

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et la recherche scientifique
Université Mohammed Boudiaf. Msila
Faculté De Technologie

Domaine : ST



Mémoire De Fin D'étude

En Vue De L'obtention Du Diplôme De :

Master

En génie mécanique

Option : Energétique

Présenté par :

TAHIR AYMEN

HABACHE ACHRAF

Thème :

Modélisation d'une cheminée solaire

Devant le jury composé de :

Nom Et Prénom	Grade	Qualité
Ihaddadene Razika	Pr	Encadreur
Berkache Amar	MCA	Président
Benkherbache Souad	MCA	Examineur

Année universitaire : 2022/2023

N° d'ordre : GM/.....2023

Remerciements et gratitude

Louange à Dieu, audient, l'Omniscient, Possesseur d'une grande gloire et grâce, et prières et paix soient sur l'Elu, le Guide, le Généreux, et sur son Dieu et ses compagnons ensemble.

Nous adressons également nos remerciements à nos familles et à tous ceux qui nous ont tendu la main de près ou de loin et nous ont aidés à accomplir ce travail avec leur coopération et leurs encouragements.

Nous exprimons également nos remerciements et notre gratitude à Mme

*«**Ihaddaden Razika** » pour avoir accepté de superviser ce travail*

Et qui n'a ménagé aucun effort pour nous prodiguer conseils et orientations tout au long de la conduite de ce travail en le guidant et en l'orientant dans toutes les étapes de la recherche.

Nous exprimons nos remerciements et notre gratitude à nos estimés professeurs du Collège des sciences et de la technologie qui ont apporté leurs conseils.

*Merci également au comité de discussion, Dr **Berkache Amar** et Dr*

Benkherbache Souad

Ceux qui ont bien voulu accepter la discussion de ce mémorandum et ont consacré du temps et des efforts à vérifier et à enrichir cette recherche dans sa forme et son contenu.

Dédicace

*Je dédie cette réalisation d'une part à ma mère, sans qui je n'aurais pas
réalisé ce que j'ai accompli, et d'autre part à mon père, qui m'a soutenu et a été
un soutien pour moi, et en troisième lieu à mes collègues et amis, et tous mes
remerciements au professeur superviseur: Razika lhaddadene*

ACHRAF HABACHE

Dédicace

Je dédie ce travail aux purs, bien-aimés, ma mère et mon père, que Dieu les protège et leur accorde longue vie.

A mes frères "Samir", "Oussama", "Sami"

Et mes sœurs « Afaf » et « Sharifa ».

A tous les membres de la famille et aux proches.

A l'encadreur de mémoire " Ihaddadene Razika " professeur à Université de M'Sila

A tous les amis et surtout

A Ali bin Boudinah, que Dieu lui fasse miséricorde, à tous ceux que je connais de près ou de loin, à ceux qui ont hissé les drapeaux du savoir et de l'éducation mes distingués professeurs,

A tous ceux qui sont tombés par inadvertance de ma plume et qui ne sont pas tombés de mon cœur.

AYMEN TAHIR

Sommaire

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale	1
Chapitre I: Etat de l'art sur les cheminées solaires.	
Introduction	4
I.1. L'énergie solaire	4
I.2. Les applications d'énergie solaire	4
I.2.1. L'électrification	4
I.2.2. La climatisation	5
I.2.3. Production d'eau chaude	5
I.2.4. L'agriculture	5
I.3. Description et principe de fonctionnement d'une cheminée solaire	6
I.3.1. Principaux éléments de la cheminée solaire	6
I.3.1.1. Le collecteur	6
I.3.1.2. Cheminée (la tour)	6
I.3.1.3. Turbines éoliennes	7
I.4. Avantages et inconvénients de la cheminée solaire	7
I.4.1. Les Avantages	7
I.4.2 Les Inconvénients [1]	8
I.5 Projets de centrales solaires à cheminée existant dans le monde	8
I.5.1. Prototype de Manzanares	8
I.5.2. Le projet de Borunga	9
I.5.3. Projet Espagnol, Ciudad Real	10
I.5.4. La centrale solaire à cheminée d'Arizona	11
I.5.6. Montagnes solaires : du français raphaël menard -groupe OTH	12

I.5.7. Cheminées solaires flottantes du grec Christos Papageorgiou	12
I.6 Les différentes méthodes de stockage	13
I.6.1. Par chauffage d'eau	13
I.6.2. Par chauffage de sable	14
I.6.3. Par chauffage de galets	14
I.7. Les bilans énergétiques dans une cheminée solaire	14
I.7.1. Bilan énergétique au niveau du collecteur	15
I.7.2 Bilan énergétique au niveau de flux d'air	17
I.7.3. Bilan énergétique au niveau de l'absorbeur (sol)	18
I.8. Éléments de calcul de la cheminée solaire	19
I.8.1. La puissance de la cheminée solaire	19
I.8.2. La puissance du collecteur	20
I.8.3. La puissance de la turbine	21
Conclusion	21
Chapitre II: simulation de la cheminée solaire en utilisant le logiciel de simulation Energy2D	
Partie 1 : Présentation du logiciel Energy2D	23
II.1.1. Description du logiciel Energy2D	23
II.1.2. Domaine d'application d'Energy2D	24
II.1.3. La simulation avec Energy2D	25
Partie 2 : Présentation de la cheminée solaire dans Energy2D	27
II.1.4. Préparation de la simulation de la cheminée solaire	27
II.1.4.1. Définition du milieu environnant :	27
II.1.4.2. Définition des géométries	29
II.1.4.3. Définition des propriétés thermiques des matériaux utilisés	30
II.1.4.4. Définition des propriétés optiques des matériaux utilisés :	30

II.1.5. Visualisation des résultats de la simulation:	31
Conclusion	33
Chapitre III: Résultat et discussion	
Introduction	34
III.1. Évolution des températures dans une cheminée solaire	34
III.1.1 Evolution des températures de l'air dans le collecteur	35
III.1.2. Evolution des températures de l'air dans la cheminée solaire	36
III.2. Effet des radiations solaires sur la variation de température dans le collecteur	37
III.3 Effet de la hauteur de cheminée sur la variation de température dans le collecteur et la cheminée	39
III.3.1. le collecteur	39
III.3.2.la cheminée	41
III.4 Effet de la distance collecteur-absorbeur sur la variation de température dans le collecteur et la cheminée	42
III.4.1.Le collecteur	42
III.4.2.La cheminée	43
Conclusion	45
Conclusion Générale	46
Référence	48
Résumé	51



**Liste des figures et des
tableaux**

Liste des figures

Chapitre I : Etat de l'art sur les cheminées solaires.

Figure I. 1: Collecteur de la cheminée solaire [5].	6
Figure I. 2: Schéma présentatif de la cheminée solaire.	7
Figure I. 3: Prototypé de Manzanares en Espagne [8].	9
Figure I. 4: Projet de Buronga en Australie[9] .	10
Figure I. 5Le projet Américain (Arizona)[10].	11
Figure I. 6: La cheminée solaire flottante [11].	12
Figure I. 7: Principe de stockage de la chaleur dans le collecteur par des tubes remplis d'eau [13].	13
Figure I. 8: Principe du stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des galets [16].	14
Figure I. 9: Schéma de la cheminée solaire simplifié [17].	15
Figure I. 10: Bilan énergétique au niveau de vitrage [18].	15
Figure I. 11 : Bilan énergétique au niveau du flux d'air.	18
Figure I. 12: Bilan énergétique au niveau de l'absorbeur (sol) [19].	19

Chapitre II : simulation de la cheminée solaire en utilisant le logiciel de simulation Energy2D

Figure II. 1: Le logo d'Energie 2D [Web3].	24
Figure II. 2: La fenêtre de Energy2D.	25
Figure II.3 a: La boîte à outils.	25
Figure II.3 b: Les capteurs qui peuvent être installés en Energy2D.....	26
Figure II.3 c: La barre d'excision de la simulation en Energy2D.	26
Figure II.4: Schéma de la cheminée solaire en Energy2D.	27
Figure II. 5: Propriétés du milieu environnante Energy2D.....	28
Figure II 5. a: Propretés milieu environnement.....	28
Figure II 5. b: Les propriétés du rayonnement solaire.....	29

Figure II 6: La géométrie du collecteur (partie droite)	29
Figure II. 7: Les propriétés thermiques du collecteur.....	30
Figure II.8: Les propriétés optiques du collecteur.....	31
Figure II.9a: Exemple de la représentation des résultats dans Energy2D sous forme de graphe.....	32
Figure II.9 b: Exemple de la représentation des résultats dans Energy2D sous forme d'un tableau.....	32

Chapitre III : Résultat et discussion

Figure III.1a: Schéma de la simulation en Energy2D.....	35
Figure III.1b: Schéma de la simulation en energy2D après4500s	36
Figure III.2: Évolution des températures de l'air dans le collecteur.	36
Figure III.3: Évolution des températures de l'air en fonction de la position des sondes dans le collecteur.....	37
Figure III.4: Évolution des températures de l'air dans la cheminée.....	37
Figure III.5: Évolution des températures de l'air en fonction de la position des sondes dans la cheminée.	38
Figure III.6: Schéma de la simulation en Energy2D.....	39
Figure III.7: Évolution de la différence de température de l'air dans le collecteur pour chaque radiation solaire.	39
Figure III.8: Évolution de la différence de température en fonction des radiations solaires.....	40
Figure III.9: Évolution de la différence de température de l'air dans le collecteur.....	41
Figure III.10.: Evolution de la différence de température dans le collecteur en fonction de la hauteur de la cheminée.....	42

Figure III.11: Évolution de la différence de température de l'air dans la cheminée.....	43
Figure III.12: Evolution la différence de température en fonction de la hauteur de la cheminée.	43
Figure III.13: Évolution de la différence de température de l'air dans le collecteur.....	44
Figure III.14: Evolution de la différence de température dans le collecteur en fonction de la distance.....	45
Figure III.15: Évolution de la différence de température de l'air dans la cheminée.....	46
Figure III.16: Evolution moyenne de la différence dans la cheminée en fonction de la distance.	46

Liste des tableaux

Tableau II. 1: Propriétés thermiques des composants de la cheminée solaire [Web4].	31
Tableau II. 2: Propriétés optiques des composants de la cheminée solaire [Web4].	32

Introduction générale

Introduction générale

La croissance population rapide et la croissance économique entraînent un besoin croissant d'énergie pour maintenir un mode de vie moderne vivable et durable. L'utilisation de combustibles fossiles comme le charbon, le pétrole et le gaz présent le risque d'épuiser les réserves de sources d'énergie non renouvelables et d'augmenter les risques environnementaux par conséquent, les efforts et la recherche doivent être dirigé vers les sources d'énergie renouvelables. Pour avoir une énergie propre et de longue durée à partir de ces énergies.

Comme source d'énergie inépuisable, l'énergie solaire est l'un des plus grands espoirs. Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire de l'énergie thermique ou électrique. La cheminée solaire est l'une de ces applications qui sert à produire de l'énergie électrique à partir de l'énergie solaire par la transformation de cette dernière en énergie cinétique de l'air interne et cette énergie cinétique à son tour entraîne des turbines éoliennes puis se transforme en électricité à la fin.

Comme suite aux travaux effectués durant ces deux dernières années sur la cheminée solaire, le présent mémoire s'intéresse à la simulation numérique de la cheminée solaire du point de vue dynamique des fluides et transfert thermique. Notre étude est consacré à l'étude de l'influence des paramètres géométriques de la cheminée solaire et du rayonnement solaire sur le comportement thermique de l'air à l'intérieure de la cheminée solaire.

Notre mémoire s'articule au tour de trois chapitres répartis comme suit :

Le premier chapitre explique le principe de la cheminée solaire et les organes principaux intervenant dans son fonctionnement Il présente également les usages de l'énergie solaire, les avantages et inconvénients de la cheminée solaire, et quelques modèles dans plusieurs régions et pays. En plus, les bilans énergétiques et éléments du calcul de la cheminée solaire sont présentés également.

Le deuxième chapitre présente les étapes nécessaires de la simulation de la cheminée solaire en utilisant le logiciel de simulation Energy2D. Il est divisé en deux parties, la première présente une présentation du logiciel utilisé et la deuxième partie est consacrée à la simulation de la cheminée solaire avec ce logiciel.

Le troisième chapitre présente les résultats de la simulation de la cheminée solaire en utilisant le logiciel Energy2D, à savoir ; l'évolution de la température de l'air dans le collecteur et dans la cheminée, l'effet des radiations solaires sur l'évolution des températures

Introduction générale

dans le collecteur et dans la cheminée solaire. De même, l'effet de la longueur de la cheminée et l'effet de la distance collecteur-absorbeur sur les évolutions des températures du collecteur et de la cheminée ont été étudiés également effectués.

Enfin une conclusion générale résume tous les résultats obtenus.

Chapitre I

**Etat de l'art sur les
cheminées solaires.**

Introduction

La cheminée solaire est un dispositif solaire conçu pour transformer l'énergie des rayons solaires en énergie cinétique qui à son tour est transformée en énergie mécanique puis électrique.

Le fonctionnement est basé sur l'échauffement par effet de serre d'un volume d'air, l'air chaud à masse volumique moins dense soumis à la poussée d'Archimède engendre un mouvement d'ascension créant un vent à la base de la cheminée. L'énergie cinétique du fluide sera exploitée pour faire tourner une turbine à vent. La cheminée solaire est déjà mise en application et a montré des résultats acceptables dans le domaine du développement et d'exploitation des énergies renouvelables.

Elle est constituée de trois éléments principaux, à savoir le capteur solaire ou le collecteur, la tour et la turbine.

I.1. L'énergie solaire

L'énergie solaire est l'énergie que dégage le soleil sous forme de rayonnement, direct ou diffus sur terre. L'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau et de vent, le règne végétal dont dépend le règne animal, l'utilise également en la transformant en énergie chimique par la photosynthèse. Grâce aux diverses exécutions, elle peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur, en électricité ou en biomasse. Par extension, l'expression «énergie solaire» est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir du rayonnement solaire. [1]

I.2. Les applications d'énergie solaire

L'éventail des applications de l'énergie solaire est relativement large, il va de l'électrification à l'agriculture en passant par la climatisation, le chauffage, la production de l'eau chaude solaire et le pompage solaire.

I.2.1. L'électrification

Avec des panneaux solaires photovoltaïques on peut produire de l'électricité, qui peut être utilisée de plusieurs façons :

- L'éclairage domestique : toutes les ampoules domestiques peuvent fonctionner avec l'énergie solaire. En utilisant des ampoules LEDs de 10 kWh, un panneau de 100 w pourrait permettre d'utiliser jusqu'à 10 ampoules dans les maisons.

- L'éclairage public, avec les lampadaires solaires.
- Les équipements électriques domestiques : les panneaux vont produire du courant continu et l'onduleur va le transformer en courant alternatif qui sera utilisable par la totalité des appareils électriques : lave-linge, micro-ondes, télévisions, ventilateurs, climatiseurs, réfrigérateurs, etc.

I.2.2. La climatisation

L'énergie solaire peut être utilisée pour la climatisation de deux manières :

- D'abord en produisant de l'électricité qui peut être utilisée pour faire fonctionner un climatiseur classique : cette option n'est pas recommandée car elle est très coûteuse vu que le climatiseur sera en général très consommateur (plus de 2000 kWh) et aussi qu'il va fonctionner avec du courant alternatif qui doit être converti par un onduleur avec une puissance conséquente (donc plus).
- En faisant directement marcher des climatiseurs solaires : ces climatiseurs solaires ont en général une meilleure efficacité énergétique ce qui leur permet d'avoir une consommation énergétique réelle de 600 kWh pour les modèles 12 BTU.

I.2.3. Production d'eau chaude

Les capteurs solaires thermiques ainsi que les panneaux solaires aérovoltaiques permettent d'utiliser la chaleur du soleil pour chauffer de l'eau. Cette eau peut être à usage sanitaire et donc envoyée vers un ballon d'eau chaude ou à usage de chauffage et donc envoyé vers des radiateurs ou un plancher chauffant.

Un chauffe-eau solaire permet de couvrir jusqu'à 100% des besoins en eau chaude du ménage. D'une part que les températures élevées permettent un excellent rendement et d'autre part parce que les besoins en eau chaude sont assez limités. Ainsi un chauffe-eau solaire de 150 litres sera souvent suffisant pour la plupart des ménages [3].

Une troisième application est le chauffage des piscines.

I.2.4. L'agriculture

L'énergie solaire a plusieurs applications dans l'agriculture et l'élevage [3] :

- Elle peut servir à électrifier les champs et domaines qui bien souvent ne sont pas raccordés au réseau électrique. L'installation de panneaux solaires permet alors aux personnes ou installées sur place de pouvoir utiliser leurs appareils électriques.

- Elle peut être utilisée pour le pompage de l'eau, quelques panneaux (sans batteries, sans régulateurs et sans onduleurs) peuvent suffire pour faire fonctionner des pompes (DC) de surface ou immergées. L'eau pompée peut être stockée dans des réservoirs pour utilisation ultérieure, dans des bassins surélevés pour l'irrigation par gravitation, ou déversée dans les abreuvoirs du bétail.
- Le courant produit peut aussi être utilisé pour électrifier les clôtures.

I.3. Description et principe de fonctionnement d'une cheminée solaire

I.3.1. Principaux éléments de la cheminée solaire

La cheminée solaire est composée de trois éléments essentiels suivants:

I.3.1.1. Le collecteur

Un toit en verre ou en film plastique et la terre naturelle en dessous forment un collecteur d'air. Le collecteur est ouvert à la périphérie pour permettre l'introduction de l'air frais. Le toit du collecteur (qui est supporté quelques mètres au-dessus de la terre) a pour but de rassembler les rayons solaires pour réchauffer la masse d'air à l'intérieur du collecteur [4].

