergies renouvelables

I.1 Introduction	3
I.2 Historique	4
I.3 Les différents types de l'énergies renouvelables	5
I.3.1 L'énergie éolienne	5
I.3.1.1 Fonctionnement d'une éolienne	5
I.3.1.2 Potentiel éolienne en Algérie	6
I.3.2 L'énergie hydraulique	6
I.3.2.1 Potentiel hydroélectrique en Algérie	7
I.3.3 L'énergie géothermique	7
I.3.3.1 Principes et fonctionnement	8
I.3.3.2 Potentiel géothermique en Algérie	8
I.3.4 L'énergie de la biomasse	9
I.3.4.1 Potentiel de la biomasse en Algérie	9
I.3.5 L'énergie solaire	10
I.3.5.1 Le soleil	10
I.3.5.2 Nature de l'énergie solaire	11
I.3.5.3 Géographie terrestre	12
I.3.5.4 Les trois voies de l'énergie solaire	12
I.3.5.4.a L'énergie solaire thermodynamique	13
I.3.5.4.b L'énergie solaire thermique	14
I.3.5.4.c L'Energie solaire photovoltaïque	15
I.3.5.5 Les capteurs solaire	15
I.3.5.5.a Les capteurs solaires photovoltaïques	15
I.3.5.5.b Les capteurs solaires thermiques	16
I.3.5.5.c Les capteurs à concentration ou parabolique	18
I.3.5.6 Potentiel solaire en Algérie	18

Chapitre -II-

Les Centrales à Cheminée Solaire : Développements et avancements

II.1 Introduction	20
II.2 Historique.....	20
II.3 Description d'une tour solaire à effet de cheminée	20
II.3.1 Définition d'une cheminée solaire	20
II.3.2 Les différentes composantes du système	21
II.3.2.1 Collecteur	21
II.3.2.2 Cheminée.....	22
II.3.2.3 Turbine.....	22
II.4 Principe de fonctionnement	23
II.5 Phénomène majeur : Le thermosiphon	24
II.6 Les différents phénomènes intervenants dans la cheminée solaire.....	26
II.6.1 L'effet Venturi	26
II.6.2 L'effet de serre	26
II.6.3 L'effet de convection naturelle	26
II.6.4 L'effet d'ovalisation	26
II.7 Cycle thermodynamique de la cheminée solaire.....	27
II.7.1 Cheminée	28
II.7.2 Collecteur.....	29
II.7.3 Turbine	30
II.8 Les avantages et les inconvénients d'une cheminée solaire	30
II.8.1 Avantages	30
II.8.2 Inconvénients	31
II.9 Récapitulatif des principaux de tours solaires géantes	31
II.9.1 Le 1er concept... : la Cheminée Solaire à courant d'air ascendant.....	31
II.9.1.1 Le prototype grandeur nature à Manzanares, Espagne.....	31
II.9.1.2 Cheminée solaire : projet Espagnol à Ciudad Real.....	32
II.9.1.3 Cheminée solaire : projet Australien	32
II.9.1.4 La Cheminée Solaire Namibienne	33
II.9.1.5 Cheminée solaire « Flottante »	33
II.9.1.6 Montagne solaire	33
II.9.2 Le 2ème concept... : Tours énergétiques	34
II.9.3 Un 3ème concept... : tornades artificielles, vortex	34

II.10 Revue bibliographies	35
II.10.1 Premiers pas et développements récents	35
II.10.2 Etudes théoriques	36
II.10.3 Analyses pour des sites spécifiques	38
II.10.4 Etudes expérimentales	38
II.10.5 Analyse structural.....	42
II.10.6 Analyse écologique	42
II.10.7 Analyse économique.....	42

Chapitre -III-

Méthodes et résultats numériques

III.1 Introduction.....	43
III.2 Méthode numérique.....	44
III.2.1 Présentation du problème physique.....	44
III.2.2 Hypothèses simplificatrices.....	44
III.2.3 Formulation mathématique.....	45
III.2.3.1 Equations générales.....	45
III.2.3.1.a Formulation vectorielle	45
III.2.3.1.b Formulation des équations en coordonnées cartésienne	46
III.3 Problème en 2D	46
III.3.1 Utilisation du GAMBIT	47
III.3.2 Utilisation du Fluent	47
III.3.3 Choix de la méthode de couplage Pression-Vitesse.....	47
III.3.4 Description du problème.....	48
III.3.5 Les conditions aux limites	48
III.3.6 Convergence de calcul	49
III.3.7 Interprétation des résultats	50
III.3.7.1 La vitesse	50
III.3.7.2 Pression.....	53
III.3.8 Validation des résultats	54

Chapitre -IV-

Résultats et interprétations

IV.1 Introduction.....	55
IV.2 Préliminaire à l'étude	55
IV.2.1 Structure et composants	55

IV.2.1.1 La Cheminée	55
IV.2.1.2 Le collecteur	55
IV.2.2 Paramètres étudiées.....	56
IV.2.3 Instrument de mesures.....	56
IV.2.4 Résultats en fonction de la première variante (13 Mai 2017)	57
IV.2.5 Résultats en fonction de la deuxième variante (14 Mai 2017).....	58
IV.2.6 Résultats en fonction de la troisième variante (16 Mai 2017)	60
IV.2.7 Résultats en fonction de la quatrième variante (17 Mai 2017)	61
IV.2.8 Résultats en fonction de la cinquième variante (18 Mai 2017).....	63
IV.3 Synthèse des résultats	64
Conclusion générale	65
Annexe	67
Références bibliographiques	68
<i>Résumé</i>	

Nomenclature

Lettres latines :

a : Diffusivité thermique. [m^2/s]

b : Terme de source dans le système d'équations algébriques discrétisées.

C_P : Capacité calorifique massique à pression constante du fluide. [J/kgK]

D_h : La longueur caractéristique. [m]

\vec{g} : Accélération de la pesanteur. [m/s^2]

G : Irradiation solaire. [W/m^2]

h : Coefficient métrique dimensionnel. [m]

H : Coefficient métrique adimensionnel.

t : Temps. [s]

T : Température. [K]

T_{ref} : Température de référence. [K]

T₀ : Température ambiante. [K]

T_d : Ecart de Température. $(T - T_{\text{ref}})$. [K]

T_c : Température du sol. [K]

T_f : Température du toit du collecteur. [K]

ΔT : Ecart de température dimensionnel $(T_c - T_f)$. [K]

\vec{V} : Vecteur vitesse. [m/s]

D_{coll} : Diamètre de collecteur. [m]

A_{coll} : Surface du collecteur. [m^2]

E : Eclairement solaire. [W/m^2]

H_c : Hauteur de cheminée. [m]

Q : Quantité de chaleur. [J]

- m :** Débit massique. [Kg/s]
- 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. [m²]
- T_a :** représente la température de l'air. [K]
- H :** représente la hauteur du collecteur. [m]
- T_e :** Température à l'entrée du collecteur. [K]
- T_{ec} :** Température sortie du collecteur. [K]
- T_{cc} :** Température au centre du collecteur. [K]

Lettres grecques :

- α:** Coefficient de sous-relaxation.
- λ:** Conductivité thermique. [W/m²K]
- β:** Coefficient de dilatation du fluide à pression constante. [1/K]
- μ:** Viscosité dynamique. [Kg/m²s]
- ν:** Viscosité cinématique. [m²/s]
- ρ:** Masse volumique. [Kg/m³]
- ρ₀:** Masse volumique à Tref. [Kg/m³]

η_{Turb} : Rendement de turbine

η_c : L'efficacité de la cheminée.

η_{coll} : Efficacité du collecteur.

Δh: Différence de l'enthalpie. [J/kg]

Exposant :

***** : Paramètres adimensionnels.

Abréviations :

CS : Cheminée Solaire

PVC : Polychlorure de vinyle

CCS : Centrale à Cheminée Solaire

PEBD : Polyéthylène à basse densité

Liste des figures

<i>Fig. I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent</i>	5
<i>Fig. I.2 : Vitesses moyennes du vent à 10 m du sol</i>	6
<i>Fig. I.3 : parc de production électrique</i>	7
<i>Fig. I.4 : nappe albienne</i>	8
<i>Fig. I.5 : Répartition de l'énergie solaire moyenne reçue au sol</i>	12
<i>Fig. I.6: Tour de l'énergie solaire thermodynamique</i>	13
<i>Fig. I.7: les différents centrale solaire thermodynamique</i>	14
<i>Fig. I.8: fonctionnement d'un capteur solaire thermique</i>	14
<i>Fig. I.9: cellules photovoltaïques</i>	15
<i>Fig. I.10 : Schéma de principe d'une photopile</i>	16
<i>Fig. I.11 : Schéma de principe d'un capteur à air fixé à un mur (mur Trombe)</i>	16
<i>Fig. I.12 : Schéma de principe d'un capteur plan vitré</i>	17
<i>Fig. I.13 : Schéma de principe d'un capteur sous vide</i>	17
<i>Fig. I.14 : Schéma d'un capteur à concentration</i>	18
<i>Fig. I.15 : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale au mois de Juillet</i>	19
<i>Fig.II.1 : Principe de fonctionnement d'une cheminée solaire</i>	21
<i>Fig.II.2 : collecteur d'une tour solaire</i>	21
<i>Fig.II.3 : cheminée d'une tour solaire</i>	22
<i>Fig.II.4 : Turbines d'une tour solaire</i>	22
<i>Fig.II.5 : Principe du stockage de chaleur sous la serre utilisant des galets</i>	24
<i>Fig.II.6 : Principe du stockage de chaleur sous la serre utilisant des tubes noirs</i>	24
<i>Fig.II.7 : Principe du stockage de chaleur sous la serre</i>	25
<i>Fig.II.8 : Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'un Thermosiphon</i>	25
<i>Fig.II.9 : Cycle réel de la cheminée solaire</i>	27
<i>Fig.II.10 : la cheminée solaire de Manzanares</i>	31
<i>Fig.II.11 : projet Espagnol à Ciudad Real</i>	32
<i>Fig.II.12 : projet Australien</i>	32
<i>Fig.II.13 : projet Namibienne</i>	33
<i>Fig.II.14 : Cheminée solaire Flottante</i>	33
<i>Fig.II.15 : Principe d'une montagne solaire</i>	34
<i>Fig.II.16 : Principe d'une tour solaire énergétique</i>	34
<i>Fig.II.17 : VORTEX de l'inventeur Nazare</i>	35
<i>Fig.II.18 : Projet de moteur solaire proposé par Isidoro Cabanyes</i>	35

<i>Fig.II.19 : La cheminée solaire présentée par Bernard Dubos.....</i>	<i>36</i>
<i>Fig.II.20 : Schéma du prototype de Pasurmarthi et Sherif.....</i>	<i>39</i>
<i>Fig.II.21 : Prototype de Zhou et al.</i>	<i>39</i>
<i>Fig.II.22 : Schéma du prototype de Botswana.....</i>	<i>40</i>
<i>Fig.II.23 : Image du prototype de Ferreira et al.</i>	<i>40</i>
<i>Fig.II.24 : Image du prototype de Koyun et al.</i>	<i>41</i>
<i>Fig.II.25 : Image du prototype de Golder.....</i>	<i>41</i>
<i>Fig. III.1 : Présentation du problème physique étudié et conditions aux limites.....</i>	<i>44</i>
<i>Fig. III.2 : La géométrie du problème étudié de la cheminée solaire réalisé par nos soins.....</i>	<i>48</i>
<i>Fig. III.3 : les courbes des résidus.</i>	<i>49</i>
<i>Fig. III.4 : Rayonnement en fonction du temps.</i>	<i>50</i>
<i>Fig. III.5 : Champs de vitesse du prototype de la cheminée solaire. (1ier maillage)</i>	<i>50</i>
<i>Fig. III.6: Champs de vitesse dans le collecteur et l'entrée de la cheminée(1ier maillage)...</i>	<i>51</i>
<i>Fig. III.7: Champs de vitesse dans le collecteur et l'entrée de la cheminée.(1ier maillage)..</i>	<i>51</i>
<i>Fig. III.8: Champs de vitesse dans le collecteur et l'entrée de la cheminée. (2emme maillage).....</i>	<i>52</i>
<i>Fig. III.9: Champs de vitesse dans le collecteur et l'entrée de la cheminée (2 Emme maillage)</i>	<i>52</i>
<i>Fig. III.10: Champs de pression dans le collecteur et l'entrée de la cheminée.</i>	<i>53</i>
<i>Fig. IV.1 : représente la cheminée du prototype.</i>	<i>55</i>
<i>Fig. IV.2 : représente le collecteur du prototype.....</i>	<i>56</i>
<i>Fig. IV.3 : Anémomètre.....</i>	<i>57</i>
<i>Fig. IV.4 : Vitesse en fonction du temps avec un seul trou.....</i>	<i>57</i>
<i>Fig. IV.5 : Variation de la vitesse et la température en fonction du temps avec un seul trou.</i>	<i>58</i>
<i>Fig. IV.6 : Variation de l'humidité et la vitesse en fonction du temps avec un seul trou.</i>	<i>58</i>
<i>Fig. IV.7 : Vitesse en fonction du temps avec deux trous.</i>	<i>59</i>
<i>Fig. IV.8 : Variation de la vitesse et la température en fonction du temps avec deux trous ...</i>	<i>59</i>
<i>Fig. IV.9 : Variation de l'humidité et la température en fonction du temps avec deux trous.</i>	<i>60</i>
<i>Fig. IV.10 : Vitesse en fonction du temps avec trois trous.</i>	<i>60</i>
<i>Fig. IV.11 : Variation de la vitesse et la température en fonction du temps avec trois trous.</i>	<i>61</i>
<i>Fig. IV.12 : Variation de la vitesse et l'humidité en fonction du temps avec trois trous.....</i>	<i>61</i>
<i>Fig. IV.13 : Vitesse en fonction du temps avec quatre trous.</i>	<i>62</i>
<i>Fig. IV.14 : Variation de la vitesse et la température en fonction du temps avec quatre trous.....</i>	<i>62</i>
<i>Fig. IV.15 : Variation de la vitesse et l'humidité en fonction du temps avec quatre trous.</i>	<i>62</i>
<i>Fig. IV.16 : Vitesse en fonction du temps avec cinq trous.....</i>	<i>63</i>
<i>Fig. IV.17 : Variation de la vitesse et l'humidité en fonction du temps avec cinq trous.</i>	<i>63</i>

Liste des tableaux

<i>Tab.I.1 : Les possibilités d'utilisation des eaux chaudes de l'aquifère Albien.....</i>	<i>9</i>
<i>Tab.I.2 : Caractéristiques principales du soleil</i>	<i>10</i>
<i>Tab.I.3 : Energie moyenne reçue par kWh/m2/an</i>	<i>19</i>
<i>Tab.II.1 : Echanges entre les différents domaines.....</i>	<i>23</i>
<i>Tab. III.1 : Conditions aux limites appliquées</i>	<i>49</i>
<i>Tab.III.2 : Comparaisons entre résultat numérique pour le 1er maillage et résultat expérimental</i>	<i>54</i>
<i>Tab.III.3 : Comparaisons entre résultat numérique pour le 2ème maillage et résultat expérimental</i>	<i>54</i>
<i>Tab. IV.1 : Différents variations de la vitesse maximale d'écoulement selon les cinq variantes</i>	<i>64</i>

Introduction générale

Depuis le début du siècle dernier, la température moyenne à la surface de la Terre a augmenté d'environ 0,6°C selon le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat. Cette température pourrait augmenter de 1,4 à 4,5°C d'ici 2100. Les signes de ce réchauffement climatique sont de plus en plus nombreux et se manifestent par la fonte des glaciers, l'élévation du niveau de la mer et les vagues de chaleur extrêmes en été, constatées dans de nombreux pays. [1]

Aujourd'hui, plus de 85% d'énergie utilisée dans le monde provient de gisement de combustible fossile (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique.

La limitation de la quantité de ces réserves, la crise successive du pétrole en 1973 et l'accroissement de la demande d'énergie dans tous les pays du monde ont conduit les pays industrialisés à chercher et à développer de nouvelles sources d'approvisionnement. La filière nucléaire était déjà lancée, mais son choix à grande échelle peut amener des conséquences graves, surtout à l'environnement, à cause de la pollution et aussi les accidents nucléaires.

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.

Les chercheurs ont développé une autre forme d'énergie dite « énergie renouvelable ». Ces énergies renouvelables ont toutes l'immense avantage d'être d'origines naturelles, inépuisables et non polluantes puisqu'elles n'émettent pas de gaz favorisant l'effet de serre, CO₂.

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, 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.

L'Algérie avec sa situation géographique, occupe une position privilégiée dans l'exploitation d'énergie solaire avec une durée d'ensoleillement qui varie de 2650 heures /an dans le nord à 3500 heures/an dans le sud, l'une des plus élevées au monde. Elle reçoit le maximum d'énergie lors du solstice d'été (21 ou 22 juin) et le minimum lors du solstice d'hivers (21 ou 22 décembre).

Parmi ces énergies renouvelables, on peut citer la production d'électricité d'origine solaire par une centrale solaire à effet de cheminée.

Comme nous pouvons le comprendre à travers l'intitulé de notre projet « cheminée solaire », l'énergie solaire est au centre de notre étude.

Le système radial de chauffage solaire (Qui est également appelé : centrale à cheminée solaire (CCS)) est une centrale thermique solaire simple qui est capable de convertir l'énergie solaire en énergie thermique dans le collecteur solaire. Dans la deuxième étape, l'énergie thermique générée est transformée en énergie cinétique dans la cheminée et en fin de compte en une énergie électrique en utilisant une combinaison d'une turbine et un générateur.

La convection naturelle est un mécanisme particulièrement important pour l'échange d'énergie et de la masse, entre l'air inclus dans le système et l'extérieur. Elle détermine les modèles aérodynamiques et thermiques à l'intérieur d'une cheminée solaire.

Dans la présente étude nous avons simulé numériquement les transferts de chaleur par convection naturelle laminaire bidimensionnelle (2D) dans une cheminée solaire.

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 étudier l'écoulement d'air dans une cheminée solaire et optimiser cette maquette afin de créer de l'énergie noble, l'électricité, à partir seulement de l'énergie du soleil.

I.1 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.

Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humaine. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique).

La cheminée solaire est un générateur naturel de puissance qui utilise la radiation solaire pour augmenter l'énergie interne de l'air circulant dans le système, ce qui permet de transformer le gain utile du capteur solaire en énergie cinétique d'écoulement qui peut être transformée en énergie électrique au moyen d'une turbine appropriée. L'étude de l'influence de la forme de la cheminée solaire sur les transferts de chaleur s'avère donc très intéressante car elle permet de comprendre les mécanismes qui régissent les phénomènes naturels et d'améliorer les performances de ces systèmes solaires.

Soulignons que le caractère renouvelable d'une énergie dépend non seulement de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée.

I.2 Historique :

Pendant la plus grande partie de son histoire, l'humanité n'a disposé que d'énergies renouvelables pour couvrir ses besoins énergétiques. Au Paléolithique, les seules énergies disponibles étaient la force musculaire humaine et l'énergie de la biomasse utilisable grâce au feu ; mais de nombreux progrès ont permis d'utiliser ces énergies avec une efficacité grandissante. Le progrès le plus significatif a été l'invention de la traction animale, qui est survenue plus tard .

L'invention de la marine à voile a été un progrès important pour le développement des échanges commerciaux dans le Monde, celle des moulins à eau et à vent a également apporté une énergie supplémentaire considérable. Fernand Braudel qualifie de « première révolution mécanique » l'introduction progressive, du XI^e siècle au XIII^e siècle, des moulins à eau et à vent

À la fin du XVIII^e siècle, à la veille de la révolution industrielle, la quasi-totalité des besoins d'énergie de l'humanité était encore assurée par des énergies renouvelables. Dans un essai d'évaluation de la répartition des consommations par source d'énergie, Fernand Braudel estime à plus de 50 % la part de la traction animale, environ 25 % celle du bois, 10 à 15 % celle des moulins à eau, 5 % celle de la force humaine et un peu plus de 1 % celle du vent pour la marine marchande.

L'apparition de la machine à vapeur, puis du moteur Diesel, ont entraîné le déclin des moulins à eau et de l'énergie éolienne au XIX^e siècle ; les moulins à eau et à vent ont disparu, remplacés par les minoteries industrielles. Au milieu du XX^e siècle, l'énergie éolienne n'était plus utilisée que pour la navigation de plaisance et pour le pompage (agriculture, polders). Par contre, l'énergie hydraulique a connu un nouvel âge d'or avec l'hydroélectricité, apparue en Suisse, Italie, France et États-Unis à la fin du XIX^e siècle et également Dans les années 1910, les premiers chauffe-eau solaires individuels apparaissent en Californie , François de Larderel met au point en Italie les techniques d'utilisation de la géothermie ; en 1911, la première centrale géothermique était construite à Larderello, et pour la tour solaire fut formalisé en 1968 par l' ingénieur Joorg Schlaich

Puis, les éoliennes sont réapparues, bénéficiant de techniques plus performantes issues de l'aviation ; leur développement a pris de l'ampleur à partir des années 1990. Le solaire thermique et le solaire photovoltaïque décollent au début des années 2000. [2]

I.3 Les différents types de l'énergies renouvelables :

On désigne aujourd'hui par énergies renouvelables un ensemble de filières diversifiées dont la mise en œuvre n'entraîne en aucune façon l'extinction de la ressource initiale et renouvelable à l'échelle humaine :

- Vent : éolienne, houlomotrice.
- Soleil : thermique, photovoltaïque, thermodynamique.
- Chaleur terrestre : géothermie.
- Eau : hydroélectrique, marémotrice.
- Biodégradation : biomasse.

Les énergies renouvelables sont ainsi multiples et fondamentalement diverses par leurs mécanismes physiques, chimiques ou biologiques.

I.3.1 L'énergie éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

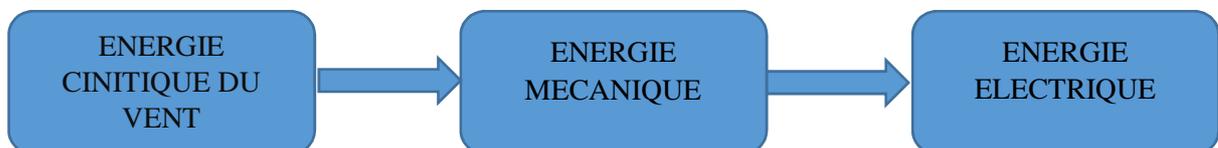


Fig. I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences.

I.3.1.1 Fonctionnement d'une éolienne :

Les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité à un prix aussi bas que possible. Leurs conditions de fonctionnement dépendent essentiellement des conditions de vent sur lesquelles aucune action n'est possible. Par conséquent, on ne peut agir qu'en

limitant, de manière optimale dans certaines conditions, et toujours de manière stricte dans d'autres conditions, l'énergie effectivement convertie par la turbine puis par le générateur électrique, avant transfert vers le réseau.

