

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي  
Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

FACULTE DE LA TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GENIE DES PROCEDES ET PETROCHIMIE

LABORATOIRE GENIE DES PROCEDES (LGP)

THÈSE EN VUE DE L'OBTENTION D'UN DIPLÔME DE DOCTORAT (LMD)

Spécialité : PROCEDES ET ENERGIE

Intitulé

# Cheminée solaire : applications et perspectives dans le Sud Algérien

Présentée et Soutenue publiquement

Par :

**MOKRANI Omar Ben Elkhettab**

Le : 06/01/2021

Devant le jury composé de :

Laouin salah eddine	MCA	Université d'El oued	Président
Khelef Abdelhamid	Pr	Université d'El oued	Examineur
Belakroum Rassim	MCA	Université d'Ouargla	Examineur
Bechki Djamel	Pr	Université d'Ouargla	Examineur
Ouahrani Mohammed redha	Pr	Université d'El oued	Directeur de thèse
Sellami Mohammed Hassane	Pr	Université d'Ouargla	Co-Directeur de thèse
Segni Ladjel	Pr	Université d'Ouargla	Invité

Année Universitaire: 2020 – 2021

## الإهداء

أهدي ثمرة عملي هذا:

إلى من وصى بهما ربي إلى من هما الغالين على قلبي و عند ربي رمز الحب و التضحية أمي و أبي حفظهما الله و أدخلهما الجنة.

إلى من هم أعز علي من نفسي أخي و عضدي ساعد و اخواتي التي هن سندي خيرة و فضيلة و زوجة أخي.

و كل افراد عائلة مقراني.

إلى من علموني ما كنت أجهل و أحاطوني علما...أساتذتي الكرام.

و إلى كل الأهل و الأصدقاء.

## شكر و تقدير

الحمد لله الذي أنار لي درب العلم و المعرفة و ووقتي لإنجاز هذا العمل.

يقول النبي ﷺ « من لا يشكر الناس لا يشكر الله » ، أتوجه بخالص الشكر و بأسمى عبارات التقدير للبروفيسور

المشرف محمد رضا وهراني و الدكتور صلاح الدين لعويني لما قدماه لي من جهد و نصح و معرفة طيلة إنجاز هذه الرسالة.

ثم أتوجه بخالص شكر و تقدير و عظيم امتناني إلى من رعاني طالباً في الدكتوراه و معداً لهذا البحث أستاذي الفاضل البروفيسور لعجال سقني و الذي له الفضل بعد الله تعالى على هذا المشروع منذ ان كان الموضوع عنواناً و فكرة الى ان صار رسالة و على ما قدمه لي من توجيهات و نصائح سديدة و ملاحظات قيمة و مستمرة ، فله مني الشكر كله و التقدير و العرفان ، و أتوجه بشكري الى استاذي الفاضل و التقدير البروفيسور محمد حسان سلامي على رعايته و دعمه و مساندته و رحابة صدره لي طيلة فترة البحث و التي كان لها الأثر الكبير في التخفيف عن صعوبات و مشقات العمل و ما قدمته لي من توجيهات و نصائح و ملاحظات، فكنتم نعمة الأساتذة لي.

و أتقدم بشكري الجزيل إلى أساتذتي الموقرين في لجنة المناقشة رئاسة و أعضاء و لتفضلهم قبول مناقشة هذه الرسالة ، سائلاً الله تعالى ان يثيبهم خيراً، و أخص بالذكر الدكتور عبد الحميد خلف على مساعدته و مساندته لي.

كما أتقدم بالشكر إلى البروفيسور جمال بشكي و الدكتور رسيم بلعكروم على تحملهم عناء السفر و تشریفهم لي بقبولهم مناقشة هذا العمل.

أبخر هذا البحث بمخبر هندسة الطرائق (LGP) بجامعة قاصدي مرباح، حيث كان لي عظيم شرف الانضمام إليه طيلة مدة إنجاز هذا البحث، لذا أتوجه بشكري العميق إلى كل من: سهام مفلح ، بلال قوجيل ، بن الشيخ صلاح ، اسماء عمر عياشي، نريمان خلفاوي، فاطمة الزهراء نواصرية ، زينب محسن.