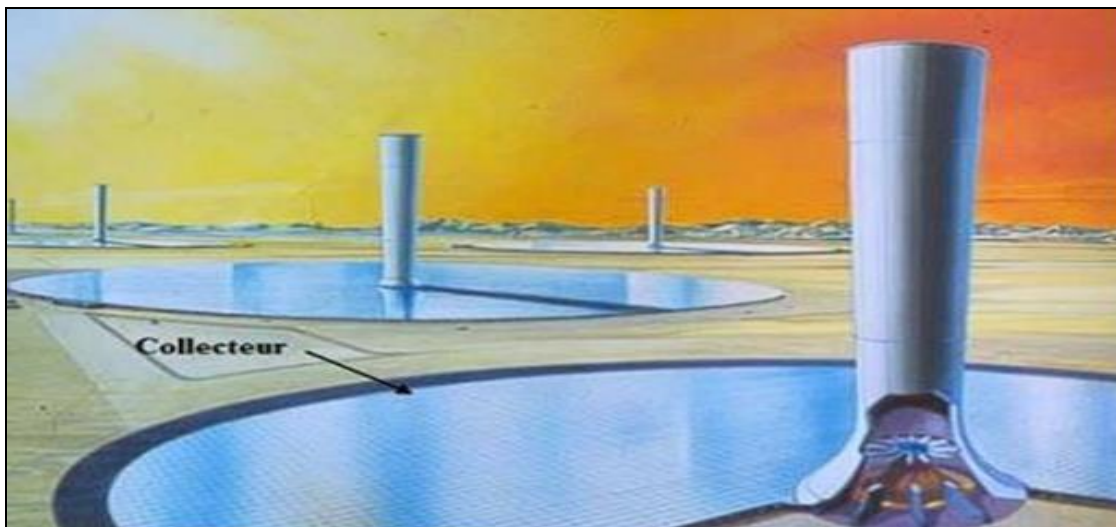


Figure I. 1: Collecteur de la cheminée solaire [5].

I.3.1.2. Cheminée (la tour)

La cheminée elle-même est le moteur réel de l'équipement. Il s'agit d'un tube à faible frottement pour créer un écoulement d'air sous forme de vent. Il faut que la hauteur de la cheminée soit plus élevée, pour atteindre un niveau de basse pression par rapport au niveau de la base.

I.3.1.3. Turbines éoliennes

Elles servent à convertir le courant d'air ascendant en énergie mécanique, puis électrique.

I.3.2 Principe de fonctionnement de la cheminée solaire

L'air est chauffé par le rayonnement solaire sous l'effet de serre dans le collecteur qui est ouvert à la périphérie pour introduire l'air frais, et puisque l'air le plus chaud est plus léger que l'air froid, il s'élève en haut d'une cheminée localisée au centre du collecteur. Une turbine éolienne à la base de la cheminée est mise dans la trajectoire de l'écoulement de l'air pour convertir l'énergie cinétique de l'air écoulant en énergie mécanique et le générateur entraîné par la turbine convertit l'énergie mécanique en énergie électrique comme illustré sur la Fig.I.2. Une cheminée solaire avec un terrain large pour le collecteur et une cheminée plus haute peut produire de 100 à 200 MW pendant la journée [6].

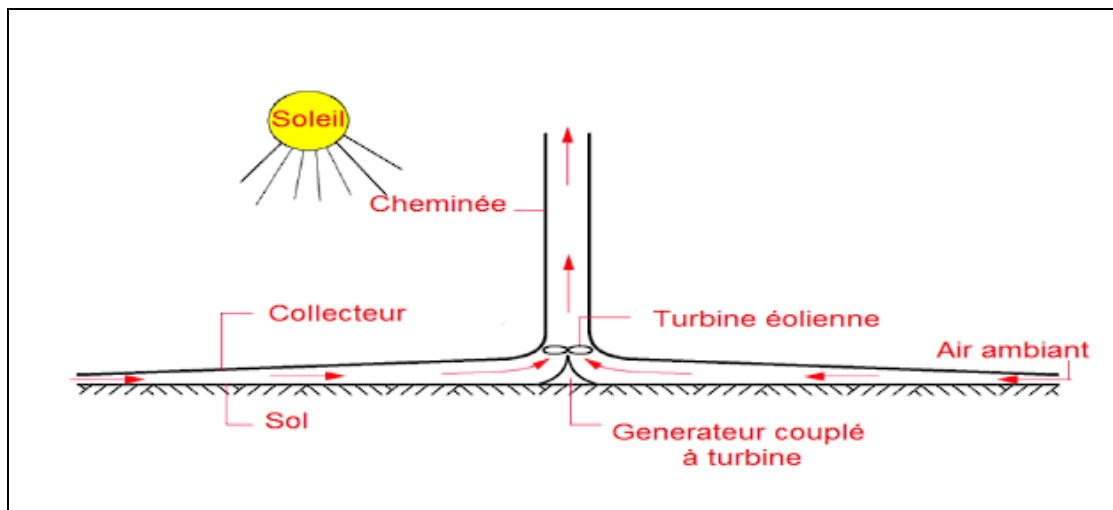


Figure I. 2: Schéma représentatif de la cheminée solaire.

I.4. Avantages et inconvénients de la cheminée solaire

I.4.1. Les Avantages

La cheminée solaire possède de multiples avantages pour la production d'énergie future [1] :

- 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.

I.4.2 Les Inconvénients [1]

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

I.5 Projets de centrales solaires à cheminée existant dans le monde

I.5.1. Prototype de Manzanares

Basé sur des informations détaillées, la recherche préliminaire théorique et un large éventail d'expériences en soufflerie, Schlaich Bergermann a conçu, construit et exploité une usine expérimentale avec une puissance maximale de 50 kW sur un site mis à disposition par la compagnie d'électricité espagnole Union Fenosa Electrica à Manzanares (environ 150km au Sud De Madrid) en 1982 (Fig I.3), avec des fonds fournis par le ministère allemand de la Recherche et de la Technologie (BMFT). [7]

L'objectif de ce projet de recherche était de vérifier, par des mesures sur le terrain, le rendement prévu des calculs basés sur la théorie, et d'examiner l'influence des différents composants sur le rendement et l'efficacité de l'usine en vertu d'ingénierie réaliste et des conditions météorologiques. Les dimensions principales et les données techniques de ce prototype sont données :

- Une cheminée de 195 m de haut en matériaux composites
- Un collecteur de 250m de diamètre, soit 6000 m² de verre et 40000 m² de plastique.
- Température de l'air chauffé dans la cheminée : 20 °C.
- 4 turbines
- Puissance produite : 50 kW

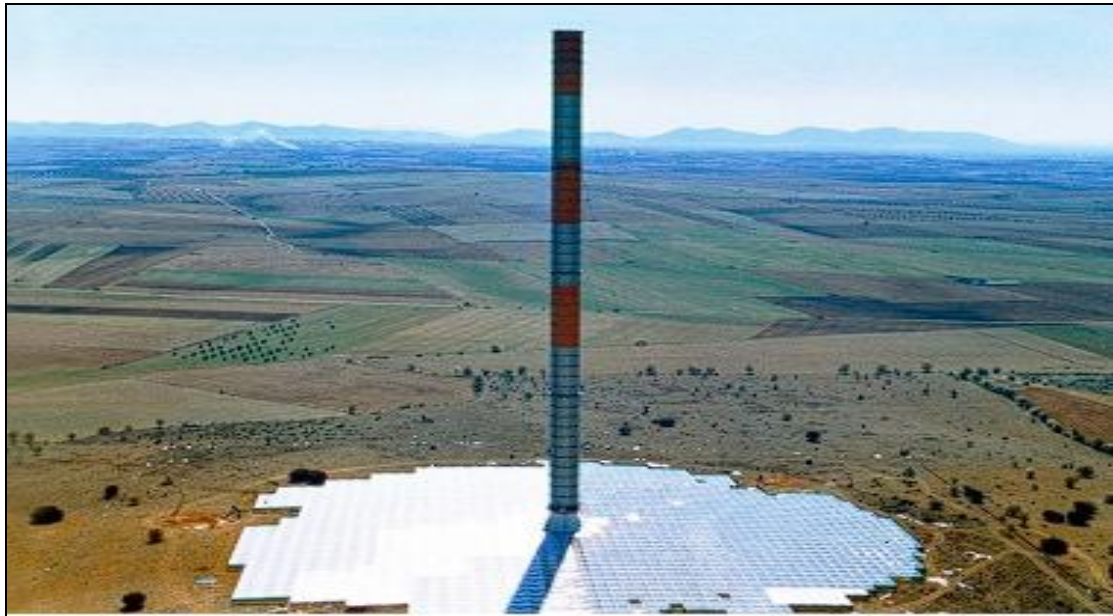


Figure I. 3: Prototype de Manzanares en Espagne [8].

I.5.2. Le projet de Borunga

Un projet de tour solaire, nommé Projet de Buronga, prévue pour 2010, est aujourd'hui développé en Australie par la société Enviromission. La cheminée. C'est un des projets les plus ambitieux de la planète pour la production d'énergie alternative.



Figure I. 4: Projet de Buronga en Australie[9] .

La tour solaire apporterait un kilowatt-heure près d'un tiers moins cher que ceux apportés par les panneaux solaires, mais toujours cinq fois plus cher que l'électricité au charbon, qui représente 95% de la production en Australie. Des touristes pourraient visiter la tour, pour diminuer toujours significativement le prix du kilowatt-heure. La culture de tomates au sein du collecteur est aussi envisagée. Les spécifications du projet

- Une cheminée de 990 m de haut (3281 pieds) matériaux composite
- Un collecteur de 7 km de diamètre, soit 38, 5 km² de verre et de plastique.
- Température de l'air chauffé dans la cheminée : 70 °C
- Vitesse de l'air dans la cheminée : 15 m/s (54 km/h).
- 32 turbines
- Puissance produite : 200 MW
- Le coût d'investissement est d'environ 400 millions d'euros.

I.5.3. Projet Espagnol, Ciudad Real

La tour de Ciudad Real est la plus haute en Europe, s'élancera dans la localité de Fuente el Fresno au centre d'un collecteur solaire en verre. 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. Ce projet est réalisé en collaboration avec la compagnie allemande Schlaich Bergermann, par les sociétés espagnoles IMASA et CAMPO3.

➤ **Spécifications du projet**

- Une cheminée de 750 m de haut
- Un collecteur de surface de 350 hectares et de 3 km de diamètre
- Puissance de l'installation : 40 mégawatts
- Coût du projet : 240 millions d'euros

I.5.4. La centrale solaire à cheminée d'Arizona

Dans le désert de l'Arizona, un projet très ambitieux et de grande envergure dans le domaine de l'énergie pourrait bientôt démarrer. Le projet est mis en œuvre par la société australienne EnviroMission, qui est en train de résoudre le problème de l'achat de terres dans le désert et qui va commencer les travaux d'ingénierie pour la construction de sa première tour solaire à grande échelle. Selon les plans des promoteurs australiens, la nouvelle tour sera tout simplement gigantesque et deviendra l'un des bâtiments les plus hauts de la planète. La hauteur de la tour sera d'environ 800 m, le diamètre de la partie supérieure - 130 m, et ses performances pourront atteindre 200 MW. Cette capacité sera suffisante pour alimenter au moins 150 en électricité avec des milliers de foyers américains. Selon des calculs effectués par des experts, après sa mise en service, cette tour pourra fonctionner pendant au moins 80 ans.



Figure I. 5: Le projet Américain (Arizona)[10].

I.5.6. Montagnes solaires : du français raphaël menard -groupe OTH

Fournir jusqu'à 500 mégawatts de puissance électrique - le tiers d'une tranche nucléaire - uniquement avec la chaleur solaire et l'altitude de la montagne: c'est le projet Elioth, élaboré par Raphaël Ménard et son équipe de la société d'ingénierie OTH. Le principe est inspiré des tours solaires, où l'air est d'abord chauffé au sol, dans une serre géante, puis aspiré dans une cheminée au centre de l'infrastructure afin d'entraîner des turbines. Le courant d'air ascendant résulte du contraste de température entre le sol et l'altitude. Seul inconvénient: pour être performante, l'installation doit disposer d'une cheminée de plus de ... 1.000 m de haut Elioth remplace la tour par des conduits à flanc de montagne.

I.5.7. Cheminées solaires flottantes du grec Christos Papageorgiou

L'idée est de diminuer le coût de construction d'une tour solaire classique, à l'aide d'une structure plus légère que l'air, gonflée par exemple à l'hélium. Une partie fixe et lourde au sol permet son inclinaison, la partie montante et légère étant constituée de boudins gonflés. Le projet de tour solaire (Fig. I.6) de cet inventeur Grec est appelée « flottante », mais en fait il s'agit d'une structure souple et flexible fixée au sol dans un désert sec.

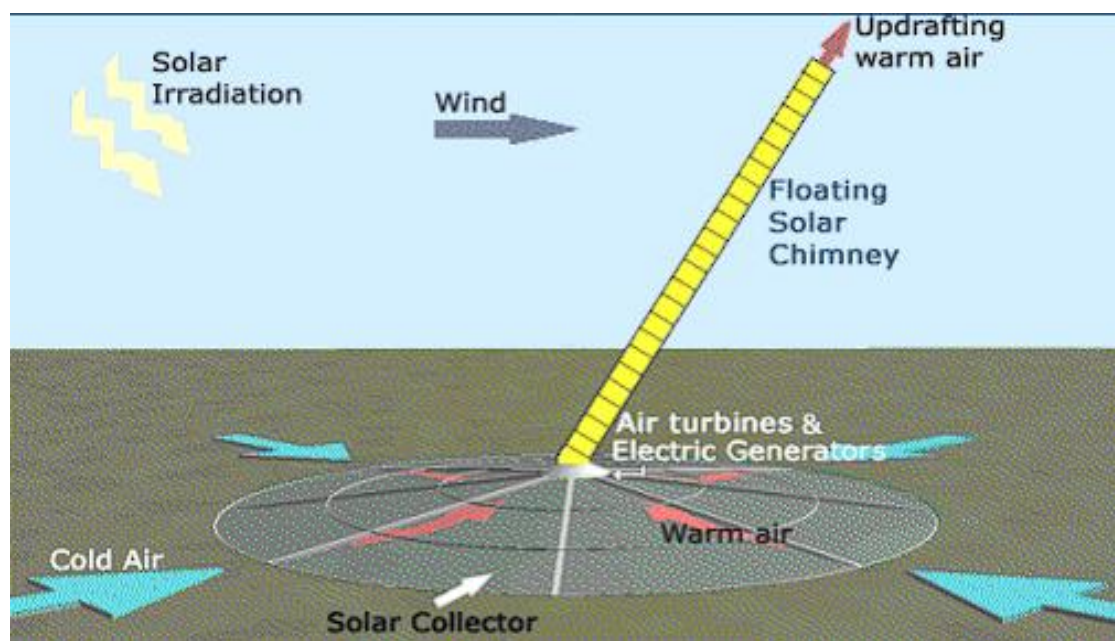


Figure I. 6: La cheminée solaire flottante [11].

I.6 Les différentes méthodes de stockage

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

I.6.1. Par chauffage d'eau

Comme les collecteurs produisent de l'air chaud par effet de serre, pour produire de l'électricité durant la nuit, des réservoirs noirs tubulaires remplis d'eau sont placés sous la serre comme montré dans la Fig I.7. Les poches à eau accumulent de la chaleur le jour et la restituent à l'air la nuit. Ces tubes sont remplis une seule fois pour toutes, il ne faut plus d'eau ensuite puisque les tubes sont hermétiquement clos après le remplissage. Le volume d'eau dans les tubes est calculé pour correspondre à une hauteur d'eau de 5 à 20 cm en fonction de la puissance désirée de production nocturne, l'énergie stockée pour la nuit diminuant la production de la journée. Un ajustement de la production peut être effectué aux heures de pointe où l'électricité se vend 3 à 10 fois plus cher qu'aux heures creuses, améliorant ainsi la rentabilité [12].

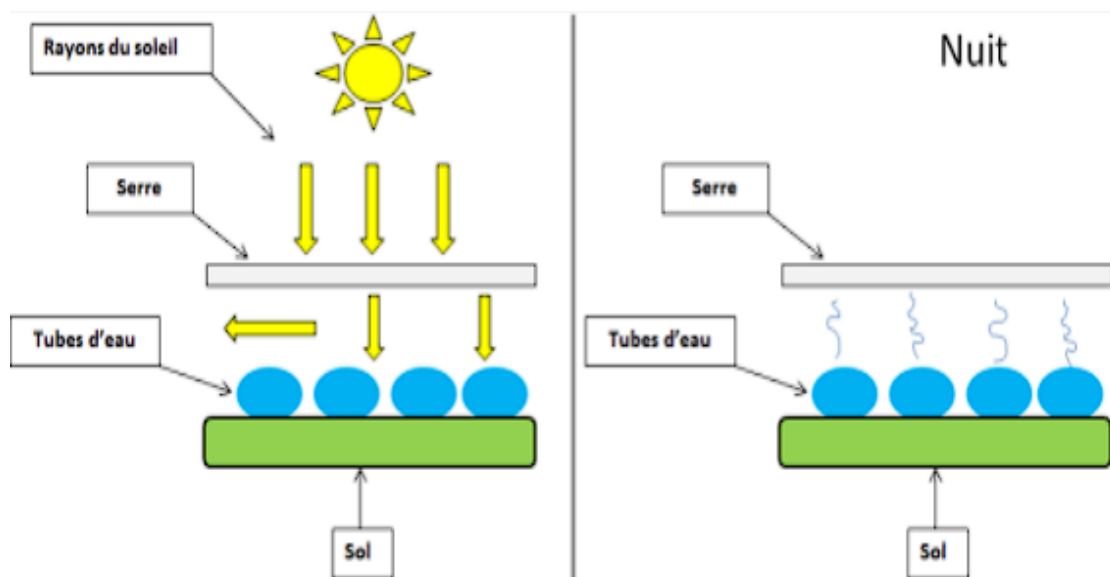


Figure I. 7: Principe de stockage de la chaleur dans le collecteur par des tubes remplis d'eau [13].

I.6.2. Par chauffage de sable

Le sable chauffe et absorbe la chaleur du soleil, le flux d'air chaud transmis à la cheminée assure la production d'électricité en faisant tourner la turbine à l'intérieur de la tour. Le sable est chauffé par le soleil pendant la journée et de l'énergie est stockée, puis la chaleur est libérée pendant la nuit et continue à faire fonctionner la turbine. Ceci permet au système de fonctionner en hiver même quand il y a un minimum de soleil. De cette façon, le système peut fonctionner 24h autour de l'horloge, 365 jours d'une année [14].

I.6.3. Par chauffage de galets

Afin d'optimiser cette production nocturne, nous pouvons placer sous la serre des galets qui ont un pouvoir de stockage de chaleur très important comme illustré sur la Fig I.8 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 [15].