I.3.1.2 Potentiel éolienne en Algérie :

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 Km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

La carte représentée ci-dessous montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-ouest, avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaïa au Nord et Biskra au Sud. [5]

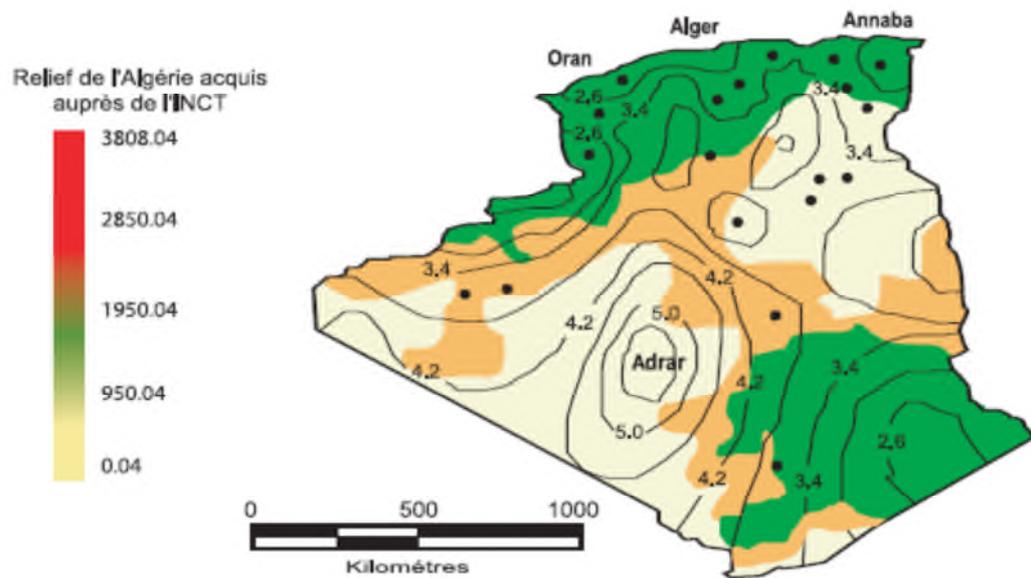


Fig. I.2 : Vitesses moyennes du vent à 10 m du sol. [5]

I.3.2 L'énergie hydraulique :

L'eau, tout comme le Soleil, est indispensable à notre vie. Mais à la différence de notre astre du jour, qui dégage de l'énergie sous forme de rayons chauds et lumineux, l'eau, elle, n'en produit pas directement. C'est son mouvement qui représente de l'énergie.

L'énergie hydraulique fonctionne un peu comme l'énergie éolienne : le mouvement de l'eau fait tourner une turbine qui produit de l'électricité. Plus l'eau coule vite, plus l'énergie produite est importante. Ce mode de production d'électricité est l'un des plus propres et des plus efficaces. Il s'appuie sur une ressource puissante et illimitée qui n'a pas besoin d'être transformée.

L'énergie hydraulique est en fait une énergie cinétique liée au déplacement de l'eau comme dans les courants marins, les cours d'eau, les marées, les vagues ou l'utilisation d'une énergie potentielle comme dans le cas des chutes d'eau et des barrages. Elle peut être convertie en électricité à l'aide de différentes centrales :

- une centrale hydroélectrique utilise l'énergie de la hauteur de chute et du débit d'un cours d'eau ;
- une centrale marémotrice utilise l'énergie des marées ;
- une hydrolienne utilise celle des courants marins ;
- l'énergie des vagues (la houle) peut aussi être exploitée.

I.3.2.1 Potentiel hydroélectrique en Algérie :

La part de capacité hydraulique dans le parc de production électrique total est de 5% ; soit 286 MW. Cette faible puissance est due au nombre insuffisant des sites hydrauliques et à la non-exploitation des sites hydrauliques existants. [5]



Fig. I.3 : parc de production électrique.

I.3.3 L'énergie géothermique

L'énergie géothermique est l'énergie renouvelable par excellence, sa source étant la chaleur terrestre. Son exploitation est simple, rapide, et peu onéreuse en comparaison des autres énergies. Le coût d'entretien d'une centrale géothermique est faible, et La géothermie,

du grec géo (la terre) et thermos (la chaleur) est un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur.

I.3.3.1 Principes et fonctionnement :

Le manteau terrestre étant chaud, la croûte terrestre laisse filtrer un peu de cette chaleur, cependant la plus grande partie de la puissance géothermique obtenue en surface (87 %) est produite par la radioactivité des roches qui constituent la croûte terrestre (désintégration naturelle de l'uranium, du thorium et du potassium).

I.3.3.2 Potentiel géothermique en Algérie :

Les calcaires jurassiques du Nord algérien qui constituent d'importants réservoirs géothermiques, donnent naissance à plus de 200 sources thermales localisées principalement dans les régions du Nord-Est et Nord-Ouest du pays. Ces sources se trouvent à des températures souvent supérieures à 40°C, la plus chaude étant celle de Hammam Meskhoutine (96°C).

Plus au Sud, la formation du continental intercalaire, constitue un vaste réservoir géothermique qui s'étend sur plusieurs milliers de Km². Ce réservoir, appelé communément « nappe albiennne » est exploité à travers des forages à plus de 4 m³/s. l'eau de cette nappe se trouve à une température moyenne de 57 °C. Si on associe le débit d'exploitation de la nappe albiennne au débit total des sources thermales, cela représenterait, en termes de puissance, plus de 700 MW. [5]

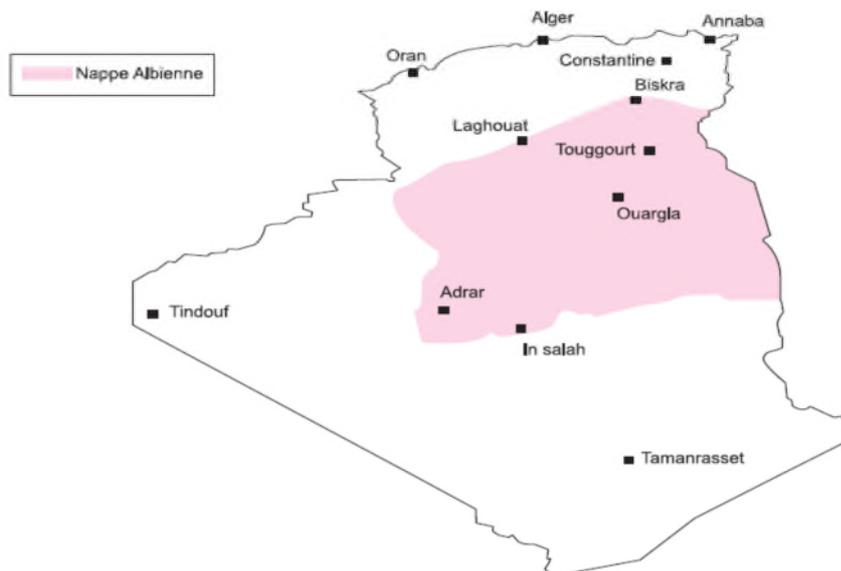


Fig. I.4 : nappe albiennne. [5]

Température de l'eau (°C)	Possibilités d'utilisations
70	Réfrigération (limite inférieure).
60	Elevage d'animaux aquatiques.
50	Chauffage de serre par tuyau aérien.
40	Chauffage urbain limité inférieure.
30	Fermentation, chauffage de serre par paillages radiant.
20	Pisciculture.

Tab.I.1 : Les possibilités d'utilisation des eaux chaudes de l'aquifère Albien.

I.3.4 L'énergie de la biomasse :

La biomasse désigne l'ensemble des matières organiques pouvant se transformer en énergie. On entend par matière organique aussi bien les matières d'origine végétale (résidus alimentaires, bois, feuilles) que celles d'origine animale (cadavres d'animaux, êtres vivants du sol). [3]

La biomasse n'est considérée comme une source d'énergie renouvelable que si sa régénération est au moins égale à sa consommation. Ainsi, par exemple, l'utilisation du bois ne doit pas conduire à une diminution du nombre d'arbres c'est-à-dire le stock est inépuisable.

On distingue trois sources principales de biomasse :

- La biomasse ligneuse, comme le bois, les feuilles mortes, la paille ou le fourrage.
- La biomasse à glucide comme les céréales, la betterave sucrière et la canne à sucre. (La valorisation se fait par conversion biologique, c'est-à-dire par fermentation ou distillation).
- La biomasse oléagineuse qui regroupe les plantes riches en lipide comme le colza et le palmier à huile. (La biomasse oléagineuse est principalement destinée à servir de biocarburant).

I.3.4.1 Potentiel de la biomasse en Algérie :

Potentiel de la forêt :

L'Algérie se subdivise en deux parties : 1 les régions selvatiques qui occupent 25.000.000 hectares environ, soit un peu plus de 10% de la superficie totale du pays. 1 les régions sahariennes arides couvrant presque 90% du territoire. Dans le nord de l'Algérie, qui représente 10% de la surface du pays, soit 2 500 000 hectares, la forêt couvre 1 800 000 hectares et les formations forestières dégradées en maquis 1 900 000 hectares. [5]

Le pin maritime et l'eucalyptus sont des plantes particulièrement intéressantes pour l'usage énergétique : actuellement elles n'occupent que 5% de la forêt algérienne.

Les déjections animales :

La valorisation des déchets organiques et principalement des déjections animales pour la production du biogaz pourrait être considérée comme une solution économique, décentralisée et écologique avec une autonomie énergétique qui permettra un développement durable des zones rurales.

I.3.5 L'énergie solaire :

L'énergie solaire est l'énergie que dispense le soleil par son rayonnement, directement ou de manière diffuse à travers l'atmosphère.

Dans l'espace, l'énergie des photons peut être utilisée, par exemple pour propulser une voile solaire. Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse créée par le règne végétal, dont dépend le règne animal via les chaînes alimentaires. L'énergie solaire est donc à l'origine de toutes les énergies sur Terre à l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice.

L'Homme utilise l'énergie solaire pour la transformer en d'autres formes d'énergie : énergie alimentaire, énergie cinétique, chaleur, électricité ou biomasse. Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou la chaleur obtenue à partir de cette dernière. [4]

I.3.5.1 Le soleil :

Sur le plan cosmogonique le soleil est une étoile quelconque dont ni les propriétés physiques ni la position ne la distinguent des milliards d'autres étoiles forment la Galaxie. Sur le plan humain, cette étoile a une importance primordiale puisque sans elle la vie n'existerait pas sur terre. [41]

Caractéristiques	valeurs
Masse	$1,989 \cdot 10^{30}$ kg
Diamètre	$1,392 \cdot 10^9$ m
Masse volumique moyenne	1410 kg/m ³
Magnitude absolue	+4.83
Magnitude apparente	-26.74
Puissance rayonnée	$3,83 \cdot 10^{26}$ W
Température superficielle	5770 k

Tab.I.2 : Caractéristiques principales du soleil. [41]

La constante solaire :

Une surface plane d'un mètre carré perpendiculaire au rayonnement solaire et située à la limite de l'atmosphère terrestre reçoit une puissance rayonnée fonction de la distance soleil terre. Cette distance variant quelque peu au cours de l'année, compte tenu de la légère excentricité de l'orbite terrestre. On constate que le flux solaire varie peu au cours du temps. Aussi appellent on constante solaire, notée C^* , la valeur moyenne du flux solaire reçue à la limite de l'atmosphère terrestre. On a : $C^* = 1353 \text{ W/m}^2$ [41]

Spectre solaire :

Le spectre du soleil est continue, c'est-à-dire que les photons émis peuvent avoir toutes les énergies possibles et produire ainsi toutes les radiations imaginables mais selon des proportions très différentes selon la bande spectrale considéré.

Éclairement solaire :

L'éclairement correspond à la puissance solaire reçue par une surface plane élémentaire, appelée capteur. On distingue l'éclairement dû aux rayons solaires directe et celui dû au rayonnement solaire diffusé par le ciel ou réfléchi par une surface (le sol, un mur ...). Cet éclairement dépend bien sûr de l'orientation de la surface par rapport au soleil. Les grandeurs seront calculées en W/m^2 et seront notées avec un astérisque "*" .

Irradiation solaire :

On s'intéresse à présent à l'énergie tombant sur une surface donnée. Les quantités qui suivent seront en générale exprimées en kW/m^2 .

I.3.5.2 Nature de l'énergie solaire :

L'énergie solaire provient de la fusion nucléaire d'atomes d'hydrogène qui se produit au cœur du soleil. Elle se propage dans le système solaire et dans l'univers sous la forme d'un rayonnement électromagnétique - de photons selon la théorie corpusculaire.

Chaque jour, la Terre est illuminée par le Soleil. L'une des deux faces du globe terrestre se trouve privé d'énergie solaire - pendant la nuit - en raison de la rotation de la Terre. La puissance solaire reçu en un point du globe varie en fonction de l'heure de la journée, de la saison et de la latitude du lieu considéré.

I.3.5.3 Géographie terrestre :

L'énergie solaire reçue en un point du globe dépend de :

- La latitude, vers l'équateur l'angle d'incidence est proche de 90° donc la surface éclairée est plus petite et l'énergie est plus concentrée.
- La nébulosité (nuages), qui est importante à l'équateur et plus faible en milieu intertropical.
- L'énergie solaire envoyée par le soleil (fluctuations décennales, saisonnières, et ponctuelles).

Le désert des Mojaves dans le sud-ouest des États-Unis est l'une des régions du monde les plus ensoleillées, elle possède une centrale solaire d'une puissance totale de 354 mégawatts.

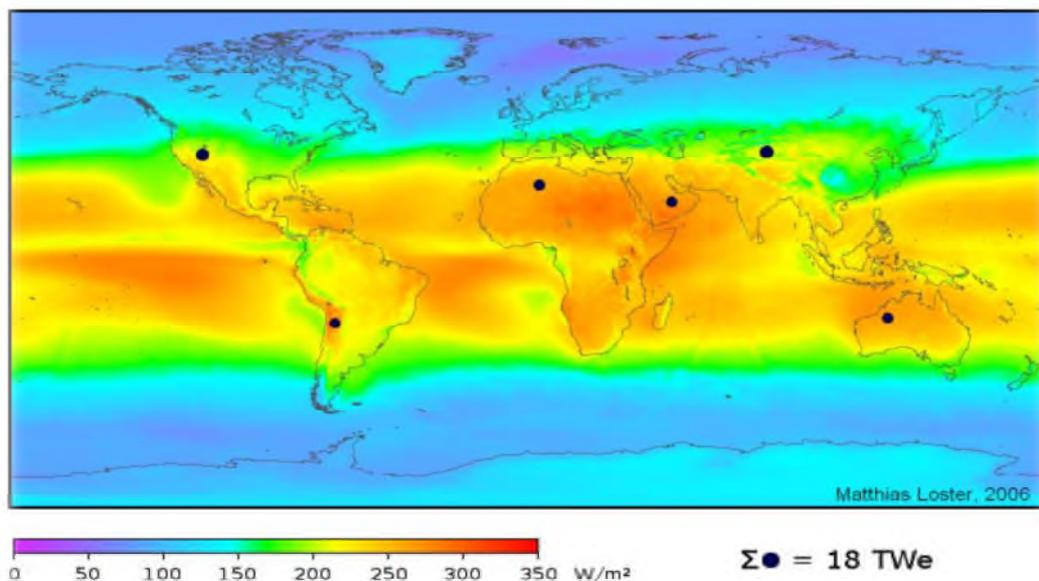


Fig. I.5 : Répartition de l'énergie solaire moyenne reçue au sol.

I.3.5.4 Les trois voies de l'énergie solaire :

Les trois façons d'utiliser directement l'énergie solaire font l'objet de nouveaux développements pour améliorer leurs performances et surtout leur compétitivité économique. La plus ancienne, l'utilisation thermodynamique, connue depuis l'Antiquité, a eu naguère son heure de gloire avec des installations. L'utilisation thermique, pour le chauffage direct de locaux ou de circuits d'eau, reste une solution attractive que garanties, subventions et amélioration technologique contribuent à relancer.

La transformation directe du rayonnement solaire en électricité, le photovoltaïque, constitue la voie potentiellement la plus riche de progrès.

I.3.5.4.a L'énergie solaire thermodynamique :

L'énergie solaire thermodynamique est l'un des modes de valorisation du rayonnement solaire direct. Cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire à l'aide de collecteurs pour chauffer un fluide à haute température et produire ainsi de l'électricité ou alimenter en énergie des procédés industriels. Energie inépuisable et ne produisant ni déchet, ni gaz à effet de serre, l'énergie solaire thermodynamique est particulièrement bien adaptée aux pays dont l'ensoleillement direct est intense. Cette énergie est amenée à se développer



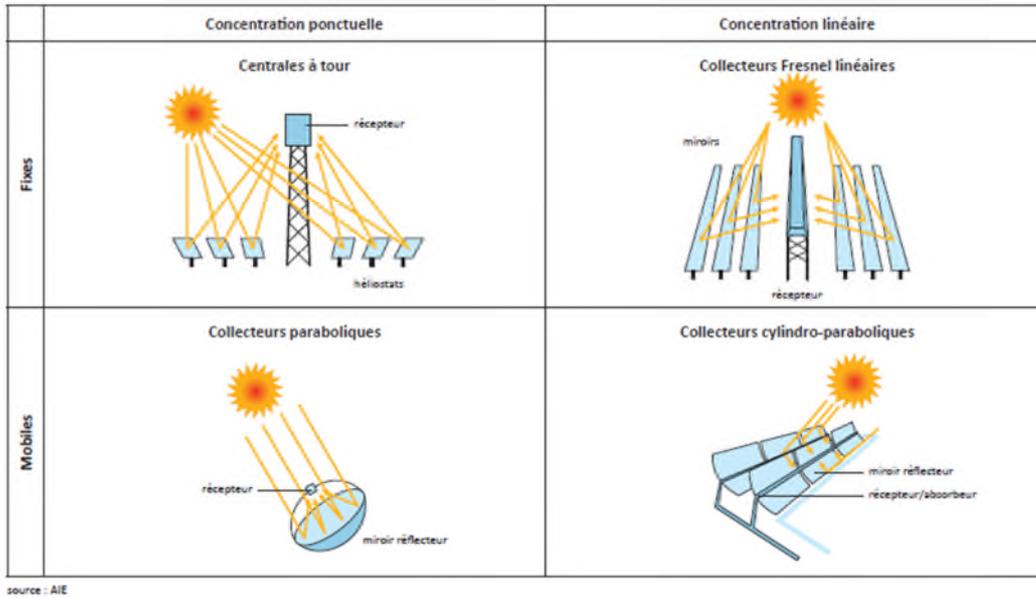
considérablement durant les prochaines années, à l'échelle européenne.

Fig. I.6: Tour de l'énergie solaire thermodynamique.

Les centrales solaires thermodynamiques :

La concentration du rayonnement solaire sur un seul foyer permet d'atteindre des températures élevées. Ce principe, connu depuis l'Antiquité, utilise des capteurs paraboliques, cylindro-paraboliques, ou des centrales dites 'à tour', pour lesquelles une multitude d'héliostats orientables concentrent l'énergie solaire sur une chaudière unique située sur une tour. Il permet le réchauffement des fluides caloporteurs, en générale de l'huile ou des sels fondus, dans une gamme de température allant de 250 à 800 °C, selon les techniques utilisées. Ces fluides viennent ensuite chauffer de la vapeur d'eau, qui entraîne un turboalternateur.

Selon le mode de concentration du rayonnement solaire, une grande variété de configurations différentes est possible :

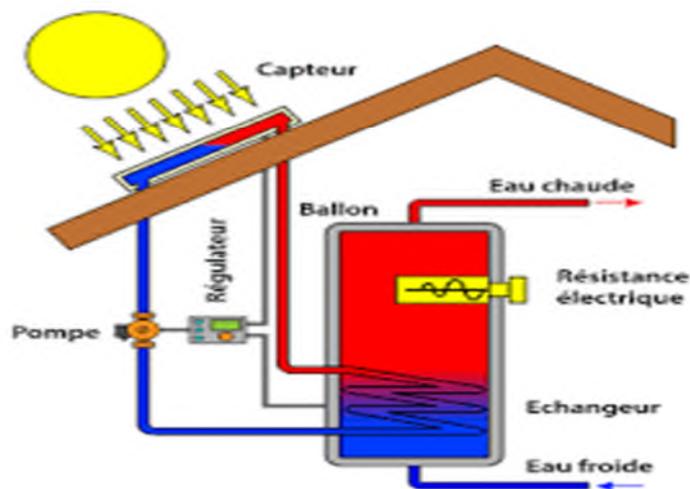


F
ig. I.7:
les

différents centrale solaire thermodynamique.

I.3.5.4.b L'énergie solaire thermique :

L'énergie solaire thermique est une forme d'énergie solaire. Elle désigne l'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz). L'énergie reçue par le fluide peut être ensuite utilisée directement (eau chaude sanitaire, chauffage, etc.) ou indirectement (production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique, production de froid, etc.). L'énergie solaire thermique provient de la chaleur transmise par le soleil par rayonnement et ne doit pas être confondue avec d'autres formes d'énergie solaire et notamment l'énergie solaire photovoltaïque qui utilise l'effet photoélectrique afin de transformer les photons émis par



le soleil en électricité.

Fig. I.8: fonctionnement d'un capteur solaire thermique.

I.3.5.4.c L'Energie solaire photovoltaïque :

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

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



Fig. I.9: cellules photovoltaïques.

I.3.5.5 Les capteurs solaires :

Le capteur solaire est l'instrument utilisé pour transformer le rayonnement solaire en chaleur. Les principes physiques fondamentaux sur lesquels se basent cette production d'énergie sont notamment l'absorption, et la conduction thermique. Dans le cas particulier des systèmes à concentration (centrale solaire thermodynamique, four solaire , etc.).

I.3.5.5.a Les capteurs solaires photovoltaïques :

Les capteurs solaires (ou cellules) photovoltaïques (PV) sont capables de convertir directement le rayonnement solaire en énergie électrique. Les particules de lumière viennent heurter les électrons du matériau semi-conducteur de la photopile et lui transmettent leur énergie (figure I 1). Le matériau semi-conducteur généralement utilisé est le silicium traité qui assure la fonction d'une diode et donc oriente la circulation de tous les électrons dans le même sens faisant apparaître une tension à ses bornes en présence de lumière.