و لا أنسى أيضاً أن أشكر مجموعة البحث التي عملت ضمنها الزملاء : بلخير ستو، عبد الرحمان بن حمزة ، سيف الدين مدور، عبد الحكيم بن عريمة، ياسين بلعيش، محمد لمين علي الواعر، مولاي رشيد قوادري.

و أتوجه أيضاً بالامتنان الى عمال ورشة صيانة كل من : محمد هلة ، حسان منزر، عبد الكريم بوغابة.

و أعبر أيضاً عن شكري لأصدقائي الذين شاركوا معي في صنع و تجميع النموذج الأولي للمدخنة الشمسية على وجه الخصوص: محمد الصغير الأخضر، صهيب عماري، الحاج الشيخ بوشريط، سيد احمد بن ربيعة، عبد الباسط سعداوي، عبد الرحمان يعقوبي، مراد جعفاري، احمد غبشي، اسماعيل بن الشيخ، جمال بن ساري، عباس سايح، محمد الأمين بخديجة.

قال عليه أفضل الصلاة و السلام «من صنع إليكم معروفاً فكافئوه، فإن لم تجدوا ما تكافئوه فادعوا له حتى تروا أنكم قد كافأتموه»، أتمنى لأي شخص شارك بشكل مباشر أو غير مباشر في نجاح هذا العمل أن يجعله الله في ميزان حسناته.

محمد بن الخطاب مقراني

## مخلص:

في مجتمعنا الحديث يتزايد استهلاك الطاقة بشكل هائل عامًا بعد عام بسبب متطلبات سبل العيش المريح ونمو سكان العالم واقتصادهم لكن للأسف فإن مصادر الطاقة التقليدية تعاني من مشاكل عدة نذكر منها التوفر والتلوث لذلك يجب علينا تطوير و استخدام مصادر الطاقات المتجددة و خاصةً مواردنا الطبيعية الهائلة التي مصدره الشمس. نظراً لأن طاقة الشمس ليست محدودة، فإن التحويل المباشر للطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية باستخدام محطات المداخن الشمسية يعتبر حلاً مثاليًا للطلب المتزايد على إمدادات الطاقة.

لتحقيق ما أوردنا ذكره تم بناء نموذج أولي صغير الحجم بارتفاع 8 أمتار و قطر مجمع 12 مترًا في منطقة الحرم الجامعي بورقلة على مستوى مخبر هندسة الطرائق (LGP) والذي يقع في جنوب الجزائر حيث تتميز معدلات الإشعاع الشمسي بارتفاعها على مدار السنة.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تحقيق أعلى سرعة لتدفق الهواء في المدخنة في الصباح والليل وذلك من أجل استخدام هذه السرعة لتحريك عفنات المولدات الكهربائية التي يمكن تثبيتها في أسفل المدخنة.

من خلال دراسة تجريبية ، تم تحديد تأثير الظروف المناخية (الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة المحيط....الخ) والأبعاد الهندسية على كفاءة إنتاج المدخنة الشمسية. بالإضافة الى ذلك، تمت دراسة تأثير نظام التهجين على أداء المدخنة الشمسية وعلى مدة تشغيلها بعد غروب الشمس باستخدام الطاقات الحرارية للمياه الجوفية التي يطلق عليها (ألبيان) حيث يمكن استخدام هذه الأخيرة في الحفاظ على ارتفاع درجة الحرارة داخل المجمع طوال الليل.

**الكلمات المفتاحية :** الطاقة المتجددة، طاقة كهربائية، محطات المداخن الشمسية، جنوب الجزائر، الشروط المناخي، الأبعاد الهندسية.

## **Abstract**

In modern society, energy consumption is increasing tremendously year by year, due to the growth of the world's population, their demand for comfortable means, and the development of the mondial economy. Unfortunately, conventional sources of energy have problems, namely availability and pollution. Therefore, we must develop and use renewable energy resources, especially our enormous natural resource, the sun. Since solar energy is unlimited in human scale, the direct conversion of solar energy into electrical energy using solar chimney power plants (SCPP) is seen as a good idea to solve the increasing demand for energy supply.