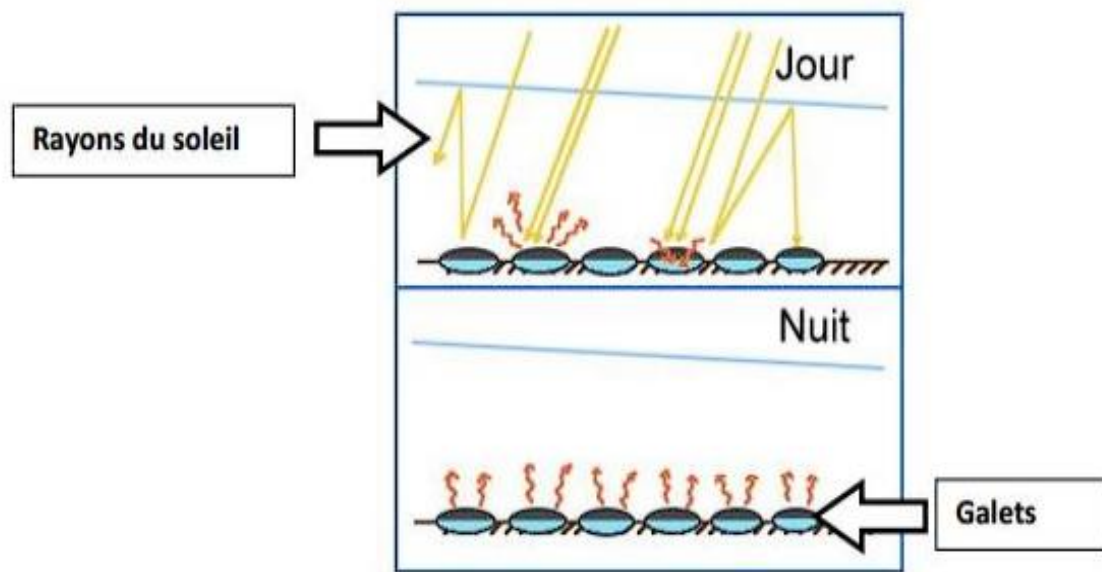


Figure I. 8: Principe du stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des galets [16].

I.7. Les bilans énergétiques dans une cheminée solaire

En effectuant un bilan énergétique dans les trois parties de la cheminée solaire, le collecteur (la couverture en verre), le flux d'air et l'absorbeur (sol) comme noté sur la Figure I.9, on obtient les équations qui gouvernent l'écoulement de l'air dans la cheminée solaire.

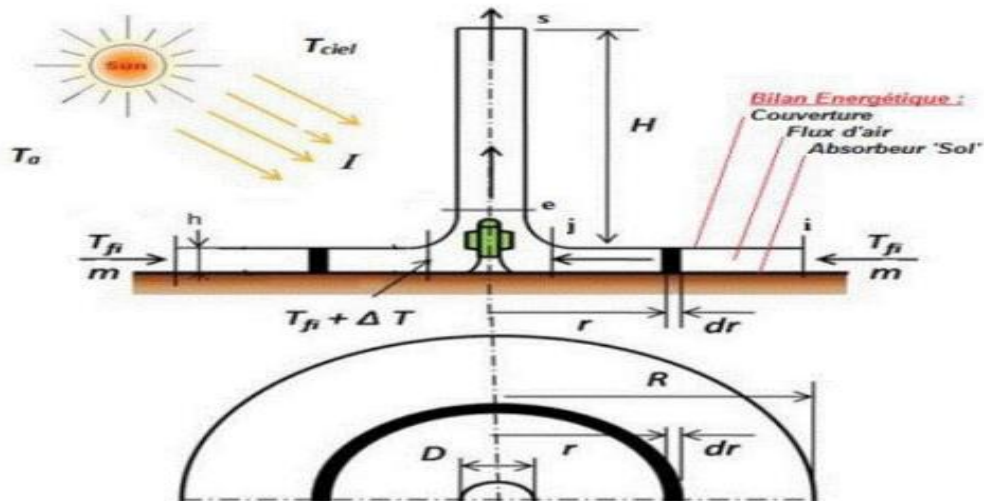


Figure I. 9: Schéma de la cheminée solaire simplifié [17].

I.7.1. Bilan énergétique au niveau du collecteur

Le collecteur absorbe la chaleur provenant du rayonnement solaire et de l'absorbeur, une partie est perdue par convection avec l'air entre l'absorbeur et le collecteur et l'air ambiant et également par rayonnement vers le ciel comme illustré sur la Figure I.10. Ce qui se traduit par:

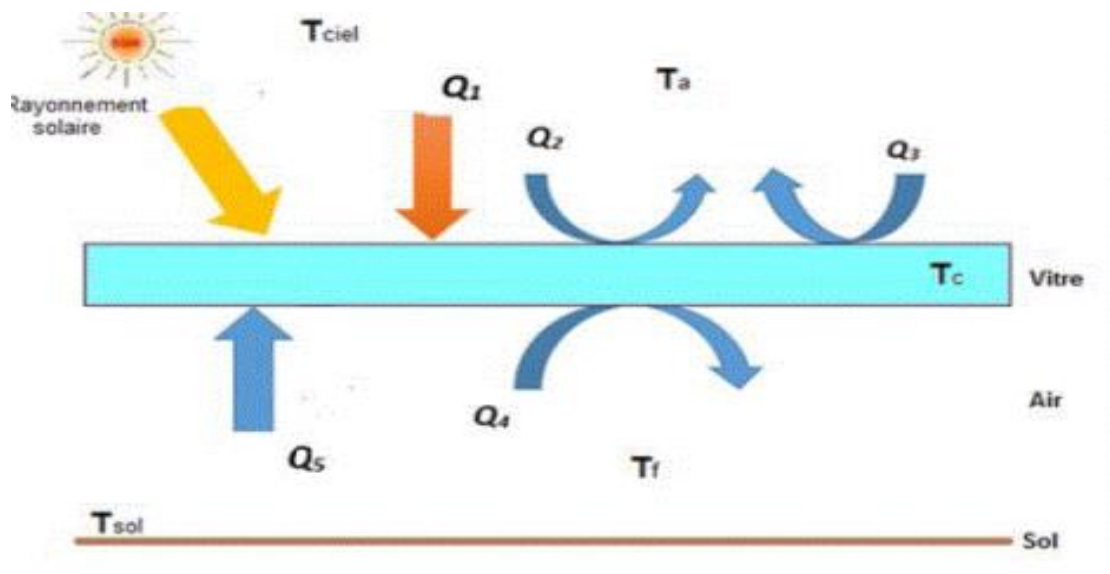


Figure I. 10: Bilan énergétique au niveau de vitrage [18].

Le rayonnement solaire incident + le rayonnement réfléchi par l'absorbeur = chaleur perdue par convection de vitrage vers l'air de la cheminée + pertes thermiques de vitrage vers l'extérieur.

Avec:

$$Q_1 + Q_5 = Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (\text{I.1})$$

$$Q_1 = \alpha_1 A_c I \quad (\text{I.1.1})$$

$$Q_2 = A_c h_v (T_c - T_a) \quad (\text{I.1.2})$$

$$Q_3 = A_c h_{r_{c-ciel}} (T_c - T_{ciel}) \quad (\text{I.1.3})$$

$$Q_4 = A_c h_{c_{c-f}} (T_f - T_c) \quad (\text{I.1.4})$$

$$Q_5 = A_c h_{r_{c-sol}} (T_{sol} - T_c) \quad (\text{I.1.5})$$

$$\alpha_1 A_c I + A_c h_{r_{c-sol}} (T_{sol} - T_c) = A_c h_v (T_c - T_a) + A_c h_{r_{c-ciel}} (T_c - T_{ciel}) + A_c h_{c_{c-f}} (T_f - T_c) \quad (\text{I.1.6})$$

Avec :

α_1 : Absorptivité de vitrage

A_c : La surface de collecteur (m²)

I : L'irradiation solaire (w/m²)

$h_{r_{c-sol}}$: Le coefficient de transfert radiatif entre le sol et le vitre (w /m²°C)

h_v : Le coefficient de transfert de vent (w /m². °C)

$h_{r_{c-ciel}}$: Le coefficient de transfert radiatif de ciel (w /m². °C)

h_c : hauteur de collecteur (m)

T_c : Température de collecteur (°C)

T_{ciel} : La température de ciel (°C)

T_f : Température de fluide (air) (°C)

T_{sol} : La température de l'absorbeur (sol) (°C)

T_a : Température Ambiante (°C)

$h_{c_{c-f}}$: Le coefficient de transfert radiatif entre le collecteur et le fluide (w /m²°C)

Si on divise l'équation précédente sur la surface A_c , on obtient :

$$\alpha_1 I + h_{r_{c-sol}} (T_{sol} - T_c) = h_v (T_c - T_a) + h_{r_{c-ciel}} (T_c - T_{ciel}) + h_{c_{c-f}} (T_f - T_c) \quad (\text{I.1.7})$$

$$\alpha_1 I = h_v T_c - h_v T_a + h_{r_{c-ciel}} T_c - h_{r_{c-ciel}} T_{ciel} + h_{c_{c-f}} T_f - h_{c_{c-f}} T_c - h_{r_{c-sol}} T_{sol} + h_{r_{c-sol}} T_c \quad (\text{I.1.8})$$

$$\alpha_1 I + h_v T_a + hr_{c-ciel} T_{ciel} - hc_{c-f} T_f - hc_{c-f} T_f + hr_{c-sol} T_{sol} = h_v T_c + hr_{c-ciel} T_c + hc_{c-f} T_c + hr_{c-sol} T_c$$

(I.1.9)

On suppose que:

$$C_1 = h_v + hr_{c-ciel} + hr_{c-sol} - hc_{c-f} \quad (\text{I.1.a})$$

L'équation (I.1.a) prend la forme suivante :

$$C_1 T_c + hc_{c-f} T_f - hr_{c-sol} T_{sol} = \alpha_1 I + h_v T_a + hr_{c-ciel} T_{ciel} \quad (\text{I.1.b})$$

I.7.2 Bilan énergétique au niveau de flux d'air

L'air dans le collecteur reçoit des flux convectifs de la part de l'absorbeur (sol) et du vite comme noté sur la Figure I.11. Ce qui se traduit par le bilan suivant:

$$Q_6 = Q_4 + Q_7 \quad (\text{I.2})$$

$$T_f m C_p dA_c = hc_{c-f} (T_f - T_c) + hc_{f-sol} \times A_c (T_{sol} - T_f) \quad (\text{I.2.1})$$

$$m C_p dT = hc_{c-f} A_c (T_f - T_c) - hc_{f-sol} A_c (T_{sol} - T_f) \quad (\text{I.2.2})$$

$$\frac{dT}{dr} = \frac{hc_{c-f}}{m C_p} (2\pi r) + (T_f - T_c) \frac{hc_{f-sol}}{m C_p} (2\pi r) (T_{sol} - T_f) \quad (\text{I.2.3})$$

On suppose que:

$$C_2 = (hc_{c-f} / m C_p) \times A_c \quad (\text{I.2.a})$$

$$C_3 = (hc_{f-sol} / m C_p) \times A_c \quad (\text{I.2.b})$$

On suppose que :

$$C_4 = C_2 + C_3 \quad (\text{I.2.c})$$

$$\left(\frac{d}{dr} + (2\pi r) C_4 \right) T_f - (2\pi r) C_3 T_{sol} + (2\pi r) C_2 + T_c = 0 \quad (\text{I.1.4})$$

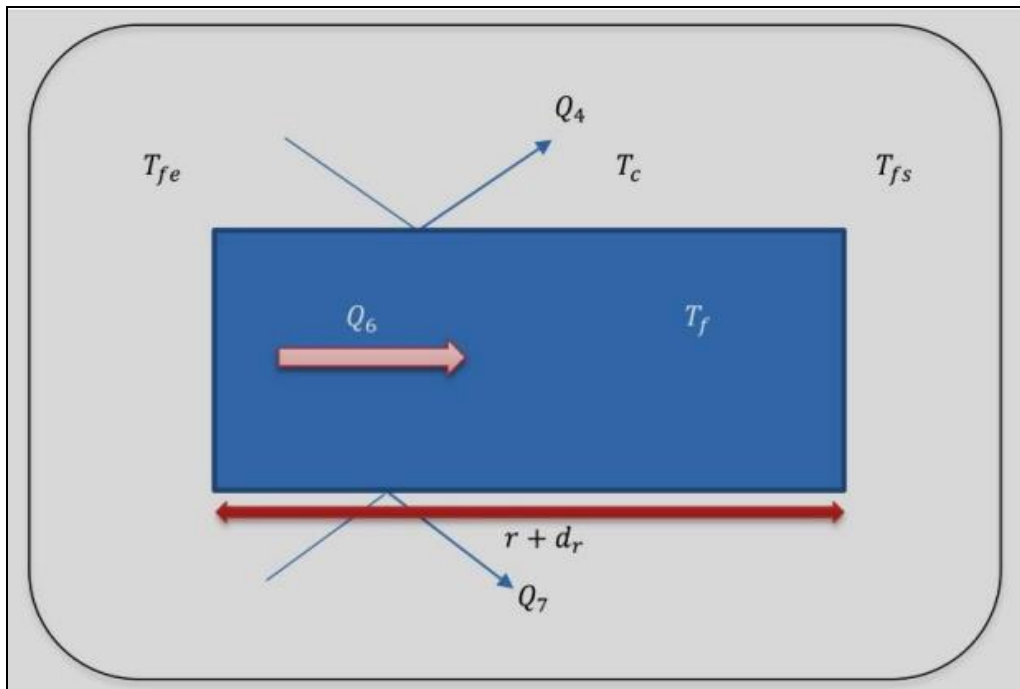


Figure I. 11 : Bilan énergétique au niveau du flux d'air.

I.7.3. Bilan énergétique au niveau de l'absorbeur (sol)

L'absorbeur absorbe la totalité du rayonnement qui traverse le vitrage, par contre il va rayonner vers le collecteur, et il va perdre une autre partie par convection avec 30 l'air qui circule entre le collecteur de l'absorbeur comme noté sur la Figure I.12 Ce qui se traduit mathématiquement par :

$$\tau\alpha_1 I = Q_9 + Q_7 + Q_5 \quad (\text{I.3})$$

On suppose que $T_b = T_a$ et l'équation précédente devient:

$$U_b (T_{sol} - T_b) = \tau\alpha_2 I + hc_{sol-f} (T_{sol} - T_f) + hr_{sol-c} (T_{sol} - T_c) \quad (\text{I.3.1})$$

Avec:

U_b : coefficient de perte totale au niveau de l'absorbeur ($w/m^2 \cdot ^\circ C$)

T_a : Température dégagée par le sol

α_2 : Absorptivité de sol

□ c_{sol-f} : Le coefficient de transfert convectif entre le sol et le fluide ($w /m^2 \cdot ^\circ C$)

□ r_{c-sol} : Le coefficient de transfert radiatif entre le sol et le vitre ($w /m^2 \cdot ^\circ C$)

L'équation (II.3.1) peut se simplifié comme suit:

$$\tau\alpha_2 I + U_b T_a = (U_b + hc_{sol-f} + hr_{c-sol}) - hc_{sol-f} T_f - hr_{c-sol} T_c \quad (I.3.2)$$

On suppose que:

$$C_5 = hc_{sol-f} + hr_{c-sol} + U_b \quad (I.3.a)$$

L'équation précédente prend la forme suivante :

$$\tau\alpha_2 I + U_b T_a = C_5 T_{sol} - hc_{sol-f} T_f - hr_{c-sol} T_c \quad (I.3.3)$$

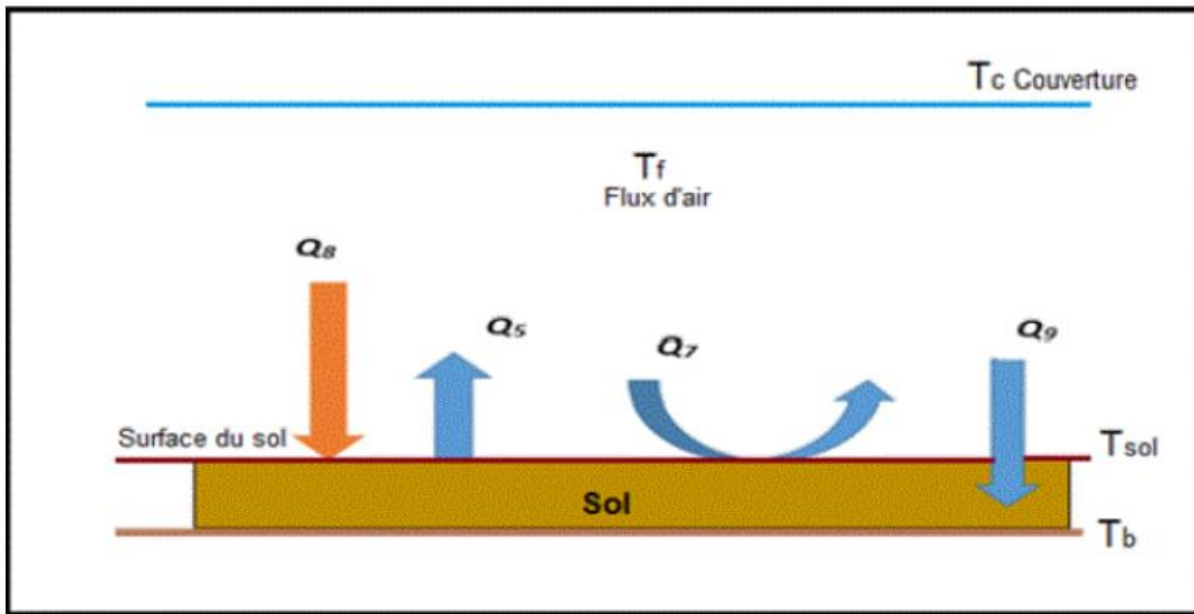


Figure I. 12: Bilan énergétique au niveau de l'absorbeur (sol) [19].

I.8. Éléments de calcul de la cheminée solaire

I.8.1. La puissance de la cheminée solaire

L'efficacité de la cheminée est définie par:

$$\eta_c = \frac{P_{utile}}{P_{solaire}} \quad (I.4)$$

$$P_{solaire} = m \cdot C_p \cdot (T_3 - T_2) = m \cdot C_p \cdot \Delta T_{23} \quad (I.5)$$

η_c : Rendement de la cheminée

P_{utile} : La puissance utile

m : Débit massique, Kg/s

C_p : Capacité calorifique massique à pression constante du fluide, J/Kg. K

ΔT : Différence de température

La puissance utile est donnée par la relation suivante :

$$P_{\text{utile}} = \frac{g \cdot H_c}{C_p T_2} \cdot \rho_{\text{coll}} \cdot A_c \cdot V_c \cdot \Delta T_{23} \quad (\text{I.6})$$

g : Accélération de la pesanteur, Kg / m. s².

H_c : Hauteur de la cheminée, m.

T_2 : Température, °C.

ρ : Masse volumique de la Collecteur.

A_c : Section transversale de la cheminée, m².

V_c : Vitesse de l'air à la sortie du collecteur (entrée de la cheminée), m/s.