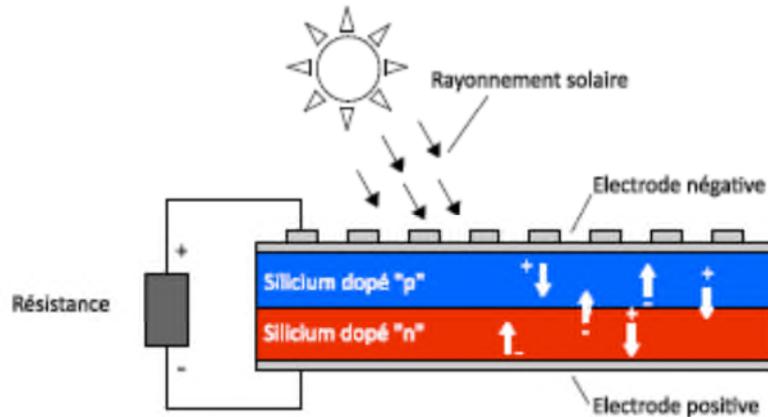


Fig. I.10 : Schéma de principe d'une photopile.

I.3.5.5.b Les capteurs solaires thermiques :

Les capteurs solaires thermiques transforment le rayonnement solaire incident en énergie calorifique par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air...). Il faut distinguer quatre catégories : les capteurs à air, plan, sous vide et à concentration.

Les capteurs solaires à air :

Ces capteurs sont constitués généralement d'un caisson isolé recouvert d'une vitre. L'air froid s'engouffrant dans la partie basse du capteur est réchauffé pour aller directement dans la pièce à chauffer. Ils peuvent aussi être fixés sur un des murs extérieurs du bâtiment à traiter.

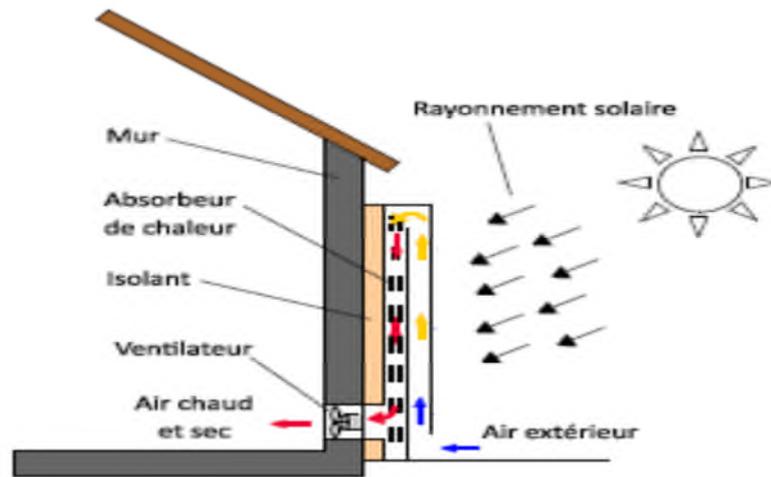


Fig. I.11 : Schéma de principe d'un capteur à air fixé à un mur (mur Trombe).

Les capteurs plans vitrés et non vitrés :

Il faut distinguer les capteurs plans vitrés et non vitrés. Les capteurs plans non vitrés sont constitués de tubes généralement en plastique noir résistant aux ultraviolets dans lesquels circule de l'eau. Ils trouvent leur application à basse température (30°C) pour chauffer l'eau des piscines.

Le capteur plan vitré est le plus répandu. Il est utilisé pour des applications nécessitant des températures moyennes allant de 30°C pour les capteurs à simple vitrage à 90°C pour les capteurs plans à double vitrage.

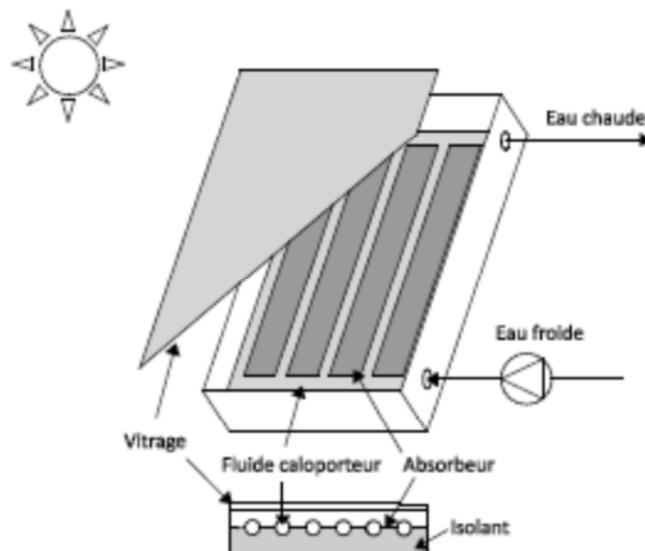


Fig. I.12 : Schéma de principe d'un capteur plan vitré.

Les capteurs sous vide :

On distingue les capteurs sous vide à caloduc et à circulation directe. Les tubes sous vide à caloduc utilisent un mécanisme d'évaporation et de condensation du fluide pour

l'échange de chaleur. Le fluide caloporteur chargé de récupérer la chaleur ne circule pas directement dans les tubes. Il est chauffé par un fluide secondaire qui s'évapore sous l'influence du rayonnement solaire, et se condense au contact de l'échangeur de chaleur.

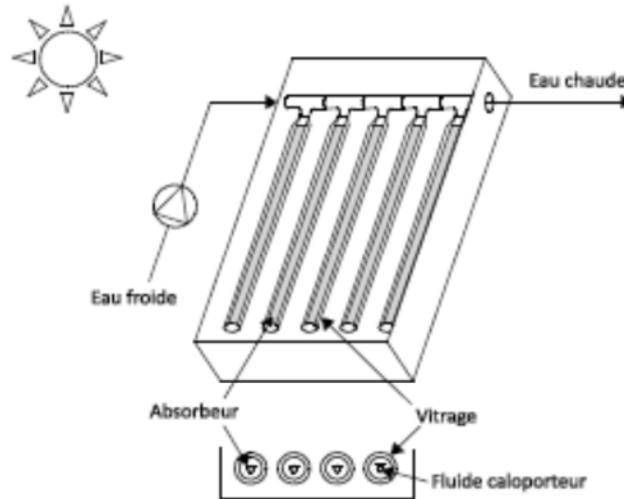


Fig. I.13 : Schéma de principe d'un capteur sous vide.

I.3.5.5.c Les capteurs à concentration ou parabolique :

Le flux solaire reçu par le capteur est d'abord réfléchi sur les miroirs du concentrateur, puis il traverse généralement un vitrage destiné à isoler thermiquement le foyer où il est absorbé par une surface appropriée. La réflexion, la transmission à travers le vitrage, et l'absorption se traduisent par des pertes optiques, caractérisées globalement par une efficacité. Dans les capteurs à concentration élevée, seule la composante directe du rayonnement solaire peut être dirigée vers le foyer, la composante diffuse ne pouvant être concentrée.

Pour atteindre des températures élevées (supérieures à 150°C), il est nécessaire de concentrer les rayons solaires par des jeux appropriés d'éléments réfléchissants (miroirs) ou de lentilles

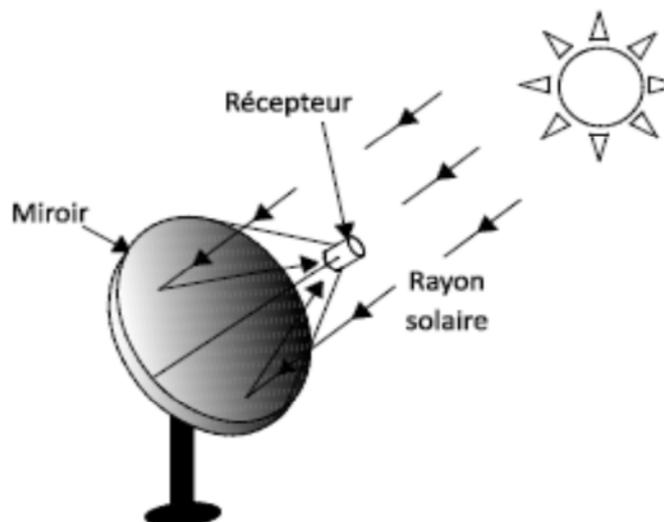


Fig. I.14 : Schéma d'un capteur à concentration.

I.3.5.6 potentiel solaire en Algérie :

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m²/an au Nord et 2263 KWh/m²/an au sud du pays. (Tab.I.1). [5]

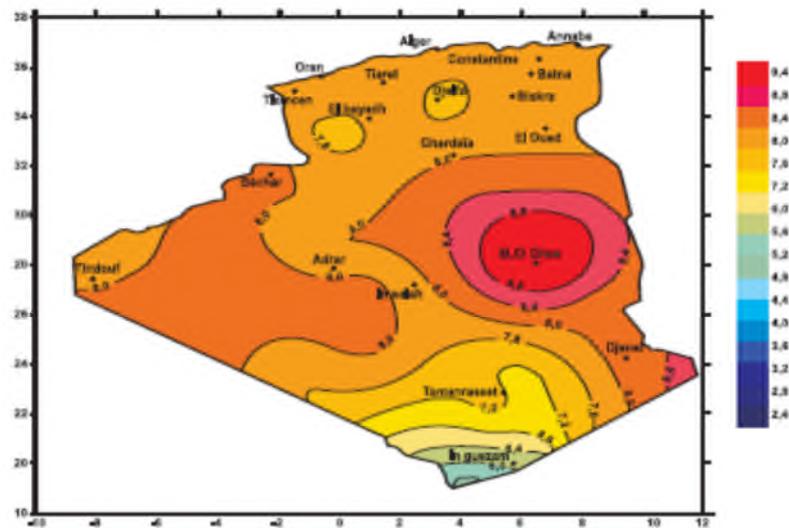


Fig. I.15 : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale au mois de Juillet.

Le potentiel le plus important, en Algérie, est le solaire. Le plus important de tout le bassin méditerranéen.

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'insolation (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tab.I.3 : Energie moyenne reçue par kWh/m²/an.

II.1. Introduction :

Une cheminée solaire (système radial de chauffage solaire) est une centrale à énergie renouvelable construite de manière à ce que l'air d'une serre chauffé par le soleil soit canalisé dans une cheminée, afin d'actionner des turbines pour produire de l'électricité. Ce concept a été inventé en 1903 par le colonel espagnol **Isidoro Cabanyes** comme en atteste la publication *La energía eléctrica* [6], puis décrit en 1931 par **Hanns Günther** [7] et enfin développé et concrétisé par l'ingénieur allemand **Jörg Schlaich** [8] dans les années 80. La tour n'est en fait qu'une cheminée. Son fonctionnement se base sur un principe simple : l'air chaud étant plus léger que l'air froid, il s'élève. Une serre gigantesque, le « collecteur », placée tout autour de la cheminée centrale, chauffe l'air grâce au soleil et provoque un vent puissant, exploité par des turbines situées à l'embouchure de la cheminée pour produire de l'électricité. Pour obtenir un fonctionnement plus régulier, favorable aussi bien sur le plan technique (pour les turbines) que pour le consommateur d'énergie, des systèmes d'accumulation de chaleur sont prévus, pour rendre le système opérationnel pendant les périodes d'intermittence.

II.2. Historique :

Le concept de la tour solaire fut formalisé en 1968 par **Joerg Schlaich** ingénieur et chercheur de nationalité allemande. En 1981 et 1982, un prototype, financé par le Ministère Allemand de la Recherche et des Technologies (BMFT) et réalisé par la société d'ingénierie **Schlaich Bergemann und Partner** (SBP), fut construit à Manzanares (Espagne) et fonctionna jusqu'à son arrêt en 1989. La centrale a pu fournir une puissance de 50 kW en pointe. La turbine a fonctionné 3067h de jour et 244h de nuit (grâce au stockage thermique du sol) en 1987, réalisant ainsi une moyenne de plus de 8h45 par jour. A la suite de cette série d'essais, de nombreuses recherches publiques et privées ont été menées jusqu'à aujourd'hui. Le bureau d'ingénierie d'OTH baptisé Elioth a breveté au début de l'année 2006 le concept de Montagnes Solaires. Fondé sur le même principe, la cheminée est ici remplacée par un conduit qui épouse le relief montagneux. [9]

II.3. Description d'une tour solaire à effet de cheminée :

II.3.1. Définition d'une cheminée solaire :

La cheminée solaire est un moyen de production électrique à partir de l'énergie solaire. Elle repose sur l'idée d'utiliser les mouvements de convection naturelle de l'air chauffé par le soleil. Une immense serre appelée "collecteur" contient et guide l'air chauffé

par le rayonnement solaire. Cet air chaud, naturellement aspiré par la cheminée, est continûment renouvelé par l'air situé à la périphérie de la serre. Equipé de ballons d'eau qui absorbent la chaleur la journée pour la restituer la nuit, un vent régulier se met alors en place. L'énergie cinétique de l'air est ensuite prélevée par un système de turbines et de générateurs. Cette simplicité confère des avantages majeurs en termes de coûts de construction, de maintenance, de robustesse, de durée de vie et d'accessibilité aux pays en voie de développement.

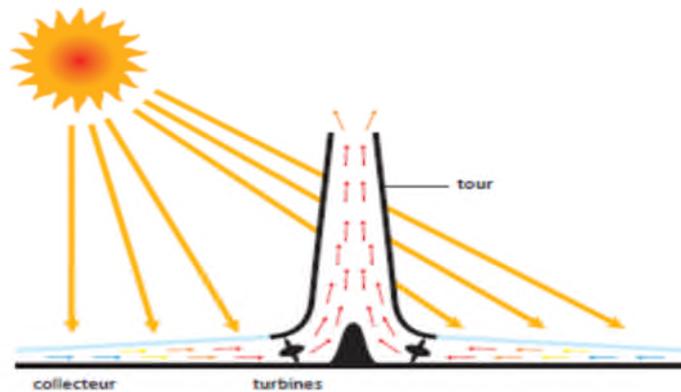


Fig.II.1 : Principe de fonctionnement d'une cheminée solaire.

II.3.2. Les différentes composantes du système : [10]

II.3.2.1. Collecteur :

Le collecteur est composé du sol comme un système de stockage de la chaleur, d'une surface transparente située quelques mètres au-dessus du sol et d'un domaine de circulation de l'air. Celui-ci, ouvert aux deux extrémités, récupère l'énergie solaire incidente en réchauffant et en contenant l'air qui y circule.

L'air est réchauffé par l'absorption du flux solaire, lequel traverse la surface supérieure transparente du collecteur. Il circule au sein du collecteur soumis à des phénomènes de



convection.

Fig.II.2 : collecteur d'une tour solaire.

II.3.2.2. Cheminée :

La cheminée est délimitée par une paroi au centre de laquelle se situe la zone d'écoulement du fluide. Celle-ci crée un appel d'air en sortie collecteur et le potentiel de pression entre le haut et le bas de cette dernière entraîne le fluide dans un mouvement ascendant.



Fig.II.3 : cheminée d'une tour solaire.

II.3.2.3. Turbine :

La turbine est située sur le parcours de l'écoulement du fluide. Elle transforme l'énergie cinétique du fluide en énergie mécanique. Celle-ci sera ensuite transformée en énergie électrique par le biais d'un générateur.



Fig.II.4 : Turbines d'une tour solaire.

Le tableau (II.1) ci-dessous résume les différents paramètres :

Fonction Composantes	Vitrage	Air	Sol	Paroi	Turbine
Collecteur	<ul style="list-style-type: none"> - Conduire l'air. - Conserver la chaleur dans le système. - Permettre l'entrée du flux solaire. 	<ul style="list-style-type: none"> - Porter l'énergie (cinétique et thermique). 	<ul style="list-style-type: none"> - Capter le rayonnement solaire. - Stocker la chaleur. - Transmettre la chaleur - Conduire l'air. 	\	\
Cheminée	\	<ul style="list-style-type: none"> - Porter l'énergie cinétique. 	\	<ul style="list-style-type: none"> - Conduire l'air. 	\
Turbine	\	\	\	\	<ul style="list-style-type: none"> - Récupérer l'énergie

Tab.II.1 : Echanges entre les différents domaines. [11]

II.4. Principe de fonctionnement :

Le principe d'une cheminée tour solaire, comme celle que nous étudions, est très simple. En effet, une grande tour creuse, qui n'est autre qu'une cheminée, est placée au centre d'une serre gigantesque appelée collecteur. L'air s'engouffre sous cette serre et est chauffé par les rayons du soleil. Le fonctionnement de cette cheminée se base sur un principe simple : l'air chaud étant plus léger que l'air froid, il s'élève. Il est donc dirigé vers le haut par convection et le déplacement de l'air permet à des turbines, situées à la base de la cheminée, de produire de l'électricité. De plus, des clapets anti-retour, situés aux ouvertures de la serre au niveau du sol, permettent l'admission de l'air à ce niveau tout en l'empêchant de sortir vers un autre endroit que vers la cheminée.

Les avantages principaux de cette technologie sont : le peu d'entretien nécessaire, un mécanisme simple, la gratuité des rayons du soleil et aussi la quantité inépuisable d'énergie fournie par le soleil. De plus, cette construction ne dégage aucune émission polluante et son fonctionnement est sans intermittence, en effet il fonctionne le jour et la nuit. Le seul inconvénient que l'on pourrait trouver à cette installation est l'investissement de départ.

Nous venons de voir dans le paragraphe précédent que cette construction fonctionne 24h/24, c'est-à-dire jour et nuit. Il est évident que la grande majorité de la production d'électricité se fait le jour étant donné de la luminosité, constamment présente du soleil, mais la nuit, également, le système peut fonctionner à faible régime. En effet, la chaleur résiduelle du sol et le différentiel permanent de température qui existe entre le sol et le point culminant de la tour réchauffe l'air emprisonné sous la serre, et donc permet de créer de l'électricité à faible intensité. Afin d'optimiser cette production nocturne, nous pouvons placer sous la serre des galets qui ont un pouvoir de stockage de chaleur très important.

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.

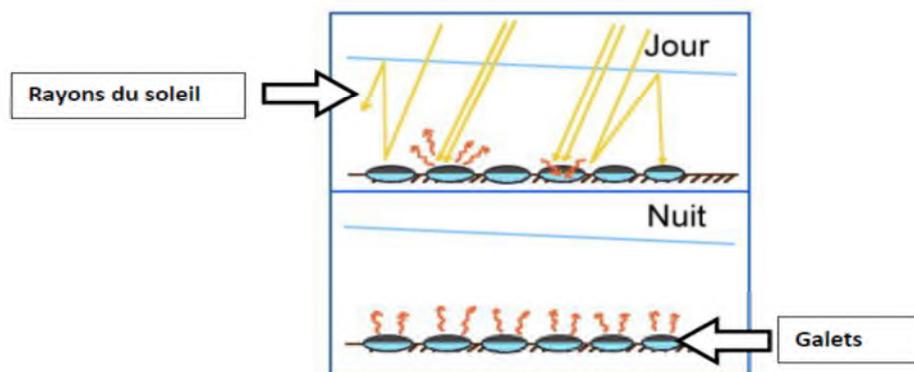


Fig.II.5 : Principe du stockage de chaleur sous la serre utilisant des galets.

L'autre façon d'optimiser la production durant la nuit est de placer, dans la serre, des tuyaux noirs remplis d'eau. En effet, la capacité de stockage de l'eau est non négligeable : (l'eau a une capacité cinq fois supérieur à celle du sol).

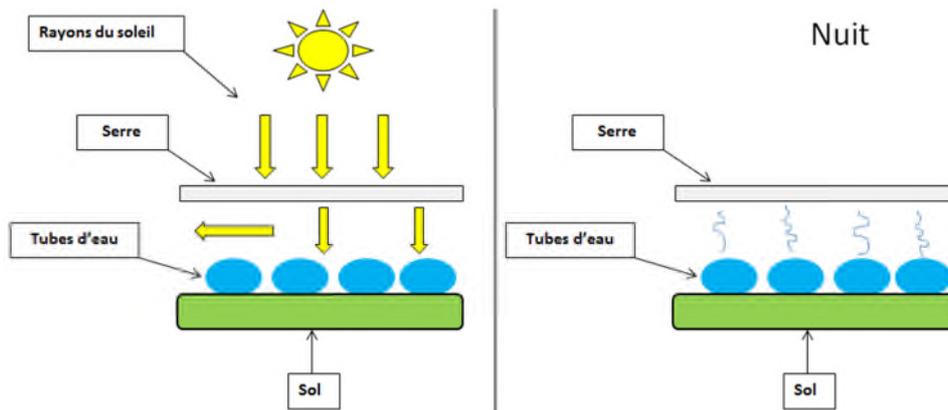


Fig.II.6 : Principe du stockage de chaleur sous la serre utilisant des tubes noirs remplis d'eau.

II.5. 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. 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.

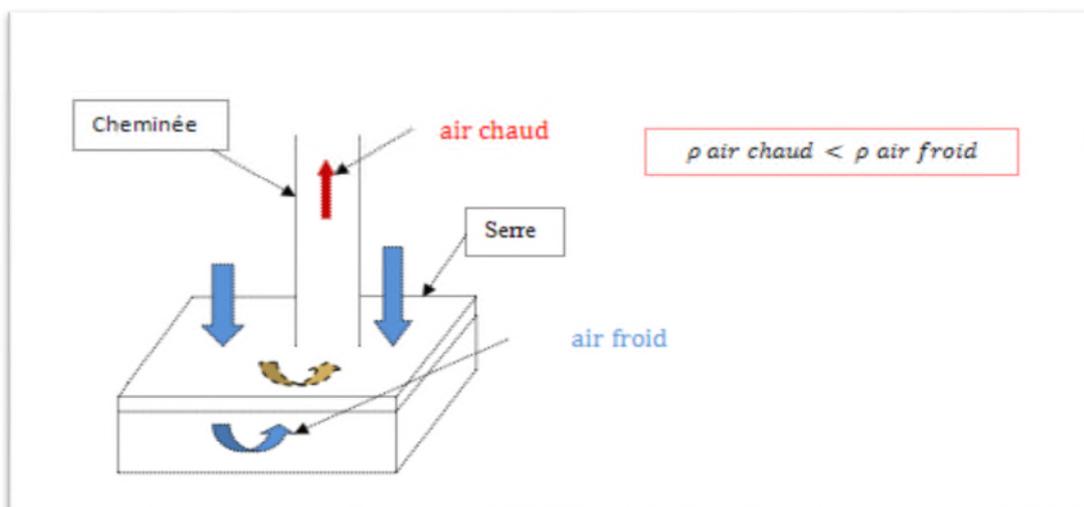
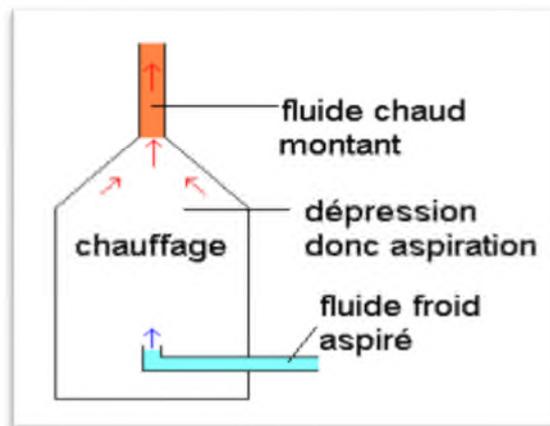


Fig.II.7 : Principe du stockage de chaleur sous la serre.