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

$$\Delta P_{\text{tot}} = \rho_{\text{coll}} \cdot g \cdot H_c \cdot \frac{\Delta T_{23}}{T_2} \quad (\text{I.7})$$

ΔP_{tot} : Différence de pression totale.

I.8.2. La puissance du collecteur

L'efficacité du collecteur est exprimée par le rapport :

$$\eta_{\text{coll}} = \alpha^* - k \frac{\Delta T_a}{E} \quad (\text{I.8})$$

η_{col} : Rendement du collecteur.

α^* : Coefficient de réflexion du sol, w/m².

K : Conductance thermique du capteur, W/m². °C.

ΔT_a : Différence de température ambiante, °C.

E : Eclairement solaire, W/ m².

I.8.3. La puissance de la turbine

La puissance mécanique maximale donnée par la turbine est :

$$\Delta P_{\text{tur,max}} = \frac{2}{3} \frac{\eta_{\text{coll}} \cdot A_{\text{coll}} \cdot E \cdot H_c}{C_p \cdot T_a} \quad (\text{I.9})$$

$\Delta P_{\text{tur, max}}$: Différence de pression mécanique maximale dans turbine.

A_{coll} : Section transversale de la Collecteur, m².

T_a : Température ambiante, °C.

La puissance électrique délivrée par la cheminée est :

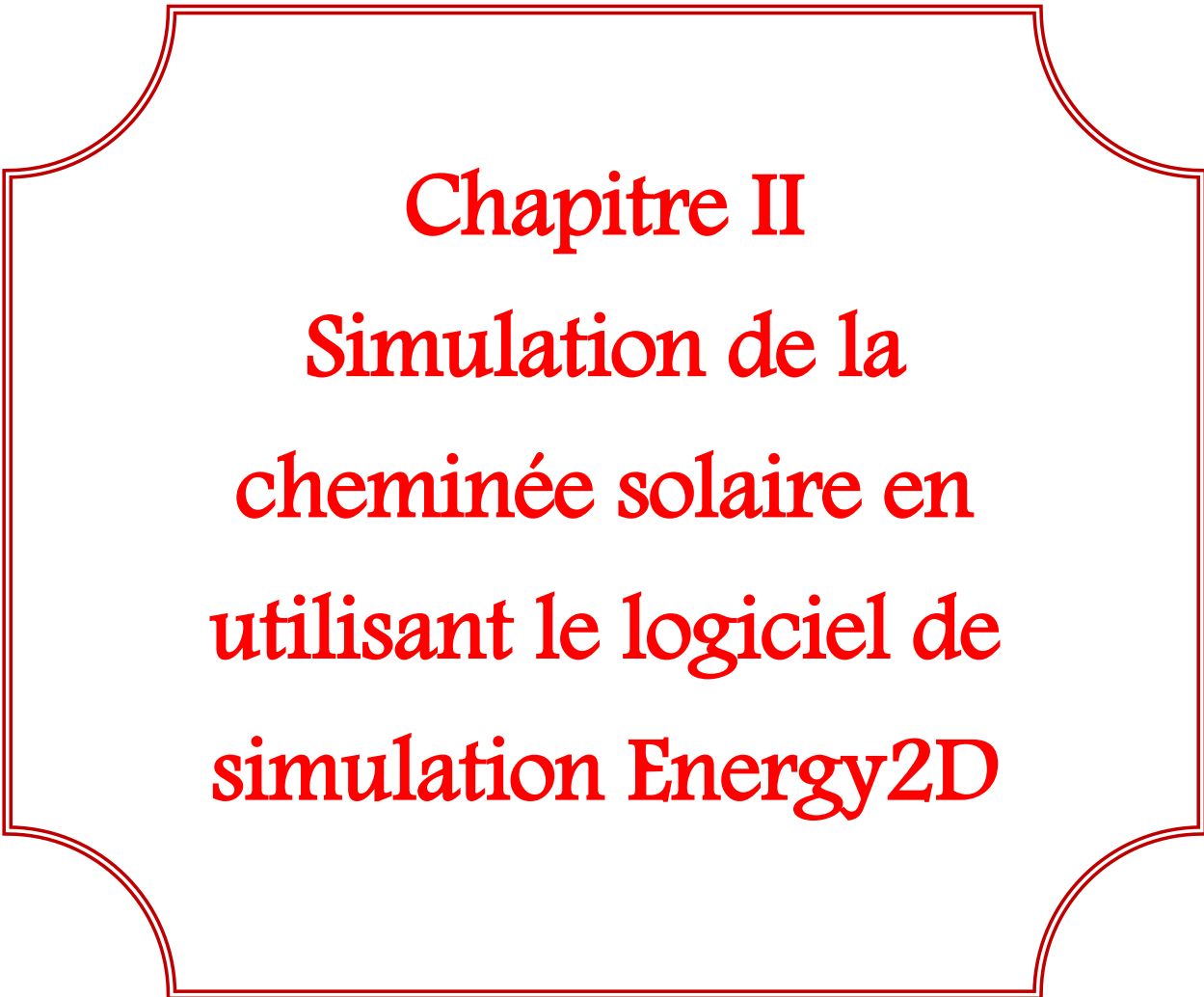
$$P_{elec} = \frac{2 g \cdot \eta_{coll} \cdot A_{coll} \cdot \eta_{tur} \cdot E \cdot H_c}{3 C_p \cdot T_a} \quad (I.10)$$

P_{elec} : La puissance électrique délivrée par la cheminée.

η_{Tur} : Rendement de la Turbine.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons les principes de fonctionnement des cheminées solaires. Il présente également les usages de l'énergie solaire, les avantages et inconvénients de la cheminée solaire, et quelques modèles dans plusieurs régions et pays et bilans énergétiques et éléments du calcul de la cheminée solaire. Ainsi que les réalisations antérieures de cette technologie dans différentes parties du monde et leurs résultats les plus importants en termes de faisabilité de production d'énergie électrique.



Chapitre II
Simulation de la
cheminée solaire en
utilisant le logiciel de
simulation Energy2D

Au cours de ce chapitre on présente la simulation de la cheminée solaire en utilisant le logiciel de simulation Energy2D. Ce chapitre se divise en deux parties, la première présente une présentation du logiciel utilisé et la deuxième partie est consacrée à la présentation de la cheminée solaire dans ce logiciel.

Partie 1 : Présentation du logiciel Energy2D

II.1.1. Description du logiciel Energy2D

Energy2D est un puissant logiciel de simulation en libre accès créé par Charles Xie au Concord Consortium dans le Massachusetts en 2012. La base d'Energy2D est établie par des recherches approfondies en physique computationnelle effectuées par Charles Xie¹ et vise à fournir un environnement pour modéliser la conduction, la convection et le rayonnement et leur couplage avec la dynamique des particules. L'utilisation d'Energy2D réduira essentiellement la forte dépendance aux mathématiques complexes pour résoudre des problèmes d'ingénierie ou tester des hypothèses scientifiques[Web1].

Cette application utilise le langage Java. Plusieurs algorithmes sont appliqués pour la résolution des problèmes de transfert de chaleur en Energy 2D ; la méthode finite-difference time-domain (FDTD) pour la conduction, la méthode de relaxation et la méthode de MacCormack pour la convection et Fredholm équation du second ordre pour le rayonnement [Web2].

Energy2D convient aux universitaires, aux étudiants ou à toute personne souhaitant s'amuser avec le transfert de chaleur. Il peut être exécuté rapidement sur la plupart des ordinateurs et ne nécessite pas de basculement entre les pré-processeurs, les solveurs et les post-processeurs, ce qui est généralement requis pour les simulations numériques de dynamique des fluides. Son logo est illustré sur la Figure 1 et le logiciel est facilement téléchargeable sur le site :<https://energy.concord.org/energy2d/download.html>

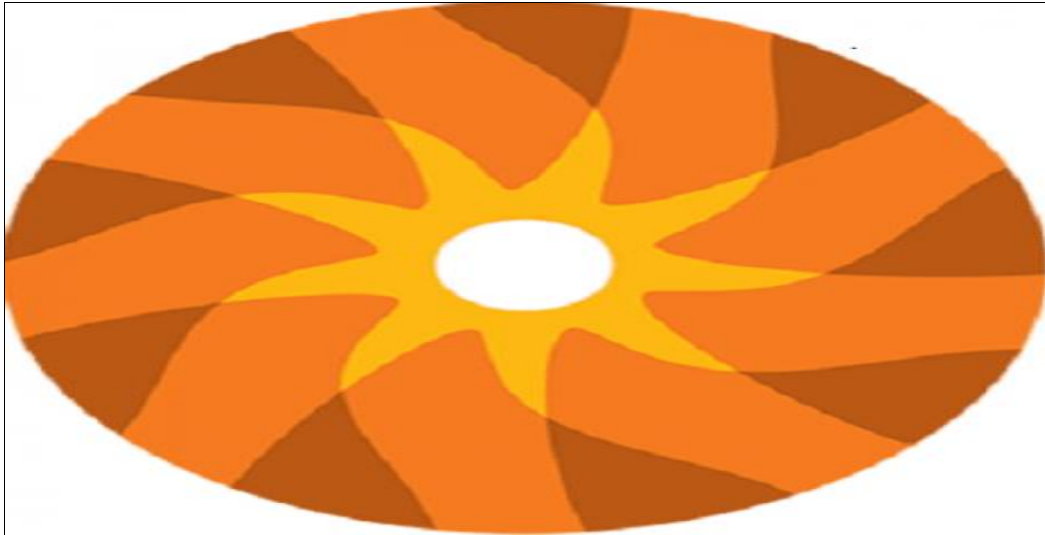


Figure II. 1: Le logo d'Energy 2D [Web3].

II.1.2. Domaine d'application d'Energy2D

Energy2D est un logiciel fiable conçu à des fins scientifiques, éducatives et informatives, qui vous permet d'observer l'activité de la chaleur, du rayonnement, de la lumière et du débit massique. Le logiciel permet de créer des simulations basées sur des équations physiques, afin de visualiser les effets de ces paramètres dans la vie de tous les jours.

Energy2D vous permet de créer plusieurs types de modèles, aussi bien pour la recherche empirique que pour la simulation pratique. Par exemple, lors de la construction d'une maison, Energy2D peut créer une simulation basée sur plusieurs critères, afin de vous montrer l'efficacité du système de conservation de la chaleur. Le logiciel peut rendre une multitude d'expériences de physique.

Les paramètres que vous pouvez étudier avec Energy2D incluent la chaleur, la température, la conduction, la convection, le rayonnement, la dynamique des fluides, le couplage des particules ou le quotient énergétique du bâtiment. Certaines des applications pratiques de ces études de cas sont l'équilibre thermique, la loi zéro de la thermodynamique, l'élasticité des matériaux, les collisions, la thermophorèse, l'effet du vent, les ponts thermiques dans les bâtiments, les cheminées, les infiltrations ou l'efficacité du chauffage solaire.

La plupart des phénomènes impliqués dans les systèmes physiques sont régis par des lois scientifiques bien définies. Ces lois corrént différentes propriétés et fournissent des

informations sur les états d'un système et les processus qu'il subit. Des modèles mathématiques peuvent donc être dérivés sur la base des lois, permettant aux scientifiques et aux ingénieurs d'expliquer ce qui s'est passé ou de prédire ce qui va se passer.

II.1.3. La simulation avec Energy2D

La prise en main est très facile, la fenêtre principale de l'application Energy2D (2.9.5) est illustrée sur la Figure II.2. Une boîte à outil sur le haut de l'écran permet de dessiner les éléments composant le modèle comme indiqué sur la Figure II.3a. Les caractéristiques physiques des éléments peuvent ensuite être définies (un exemple dans l'application de la cheminée solaire).

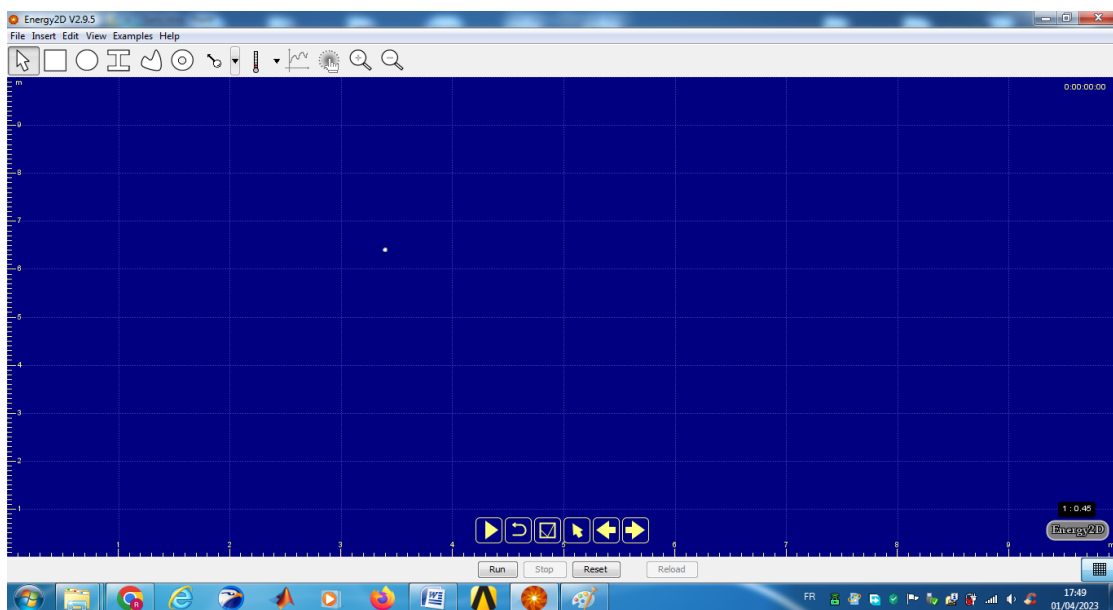


Figure II. 2: La fenêtre de Energy2D.

Des capteurs peuvent être insérés (thermomètres, anémomètres, une source de chaleur) comme indiqué sur la Figure II.3b. lors de la simulation ils permettront de visualiser les valeurs et de tracer les courbes en fonction du temps. Des tutoriels sont présents sur le site du logiciel, ainsi que de nombreux modèles.

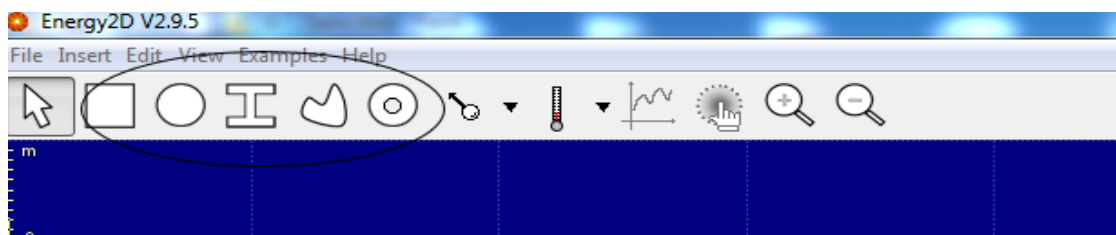
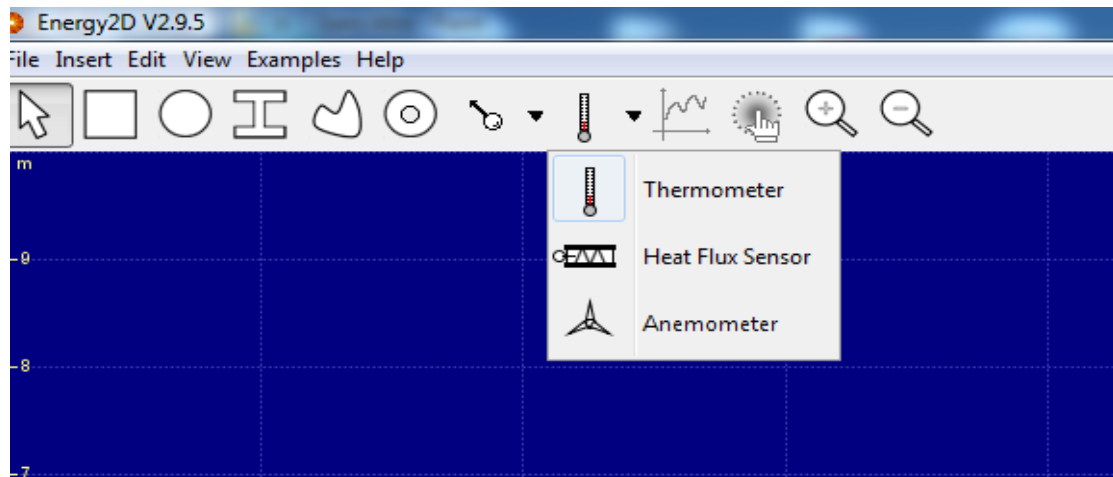


Figure II.3 a: La boîte à outils.



Une fois que le schéma de la simulation est défini, on peut l'exécuter en cliquant sur le bouton Run en bas ou en haut (Figure II.3c). On peut visualiser les résultats sous forme d'un graphe ou de tableau de données selon le cas, en cliquant sur le troisième bouton.

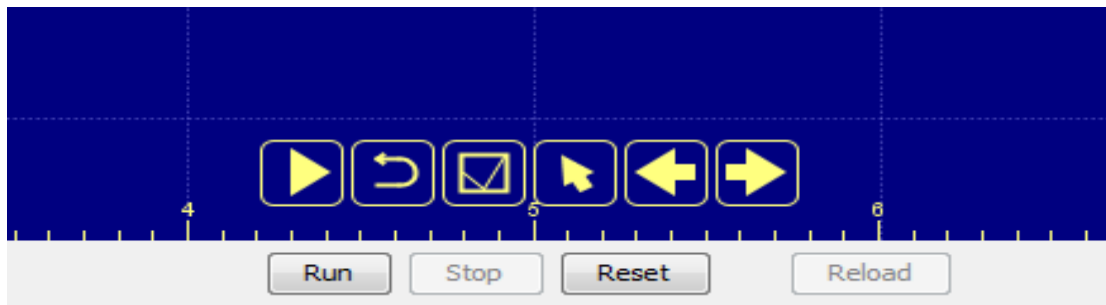


Figure II.3 c: La barre d'exécution de la simulation en Energy2D.

L'interface utilisateur graphique (GUI) d'Energy2D prend en charge les modules de fonctionnalité suivants [web4]:

- Commandes de simulation
- Modes d'interaction
- Outils de dessin et d'édition
- Propriétés du modèle
- Propriétés de l'objet
- Options d'affichage
- Gestion des tâches
- Capteurs virtuels
- Graphique
- Lire écrire
- Modèles

Partie 2 : Présentation de la cheminée solaire dans Energy2D

II.1.4. Préparation de la simulation de la cheminée solaire

La simulation d'une cheminée solaire dans le logiciel Energy2D est illustrée sur la Figure II.4. Nous avons un collecteur, une cheminée, un absorbeur, le sol et le milieu environnant. C'est une application dans ce logiciel qu'on peut changer selon le cas. La cheminée que nous avons étudiée présente un diamètre de collecteur de 7.19 m, un diamètre de la cheminée de 1 m, une hauteur de la cheminée de l'ordre de 5.6 m, l'épaisseur de l'absorbeur de 0.2 m.

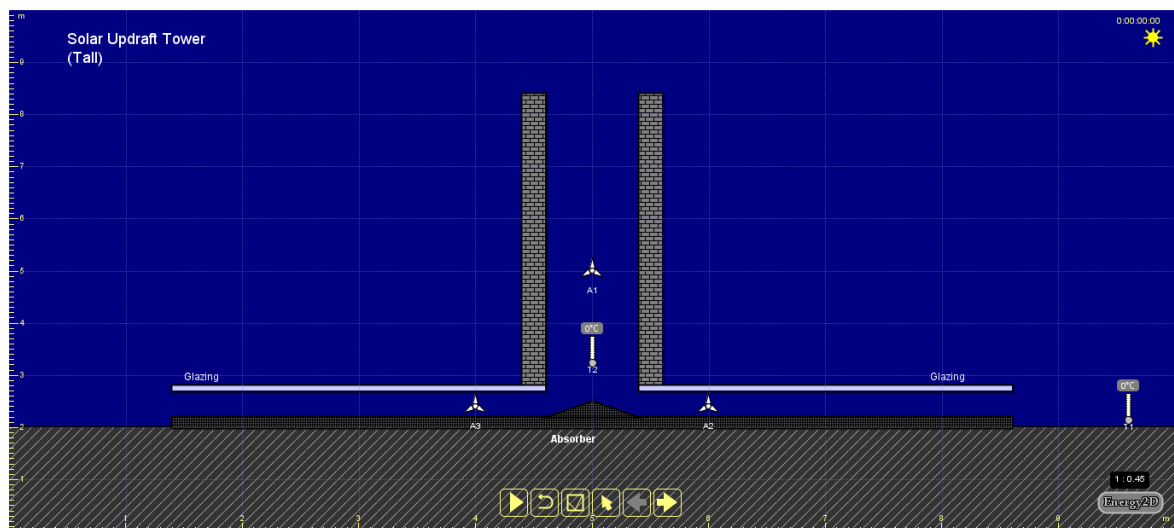


Figure II.4: Schéma de la cheminée solaire en Energy2D.

La simulation de la cheminée solaire s'effectue suivant les étapes suivantes :

II.1.4.1. Définition du milieu environnant

La fenêtre illustrée sur la Figure II.5 illustre toutes les propriétés du milieu environnant (dans notre cas c'est de l'air). On peut retrouver les propriétés générales (General) qui caractérisent les modes de transfert de chaleur utilisés (convection et rayonnement), en plus des dimensions du système à simuler et le temps de simulation.

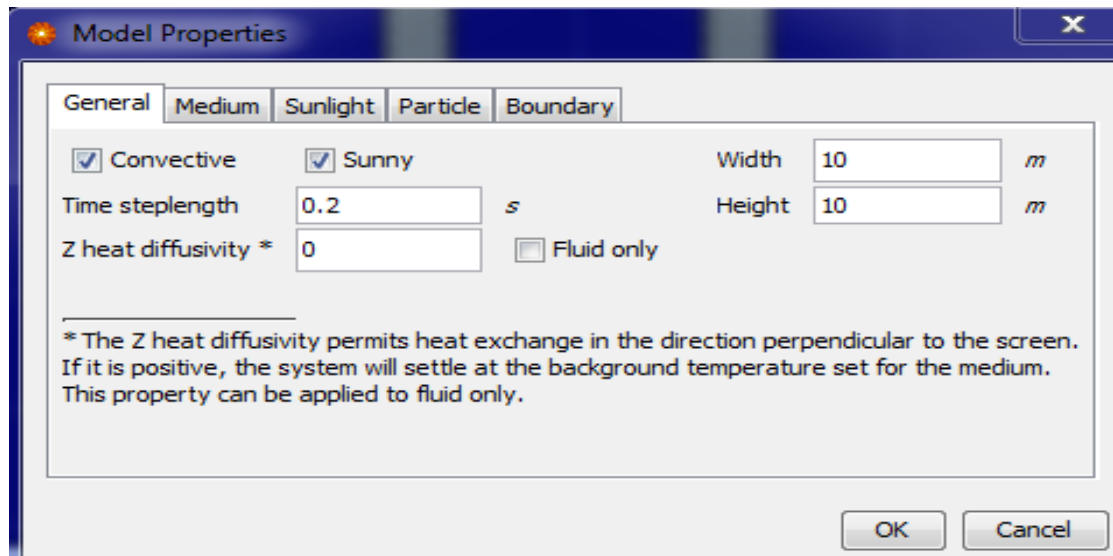


Figure II. 5: Propriétés du milieu environnante Energy2D.

Une autre fenêtre des propriétés de l'air (Medium) est illustrée sur la figure II.5a, elle regroupe la température ambiante, la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité cinématique et le coefficient d'expansion thermique de l'air.

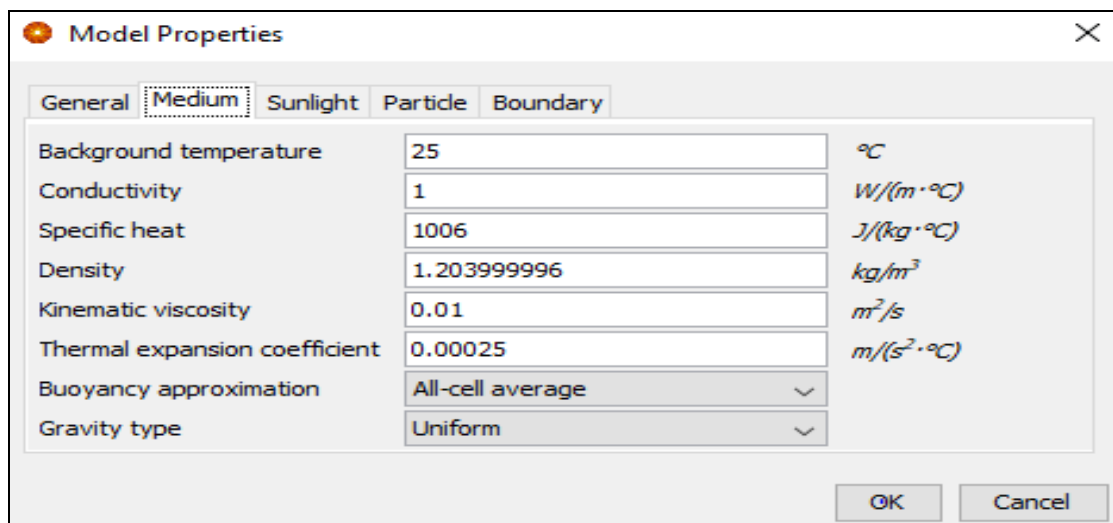


Figure 5. a: Propretés milieu environnant.

La fenêtre des propriétés de du rayonnement solaire (Sunlight) est illustrée sur la figure II.5b, elle regroupe le nombre de rayon représentatif sur la figure, la vitesse du rayonnement, intervalle d'émission, l'intensité du rayonnement et l'angle d'incidence du rayonnement solaire.

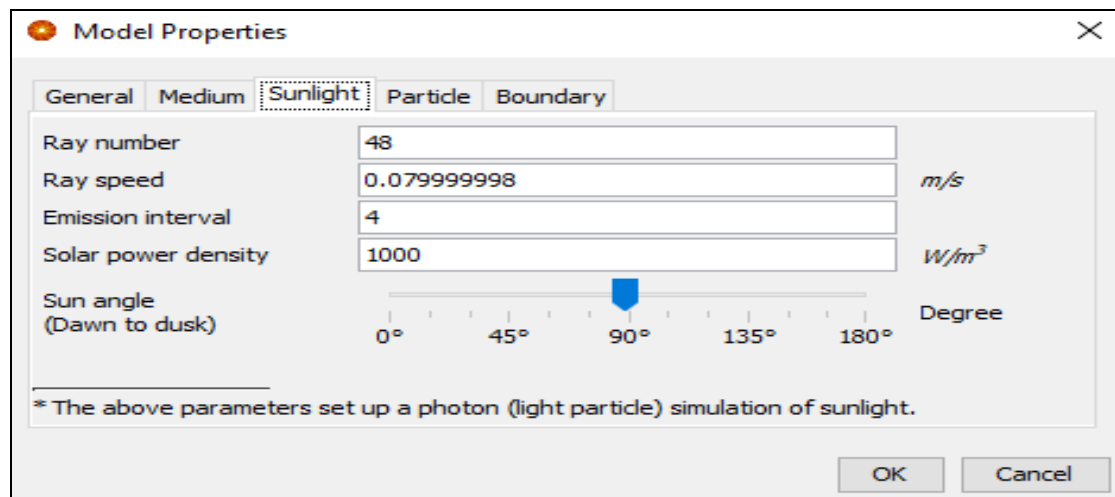


Figure 5. b: Les propriétés du rayonnement solaire.

II.1.4.2. Définition des géométries

Dans le cas de la simulation de la cheminée solaire nous avons les composantes suivantes ;le sol, l'absorbeur, le collecteur et la cheminée, on va définir la géométrie de chaque composant. Un exemple illustratif du collecteur est illustré sur la figure II.6.

Notant qu'on va définir la partie droite et la partie gauche du collecteur, de même pour la cheminée. On doit définir les coordonnées du centre de la partie droite du collecteur (les valeurs de x et de y par rapport au repère du système) ainsi que la longueur et la hauteur la partie droite du collecteur.

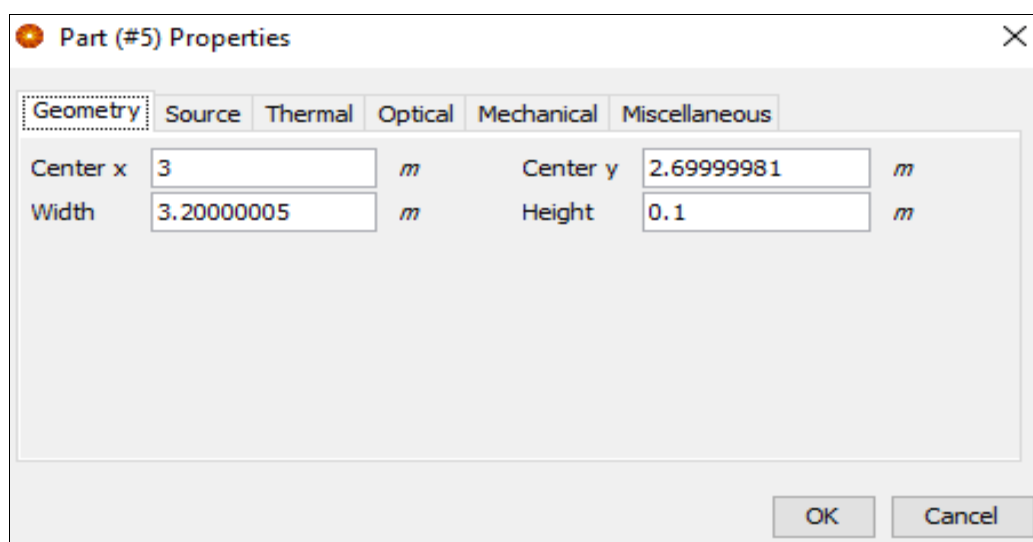


Figure 6: La géométrie du collecteur (partie droite).

II.1.4.3. Définition des propriétés thermiques des matériaux utilisés

La définition des propriétés optiques de tous les composants (le collecteur, l'absorbeur, le sol et la cheminée) de la cheminée solaire doit être effectuée également. Un exemple illustratif du collecteur est illustré sur la Figure II.7. Ces propriétés regroupent du matériau de construction. Le tableau II.1 illustre les propriétés thermiques des composants de la cheminée solaire.

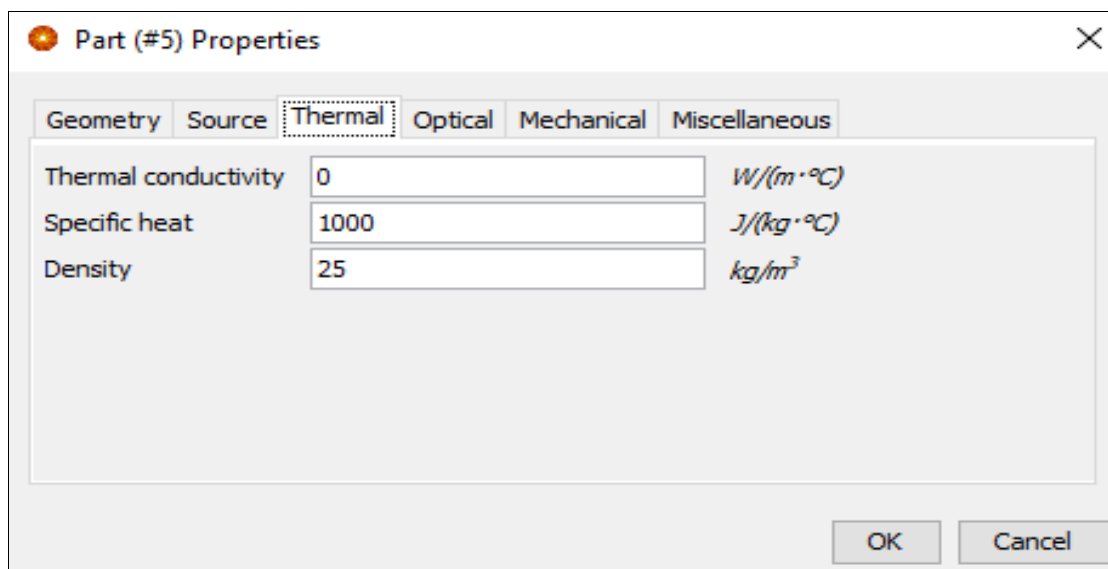


Figure II. 7: Les propriétés thermiques du collecteur.

	Le collecteur	La cheminée	L'absorbeur	Le sol
La masse volumique (Kg/m³)	20	25	10	25
Conductivité thermique (w/m. °C)	0.03	0.001	0.1	0.001
Chaleur spécifique (J/kg. °C)	840	1300	1000	1300

Tableau II. 1: Propriétés thermiques des composants de la cheminée solaire [Web4].

II.1.4.4. Définition des propriétés optiques des matériaux utilisés :

La définition des propriétés thermiques de tous les composants (le collecteur, l'absorbeur, le sol et la cheminée) de la cheminée solaire doit être effectuée. Un exemple illustratif du collecteur est illustré sur la Figure II.8. Ces propriétés regroupent

l'absorptivité, la réflectivité, la transmissivité et l'émissivité du matériau de construction. Le tableau II.8 illustre les propriétés optiques des composants de la cheminée solaire.

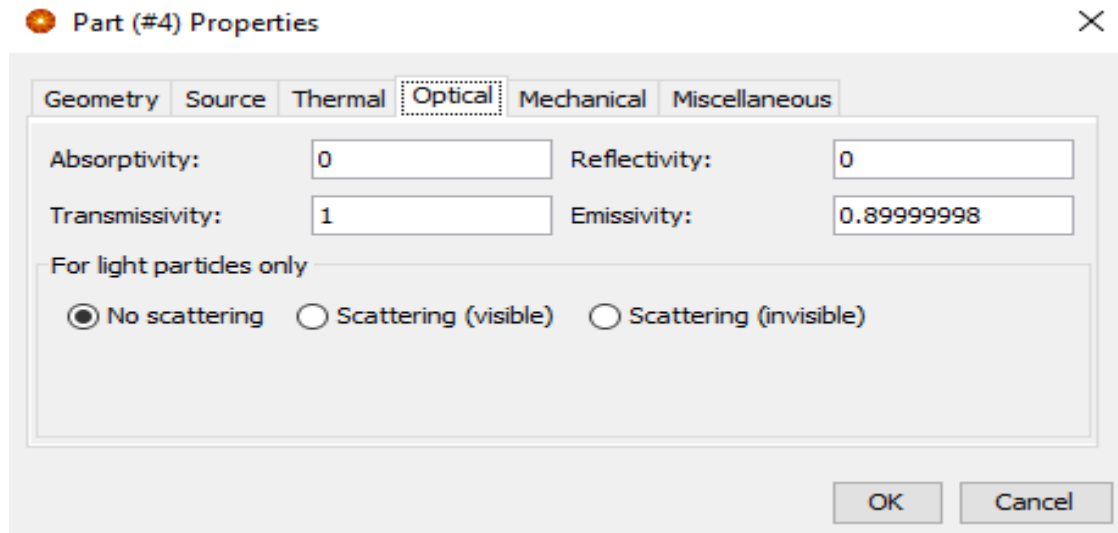


Figure II.8: Les propriétés optiques du collecteur.

Tableau II. 2: Propriétés optiques des composants de la cheminée solaire [Web4].

	Le collecteur	La cheminée	L'absorbeur	Le sol
L'absorptivité	0	0	1	0
La réflectivité	0	1	0	1
l'émissivité	0.89	0	0	0
La transmissivité	1	0	0	0

II.1.5. Visualisation des résultats de la simulation:

Les résultats de la simulation peuvent être présentes sous deux formes ; soit sous forme d'une courbe comme indiqué sur la Figure II.9 a ou sous forme de valeur numérique comme illustré sur Figure II.9 b.