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.

Fig.II.8 : 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.

II.6. Les différents phénomènes intervenants dans la cheminée solaire :

Si le projet de tour solaire est si intéressant, c'est parce que les différents phénomènes et réactions physiques qui s'y déroulent sont connus décennies et maîtrisés par l'homme depuis des décennies.

II.6.1. L'effet Venturi :

Le nom de cet effet vient du nom du physicien italien Giovanni Venturi. Ce phénomène se traduit par une accélération des particules gazeuses (dans ce cas-là ; l'air) dû à un rétrécissement de leur zone de circulation. Cela entraîne également une baisse de la pression.

II.6.2 L'effet de serre :

Le collecteur de la cheminée solaire est en verre ou plastique qui est transparent au rayonnement de courte longueur d'ondes, mais opaque au rayonnement I.R (de grande longueur d'ondes), permettant de réaliser un effet de serre.

II.6.3 L'effet de convection naturelle :

Quand l'air est chaud, il s'élève et la pression diminue : il y a une dépression. Au contraire, l'air froid descend, la pression augmente : il y a un anticyclone. Entre deux cellules d'air de pression différentes, un vent se crée et va de l'anticyclone vers la dépression. Les particules chaudes sont plus légères que les particules froides, et cherchent à les atteindre : ces particules se dilatent sous l'effet de la chaleur, et sont ainsi moins denses (donc plus légères).

II.6.4 L'effet d'ovalisation :

A été contré dans la tour solaire grâce à des structures circulaires disposées à intervalles réguliers dans la tour, sinon elle se replierait sur elle-même.

II.7 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 : [12]

- 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.

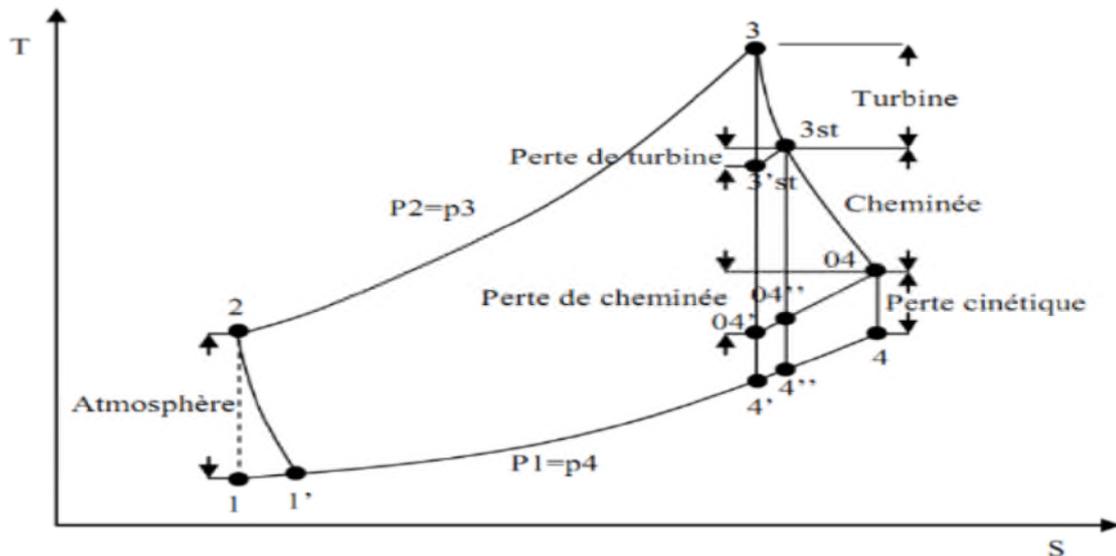
- Le débit massique de l'air est constant.
- Les conditions atmosphériques à l'entrée et à la sortie sont constantes.
- La différence de pression ΔP_{23} dans le collecteur est nulle (elle est négligeable devant celle entre l'entrée et la sortie de cheminée).

Les différentes transformations du cycle théorique de la cheminée solaire sont :

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.

3-3st : Détente isentropique dans la turbine.



3st-4 : Détente isentropique dans la cheminée.

Fig.II.9 : Cycle réel de la cheminée solaire. [13]

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.

II.7.1 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 :

$$\eta_c = \frac{\text{la puissance utile}}{\text{la puissance solaire rapportée au collecteur}} \quad (\text{II.1})$$

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

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'équation de conservation d'énergie est :

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

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

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

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

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

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

$$P_{\text{utile}} = m \cdot C_p \cdot (T_3 - T_4) - m \cdot C_p \cdot (T_{3st} - T_4) = m \cdot C_p \cdot (T_3 - T_4) - m \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (\text{II.4})$$

En remplaçons dans les équations (II.1) et (II.4) la proposition $C = \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}$, donc l'efficacité de la cheminée sera :

$$\eta_c = \frac{P_{\text{utile}}}{Q} = 1 - \frac{1}{C} \quad (\text{II.5})$$

Et de même pour la relation de l'équation (II.3) :

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

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

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

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

$$\text{D'où ; } v_c = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_c \cdot \frac{\Delta T_{23}}{T_2}}$$

La puissance utile peut être écrite aussi comme suit :

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

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

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

$$\Delta P_{tot} = \rho_{coll} \cdot g \cdot H_c \cdot \frac{\Delta T_{23}}{T_2} \quad (\text{II.6})$$

II.7.2 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 :

$$\eta_{coll} = \frac{Q}{(A_{coll} \cdot E)} \quad (\text{II.7})$$

$$\text{On a : } Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T_{23} \text{ avec ; } m = \rho_{coll} \cdot A_c \cdot V_c$$

Donc l'efficacité du collecteur devient ;

$$\eta_{coll} = \frac{\rho_{coll} \cdot A_c \cdot V_c \cdot C_p \cdot \Delta T_{23}}{(A_{coll} \cdot E)} \quad (\text{II.8})$$

II.7.2 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. [14]

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

$$\text{Et ; } \Delta p_{turb,max} = \frac{2}{3} \cdot \Delta p_{tot} \cdot A_c \cdot V_c$$

En remplaçant la relation (II.6) dans la relation précédente, on trouve :

$$\Delta p_{turb,max} = \frac{2}{3} \cdot \rho_{coll} \cdot g \cdot H_c \cdot \frac{T_{23}}{T_2} \cdot A_c \cdot V_c$$

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

Donc la puissance transformée au générateur est :

$$p_e = \frac{2}{3} \cdot \frac{\eta_{coll} \cdot A_{coll} \cdot \eta_{turb} \cdot g \cdot E \cdot H_c}{C_p \cdot T_2} \quad (\text{II.9})$$

II.8 Les avantages et les inconvénients d'une cheminée solaire :

II.8.1 Avantages :

La tour solaire possède de multiples avantages pour la production d'énergie future :

- L'installation est créée pour des zones désertiques donc dépourvues d'intérêts (pas de possibilité d'aménagement) mais riches en soleil.
- Après la construction de la tour, aucun carburant n'est nécessaire à son fonctionnement, donc indépendance énergétique.
- La production d'énergie électrique perdure jour et nuit (des cylindres remplis d'eau et de couleur opaque captent la chaleur le jour et la libèrent la nuit).
- La maintenance nécessaire est peu importante et la structure n'a aucun impact écologique.
- Les 3 matériaux nécessaires à la construction d'une tour solaire sont le béton, le verre et l'acier, disponibles en grande quantité partout dans le monde.
- L'énergie produite est peu chère.
- Des plantations peuvent être créées sous le collecteur.
- Plus de sécurité par rapport au nucléaire surtout à l'heure actuelle.

II.8.2 Inconvénients :

La tour solaire possède quelques désavantages :

- Investissement de départ
- Impact visuel négatif (certains y voient une dégradation du paysage)

- Elle ne peut pas concurrencer le nucléaire en termes de puissance. (7 fois moins puissante qu'un réacteur nucléaire, pour les plus grandes tours, soit 200MW contre 1500MW)
- Lors de la construction, cette structure massive nécessite beaucoup d'expertise en ingénierie.

II.9 Récapitulatif des principaux de tours solaires géantes :

II.9.1 Le 1^{er} concept... : la Cheminée Solaire à courant d'air ascendant :

II.9.1.1 Le prototype grandeur nature à Manzanares, Espagne :

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. À ce jour, la tour solaire de Manzanares en Espagne est la seule réalisation



connue. [15]

Fig.II.10 : la cheminée solaire de Manzanares.

II.9.1.2 Cheminée solaire : projet Espagnol à Ciudad Real :

La tour, la plus haute en Europe s'élancera dans la localité de Fuente el Fresno au centre d'un collecteur solaire en verre d'une superficie de 3500 hectares. La puissance sera de 40 MW et couvrira la demande en électricité de 120 000 personnes. Elle fournira l'équivalent en énergie de 140 000 barils de pétrole et évitera l'émission dans l'atmosphère de 78 000

tonnes de dioxyde de carbone. Budget : 240 millions d'euros ; en collaboration avec la compagnie allemande Schlaich Bergermann, par les sociétés espagnoles IMASA et CAMPO3. [16]

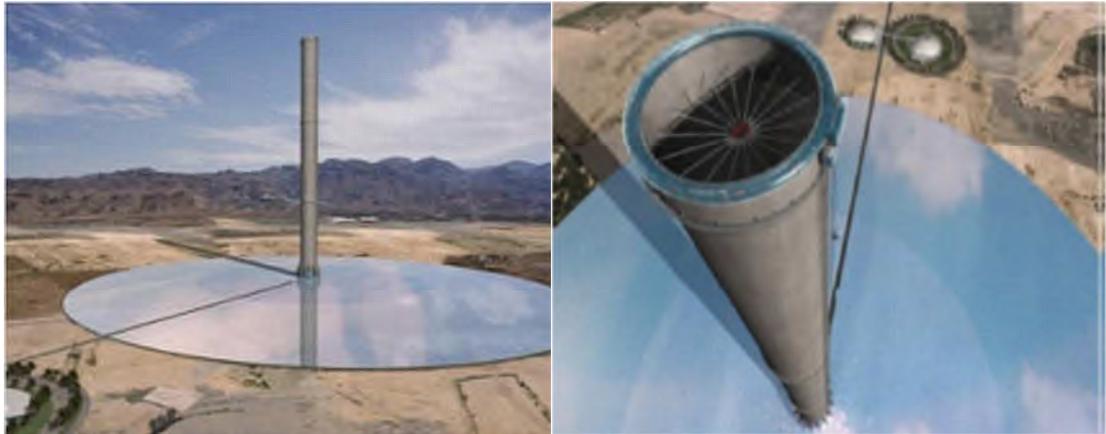
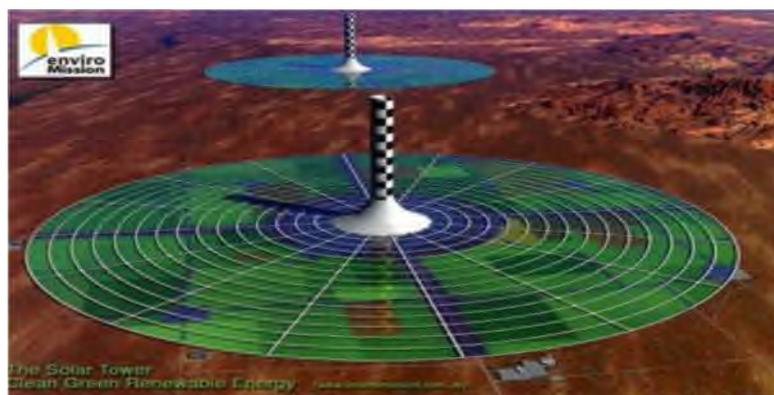


Fig.II.11 : projet Espagnol à Ciudad Real.

II.9.1.3 Cheminée solaire : projet Australien :

Un projet de tour solaire, appelé Projet de Buronga, prévu pour 2011, est actuellement développé en Australie par la société « Enviro Mission ». La cheminée aurait 990 mètres de hauteur, 70 mètres de diamètre. 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. [16]

Fig.II.12 : projet Australien.

II.9.1.4 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

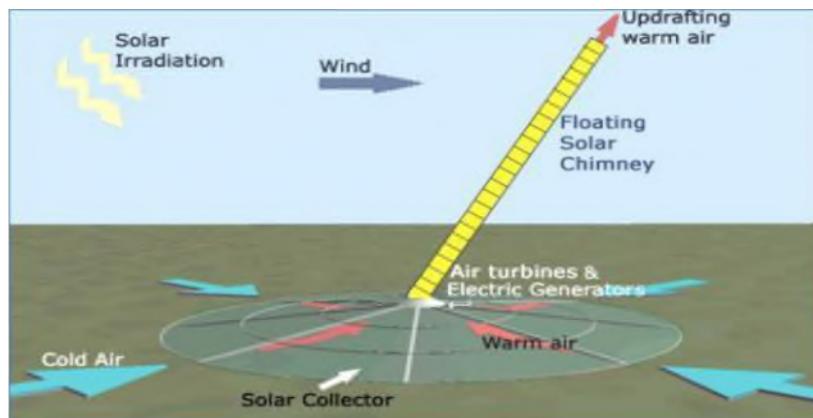


prévu 01 milliard de dollars. [17]

Fig.II.13 : projet Namibienne.

II.9.1.5 Cheminée solaire « Flottante » :

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 ex. à l'hélium. **Une partie fixe et lourde au sol** permet son inclinaison, la partie montante et légère étant constituée de « boudins gonflés



».

Fig.II.14 : Cheminée solaire Flottante.

II.9.1.6 Montagne solaire :

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.

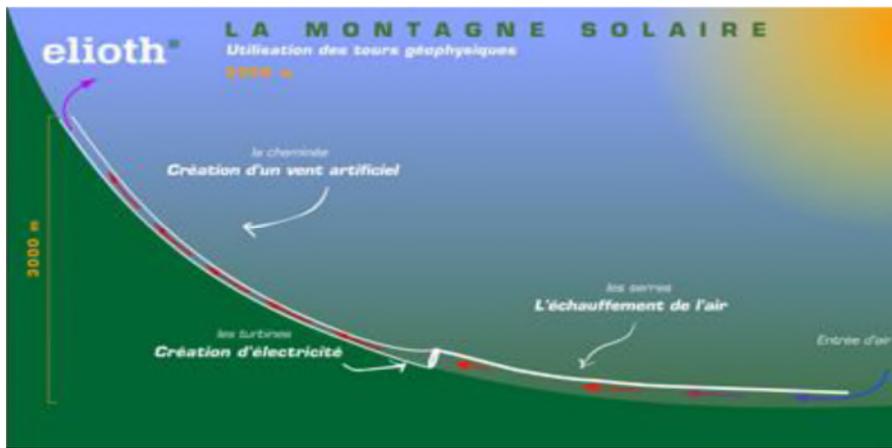
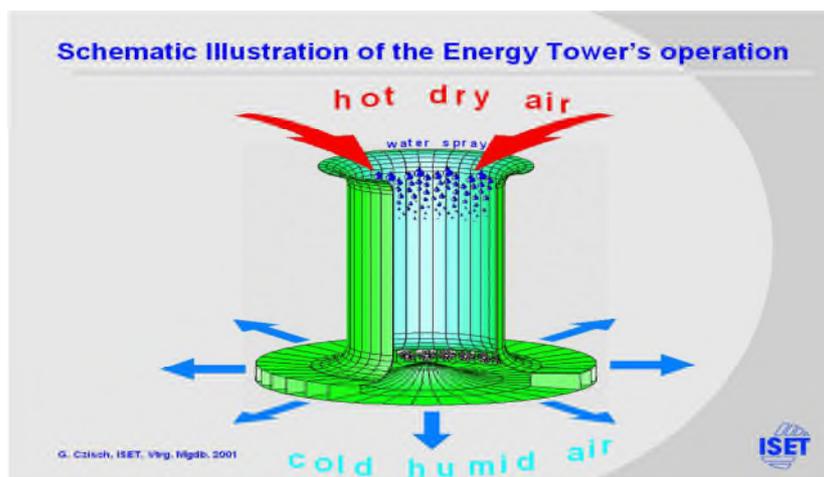


Fig.II.15 : Principe d'une montagne solaire.

II.9.2 Le 2ème concept... : Tours énergétiques :

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 ».

Une Tour Énergétique 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 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.

Fig.II.16 : Principe d'une tour solaire énergétique.

II.9.3 Un 3ème concept... : 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.



Fig.II.17 : VORTEX de l'inventeur Nazare.

II.10 Revue bibliographies :

II.10.1 Premiers pas et développements récents :

Une des premières descriptions d'une centrale cheminée solaire a été écrite en 1903 par **Isidoro Cabanyes**, un colonel d'artillerie espagnole. Il a communiqué la proposition « Proyecto de motor solar » (projet de moteur solaire), la présentation d'un appareil se composant d'un chauffage aérien attaché à une maison avec une cheminée. Dans l'intérieur de la maison, une sorte d'hélice de vent a été placée avec le but de production d'électricité, comme montré dans la (*Fig.II.18*). [18]

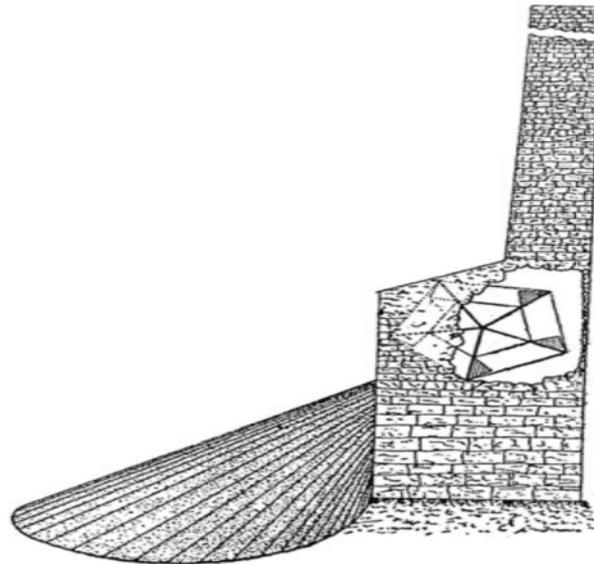


Fig.II.18 : Projet de moteur solaire proposé par Isidoro Cabanyes. [18]

En 1926, le professeur ingénieur **Bernard Dubos** a proposé à l'académie française des sciences, la construction d'une centrale aéro-électrique solaire en Afrique du Nord avec sa cheminée solaire sur le versant de la montagne de grande hauteur, (**Fig.II.19.**). [18]

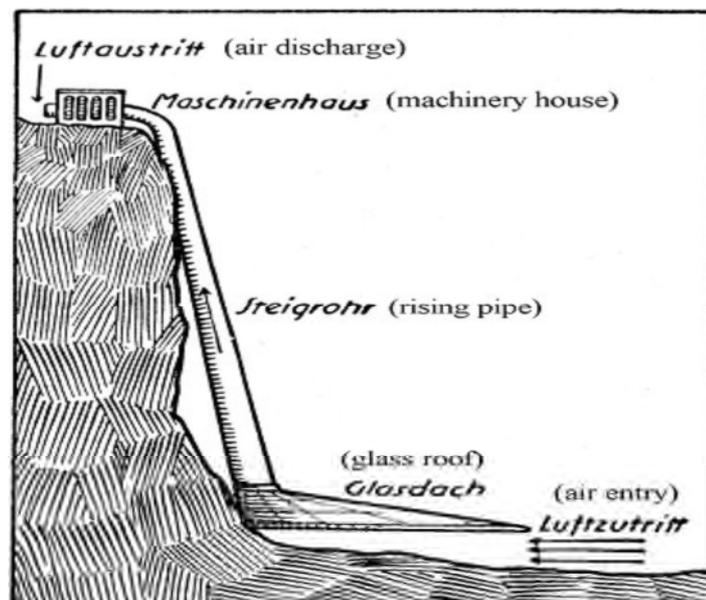


Fig.II.19 : La cheminée solaire présentée par Bernard Dubos. [18]

II.10.2 Etudes théoriques :

Mullett [43] a commencé le développement d'un modèle théorique opérationnel pour la cheminée solaire en dérivant le rendement global et les données de performance pertinents. Dans son calcul, le rendement global est proportionnel à la hauteur de la cheminée.

Il en conclut que la cheminée solaire est essentiellement un générateur de puissance de grande échelle. Le rendement de la cheminée est donné par l'équation **(II.10)**.

$$\eta_t = \frac{g.H}{C_p.T_0} \quad \text{(II.10)}$$

Avec :

g : L'accélération de pesanteur (m/s²)

T_0 : La température ambiante (K)

C_p : La capacité thermique massique (J/kg. K)

H : La hauteur de la cheminée (m)

Basé sur les données du prototype de Manzanares, **Padki & Sherif**, [11] ont conduit une recherche sur la viabilité de produire de l'électricité par les cheminées solaires à moyenne et à grande échelle.

À la fin des années 90, **Pasumarthi & Sherif** [44] ont construit un prototype de cheminée solaire à petite échelle pour étudier l'effet de différents paramètres géométriques sur la température de l'air, la vitesse de l'air et la puissance de la cheminée solaire. D'autres études ont été menées par **Pasumarthi & Sherif** [45], ils ont exploité la performance du collecteur en étendant la base de collecteur et en introduisant un absorbeur intermédiaire. D'après eux, les deux améliorations ont contribué à accroître la puissance globale à la sortie de la cheminée. En outre, une brève évaluation économique des coûts du système est présentée.

La première tentative connue de résoudre par CFD (Computational Fluid Dynamics) le flux convectif dans une Cheminée Solaire est fait par **Bernardes, et al.** [46]. Ils ont présenté une solution pour les équations de Navier-Stokes et de l'énergie pour la convection naturelle laminaire en régime stationnaire. L'approche de la méthode des volumes finis en coordonnées généralisées a été employée.

Kröger & Blaine [47] ont évalué l'influence des conditions ambiantes. Leurs travaux montrent que l'humidité de l'air peut augmenter le potentiel de conduire de l'air et sous certaines conditions la condensation peut se produire.

Kröger & Buys [48] ont développé des relations analytiques pour déterminer la différence de pression due aux effets de frottement et des corrélations de transfert de chaleur pour le développement du flux radial entre le toit et le collecteur.

Gannon & von Backström [49], se sont penchés sur une analyse thermodynamique idéale du cycle d'écoulement d'air, supposé comme gaz parfait isentropique, à travers une CCS. Ils se sont intéressés, dans une première partie, à définir les limites de fonctionnement du système en question et ont essayé de se rapprocher du cas réel en introduisant les pertes par frottement à travers le système ainsi que les pertes cinétiques à la sortie de la cheminée et le système de turbine, tout en adoptant un modèle simple qui incluse le fort couplage existant entre le débit d'air et l'élévation de la température à travers le collecteur.