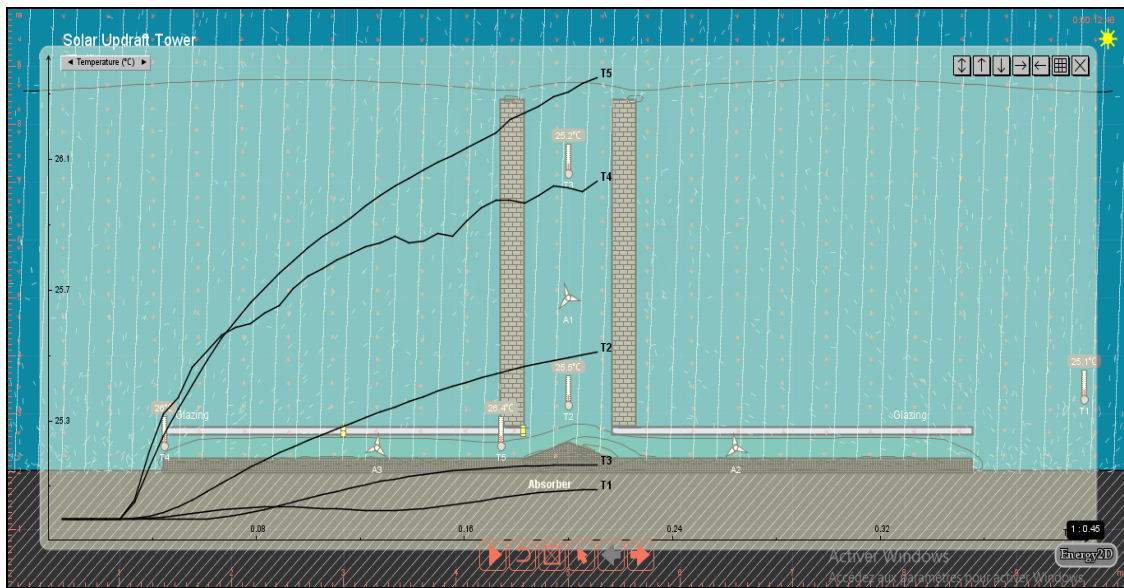


Figure II.9a: Exemple de la représentation des résultats dans Energy2D sous forme de graphe.

Time	T1	T2	T3	T4	T5
20.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
40.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
60.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
80.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
100.0	25.0	25.000006	25.0	25.000307	24.99997
120.0	25.000385	25.001389	24.999989	25.061285	25.051245
140.0	25.002531	25.00687	24.999489	25.208838	25.158688
160.0	25.006498	25.018566	24.9987	25.322525	25.256128
180.0	25.011736	25.036427	24.998219	25.37156	25.33781
200.0	25.017517	25.058828	24.998653	25.464474	25.409315
220.0	25.02319	25.083687	25.000622	25.51287	25.485964
240.0	25.028196	25.109268	25.004583	25.562191	25.553507
260.0	25.032213	25.134315	25.010574	25.584944	25.607439
280.0	25.035034	25.158253	25.018524	25.597744	25.660458
300.0	25.036549	25.180676	25.028065	25.630224	25.704607
320.0	25.036835	25.201618	25.038828	25.65223	25.751577
340.0	25.036003	25.221237	25.05032	25.70422	25.790548
360.0	25.034374	25.240112	25.062086	25.742151	25.830904
380.0	25.032238	25.258593	25.073772	25.766903	25.866007
400.0	25.029976	25.276257	25.085033	25.791151	25.892546
420.0	25.027996	25.293245	25.09562	25.81268	25.923977
440.0	25.026594	25.309881	25.105381	25.832155	25.9572
460.0	25.026169	25.326365	25.114262	25.843279	25.98903
480.0	25.026884	25.342756	25.122217	25.865404	26.018793
500.0	25.028849	25.358955	25.129324	25.845142	26.042786

Figure II.9 b: Exemple de la représentation des résultats dans Energy2D sous forme d'un tableau.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu sur le logiciel Energy 2D ; certaines de ses caractéristiques, et son domaine d'application. On note que ce logiciel est à libre accès et il est facile à télécharger. On a présenté les étapes essentielles dans son adaptation pour l'étude d'une cheminée solaire ; définition du milieu environnant, définition des géométries (sol, collecteur, sol et cheminée), définition des propriétés thermique et optique de tous les composants. De même, la visualisation des résultats peut être représentée de deux façons, soit sous forme d'un graphe ou sous forme d'un tableau de données.



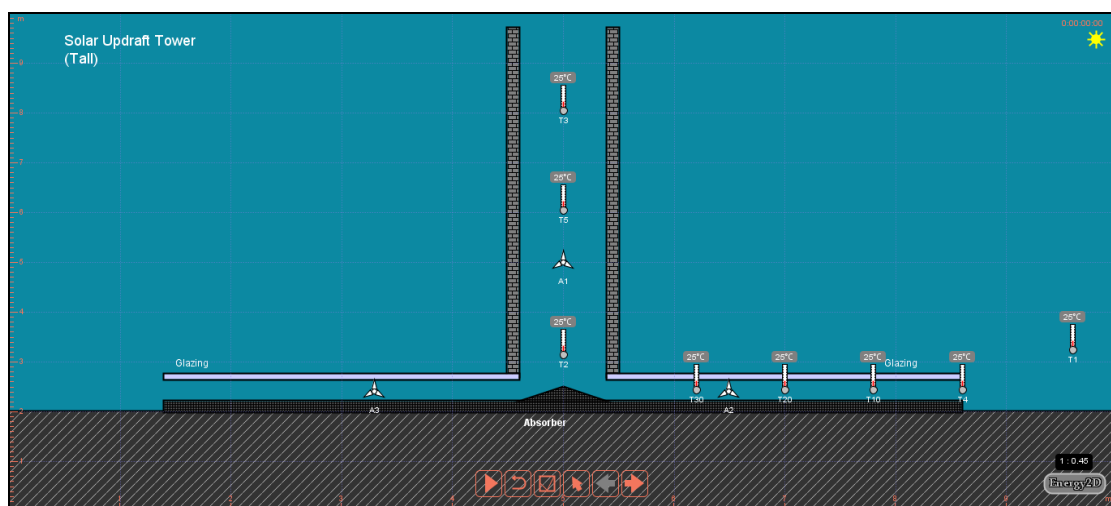
Chapitre III
Résultat et discussion

Introduction

Dans ce chapitre on s'intéresse à l'étude de la simulation de la cheminée solaire en utilisant le logiciel Energy2D. L'évolution de la température de l'air dans le collecteur et dans la cheminée a été effectuée. De même, les effets des radiations solaires, la longueur de la cheminée et la distance collecteur-absorbeur sur les évolutions des températures du collecteur et de la cheminée ont été étudiés.

III.1. Évolution des températures dans une cheminée solaire

Pour déterminer l'évolution des températures de l'air dans le collecteur et dans la cheminée solaire une simulation par le logiciel Energy2D a été effectuée. Dans ce cas, le diamètre du collecteur est de 7.19m , le diamètre de la cheminée est 0.89m , la longueur de la cheminée est de 7m et la distance qui sépare le collecteur de l'absorbeur est de 0.1m Les radiations solaires et la température ambiante sont 1000 W/m² et 25 °C respectivement. Les Figures III.1a et III.1b illustrent les schémas de cette simulation.



Fig

Figure III.1a: Schéma de la simulation en Energy2D

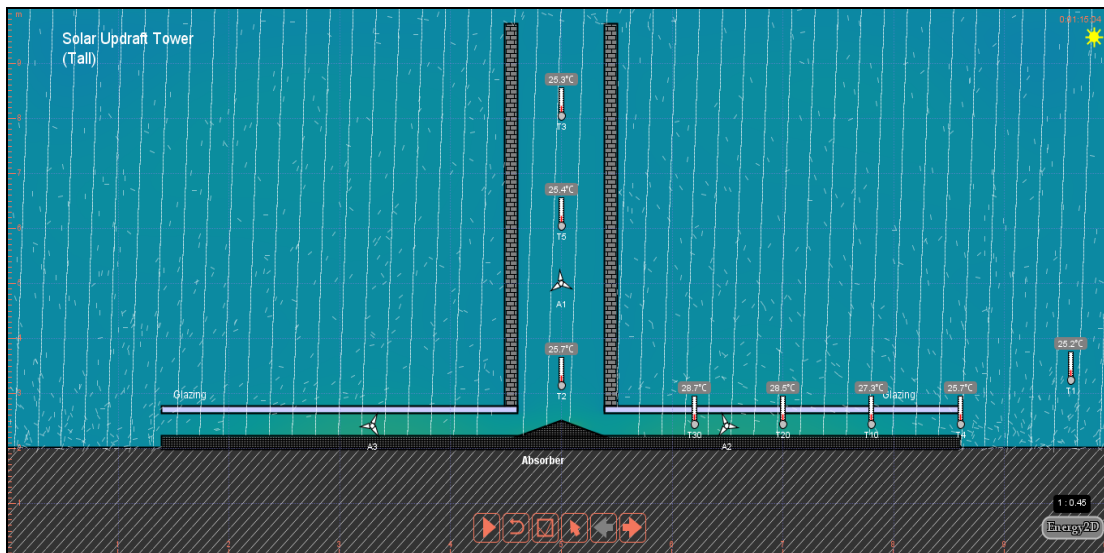


Figure III.1b: Schéma de la simulation en energy2D après 4500s.

III.1.1 Evolution des températures de l'air dans le collecteur

Quatre sondes de température (T_4 , T_{10} , T_{20} , T_{30}) ont été placées dans l'air du collecteur comme indiqué sur la Figure III.1a. La distance entre chaque sonde et un autre est de 0.8m L'évolution de ces températures pour un temps de simulation de 5000 s est représentée sur la Figure III.2.

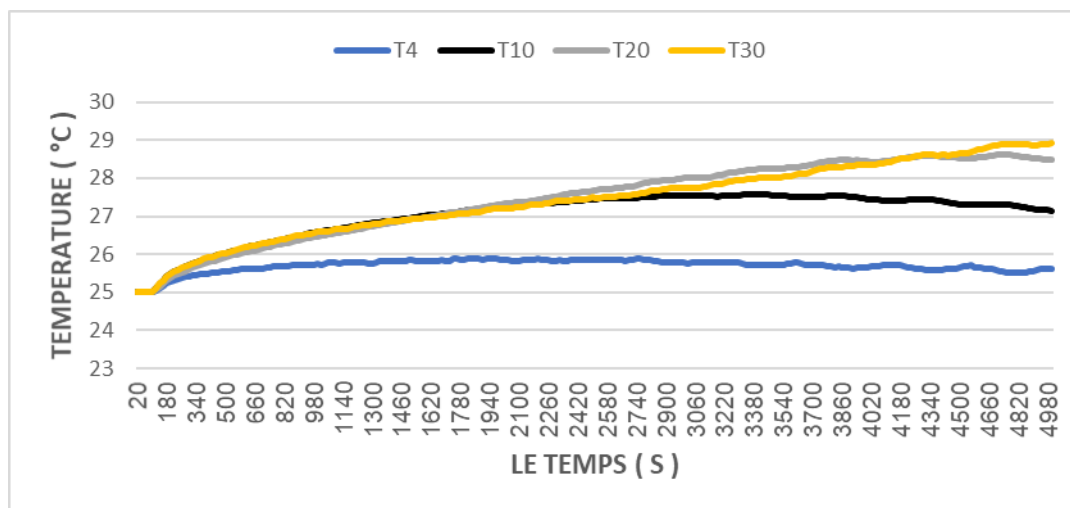


Figure III.2: Évolution des températures de l'air dans le collecteur.

On note que la température dans le collecteur augmente avec la diminution du diamètre. Au début, lorsque le temps est de 20 seconde, tous les capteurs sont égaux à 25 °C, et les températures augmentent progressivement jusqu'à atteindre des valeurs maximales à 5000 secondes ($T_4=25.6^\circ\text{C}$, $T_{10}=27.1^\circ\text{C}$, $T_{20}=28.4^\circ\text{C}$, $T_{30}=28.9^\circ\text{C}$).

Afin de déterminer la variation de la température de l'air en fonction de la distance r , on a tracé l'évolution de cette température en fonction de la position de ces sondes à la fin de la simulation comme illustré sur la Figure III.3. Dans ce cas, la valeur de la température en fonction de rayon r est donnée par l'équation suivante:

$$T(r) = -0,0024r^2 + 0,2104r + 25,083 \quad (R^2 = 1) \quad (\text{III.1})$$

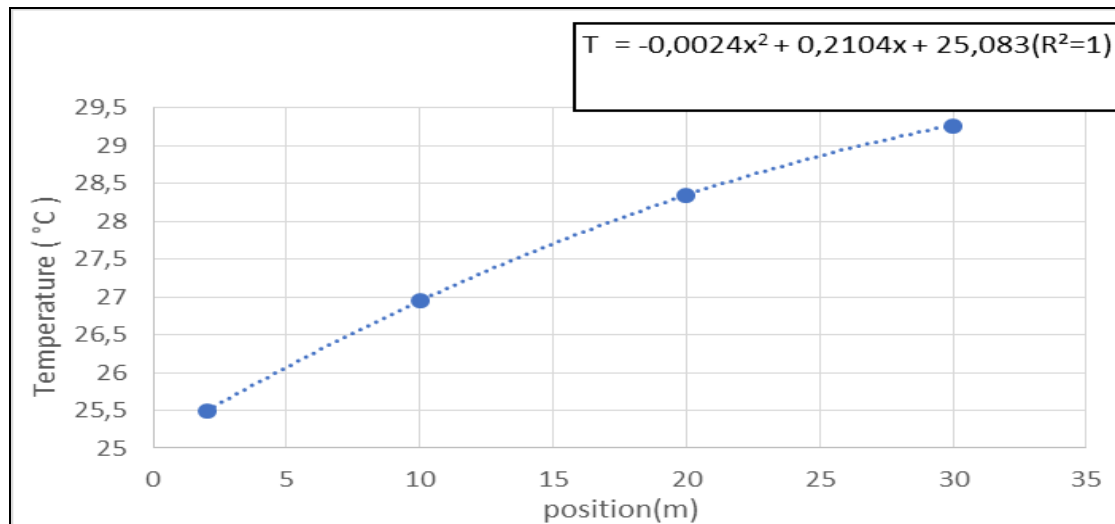


Figure III.3: Évolution des températures de l'air en fonction de la position des sondes dans le collecteur.

III.1.2. Evolution des températures de l'air dans la cheminée solaire

Trois sondes de température (T_2 , T_3 , T_5) ont été placées dans l'air de la cheminée comme indiqué sur la Figure III.1a. La distance entre T_2 et T_5 est de 2.9m et 1a. La distance entre T_5 et T_3 est de 2m. L'évolution de ces températures pour le même temps de simulation est illustrée sur la Figure III.4.

On note dans le cas de la cheminée que la température diminue avec la longueur de la cheminée. Au temps de 20 secondes, les températures avaient la même valeur ($T_2=T_5=T_3=25^\circ\text{C}$). Au cours du temps, on enregistre une augmentation de ces températures. On note également, une diminution de la température en fonction de la hauteur de la cheminée comme illustré sur la Figure III.5. A titre d'exemple, en fin de notre simulation les températures suivantes ont été enregistrées: $T_2=25.5^\circ\text{C}$, $T_5=25.3^\circ\text{C}$, $T_3=25.2^\circ\text{C}$.

Une relation de la température de la cheminée en fonction de sa hauteur peut être proposée:

$$T(r) = 25,677 \times h^{-0,016} \times 0,982 \quad (R^2 = 0,9818) \quad (III.2)$$

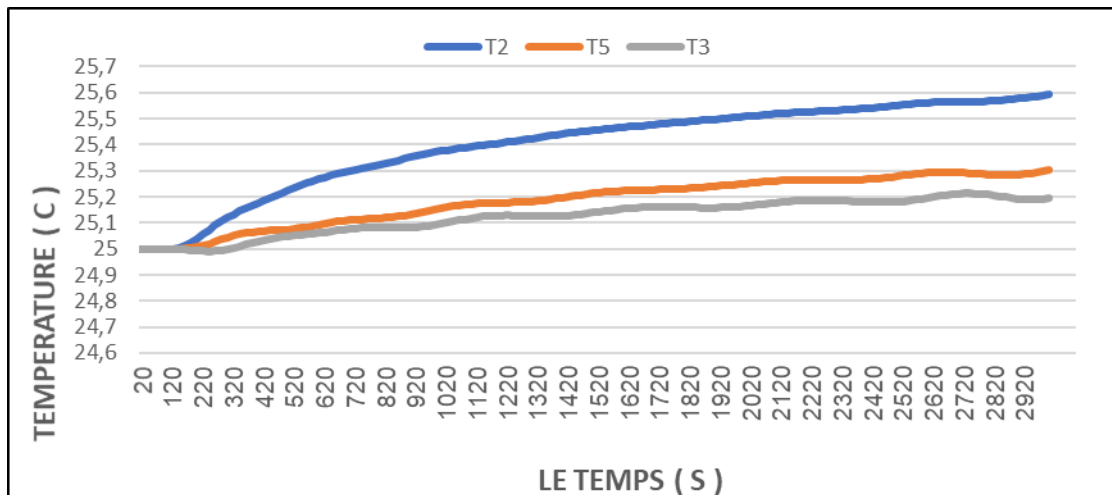


Figure III.4: Évolution des températures de l’air dans la cheminée

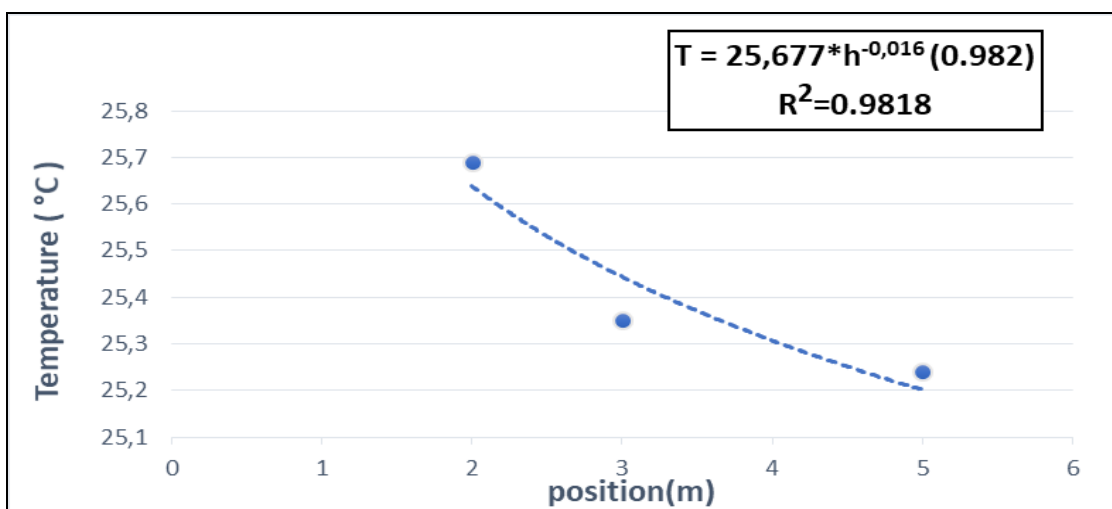


Figure III.5: Évolution des températures de l’air en fonction de la position des sondes dans la cheminée.