Bernardes, et al. [50] ont élaboré une analyse portant sur les cheminées solaires et visant le développement d'un modèle analytique et numérique permettant de décrire les performances des cheminées solaires. Ce modèle a été élaboré pour estimer la puissance de sortie des cheminées solaires ainsi que d'examiner l'effet de diverses conditions ambiantes et des dimensions structurelles caractéristiques sur la puissance développée. Les résultats du modèle mathématique ont été comparés avec les résultats expérimentaux collectés sur la centrale de Manzanares, pour être ensuite utilisé pour prédire les performances caractéristiques des CCS à grande échelle à caractère commercial. Ces résultats montrent que la hauteur de la cheminée, le facteur de chute de pression à la turbine, le diamètre et les propriétés optiques du collecteur sont des paramètres importants pour la conception des cheminées solaires. Les auteurs ont déduit que la puissance maximale peut être atteinte lorsque le facteur de chute de pression à la turbine est égal à environ 0,97.

Schlaich, et al. [51] présentent une étude économique des centrales CCS ; en décrivant une théorie simplifiée sur les CCS. Puis ils présentent la réalisation et le fonctionnement du prototype de Manzanares. Cette étude a tracé les grandes lignes des études technico- économiques de base pour de futures installations CCS. Cette étude est employée dans le développement du prototype de l'Australie. Les auteurs ont bien apporté des réponses aux questions soulevées concernant la technologie des CCS en exposant les inconvénients ! Tout en justifiant les avantages que peut apporter un tel système.

Pastohr et al. [52] ont utilisé le logiciel FLUENT pour modéliser la centrale CCS semblable géométriquement à celle de Manzanares dans le but d'effectuer une analyse avec plus de détail du mode de fonctionnement et du rendement du système. Ils ont confirmé que la chute de pression dans la turbine et le débit massique sont des éléments décisifs sur l'efficacité du système et ne peuvent être déterminés uniquement par l'accouplement de toutes les parties d'une centrale CCS. Les résultats numériques donnés par FLUENT rivalisent bien avec les résultats donnés par un modèle simple proposé par les auteurs, ce qui a conduit à la

conclusion de pouvoir employer ce dernier tout simplement pour des études paramétriques en vigueur.

II.10.3 Analyses pour des sites spécifiques :

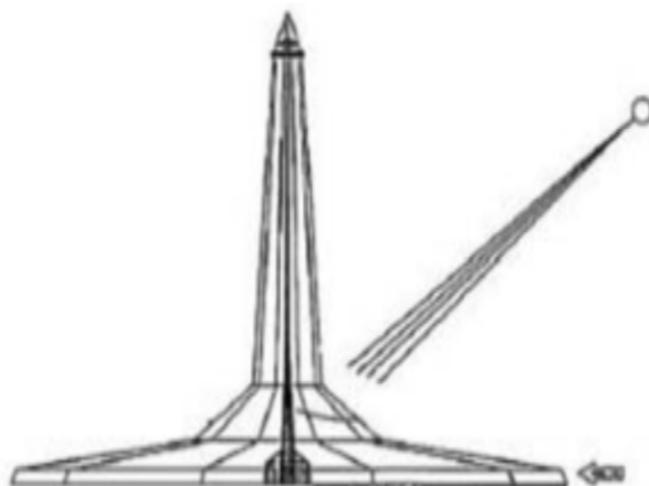
Dai et al. [53] ont présenté, dans leur article, une méthode itérative basée sur un modèle global de connaissance régissant l'écoulement d'air dans une cheminée solaire typique fictive et fonctionnant dans trois régions isolées de nord-ouest de la Chine. Selon les auteurs, une CCS constituée d'une cheminée de 200m de hauteur et de 10 m de diamètre et un collecteur de 500m de diamètre peut produire 110~190kW d'électricité sur une moyenne mensuelle toute l'année. **Bilgen et Rheault** [54] ont développé un modèle mathématique basé sur des données météorologiques moyennes mensuelles et le cycle thermodynamique pour simuler la production d'énergie de la CCS aux latitudes élevées. Trois emplacements au Canada, à savoir Ottawa, Winnipeg et Edmonton ont été choisis afin d'évaluer une centrale de production de puissance nominale de 5 MW.

II.10.4 Etudes expérimentales :

Le premier prototype de centrale à cheminée solaire fut effectivement construit à Manzanares (ville espagnole à 150 kilomètres de Madrid) sous la direction de l'ingénieur allemand **Jörg Schlaich** [8], et grâce aux fonds du Ministère allemand de la recherche et de la technologie [9,19]. Cette cheminée mesurait 194 mètres pour une puissance de 50 kW et a fonctionné jusqu'en 1989. Elle fut arrêtée en raison d'un coût du kilowatt-heure, cinq fois plus élevé qu'une centrale thermique classique.

En 1983, **Krisst** [20] a construit une petite installation expérimentale de 10W de puissance. Le diamètre de la base du collecteur et la hauteur de la cheminée étaient de 6 m et 10 m respectivement. En 1985, **Kulunk** [21] a réussi à produire 0.14W d'électricité à partir d'un système à échelle réduite, une tour de 2 m et un collecteur de 9 m², à Izmir en Turquie.

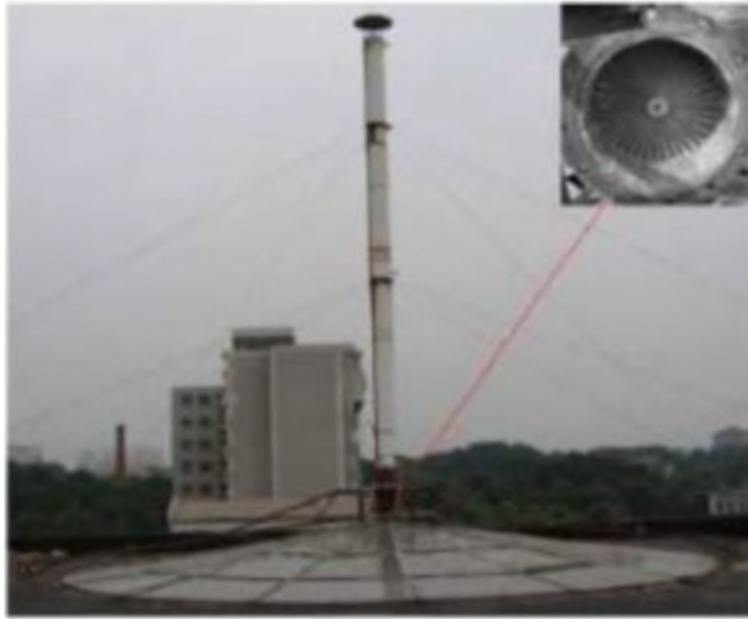
En 1997, une CCS (**Fig. II.20**) dotée d'une tour de forme conique de 7.92m de hauteur et d'un collecteur de 9.15m de diamètre a été construite par **Pasurmarthi et Sherif en**



Floride. [22, 23]

Fig.II.20 : Schéma du prototype de Pasurmarthi et Sherif. [22, 23]

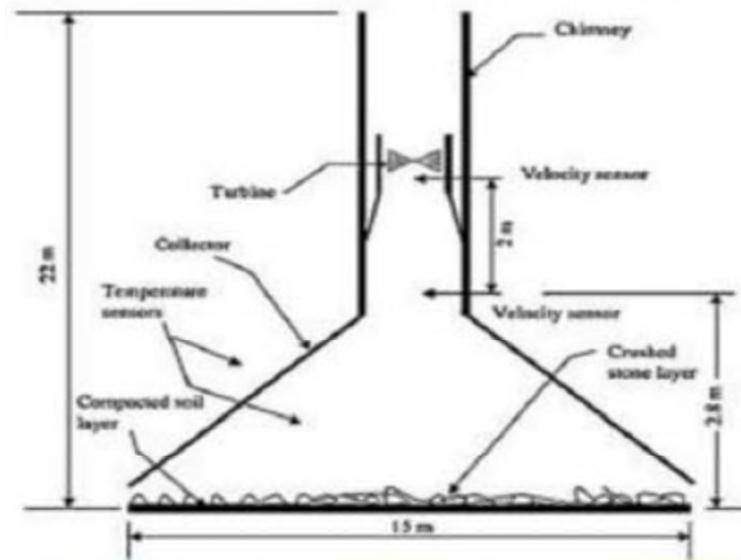
En 2002, une installation pilote d'une CCS (**Fig. II.21**) composée d'un collecteur d'air de 10m de diamètre et d'une tour de 8m de hauteur a été construite à **Wuhan en Chine**.



[24,25]

Fig.II.21 : Prototype de Zhou et al. [24, 25]

En se basant sur le besoin d'installations pour des stratégies d'énergie à long terme, le ministère de la science et de la technologie du Botswana a conçu et réalisé une installation d'une CCS pour la recherche, [26] (**Fig. II.22**). La tour, de 22 m de hauteur et 2 m de diamètre, était fabriquée de polyester renforcé par le verre, soutenu par une structure en acier, le toit du collecteur, de 15 m de diamètre et de 5mm d'épaisseur, a été fabriqué par du verre



clair.

Fig.II.22 : Schéma du prototype de *Botswana*. [26]

Une CCS d'une tour de 11 m de hauteur et d'un collecteur d'un mètre de diamètre (**Fig.II.23**) a été construite dans le campus universitaire de **Universidade Federal de Minas Gerais**, à Belo **Horizonte, Brazil** [27,28]. Sa tour est un ensemble de 05 modules en bois de forme cylindrique de 2.2 m de hauteur chacun, couverts intérieurement et extérieurement de fibres de verre. Son collecteur de 25 m de diamètre et de 0.5 m fabriqué en utilisant un film de



plastique soutenu par une structure tubulaire en acier.

Fig.II.23 : Image du prototype de *Ferreira et al.* [27,28]

Une autre installation pilote d'une CCS de 15 m de hauteur et d'un collecteur de 16 m de diamètre a été également montée dans le campus de l'université de Suleyman Demirel, à



Isparta en Turquie [29] (**Fig.II.24**).

Fig.II.24 : Image du prototype de **Koyun et al.** [29]

Un petit prototype faisant la combinaison d'un bassin solaire d'approximativement 4.2 m de diamètre et de 1.85 m de profondeur et d'une CCS d'une tour de 8 m de hauteur et de 0.35 m de diamètre (**Fig.II.23**) a été construit par **Golder** [30,31] dans le campus de l'université de RMIT, à *Bundoora en Australie* en 2002.



Fig.II.25 : Image du prototype de **Golder.** [30]

Un modèle de système de cheminée solaire à petite échelle a été mis en place par **Ming, et al** [32]. La distribution de la température du système en fonction du temps et de l'espace, ainsi que la variation de vitesse à l'intérieur de la cheminée dans le temps, a été mesurée.

II.10.5 Analyse structural :

Harte & Van Zijl [33] ont présenté quelques aspects structurels pour les turbines classiques, comme leur charge dynamique et le degré de réaction ainsi que leur comportement en fatigue. Pour le concept de cheminée solaire, les défis structurels concernant l'action du vent, les fréquences propres, la rigidification et l'optimisation de forme avec une attention particulière sur les ailettes de guidage d'entrée sont discutés.

II.10.6 Analyse écologique :

Bernardes [34] a effectué une évaluation complète des impacts causés par la masse et les flux énergétiques des systèmes de cheminées solaires de sa conception à la production, puis l'élimination finale à l'aide de la méthode d'analyse de cycle de vie. La méthode d'analyse

du cycle de vie classique a été améliorée par une analyse sectorielle supplémentaire (analyse input-output), notamment l'approche hybride. L'étude est une contribution importante pour l'intégration de l'évaluation du cycle de vie dans le processus de décision dans le secteur des énergies renouvelables.

II.10.7 Analyse économique :

Une étude fondamentale sur le prototype de CCS espagnol a été réalisée par **Haaf et al.** [9]. Dans leur article, les auteurs ont analysé brièvement le bilan énergétique, les critères de conceptions et l'analyse des coûts.

Pretorius et Kröger [35] ont entrepris une étude thermo-économique pour l'optimisation d'une installation électrique à cheminée solaire à grande échelle, grâce à de multiples simulations informatiques.

Une étude développée par **Fluri, et al** [36] a révélé que les modèles économiques précédents ont peut-être sous-estimé le coût initial et le coût moyen de l'électricité d'une installation de cheminée solaire à grande échelle. Elle a également montré que les crédits de carbone de manière significative peuvent réduire le coût moyen de l'électricité pour une telle installation.

III.1 Introduction :

Les écoulements de fluide en régime laminaire, sont décrits par le système d'équations aux dérivées partielles. Ainsi, tous les phénomènes de transport sont régis par ce système formé par les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie, qu'il convient de résoudre pour connaître les caractéristiques des champs thermique et d'écoulement. Pratiquement impossible de trouver une solution analytique exacte à de tel systèmes du fait que les équations citées si dessus soient très complexes, c'est-à-dire non-linéaires d'une part et couplées d'autre part. Dans ce cas le recours à la résolution numérique s'impose et nous incite à choisir la méthode numérique adéquate pour obtenir les meilleures approximations.

Parmi les méthodes de discrétisation les plus fréquemment utilisées dans les problèmes d'écoulements et de transfert de chaleur, on peut citer les méthodes des différences finies, d'éléments finis et des volumes finis.

Dans cette présente étude, la résolution numérique des équations de quantité de mouvement, d'énergie et de l'équation de continuité, est faite par la méthode des volumes finis. Elle est avantageuse, puisque :

- Elle garantit la conservation de masse et de quantité de mouvement dans tout le domaine de calcul.
- Elle facilite la linéarisation des termes de sources d'énergie.
- Elle permet un traitement plus facile des milieux hétérogènes.

La méthode des volumes finis présentée par **Patankar** [37] consiste principalement à diviser le domaine physique en un nombre fini de petits volumes adjacents qui seront nommés volumes de contrôle. Chaque volume de contrôle contient un point placé en son centre appelé nœud. Les fonctions discrétisées qu'on calculera, auront leurs valeurs aux nœuds, chaque nœud considéré sera entouré de quatre nœuds voisins noté par W (ouest), E (est), N (nord) et S (sud).

III.2 Méthode numérique :

III.2.1 Présentation du problème physique :

Nous considérons une cheminée solaire contenant un fluide incompressible (air). La surface du toit et le sol crée un gradient vertical de température (parois actives) (**Fig.III.1**).

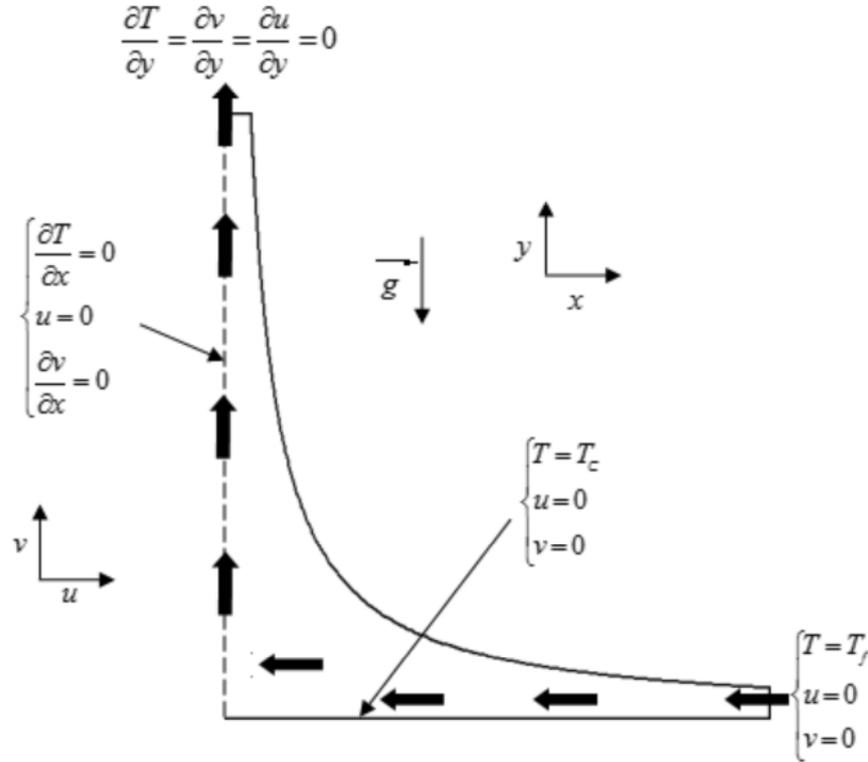


Fig. III.1 : Présentation du problème physique étudié et conditions aux limites.

III.2.2 Hypothèses simplificatrices :

Les hypothèses utilisées sont les suivantes :

- Un écoulement de fluide *incompressible*.
- Nous supposons être dans le cadre de *l'approximation de Boussinesq*, qui consiste à considérer que la masse volumique (ρ) du fluide ne varie que dans le terme des forces de volume (pesanteur), dont les variations avec la température, supposées linéaires engendrent la convection naturelle. Ces variations sont alors traduites par une équation d'état qui relie la masse volumique à la température. L'équation d'état est donc:

$$\rho = \rho(P, T) = \rho_0 [1 - \beta(T - T_{ref})] \quad (\text{III. 1})$$

Où :

β : est le coefficient de dilatation à pression constante.

T_{ref} : est la température de référence.

ρ_0 : est la masse volumique à T_{ref}

Au niveau de tous les autres termes la masse volumique est constante est égale à ρ_0 .

- Les propriétés physiques du fluide sont supposées **constantes**.
- La puissance volumique dissipée est négligeable.
- Le flux de dissipation visqueuse de la chaleur est négligeable.
- Pas d'échange par rayonnement au sein du fluide.
- Le problème est bidimensionnel et laminaire.

III.2.3 Formulation mathématique :

III.2.3.1 Equations générales :

Les équations exprimant les phénomènes d'écoulements sont principalement celles des dérivées des lois physiques de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie.

III.2.3.1.a Formulation vectorielle :

Après introduction des hypothèses données ci-dessus, on peut considérer que les équations suivantes décrivent le phénomène de la convection naturelle à l'intérieur de la cheminée solaire :

Equation de continuité :

C'est l'équation qui exprime la loi de la conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel :

$$\text{div}(\vec{v}) = 0 \quad (\text{III. 2})$$

Equation du mouvement :

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide et son mouvement et les causes qui le produisent. Où on peut indiquer que le taux de variation de quantité de mouvement contenu dans le volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont appliquées. Elle s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}})\vec{v} = \frac{\rho}{\rho_0} \vec{g} + \frac{\Delta k}{\rho_0} \quad (\text{III. 3})$$

Equation de la chaleur

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie, soit :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}})\vec{v} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \nabla^2 T \quad (\text{III. 4})$$

Avec :

\vec{v} : vitesse du fluide.

\vec{g} : accélération de la pesanteur.

K : tenseur des contraintes.

λ : conductivité thermique du fluide.

C_p : capacité calorifique massique à pression constante du fluide.

T : température du fluide.

t : temps

III.2.3.1.b Formulation des équations en coordonnées cartésiennes :

En tenant compte des hypothèses ci-dessus, les équations de base s'écrivent respectivement :

Equation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{III. 5})$$

Equation du mouvement :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{III. 6. a})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + g\beta Td + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (\text{III. 6. b})$$

Equation de la chaleur :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{III. 7})$$

III.3 Problème en 2D :

Notre objectif est d'analyser l'effet de la géométrie sur le transfert thermique et l'écoulement de l'air dans le système de prototype de « cheminée solaire » conçu par nos soins. Pour cette raison, nous avons présenté essentiellement les champs de vitesse ainsi de pression dans le cas stationnaire pour deux maillages différents.

III.3.1 Utilisation du GAMBIT :

Le maillage est conçu par l'utilisateur à l'aide du GAMBIT. Celui-ci permet de construire trois types de grille de calcul, structurée, non structurée ou hybride.

- Maillage structuré (quadrilatères/hexagones), il est plus facile de le générer en utilisant à multi bloc.
- Maillage non structuré (tri/tétra), les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition.
- Maillage hybride, maillage généré par un mélange d'éléments de différents types (structuré et non structuré).

Dans ce travail nous avons utilisé maillage hybride ; un maillage structuré pour la cheminée et la partie rectangulaire du collecteur, et un maillage non structuré pour la partie triangulaire du collecteur.

III.3.2 Utilisation du Fluent :

Pour réaliser nos simulations, nous avons choisi d'utiliser le code de calcul FLUENT, ce code est développé pour modéliser les écoulements des fluides et les transferts thermiques, il est écrit en langage de programmation C. Ce logiciel utilise la méthode des volumes finis pour résoudre les équations.

III.3.3 Choix de la méthode de couplage Pression-Vitesse :

FLUENT propose trois méthodes pour le couplage vitesse-pression :

- Méthode SIMPLE (Semi Implicit Method for a Pressure Linked Equations) qui a été créé par **Patankar et Spalding** [38], et qui est le plus robuste.
- Méthode SIMPLEC (SIMPLE Consistent). A été mis au point par **Van Doormal et Raithby** [39]. Les étapes de cet algorithme sont presque les mêmes que celles de l'algorithme SIMPLE avec la différence que dans les équations de correction des vitesses on néglige les termes les moins significatifs.
- Méthode PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators): L'algorithme PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) a été mis au point par **Issa** [40]. Cet algorithme a été développé initialement comme une procédure non itérative pour le calcul des écoulements compressibles instationnaires. Ultérieurement l'algorithme a été bien adapté pour la procédure itérative appliquée aux problèmes stationnaires. L'algorithme est une extension de l'algorithme SIMPLE ayant une étape de correction de plus.

Dans notre étude, l'algorithme choisi est l'algorithme SIMPLE qui est robuste, offrant ainsi plus de garanties pour la convergence de la solution.

III.3.4 Description du problème :

Le code FLUENT a été utilisé pour simuler l'écoulement d'air dans un prototype d'une cheminée solaire réalisé au niveau de la faculté. Le modèle physique considéré est schématisé sur la **figure III.2**. Il s'agit d'une cheminée solaire avec 3 m de diamètre du collecteur, une cheminée de 6 m de hauteur, 0.1 m de diamètre et 1.5 m de distance entre l'entrée de la cheminée et la surface du sol (l'absorbeur).

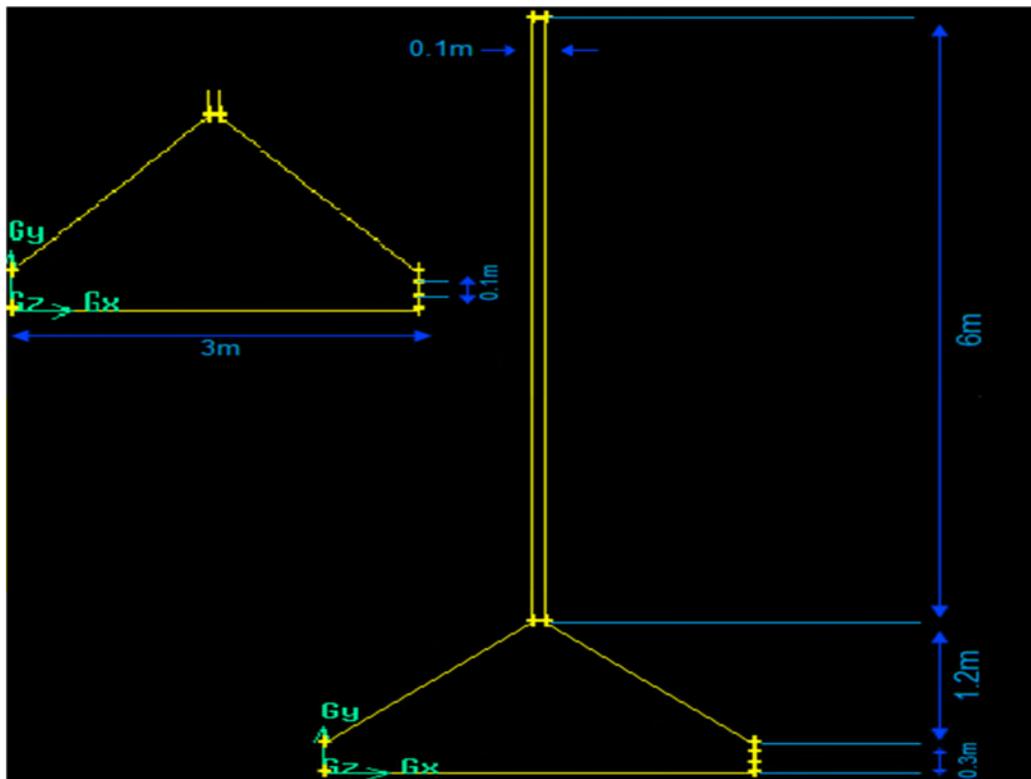


Fig. III.2 : La géométrie du problème étudié de la cheminée solaire réalisé par nos soins.

III.3.5 Les conditions aux limites :

Plusieurs types de conditions aux limites sont proposés dans le code FLUENT. Nous en utilisons essentiellement trois : pression d'entrée, pression de sortie imposée à la surface libre, et la condition de paroi.

- La condition aux limites « **Pressure inlet** » (pression d'entrée) est appliquée à l'entrée du collecteur, le fluide entre à des conditions atmosphériques (pression statique soit nulle : $P = 0$ Pa).
- La deuxième condition « **Pressure-outlet** » (pression de sortie) est appliquée au niveau de la sortie de la cheminée (pression statique nulle : $P = 0$ Pa).

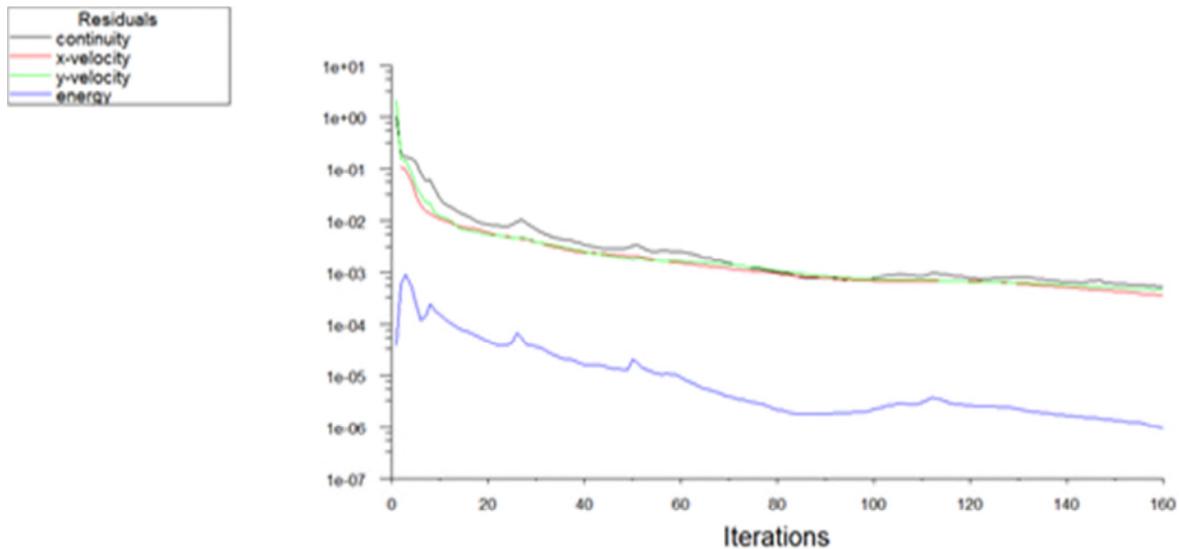
- La troisième condition « **Wall** » (paroi) est une condition de température imposée et du flux imposé. Elle est appliquée au niveau des parois du système comme suit :
 - ❖ Flux nul (Paroi adiabatique), pour la surface de la cheminée ($q = 0 \text{ W/m}^2$). [41]
 - ❖ Température imposée pour le toit du collecteur ($T_0 = 300\text{K}$).
 - ❖ Le sol sous le collecteur absorbe un flux solaire G , on peut considérer un flux de chaleur imposé au niveau du sol ($q = G \cdot \tau \cdot \alpha$). L'absorptivité du sol en aluminium est $\alpha = 0,85$, la transmissivité du toit [en PEBD (polyéthylène basse densité)] est $\tau = 0,8$ [41] et l'irradiation solaire sera changée.

Surfaces	Types	Valeurs	
Toit du collecteur	Wall	$T_0 = 300 \text{ K}$	
Surface de la Cheminée	Wall	$q = 0 \text{ W/m}^2$	
Sol (absorbeur)	Wall	$q = G \cdot \tau \cdot \alpha \text{ W/m}^2$	
Entrée du collecteur	Pressure inlet	$T_{ext} = 304 \text{ K}$,	$p_{gauge} = 0 \text{ Pa}$
Sortie de la cheminée	Pressure outlet	$T_{ext} = 300 \text{ K}$,	$p_{gauge} = 0 \text{ Pa}$

Tab. III.1 : Conditions aux limites appliquées.

III.3.6 Convergence de calcul :

Pour s'assurer de la convergence de calcul, nous nous aidons de critère visuel consiste à observer les courbes des résidus (**Fig. III.3**). Lorsque les résidus sont faibles (10^{-6} pour l'équation d'énergie et 10^{-3} pour les autres équations), nous pouvons considérer que la



solution est atteinte.

Fig. III.3 : les courbes des résidus.

III.3.7 Interprétation des résultats :

Arrivé au terme de cette étude, rappelons brièvement nos objectifs initiaux. Nous discuterons les résultats obtenus que nous avons simulés pour deux maillages différents pour les comparées avec celles de la partie expérimentale de notre prototype (comparons essentiellement la vitesse maximale à l'entrée de la cheminée pour les deux parties numériques et expérimentales). Il s'agit d'un écoulement d'air au sein d'une cheminée solaire chauffée. Nous avons présenté nos résultats pour une valeur maximale de l'irradiation solaire pour une journée.

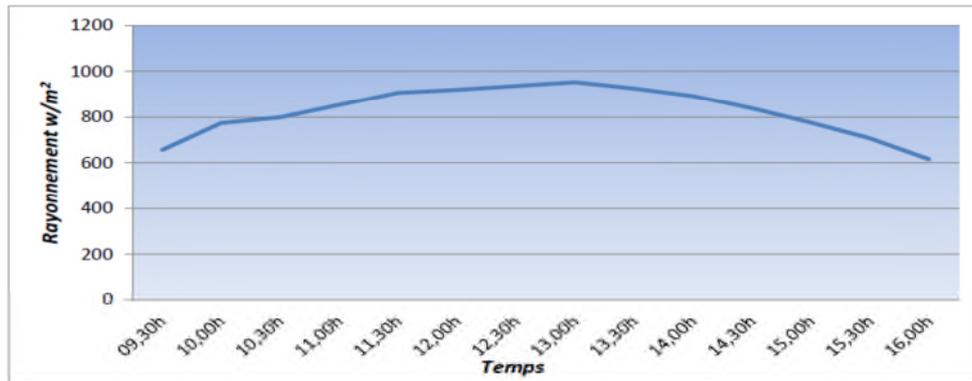


Fig. III.4 : Rayonnement en fonction du temps.

III.3.7.1 La vitesse :

Les figures III.5 et III.6 représentent la répartition de la vitesse dans le milieu du système de la cheminée solaire pour le premier maillage avec une valeur de l'irradiation solaire G correspondant à $900 W/m^2$. Il convient de noter que la vitesse augmente avec l'augmentation de l'irradiation solaire c'est pour cela on a choisi une valeur maximale de G pour une valeur maximale de vitesse située aux environs de l'entrée de la cheminée.

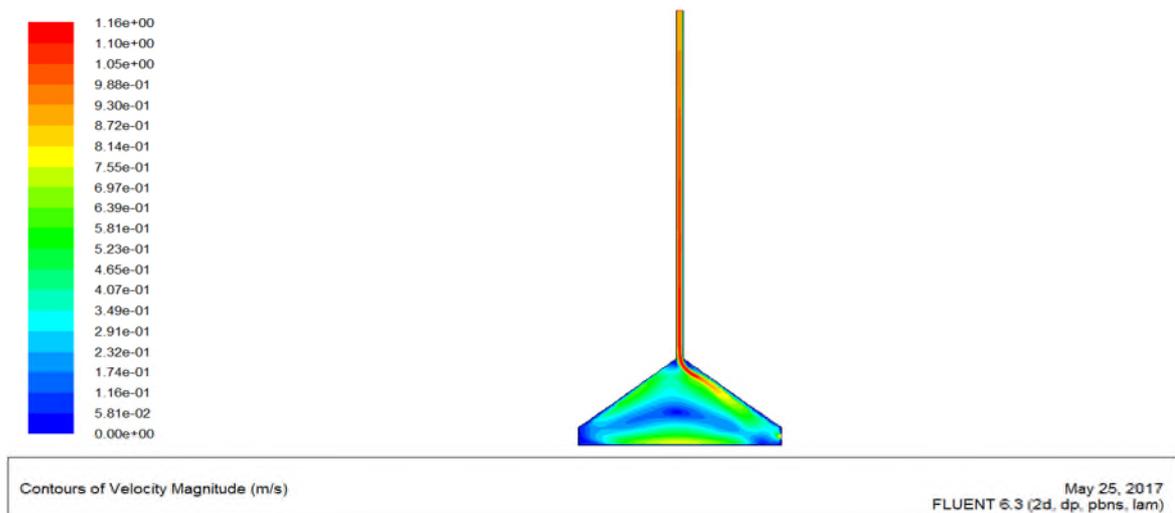


Fig. III.5 : Champs de vitesse du prototype de la cheminée solaire. (1^{ier} maillage)

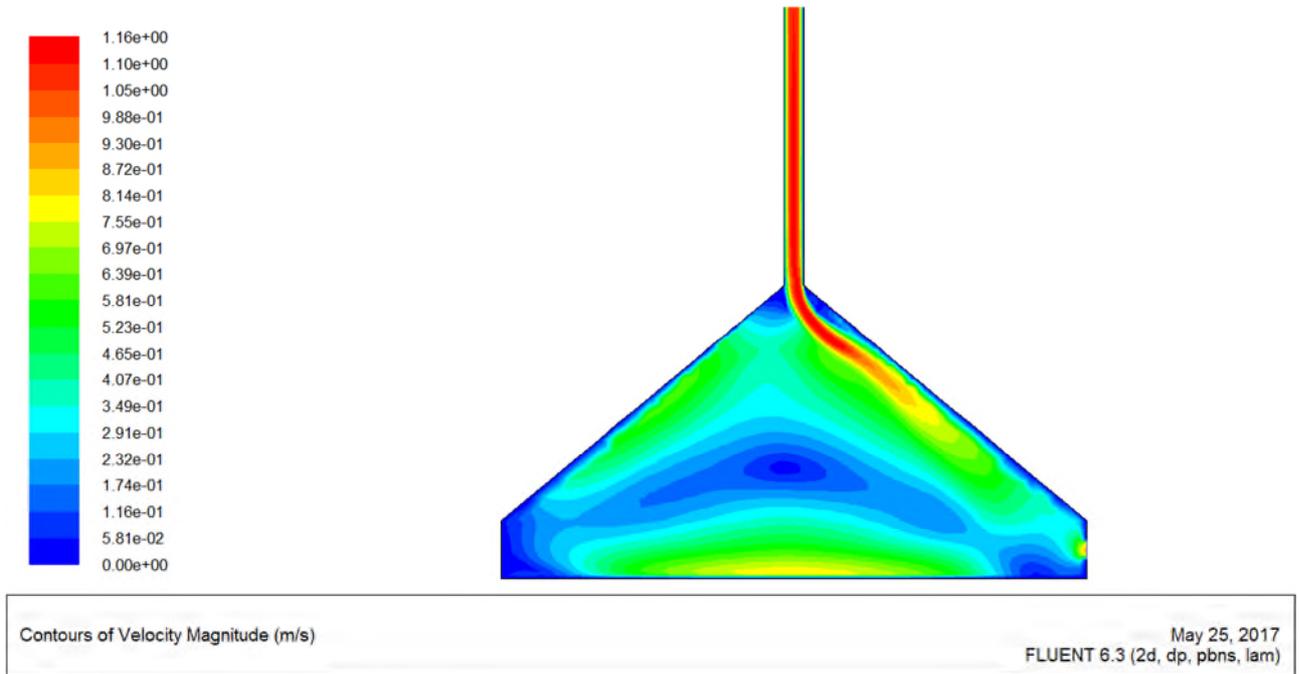
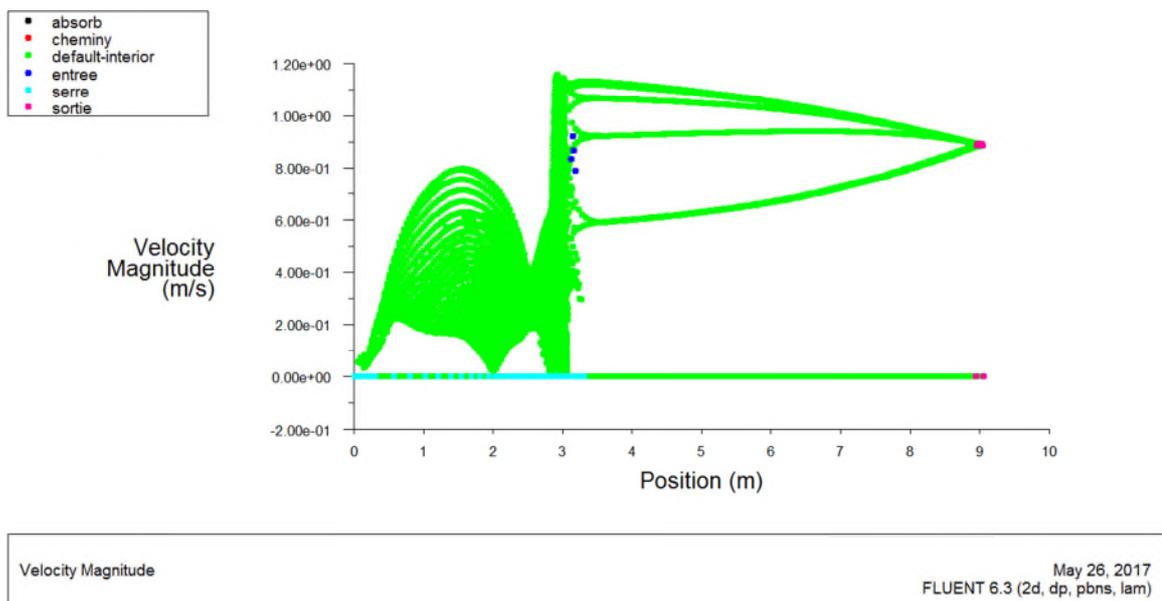


Fig. III.6: Champs de vitesse dans le collecteur et l'entrée de la cheminée. (1^{er} maillage)

La **figure III.7** représente le profil de vitesse de l'air à travers le collecteur et la cheminée pour le premier maillage. La vitesse augmente à travers le collecteur, mais elle



augmente considérablement en atteignant l'entrée de la cheminée.

Fig. III.7: Champs de vitesse dans le collecteur et l'entrée de la cheminée. (1^{er} maillage)

Il convient de noter pour ce maillage, illustrée par la **figure III.8** et le profil de vitesse par la **figure III.9**, que la valeur de la vitesse est supérieure à celle calculée dans le maillage précédent et la grande zone de recirculation de l'écoulement inversée située à la base de la cheminée avec une vitesse maximale attendue à la sortie de la cheminée.

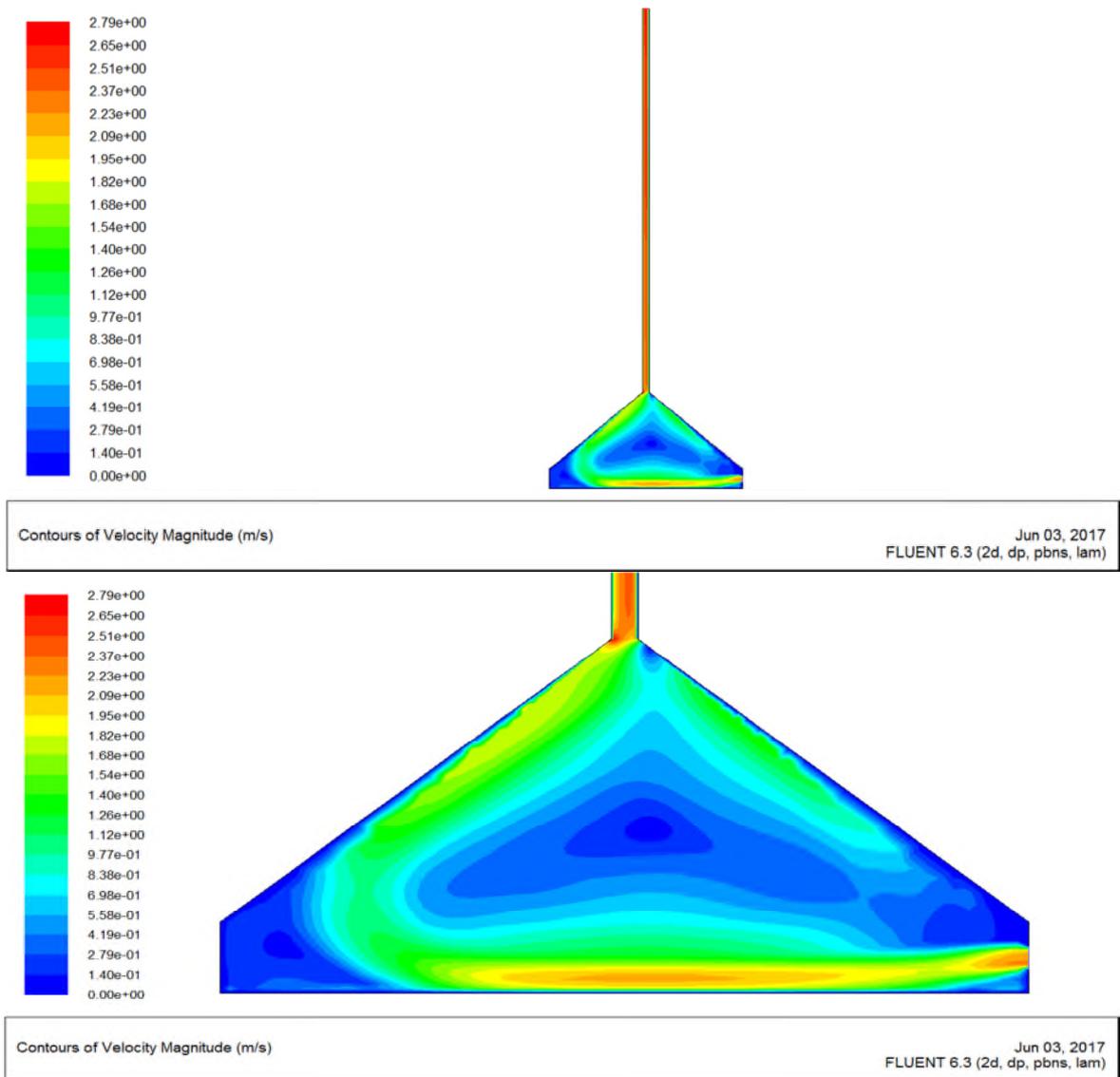


Fig. III.8: Champs de vitesse dans le collecteur et l'entrée de la cheminée. (2^{ème} maillage)

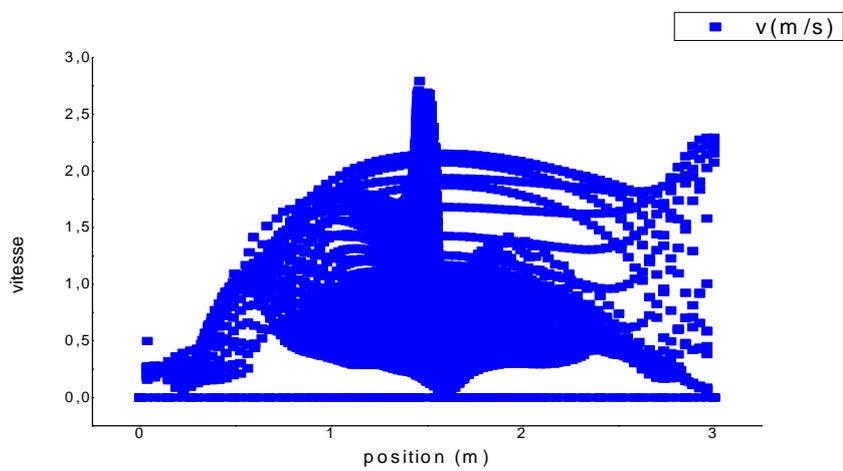


Fig. III.9: Champs de vitesse dans le collecteur et l'entrée de la cheminée. (2^{ème} maillage)

III.3.7.2 Pression :

Pour les deux maillages, la **figure III.10** illustre la variation du champ de pression au niveaux de la cheminée solaire. Les résultats montrent que la pression dans le système est une valeur négative. C'est la raison pour laquelle l'air extérieur peut pénétrer dans le système et qui forme un flux.