III.2. Effet des radiations solaires sur la variation de température dans le collecteur

Pour déterminer l'effet de la variation des radiations solaires sur l'évolution des températures de l'air dans le collecteur et dans la cheminée solaire une simulation par le

logiciel Energy2D a été effectuée (Figure III.6). Dans ce cas, la température ambiante est de 25 °C et les radiations solaires varient entre 200 W/m² et 1000 W/m² en passant par 400, 600 et 800W/m².

Notant que le diamètre de collecteur est de 7.19m, un diamètre de la cheminée de 1 m, une hauteur de la cheminée de l'ordre de 5.6 m, l'épaisseur de l'absorbeur de 0.2 m.

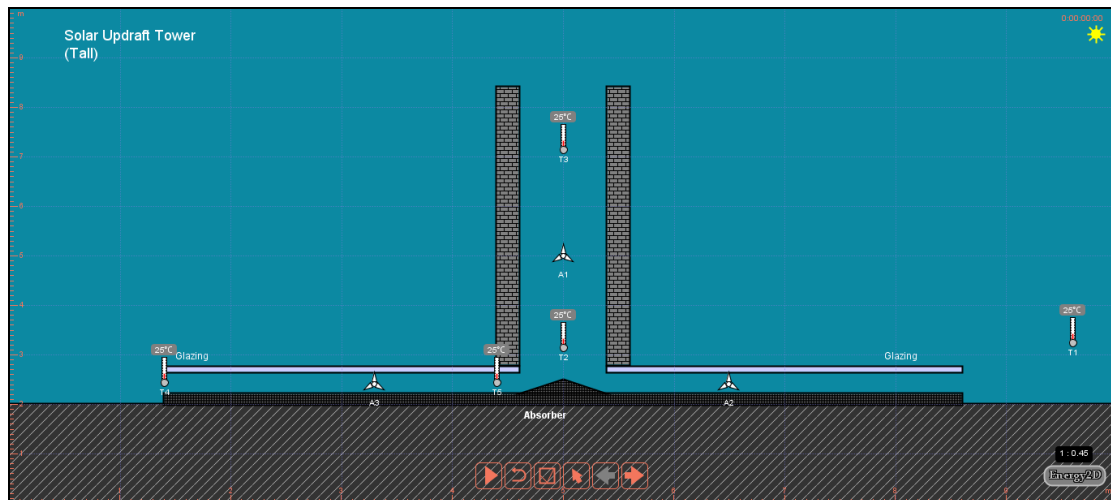


Figure III.6: Schéma de la simulation en Energy2D.

On remarque que l'augmentation des radiations augmente la différence de température dans le collecteur (sortie et entrée). A titre d'exemple, à 1000 secondes la différence de températures est de 0.07°C pour le rayonnement solaire de 200 W/m², elle prend les valeurs de 0.16°C, 0.23°C, 0.32°C pour les radiations solaires 400 W/m², 600W/m², 700 W/m² respectivement. Notant que pour 1000 W/m², la différence de température est de 0.42°C. Cette différence de température augmente avec le temps, pour un temps de 4000 secondes cette différence de température est 0.10°C, 0.30°C, 0.69°C, 1.32°C et 2.28°C pour les radiations solaires 200, 400, 600, 700 et 1000 W/m² respectivement.

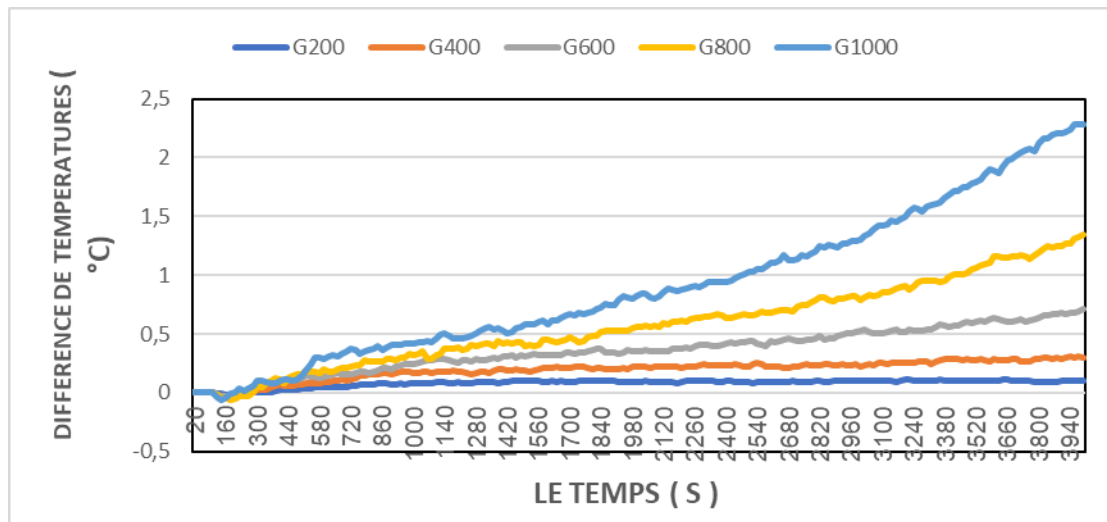


Figure III.7: Évolution de la différence de température de l’air dans le collecteur pour chaque radiation solaire.

Une relation de la différence de température dans le collecteur en fonction des radiations solaires (Figure III.8) a été proposée :

$$\Delta T = 6 \times 10^{-6} \times G^{1,8152} \quad (R^2 = 0,9967) \quad \text{(III.3)}$$

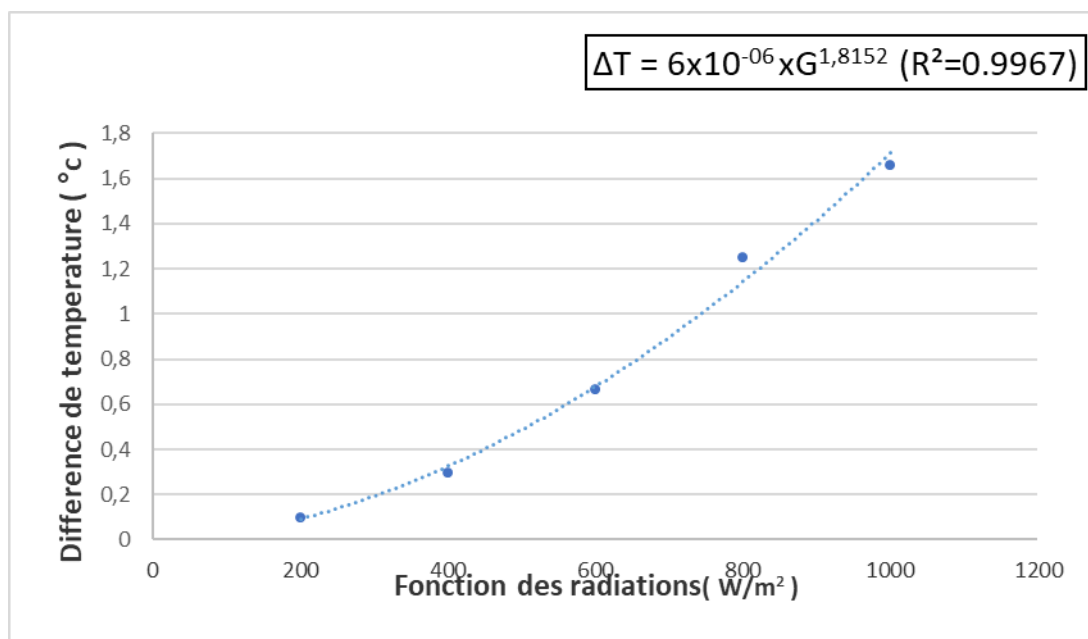


Figure III.8: Évolution de la différence de température en fonction des radiations solaires.

III.3. Effet de la hauteur de cheminée sur la variation de température dans le collecteur et la cheminée

Pour déterminer l'effet de la hauteur de la cheminée sur l'évolution des températures de l'air dans le collecteur et dans la cheminée solaire une simulation par le logiciel Energy2D a été effectuée. Dans ce cas, la température ambiante est de 25 °C et les radiations solaires sont 1000 W/m² et on fait varier la hauteur de la cheminée : 5 m, 8 m et 9 m.

III.3.1. le collecteur

On remarque que l'augmentation de la hauteur de la cheminée augmente la différence de température dans le collecteur comme illustré sur la Figure III.9. De même, cette différence augmente avec le temps. On remarque également qu'il n'y a pas de différence entre les différences de température des deux hauteurs 8m et 9m. A titre indicatif, au temps de 1400 secondes, la différence de température dans le collecteur est 0.37°C pour 5m de hauteur et 0.53°C pour une hauteur de 9m. Dans le cas de 4000 secondes, les différences de température dans le collecteur sont 1.98°C (5m) et 2.37°C (9m).

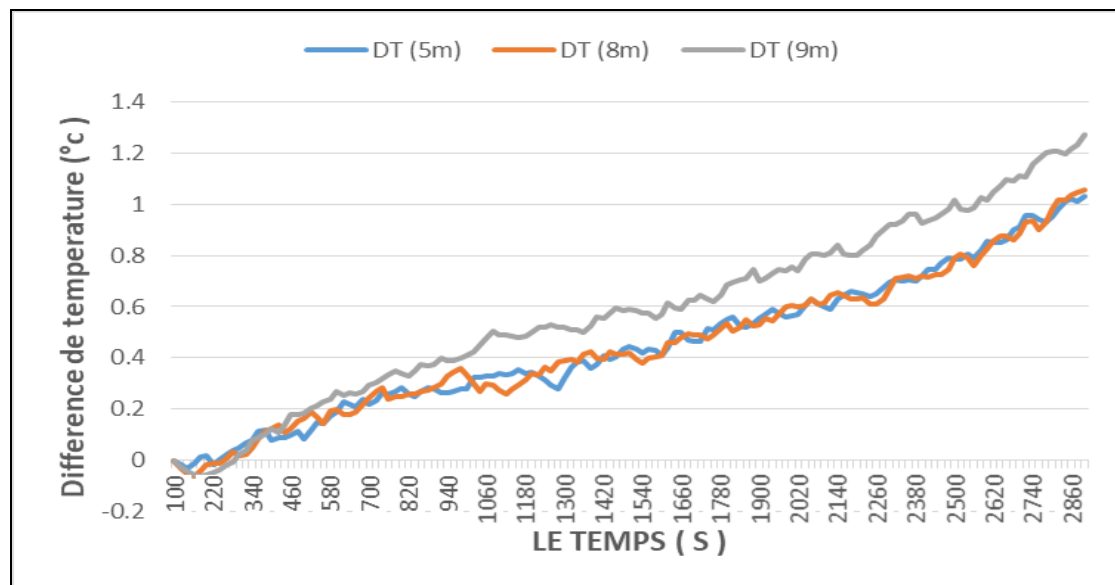


Figure III.9: Évolution de la différence de température de l'air dans le collecteur.

Afin de quantifier l'effet de la hauteur de la cheminée sur la différence de température dans le collecteur, on a tracé la variation de température dans le collecteur en fonction de la hauteur de la cheminée comme noté sur la Figure III.10. Une relation a été proposée :

$$\Delta T = 0,0508 x^2 - 0,6513x + 3,0179 \quad (R^2 = 1) \quad \text{(III.4)}$$

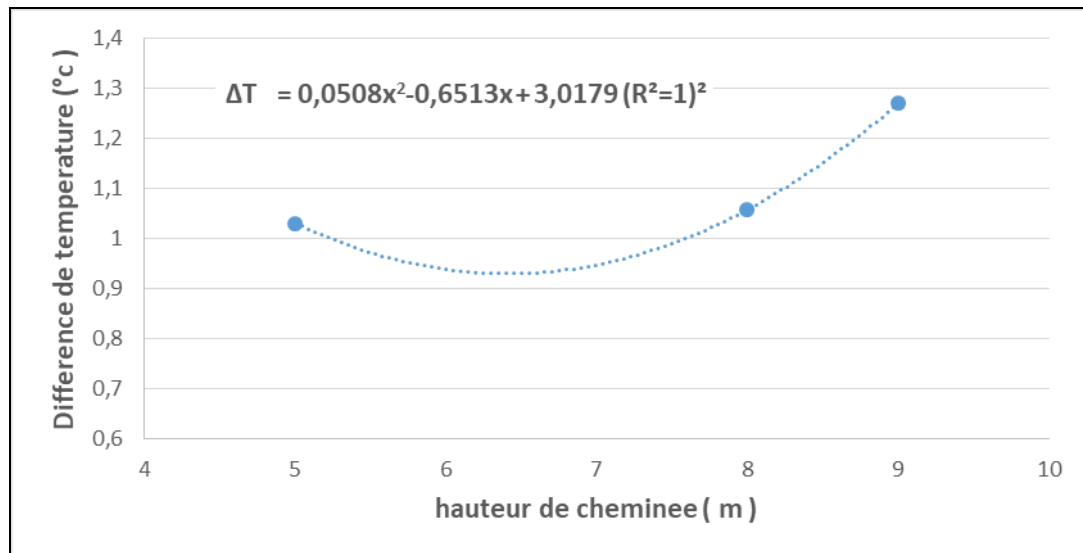


Figure III.10.: Evolution de la différence de température dans le collecteur en fonction de la hauteur de la cheminée

III.3.2.la cheminée

La même démarche précédente a été appliquée pour déterminer l'effet de la longueur de la cheminée solaire sur la variation de température dans la cheminée. On remarque que l'augmentation dans la hauteur de la cheminée augmente la différence de température dans la cheminée comme illustrée sur la Figure III.11. A titre d'exemple,

À 1000 secondes, la différence de températures est 0.36°C pour 5m et 0.74°C pour 9m. Pour quantifier cette variation, une relation mathématique (Figure III.12) a été proposée comme suit :

$$\Delta T = 0.1257e^{0,2843x} \quad (R^2 = 0,995) \quad \text{(III.5)}$$

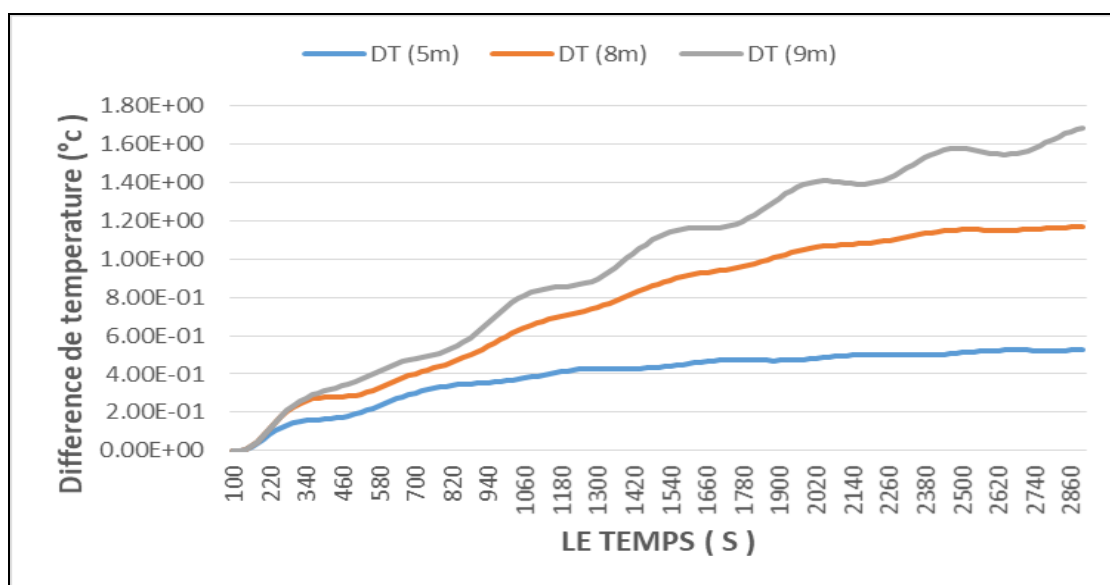


Figure III.11: Évolution de la différence de température de l’air dans la cheminée.

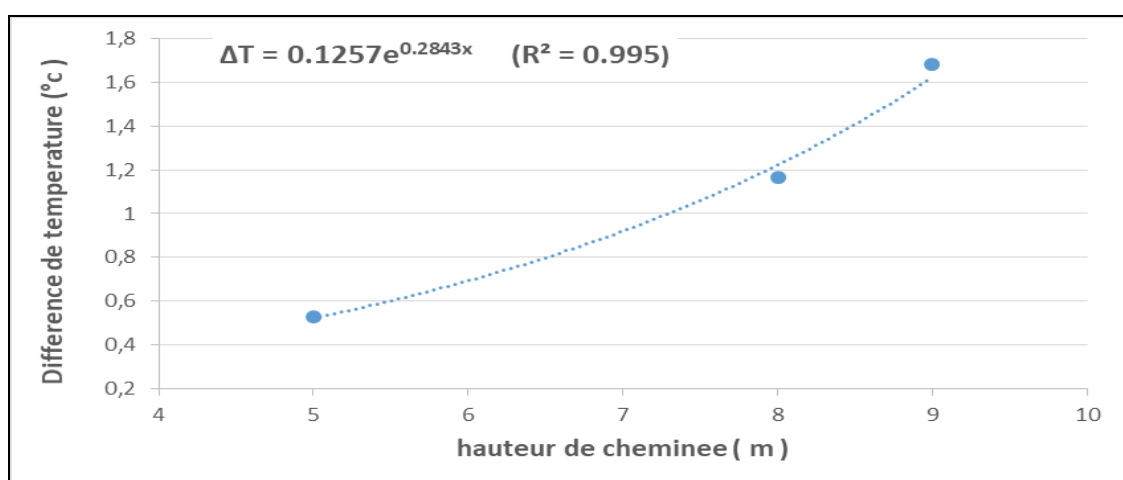


Figure III.12: Evolution la différence de température en fonction De la hauteur de la cheminée.

III.4 Effet distance collecteur-absorbeur sur la variation de température dans le collecteur et la cheminée

Pour déterminer l'effet de la variation de la distance colleur-absorbeur sur l'évolution des températures de l'air dans le collecteur et dans la cheminée solaire une simulation par le logiciel Energy2D a été effectuée. Dans ce cas, la température ambiante est 25 °C, les radiations solaires sont 1000 W/m² et la distance colleur-absorbeur prend les valeurs suivantes : 2.4, 2.5, 2.9 et 3.2 m.

III.4.1. Le collecteur

L'évolution de la différence de température de l'air entre la sortie et l'entrée du collecteur en fonction du temps pour les différentes valeurs de la distance qui sépare le collecteur et l'absorbeur est illustrée sur la Figure III.13. On note que la différence de température augmente avec le temps et avec l'augmentation de cette distance. A titre d'exemple à 1000 secondes, la différence de températures est 0.07°C pour la distance de 2.4m et elle est de 0.67°C pour la distance est de 3.2m.