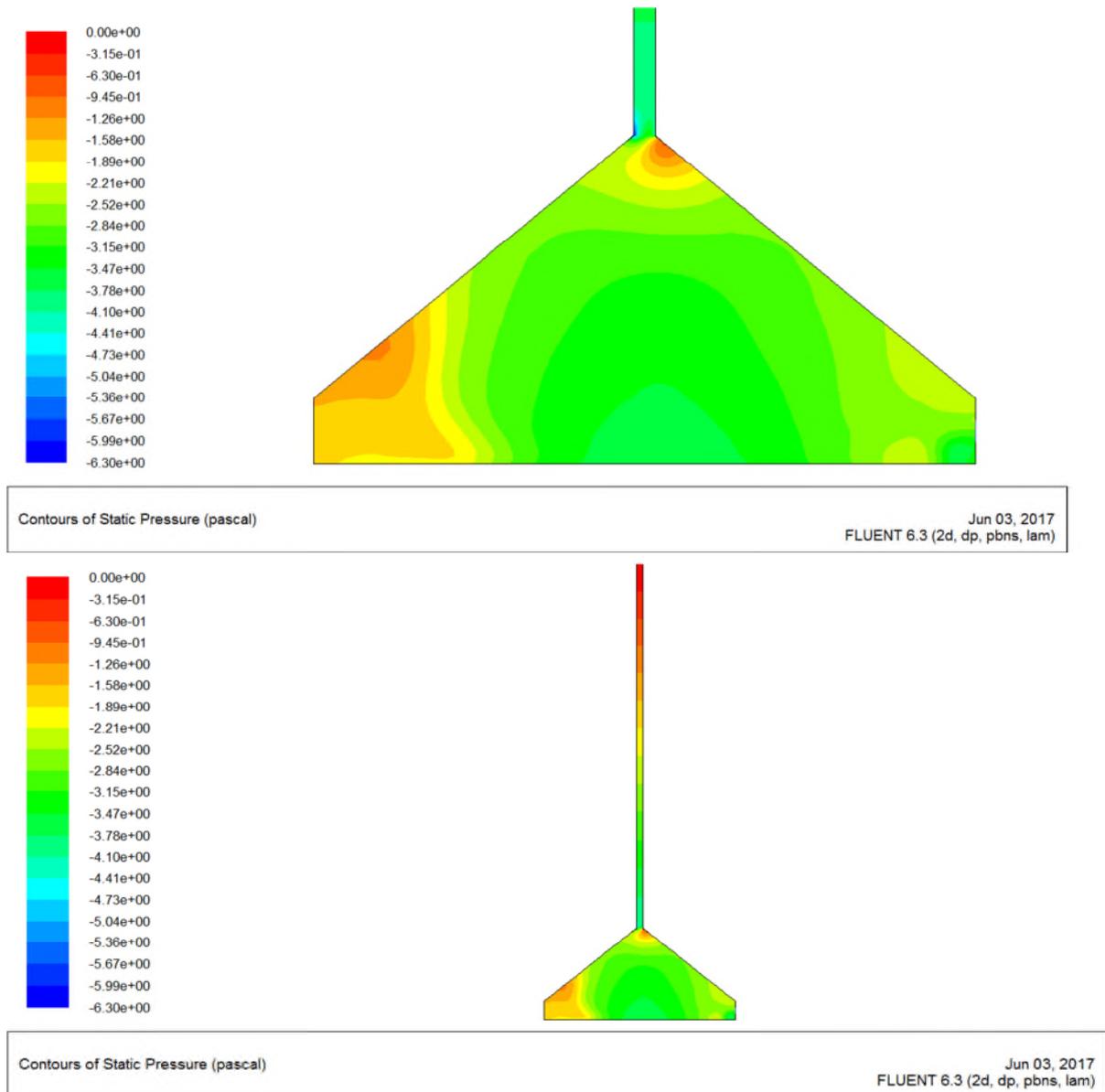


Fig. III.10: Champs de pression dans le collecteur et l'entrée de la cheminée.

Cette figure illustre que la différence de pression entre l'entrée de la cheminée et les premiers mètres de celle-ci, est la plus importante, ce qui nous permet de conclure qu'à cet endroit précis nous pouvons avoir la plus grande énergie que délivre le système et donc la meilleure position pour placer les générateurs.

III.3.8 Validation des résultats :

Cette étape consiste à valider notre simulation numérique (notre modèle sous FLUENT) en comparant nos résultats avec celle de la partie expérimentale :

Les résultats expérimentaux pour notre prototype montrent que, lorsque l'irradiation solaire est 900W/m^2 , la vitesse de l'air maximale à l'entrée de la cheminée est de 2.4m/s . Comme le montre les **Tableaux (III.2)** et **(III.3)**, un bon accord quantitatif a été obtenu entre les données expérimentales du prototype et les résultats numériques pour le 2^{ème} maillage.

Donc nos résultats montrent aussi qu'on peut placer des générateurs à l'entrée de la cheminée pour la production de l'électricité avec une vitesse suffisante pour tourner un ventilateur, d'où notre système est fonctionné correctement.

Résultats	Vitesse maximale de l'air à l'entrée de la cheminée (m/s)(1 ^{ier} maillage)
Données expérimentales de prototype	2.4
Résultats numérique	1.16

Tab.III.2 : Comparaisons entre résultat numérique pour le 1^{ier} maillage et résultat expérimental.

Résultats	Vitesse maximale de l'air à l'entrée de la cheminée (m/s) (2 ^{ème} maillage)
Données expérimentales de prototype	2.4
Résultats numérique	2.23

Tab.III.3 : Comparaisons entre résultat numérique pour le 2^{ème} maillage et résultat expérimental.

IV.1 Introduction :

Le prototype de « cheminée solaire » conçu par nos soins, a été installé au niveau de la faculté et suivi durant cinq (5) jours au 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 cinq (5) variantes se qui concernes les déférentes entrées du collecteur 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 d'une journée complète (24h).

IV.2 Préliminaire à l'étude :

Nous avons réalisé cette conception à partir des déférents idées concernons les cheminées solaires situons au niveaux du monde.

IV.2.1 Structure et composants :

IV.2.1.1 La Cheminée :

La Cheminée est d'une hauteur de 06m et 0,1m de diamètre fabriquée en PVC vu sa solidité et sa maniabilité en cas de modification ainsi que sa bonne résistivité thermique.



Fig. IV.1 : représente la cheminée du prototype.

IV.2.1.2 Le collecteur :

Le collecteur est fabriqué essentiellement d'un cadre métallique se forme d'un cône avec une angle d'inclinaison de 45° , un diamètre de 3m, et une hauteur jusqu'à le début de la cheminée de 1.5m, couvert avec un plastique jaune s'appelle ; Polyéthylène à basse densité

(PEBD) fait partie des matériaux les plus utilisés en plasticulture, les principales propriétés de ce plastique sont sa légèreté et sa transparence ainsi que sa bonne conductivité thermique.



Fig. IV.2 : représente le collecteur du prototype.

IV.2.2 Paramètres étudiées :

A travers cette étude expérimentale, notre but d'avoir 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 cinq variantes à savoir :

Premièrement, l'entrée de collecteur avec un seul trou jusqu'à arriver à cinq trous.

- Première variante : un seul trou à l'entrée du collecteur.
- Deuxième variante : deux trous approché à l'entrée du collecteur.
- Troisième variante : trois trous approché à l'entrée du collecteur.
- Quatrième variante : quatre trous approché à l'entrée du collecteur.
- Cinquième variante : cinq trous approché à l'entrée du collecteur.

IV.2.3 Instrument de mesures :

Les paramètres utiles à notre étude étaient les températures à différents endroits du prototype avec l'humidité et la vitesse de l'air à l'entrée de la cheminée. Pour obtenir ces données, nous avons utilisé plusieurs capteurs de température, les huit capteurs furent positionnés à des endroits déférents dans le collecteur.

Pour ce qui est de l'humidité et 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 pour mesuré de la vitesse. (Fig.IV.3)



Fig. IV.3 : Anémomètre.

IV.2.4 Résultats en fonction de la première variante (13 Mai 2017) :

Pour cette première expérience, nous avons fait un seul trou à l'entrée du collecteur avec 0.1m de diamètre réciproque au diamètre de sortie de la cheminée.

Les résultats obtenus attestent d'une vitesse maximale d'écoulement très satisfaisant mais variable au cours de la demi-journée oscillant entre 2m/s et 2,4 m/s (*Figure IV.4*).

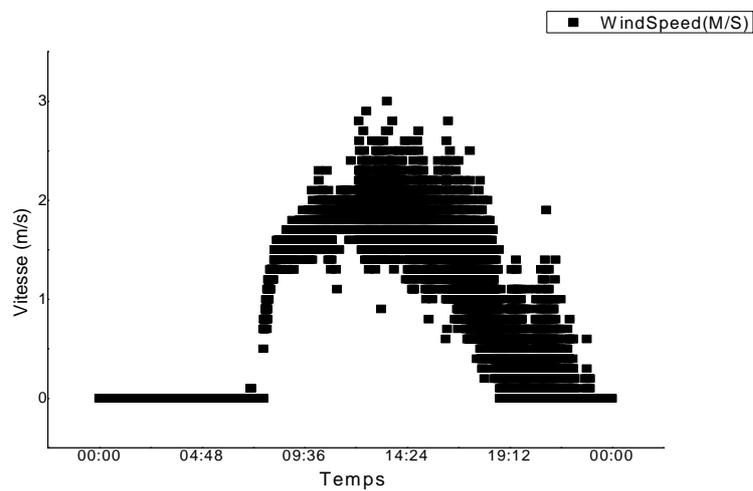


Fig. IV.4 : Vitesse en fonction du temps avec un seul trou.

Les résultats indiquent une vitesse d'écoulement au point de départ est nulle jusqu'à d'environ 1,3m/s à 09h36, et connaît une augmentation avec l'augmentation de la température à une valeur maximale de 2.4m/s, et 60°C à 13h30. (*Figure IV.5*).

Puis l'on assiste à une régression jusqu'au point final après 20h00 du soir pour atteindre une valeur presque nulle soit approximativement à la valeur du point de départ.

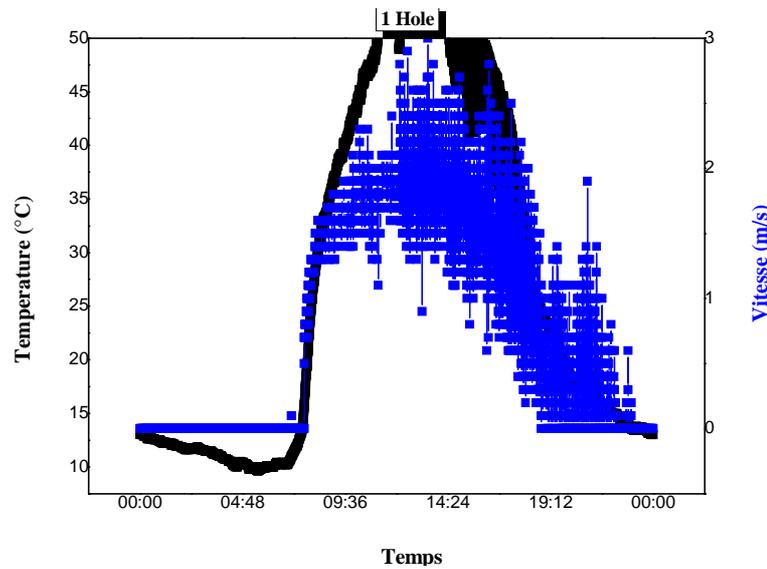


Fig. IV.5 : Variation de la vitesse et la température en fonction du temps avec un seul trou.

Plusieurs sont les facteurs qui agissent sur la variation de la vitesse à l'entrée de la cheminée parmi eux la variation de l'humidité, donc on voit que le facteur de l'humidité est opposé à la variation de la vitesse, et également à la variation de la température.

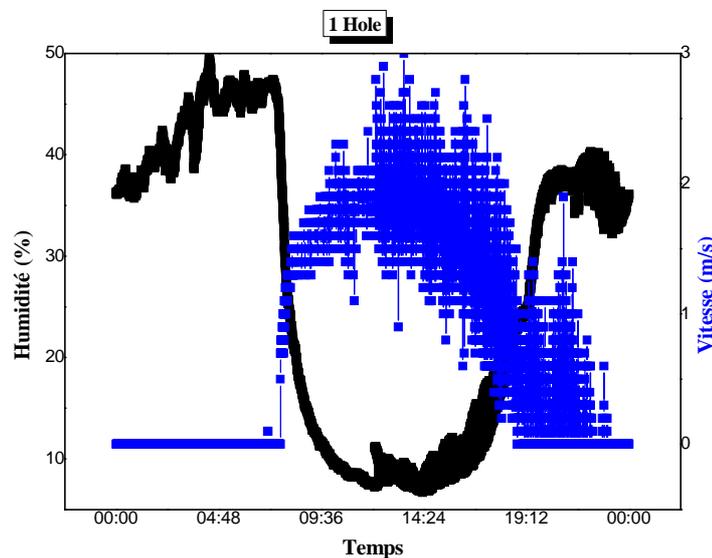


Fig. IV.6 : Variation de l'humidité et la vitesse en fonction du temps avec un seul trou.

IV.2.5 Résultats en fonction de la deuxième variante (14 Mai 2017) :

Pour la deuxième expérience, on a ajouté un deuxième trou à l'entrée du collecteur de même diamètre que le premier, et les résultats sont les suivants :

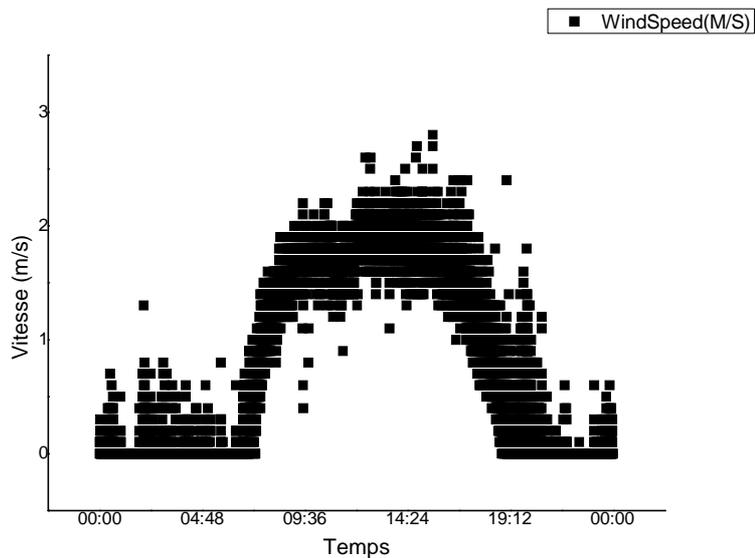


Fig. IV.7 : Vitesse en fonction du temps avec deux trous.

L'écoulement à l'entrée de la cheminée débute avec une vitesse inférieure ou égale à 0.5m/s au début de l'expérience à première heure de la journée (00h00) à cause de la vitesse extérieure du vent qui influe sur la vitesse intérieure de l'écoulement au niveau de la cheminée solaire, et suit une progression jusqu'à atteindre une vitesse maximale de 2,4m/s à 13h30, puis une amorce de baisse régulière jusqu'à atteindre la valeur de 0.4m/s à 20h00, et une valeur nulle à la fin de la journée.

Pour les figures (VI.8 et VI.9), on a la même remarque pour l'expérience précédente que la vitesse atteint ces valeurs maximales avec l'augmentation de la température. Et l'humidité est toujours opposé à la variation de la température au niveaux de la journée.

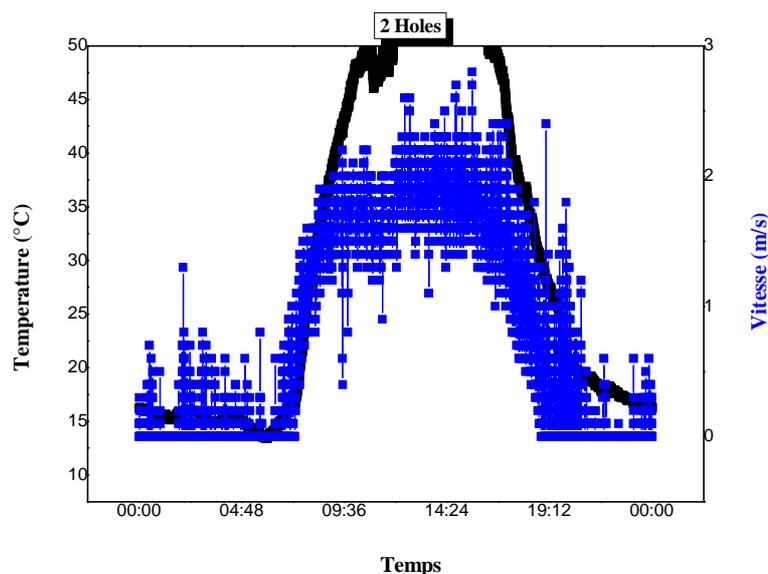


Fig. IV.8 : Variation de la vitesse et la température en fonction du temps avec deux trous.

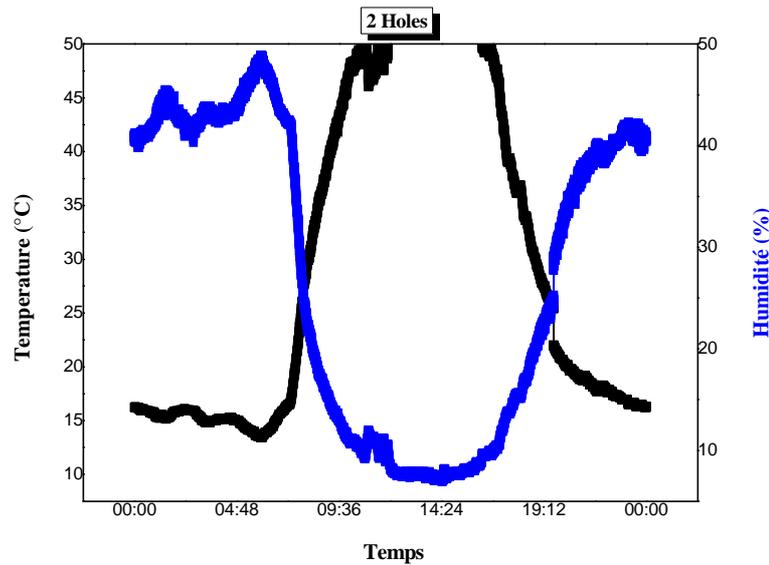


Fig. IV.9 : Variation de l'humidité et la température en fonction du temps avec deux trous.

IV.2.6 Résultats en fonction de la troisième variante (16 Mai 2017) :

Pour cette troisième expérience, nous avons ajouté un troisième trou et on constate qu'il n'y a pas un grand changement avec les expériences précédentes. Les résultats obtenus attestent d'une vitesse maximale d'écoulement égale à 2,4m/s, et on remarque que la vitesse au début de la journée varie de 0 m/s à 0.5 m/s à cause de l'influence du vent extérieur.

Et les autres résultats sont :

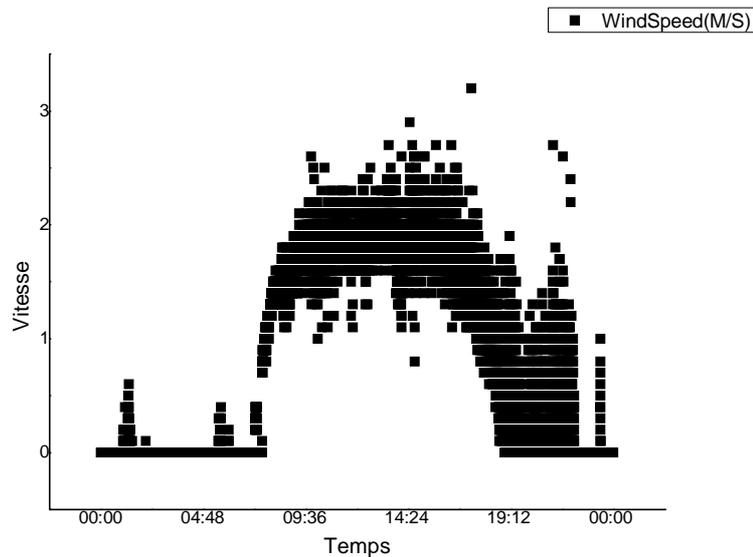


Fig. IV.10 : Vitesse en fonction du temps avec trois trous.

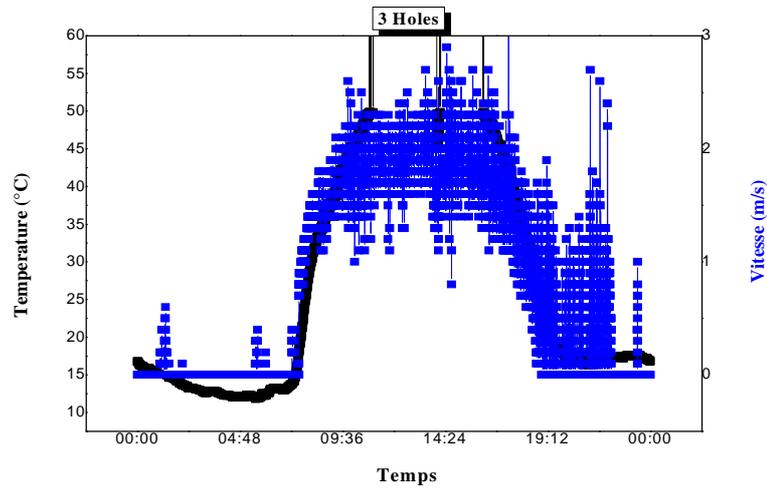


Fig. IV.11 : Variation de la vitesse et la température en fonction du temps avec trois trous.

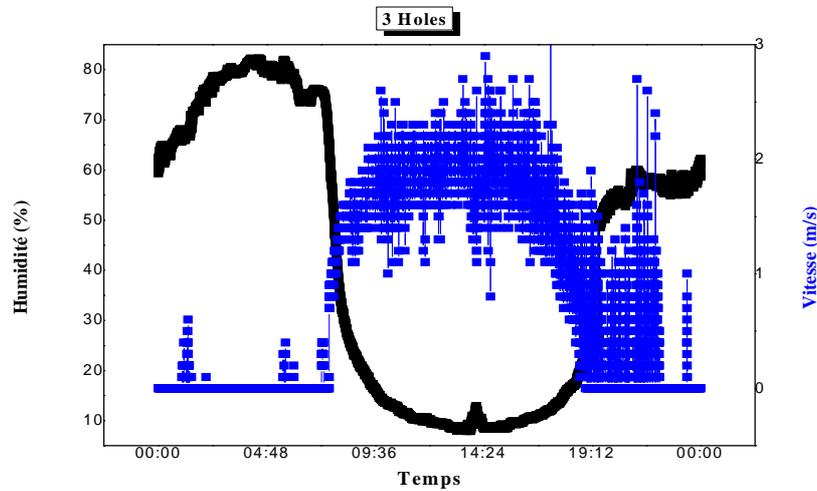


Fig. IV.12 : Variation de la vitesse et l'humidité en fonction du temps avec trois trous.

IV.2.7 Résultats en fonction de la quatrième variante (17 Mai 2017) :

Pour cette quatrième expérience avec quatre trous à l'entrée du collecteur, nous remarquons une augmentation significative de la vitesse pour atteindre une valeur maximale à l'entrée de la cheminée de 3 m/s ou plus. (*Figure IV.13*)

On remarque aussi à la fin de la journée et pour une température faible, une perturbation de la vitesse d'écoulement de 0.5 m/s à 1 m/s, et cela est dû au nombre d'ouvertures à l'entrée du collecteur qui permettent l'entrée d'une quantité considérable de vent à la partie intérieure du collecteur.

L'évolution des différentes entrées d'air dans le collecteur expliquent l'influence sur la cinétique de la vitesse d'écoulement, malgré que la température maximale dans ce jour-là est inférieure par rapport aux trois expériences précédentes. (*Figure IV.14*).

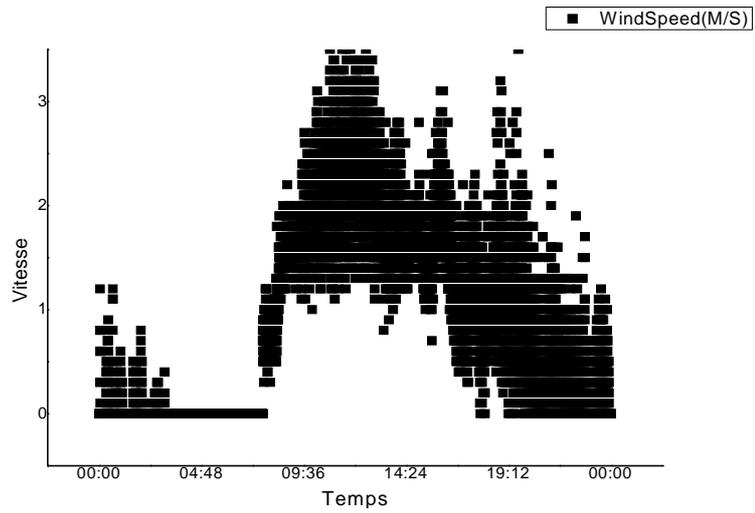


Fig. IV.13 : Vitesse en fonction du temps avec quatre trous.

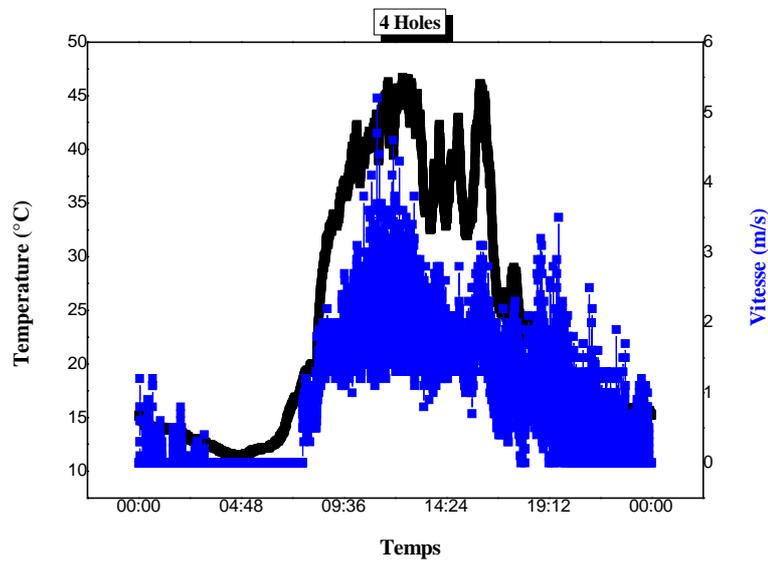


Fig. IV.14 : Variation de la vitesse et la température en fonction du temps avec quatre trous.

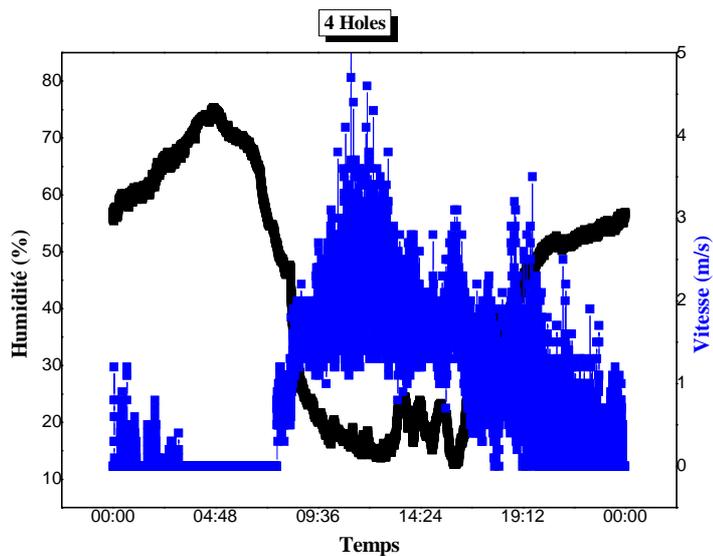


Fig. IV.15 : Variation de la vitesse et l'humidité en fonction du temps avec quatre trous.

IV.2.8 Résultats en fonction de la cinquième variante (18 Mai 2017) :

L'écoulement à l'entrée de la cheminée dans cette expérience avec cinq trous débute avec une vitesse nulle et suit une progression jusqu'à atteindre une vitesse maximale de $2,8\text{m/s}$ à 14h00 puis une amorce de baisse régulière jusqu'à atteindre la valeur de $1,2\text{m/s}$ à 19h12, puis elle retour nulle comme le début de la journée.

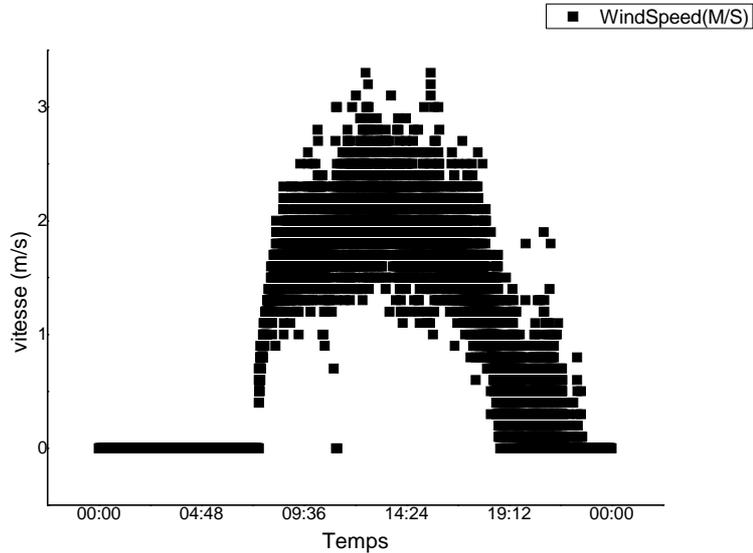


Fig. IV.16 : Vitesse en fonction du temps avec cinq trous.

A ce niveau d'analyse, l'influence du nombre des ouvertures dans le collecteur sur la vitesse d'écoulement est confirmée, on remarque que la vitesse d'écoulement de l'air pour cette expérience est inférieure à celle de l'expérience précédente.

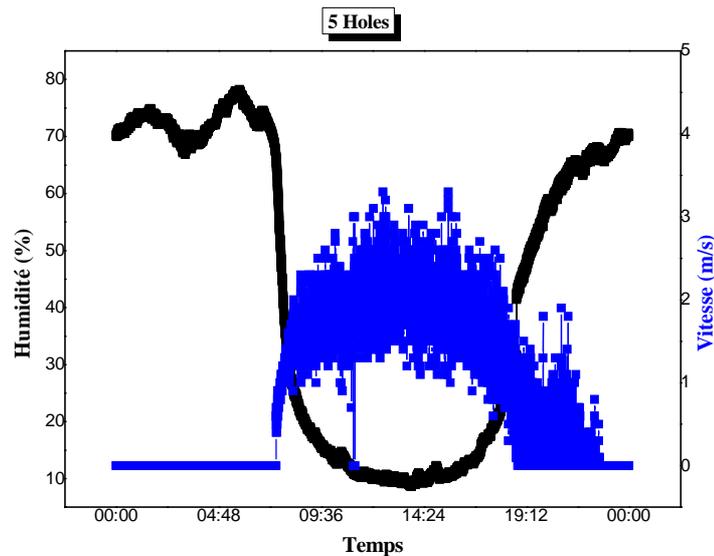


Fig. IV.17 : Variation de la vitesse et l'humidité en fonction du temps avec cinq trous.

IV.3 Synthèse des résultats :

A partir des résultats obtenus en fonction des cinq variantes considérées dans cette étude, 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 satisfaisantes ; le meilleur rendement est obtenu au niveau de la quatrième variante avec quatre trous à l'entrée du collecteur.

Les plus grandes vitesses d'écoulement dans le cas des cinq 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.

Expérience	La vitesse maximale a l'entrée de la cheminé (m/s)
Première variante	2.4
Deuxième variante	2.4
Troisième variante	2.4
Quatrième variante	3
Cinquième variante	2.8

Tab. IV.1 : Différentes variations de la vitesse maximale d'écoulement selon les cinq variantes.

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).

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.

Avec le développement des moyens de calculs la simulation numérique devient de plus en plus un outil très intéressant pour la prédiction des phénomènes pouvant se produire à l'intérieur des cheminées solaires, Nous avons étudié numériquement la convection naturelle bidimensionnelle laminaire et permanente dans notre prototype.

Les résultats des simulations numériques ont montré, qu'on a un bon accord quantitatif entre les données expérimentales du prototype et les résultats numériques d'où notre système est fonctionné correctement avec une vitesse maximale de 2.23 m/s proche à celle de 2.4 m/s pour notre résultat expérimental.

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 a été installé au niveau de la faculté et suivi durant cinq jours du mois de Mai 2017.

Pour cette expérimentation, nous avons considéré cinq variantes en matière d'ouverture du collecteur et avons procédé aux différentes mesures d'une journée complète (24h).

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 13h00 -14h00. Les

rendements en matière de vitesse maximal d'écoulement sont largement améliorés en fonction des variantes considérées : 2.4 m/s pour la première, la deuxième, et la troisième variante (un seul trou, deux trous, et trois trous à l'entrée du collecteur), 3 m/s pour la quatrième variante (quatre ouvertures) et 2.8 m/s ce qui concerne la cinquième variante (cinq trous).

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 maximales 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 13h00 et 14h30, celles des trois variantes à l'entrée de la cheminée étaient de 31, 49 et 65°C respectivement pour les cinq variantes.

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 au niveau du collecteur.
- 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

Annexe

Tableau 1 : Propriété des matériaux utilisé dans le prototype de la cheminé solaire

propriété	PEBD	PVC
Masse volumique (kg.m^{-3})	915 – 935	1380
Conductibilité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	0.35	0.2
Capacité thermique massique ($\text{j.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	1900 – 2300	1000 - 1500

Tableau 2 : Propriété des matériaux utilisé dans le prototype de la cheminé solaire. [42]

Date le 1 ^{er}	Puissance surfacique (W/m^2)	Ecart relatif en %/ C*
Janvier	1399	+3.40
Février	1394	+3.03
Mars	1379	+1.92
Avril	1354	+0.07
Mai	1333	-1.48
Juin	1312	-3.03
Juillet	1308	-3.33
Aout	1312	-3.03
Septembre	1329	-1.77
Octobre	1350	-0.22
Novembre	1373	+1.48
décembre	1392	+2.88

Références bibliographiques

- [1] GIEC (2001). "The Scientific Basis, Third Assessment Report, UN Intergovernmental Panel on Climate Change." Cambridge University Press.
- [2] <http://www.ecolopop.info/2006/07/500-mw-solaires-pour-un-brevet-adeveloppeur/442>
28 février 2014
- [3] N. BOUKHETAIA, J. FYOT, H. HOLIN, "Biomasse énergie", L'industrie des énergies décarbonées, 2010.
- [4] D. WILGENBUS, "L'énergie solaire", La main à la pâte – Société française de physique, Paris lion 2012.
- [5] Guide des Energies Renouvelables. Édition 2007
- [6] I. Cabanyes, "Proyecto de Motor Solar", La Energia Eléctrica Revista General de Electricidad y sus Aplicaciones, 8, 61-65, 1903.
- [7] H. Günther, "In hundert Jahren, Kosmos - Gesellschaft der Naturfreunde", Stuttgart, 78 pp., 1931.
- [8] J. Schlaich, The solar chimney: electricity from the sun: Edition Axel Menges, 1995.
- [9] W. Haaf, K. Friedrich, G. Mayr, and J. Schlaich, Solar Chimneys: Part I: Principle and Construction of the Pilot Plant in Manzanares, International Journal of Solar Energy, 2, No. 1, pp 3–20, (1984).
- [10] JÖRG SCHLAICH, "The solar chimney: electricity from the sun ", Edition Axel Menges, Novembre 2004.
- [11] L.B. Padki, M.M., Sherif, S.A., Solar chimney for medium-to large scale power generation, Proceedings of the Manila International Symposium on the Development and Management of Energy Resources, Manila, (1989).
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] ELIAS PAEZ ORTEGA, "Analyzes of Solar Chimney Design ", University of Science and Technology, Norwegian, July 2011.

- [15] Le livre de Denis BONNELLE : 'Vent Artificiel « tall is beautifull »', 2003, Editions du Cosmogone,
- [16] Sherif, S.A, L.B. Padki , Solar chimney for power generation in rural areas, Seminar on Energy Conservation and Generation Through Renewable Resources, Ranchi, India, pp. 91–96.
- [17] A. DHAHRI, A. OMRI, "A Review of solar Chimney Power Generation Technology ", (IJEAT), February 2013
- [18] I. Cabanyes, "Proyecto de Motor Solar", La Energia Eléctrica Revista General de Electricidad y sus Aplicaciones, 8, 61-65, 1903.
- [19] W. Haaf, "Solar chimneys: part ii: preliminary test results from the Manzanares pilot plant," International Journal of Sustainable Energy, vol. 2, pp. 141-161, 1984.
- [20] R. Krisst, "ENERGY-TRANSFER SYSTEMS," ed: MARIER COMMUNICATIONS 620 CENTRAL AVE NORTH, MILICA, MN 56363-1788, pp. 8-8, 1983.
- [21] H. Kulunk, "A prototype solar convection chimney operated under Izmit conditions," in Proceedings of the 7th Miami international conference on alternative energy sources, 1985.
- [22] N. Pasumarthi and S. Sherif, "Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney model—Part II: experimental and theoretical results and economic analysis," International Journal of Energy Research, vol. 22, pp. 443-461, 1998.
- [23] S. Sherif, N. Pasumarthi, R. Harker, and G. Brinen, "Performance of a demonstration solar chimney model for power generation," Final Technical Report No. UFME/SEECL 9507, Solar Energy and Energy Conversation Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of Floarida, Gainesville, Florida1995.
- [24] X. Zhou, J. Yang, B. Xiao, and G. Hou, "Simulation of a pilot solar chimney thermal power generating equipment," Renewable Energy, vol. 32, pp. 1637-1644, 2007.
- [25] X. Zhou, J. Yang, B. Xiao, and G. Hou, "Experimental study of temperature field in a solar chimney power setup," Applied Thermal Engineering, vol. 27, pp. 2044-2050, 2007.
- [26] C. Ketlogetswe, J. K. Fiszdon, and O. O. Seabe, "RETRACTED: Solar chimney power generation project—The case for Botswana," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 12, pp. 2005-2012, 2008.

- [27] A. G. Ferreira, C. B. Maia, M. F. Cortez, and R. M. Valle, "Technical feasibility assessment of a solar chimney for food drying," *Solar Energy*, vol. 82, pp. 198-205, 2008.
- [28] C. B. Maia, A. G. Ferreira, R. M. Valle, and M. F. Cortez, "Analysis of the airflow in a prototype of a solar chimney dryer," *Heat Transfer Engineering*, vol. 30, pp. 393-399, 2009.
- [29] A. Koyun, I. Üçgül, M. Acar, and R. Şenol, "Güneş Bacası Sisteminin Termal Özet Dizaynı. Tesisat Mühendisliği Dergisi, 98: 45–50," ed, 2007.
- [30] K. Golder, "Combined solar pond and solar chimney," Final year Mechanical Engineering Project. School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering, Bundoora Campus, RMIT University, Melbourne, Australia, 2003.
- [31] A. Akbarzadeh, P. Johnson, and R. Singh, "Examining potential benefits of combining a chimney with a salinity gradient solar pond for production of power in salt affected areas," *Solar Energy*, vol. 83, pp. 1345-1359, 2009.
- [32] T. Ming, W. Liu, Y. Xiong, X. Guan, G. Xu, and Y. Pan, "Experimental simulation of heat transfer and flow in the solar chimney system," *JOURNAL OF ENGINEERING THERMOPHYSICS*, vol. 29, p. 681, 2008.
- [33] R. Harte and G. P. Van Zijl, "Structural stability of concrete wind turbines and solar chimney towers exposed to dynamic wind action," *Journal of Wind engineering and industrial aerodynamics*, vol. 95, pp. 1079-1096, 2007.
- [34] M. Bernardes, "Life cycle assessment of solar chimneys, world renewable energy congress VIII," in *Proceedings of the World Renewable Energy congress VIII*, Denver, USA, 2004.
- [35] J. P. Pretorius and D. G. Kröger, "Thermoeconomic optimization of a solar chimney power plant," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 130, p. 021015, 2008.
- [36] T. Fluri, J. Pretorius, C. V. Dyk, T. Von Backström, D. Kröger, and G. Van Zijl, "Cost analysis of solar chimney power plants," *Solar Energy*, vol. 83, pp. 246-256, 2009.
- [37] S. Patankar, *Numerical heat transfer and fluid flow*: Hemisphere, Washington, D,C, 1980.
- [38] S. V. Patankar and D. B. Spalding, "A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 15, pp. 1787-1806, 1972.

- [39] J. Van Doormaal and G. Raithby, "Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows," *Numerical heat transfer*, vol. 7, pp. 147-163, 1984.
- [40] R. I. Issa, "Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator splitting," *Journal of computational physics*, vol. 62, pp. 40-65, 1986.
- [41] R. Sangi, M. Amidpour, and B. Hosseinizadeh, "Modeling and numerical simulation of solar chimney power plants," *Solar energy*, vol. 85, pp. 829-838, 2011.
- [42] J. Bernard. *Energie solaire calculs et optimization*, Ellipses Edition Marketing, 2004.
- [43] L. Mullett, "The solar chimney—overall efficiency, design and performance," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 8, pp. 35-40, 1987.
- [44] N. Pasumarthi and S. Sherif, "Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney model—Part I: mathematical model development," *International Journal of Energy Research*, vol. 22, pp. 277-288, 1998.
- [45] N. Pasumarthi and S. Sherif, "Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney model—Part II: experimental and theoretical results and economic analysis," *International Journal of Energy Research*, vol. 22, pp. 443-461, 1998.
- [12] [46] M. A. dos Santos Bernardes, R. Molina Valle, and M. F.-B. Cortez, "Numerical analysis of natural laminar convection in a radial solar heater," *International journal of thermal sciences*, vol. 38, pp. 42-50, 1999.
- [47] D. Kroger and D. Blaine, "Analysis of the driving potential of a solar chimney power plant," *SAI MechE R&D Journal*, vol. 15, pp. 85-94, 1999.
- [48] D. Kröger and J. Buys, "Radial flow boundary layer development analysis," *South African Institution of Mechanical Engineering, R & D Journal*, vol. 15, pp. 95-102, 1999.
- [49] A. J. Gannon and T. W. von Backström, "Solar chimney cycle analysis with system loss and solar collector performance," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 122, pp. 133-137, 2000.
- [50] M. dos S Bernardes, A. Voß, and G. Weinrebe, "Thermal and technical analyses of solar chimneys," *Solar Energy*, vol. 75, pp. 511-524, 2003.
- [51] J. r. Schlaich, R. Bergermann, W. Schiel, and G. Weinrebe, "Design of Commercial Solar Tower Systems: Utilization of Solar Induced Convective Flows for Power Generation," in *ASME 2003 International Solar Energy Conference*, pp. 573-581, 2003.

- [52] H. Pastohr, O. Kornadt, and K. Gürlebeck, "Numerical and analytical calculations of the temperature and flow field in the upwind power plant," *International Journal of Energy Research*, vol. 28, pp. 495-510, 2004.
- [53] A. Koonsrisuk and T. Chitsomboon, "Frictional effect on the flow in a solar chimney," in *Proceedings of the 4th National Symposium on Graduate Research*, Chiang Mai, Thailand, 2004.
- [54] Y. Dai, H. Huang, and R. Wang, "Case study of solar chimney power plants in Northwestern regions of China," *Renewable Energy*, vol. 28, pp. 1295-1304, 2003.

Résumé :

Le prototype de « cheminée solaire » installé au niveau de la faculté a été suivi durant cinq jours du mois de Mai 2017. Pour cette expérimentation, nous avons considéré cinq variantes (une, deux, jusqu'à cinq ouvertures du collecteur) et réaliser les différentes mesures d'une journée complète (24h).

Les valeurs maximales en matière de vitesse d'écoulement dans la cheminée, de températures sont obtenues dans l'intervalle temps 13h00-14h30. En fonction des variantes considérées, on a trouvé que pour une vitesse maximale d'écoulement égale à 3 m/s, la quatrième variantes (quatre trous à l'entrée) c'est la meilleure expérience, 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,

Abstract:

The "solar chimney" prototype that was set in the university was monitored for 5 days of the month of May 2017. For this experimentation, we have considered five variants (one, two, and till five openings) and achieved the different measures all the day (24h). The highest values in terms of flow rate inside the chimney, of temperature are gotten in the interval 13h00 - 14h30. Based on the considered variants, we have observed that the wind speed equal 3 m/s, so the fourth experience (four hole) it's the best results, 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, wind speed, temperature, radiance,

ملخص:

ان نموذج (المدخنة الشمسية) الذي تم وضعه على مستوى الكلية في الخمسة ايام من شهر ماي 2017 وخلال هذه التجربة اعتمدنا على خمسة متغيرات (فتحة فتحتان الى خمس فتحة) حيث انجزنا عدة قياسات في اليوم بأكمله (24 سا) حيث تم تسجيل القيم العظمى لكل من سرعة التدفق الحرارة في الفترة ما بين 13:00 و 14:30 بدلالة المتغيرات لقد وجدنا ان سرعة التدفق تساوي 3م/ثا المتغيرة الرابعة (4 فتحة للجامع) هي أفضل تجربة وهذا يبين ان عدد الفتحة يلعب دورا هاما.

عند هذا المستوى من التحليل نجد تأثير الاشعاع على الحرارة وسرعة التدفق أكد.

الكلمات المفتاحية: المدخنة الشمسية سرعة التدفق الحرارة الاشعاع