Une relation de la différence de température dans le collecteur en fonction la distance collecteur-absorbeur (Figure III.14) a été proposée :

$$\Delta T = 0,2602e^{0,4328x} \quad (R^2 = 0,9779) \quad \text{(III.6)}$$

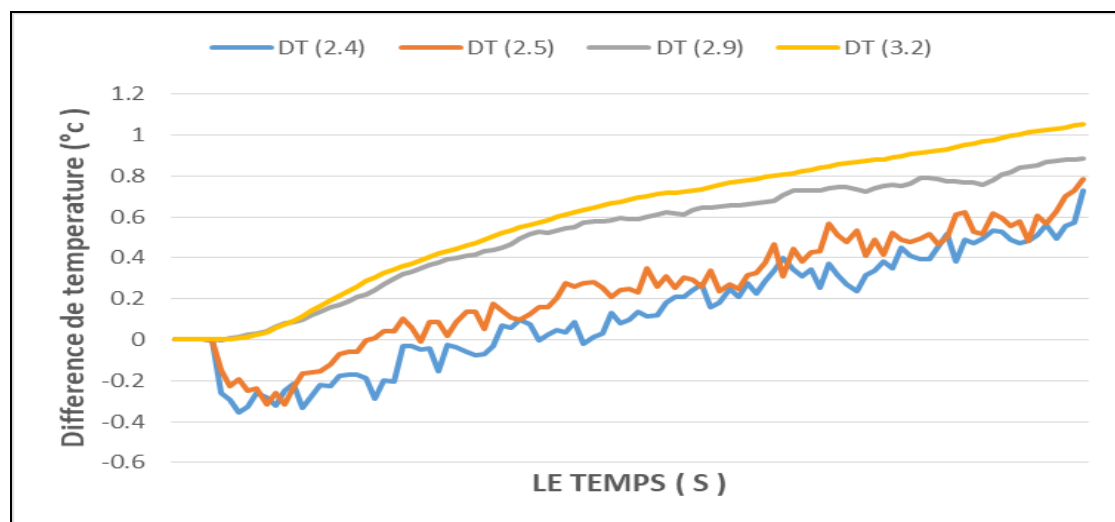


Figure III.13: Évolution de la différence de température de l'air dans le collecteur.

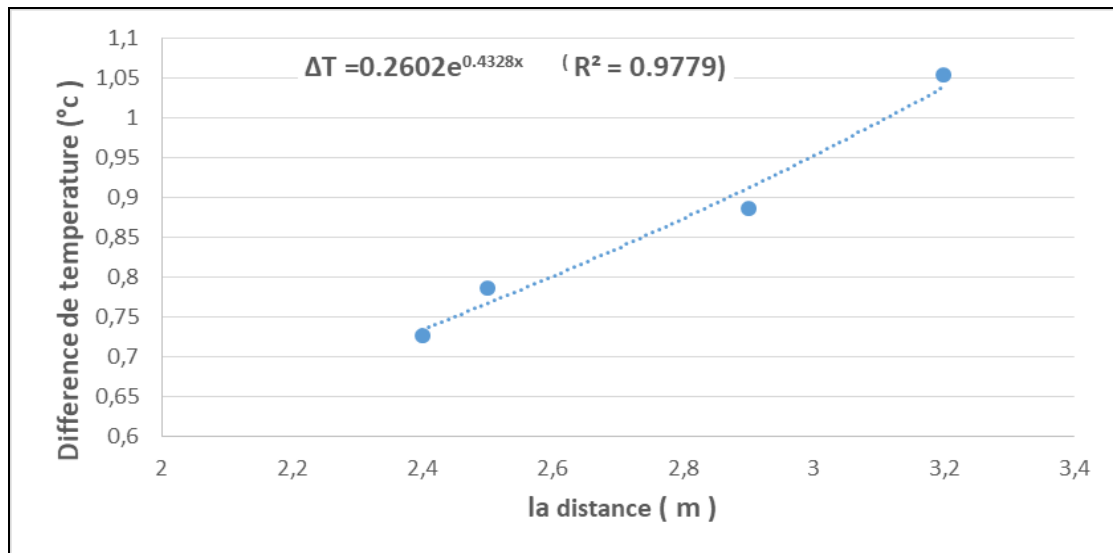


Figure III.14: Evolution de la différence de température dans le collecteur en fonction de la distance.

III.4.2.La cheminée

La même procédure précédente a été appliquée pour déterminer l'effet de la distance collecteur-absorbeur sur la variation de température dans la cheminée. On remarque que l'augmentation de la distance collecteur-absorbeur augmente la différence de température dans la cheminée comme illustrée sur la Figure III.15. A titre d'exemple,

À 1000secondes, la différence de températures est 0.38°C pour la distance de 2.4 m, elle est de 0.71°C pour une distance de 3.2m et pour les distances 2.5m et 2.9m, la différence de température est de 0.42°C et 0.43°C respectivement. Pour quantifier cette variation, une relation mathématique illustrée sur la Figure III.16 a été proposée comme suit :

$$\Delta T = 3,465 x^3 - 27,413 x^2 + 72,267 x - 62,967 \quad (R^2 = 1) \quad \text{(III.7)}$$

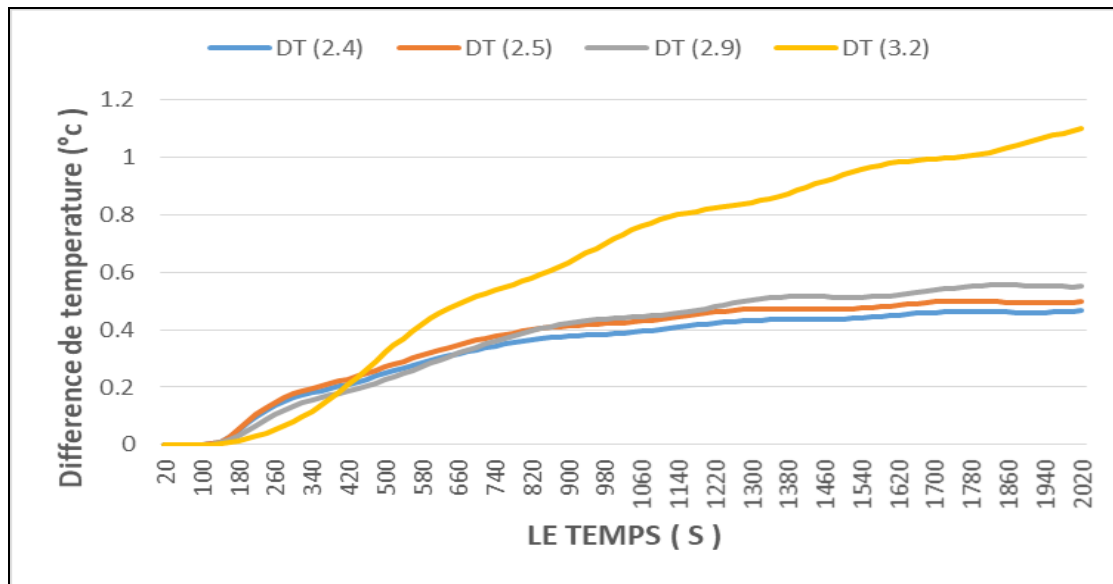


Figure III.15: Évolution de la différence de température de l’air dans la cheminée.

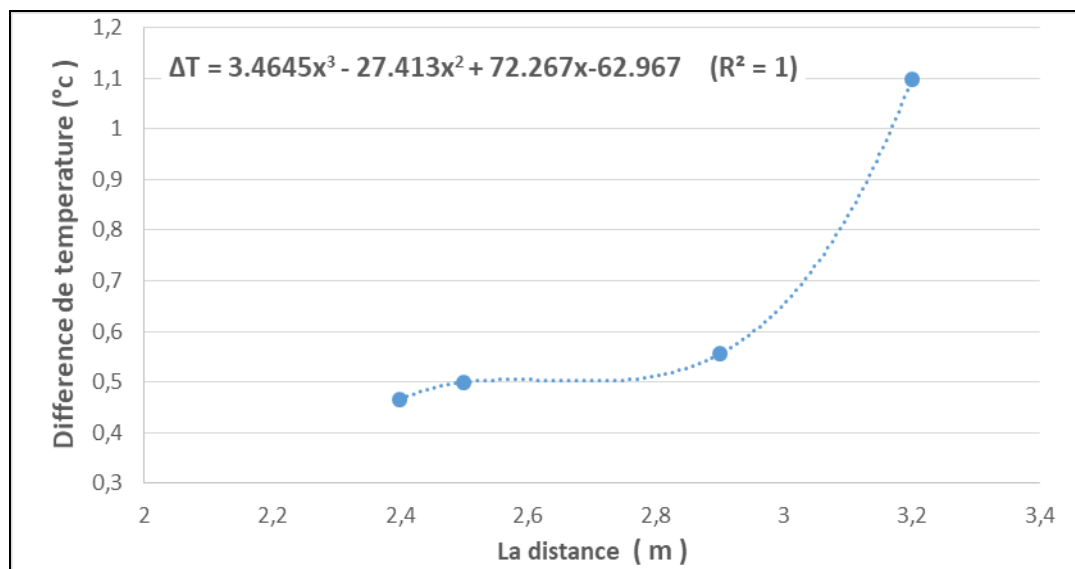


Figure III.16: Evolution moyenne de la différence dans la cheminée en fonction de la distance.

Conclusion

L’étude de la simulation de la cheminée solaire en utilisant le logiciel Energy 2D faite le long de ce chapitre nous permet de retenir les points suivants :

- La température de l’air dans le collecteur augmente selon la position du rayon, à chaque fois qu’on se rapproche du centre de la cheminée la température de l’air augmente selon la formule :

$$T = -0,0024x^2 + 0,2104x + 25,083 (R^2=1) .$$

- La température dans la cheminée diminue en fonction de sa hauteur selon cette formule:

$$T = 25,677 * h^{-0,016} (0.982) (R^2=0.9818) .$$

- La différence de température dans le collecteur varie avec les radiations solaires :

$$\Delta T = 6 \times 10^{-06} \times G^{1,8152} (R^2=0.9967) .$$

- La différence de température dans le collecteur augmente avec l'augmentation de la hauteur de la cheminée selon la formule :

$$\Delta T = 0,0508x^2 - 0,6513x^2 + 3,0179 (R^2=1)$$

- La différence de température dans le collecteur augmente avec l'augmentation dans la distance collecteur-absorbeur selon la formule :

$$\Delta T = 0.2602e^{0.4328x} (R^2=0.9779)$$

Conclusion générale

Conclusion Générale

La technologie de la cheminée solaire offre un moyen d'exploiter la chaleur du soleil. Pour de meilleurs résultats, une cheminée solaire doit être construite dans une zone Très ensoleillé avec beaucoup d'espaces inoccupés. La cheminée solaire est Un générateur naturel qui utilise le rayonnement solaire pour augmenter l'énergie L'énergie interne de l'air circulant dans le système, qui rend la conversion Un gain utile d'énergie cinétique d'écoulement pour les capteurs solaires peut être Celle-ci est convertie en électricité par des turbines adaptées.

Notre étude porte sur la simulation de la cheminée solaire en utilisant le logiciel de simulation Energy2D, plus exactement sur l'évolution des températures de l'air dans le collecteur et dans la cheminée. De même, l'effet des radiations solaires et l'effet de la longueur de la cheminée et celui de la distance collecteur-absorbeur sur les évolutions des températures du collecteur et de la cheminée ont été étudiés.

Le logiciel Energy2D qu'on a utilisé pour la simulation d'une cheminée solaire est un logiciel à libre accès et il est facile à télécharger et facile à manipuler. Notre étude de simulation numérique nous a permis de retenir les points suivants:

- La température de l'air dans le collecteur augmente selon la position du rayon, à chaque fois qu'on se rapproche du centre de la cheminée la température de l'air augmente selon la formule:

$$T = -0,0024x^2 + 0,2104x + 25,083(R^2=1).$$

- La température dans la cheminée diminue en fonction de sa hauteur selon cette formule:

$$T = 25,677 * h^{-0,016} \quad (0.982) \quad (R^2=0.9818).$$

- La différence de température dans le collecteur varie avec les radiations solaires:

$$\Delta T = 6 \times 10^{-06} \times G^{1,8152} \quad (R^2=0.9967).$$

- La différence de température dans le collecteur augmente avec l'augmentation de la hauteur de la cheminée selon la formule :

$$\Delta T = 0,0508x^2 - 0,6513x^2 + 3,0179 \quad (R^2=1).$$

Conclusion générale

- La différence de température dans le collecteur augmente avec l'augmentation dans la distance collecteur-absorbeur selon la formule :

$$\Delta T = 0.2602e^{0.4328x} (R^2=0.9779) .$$

Et comme suite à notre travail, on propose de faire d'autre simulation sur l'effet du diamètre du collecteur, l'effet de diamètre de la cheminée, la hauteur de l'absorbeur.....etc. sur les performances de la cheminée solaire afin de déterminer une géométrie optimale.

Référence

Référence

- [1] LAKHDARI Med Sighér et MOKRANI Omar Ben Khettab Etude expérimentale d'une cheminée solaire au Sud Algérien région d'Ouargla Mémoire Master Académique
- [2] D. WILGENBUS, —L'énergie solaire—, La main à la pâte – Société française de physique, Paris lion 2012.
- [3] <https://senegrid.sn/le-blog/applications-de-l-energie-solaire>
- [4] A brief history of solar chimney. Retrieved 10.11.2004
- [5] JörgSchlaich, Wolfgang Schiel: solar chimneys, Encyclopedia of Physical Science and Technology Third Edition, 2000, Consulting Engineers, Stuttgart.
- [6] Solar Chimney-Technology. Retrieved 10.11.2004
- [7] J. Schlaich, The solar chimney: electricity from the sun: Edition Axel Menges, 1995
- [8]<https://www.ecosources.org/50-prototype-de-tour-solaire-cheminee-implantee-a-manzanares-en-1982>
- [9] http://www.economie-denergie.wikibis.com/projet_de_buronga.php
- [10] Enviromission.Websiteaddress:<http://www.enviromission.com.au>.
- [11] <https://doczz.fr/doc/2867492/recapitulatif-des-principaux-projets-de-tours-solaires-ge..>
- [12]: Kasaeian, A., Ghalamchi, M., &Ghalamchi, M. Simulation and optimization of geometric parameters of a solar chimney in Tehran. Energy conversion and management, 83, 28-34. (2014)
- [13] http://www.ecosources.info/dossiers/Centrale_solaire_tour_effet%20cheminee
- [14]AbdulcelilBUĞUTEKİN,«Experementalstudyoftemperaturefiledinasolar chimneyplantinAdiyaman».IsıBilimiveTekniğiDergisi,32,2,73-80,2012J.of Thermal Science and Technology ©2012 TIBTD Printed in Turkey ISSN 1300- 3615.
- [15] http://www.ecosources.info/dossiers/Centrale_solaire_tour_effetcheminee.
- [16] BOUZIANE Ibrahim el-Khalil, LOUCHANI SIF Eddine « Analyse numérique du comportement aérothermique dans une cheminée solaire combinée avec l'énergie géothermique

Référence

[17] www.ccsenet.org/mas/moderne Applied Science Vol. 7, n ° 4; 2013 58

[18] (Hamdan, 2011). URL: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n4p55> College of Engineerin2010

[19] (Zhou, Yang, Xiaco, et Shi, 2008). URL: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v7n4p55> College of Engineerin2010

Web1: <https://charlesxie.medium.com/numerical-algorithms-for-simulating-three-modes-of-heat-transfer-e65fca9baf50>

Web2:https://win32diskimager.es/descargar-energy2d-para-windows/#Como_utilizar_Energy2D

Web3: <https://www.softpedia.com/get/Science-CAD/Energy2D.shtml>

Web4: Ipsita Negi and Kirti Pal, Effect of tower height and collector radius on performance of solar updraft tower power plant. International Journal of Social Ecology and Sustainable Development. Vol. 3(1), 2022.

Résumé

Résumé

La cheminée solaire (CHS) présente un outil important de la conversion de l'énergie solaire en électricité. Les calculs de performance d'une cheminée solaire sont importants pour l'estimation des meilleures dimensions pour un emplacement bien déterminé et selon ces conditions opératoires. Plusieurs facteurs affectent les performances d'une CHS à savoir; le diamètre du collecteur, la hauteur et le diamètre de la cheminée, les radiations solaires, la vitesse du vent.....Notre étude porte sur une simulation numérique d'une cheminée solaire en utilisant le logiciel Energy2D. Elle vise l'évolution de la température de l'air dans la CHS. De même, les effets des radiations solaires, de la hauteur de la cheminée, de la distance entre le collecteur/absorbeur sur l'évolution de la température de l'air dans le collecteur et dans la cheminée ont été effectués.

Mots clés: Cheminée solaire, Energy2D, Simulation, Radiations solaires, Collecteur, Absorbeur, Température.

Summary

The solar chimney (SCH) is an important tool for converting solar energy into electricity. Calculating the performance of a solar chimney is important for estimating the best dimensions for a given location and operating conditions. Several factors affect the performance of a SCH, namely: collector diameter, chimney height and diameter, solar radiation, wind speed.....Our study focuses on a numerical simulation of a solar chimney using Energy2D software. It focuses on the evolution of air temperature in the SCH. Also, the effect of solar radiation, chimney height and distance between collector/absorber on the evolution of air temperature in the collector and in the chimney have been carried out.

Keywords: Solar chimney, Energy2D, Simulation, Solar radiation, Collector, Absorber, Temperature.

ملخص

تقدم المدخنة الشمسية (CHS) أداة مهمة لتحويل الطاقة الشمسية إلى كهرباء. تعد حسابات أداء المدخنة الشمسية مهمة لتقدير أفضل الأبعاد لموقع محدد جيدا ووفقا لظروف التشغيل هذه. هناك عدة عوامل تؤثر على أداء CHS وهي؛ قطر المجمع، ارتفاع وقطر المدخنة، الإشعاع الشمسي، سرعة الرياح تركز دراستنا على محاكاة عددية لمدخنة شمسية باستخدام برنامج Energy2D.

يستهدف تطور درجة حرارة الهواء في CHS. وبالمثل، تم تنفيذ تأثير الإشعاع الشمسي، وارتفاع المدخنة، والمسافة بين المجمع / الامتصاص على تطور درجة حرارة الهواء في المجمع وفي المدخنة. الكلمات المفتاحية: مدخنة شمسية، Energy2D، محاكاة، إشعاع شمسي، جامع، ممتص، درجة حرارة.