A small-scale prototype of (SCPP) with 8 m height and 12 m of collector diameter is built in the campus Zone of Ouargla University at the laboratory of the Process Engineering (LGP) which is located in southern Algeria where solar irradiation rate is high.

The main objective of this study is to achieve the highest air velocity within the chimney in the day and in the night in order to use this air to move an electric turbine. Through an experimental study, the influence of climatic conditions (solar radiation and ambient temperature) and geometric parameters on the production efficiency of the solar chimney was determined. In addition, the influence of the hybridization system on the performance of the solar chimney and on the duration of its operation after sunset was studied with the use of geothermal energy called ALBIEN. The last was used to maintain the temperature level of the collector overnight.

**Keywords:** Renewable energies, Electric energy, Solar chimney power plants (SCPP), South of Algeria, Climatic conditions, Geometric parameters.

## Résumé

Dans la société moderne, la consommation de l'énergie augmente énormément d'une année à l'autre en raison des exigences de confort et de la croissance de la population mondiale et de l'économie. Les sources conventionnelles d'énergie ont malheureusement des problèmes, à savoir la disponibilité et la pollution. Par conséquent, nous devons développer et utiliser des ressources d'énergies renouvelables en particulier notre ressource naturelle énorme, le soleil. Puisque l'énergie solaire est illimitée à l'échelle humaine, la conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique à l'aide des centrales à cheminées solaires (CCS) est considérée comme une solution idéale qui doit répondre à la demande croissante en énergie.

Pour contribuer à la résolution du problème, un prototype à petite échelle d'une CCS de 8 m de hauteur et 12 m de diamètre de collecteur est construit dans la zone du campus de l'Université d'Ouargla au niveau du laboratoire de génie des procédés (LGP), qui est située dans le sud de l'Algérie où le taux d'irradiation solaire est élevé.

L'objectif principal de cette étude est d'atteindre une vitesse d'écoulement de l'air au sein de la cheminée la plus élevée dans le matin et la nuit afin d'utiliser cette vitesse pour faire lancer une turbine électrique. A travers une étude expérimentale, l'influence des conditions climatiques (rayonnement solaire et température ambiante) et des paramètres géométriques sur l'efficacité de production de la cheminée solaire est déterminée. De plus, l'influence du système d'hybridation sur les performances de la cheminée solaire et sur la durée de son fonctionnement après le coucher de soleil est étudiée avec l'utilisation de l'énergie géothermale nommée ALBIEN. Ce dernier peut servir pour maintenir élevée la température du collecteur pendant la nuit.

**Mots clés :** Énergies renouvelables, Energie électrique, Centrales à cheminées solaire (CCS), Sud de l'Algérie, Conditions climatiques, Paramètres géométriques.

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau (I.1) :</b> Potentiel Solaire en Algérie	14
<b>Tableau (I.2) :</b> Les avantages et les inconvénients de l'énergie géothermiques	15
<b>Tableau (I.3) :</b> Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne	18
<b>Tableau (I.4) :</b> Les avantages et les inconvénients de l'énergie hydrauliques	20
<b>Tableau (I.5) :</b> Les avantages et les inconvénients de l'énergie biomasses	21
<b>Tableau (II.1) :</b> Résumé des études analytiques et de simulation.	26
<b>Tableau (II.2) :</b> Résumé de l'étude expérimentale de la cheminée solaire.	29
<b>Tableau (II.3) :</b> Résumé des systèmes de cheminées solaires hybrides et des applications spéciales	31
<b>Tableau (V.1) :</b> Dimensions principales du prototype (CCS).	65
<b>Tableau (V.2) :</b> Caractérisation de l'eau géothermique de l'Albien dans le sud de l'Algérie.	74
<b>Tableau (V.3) :</b> Principales dimensions et caractéristiques de l'échangeur thermique en spirale	75
<b>Tableau (VI.1) :</b> Coûts des composants de la centrale à cheminée solaire.	111
<b>Tableau (VI.2) :</b> Coûts et autres paramètres pour l'analyse économique	112
<b>Tableau (VI.3) :</b> Prix d'électricité en Dinars Algérien (DA), en Dollar le tarif moyen européen en Dollar.	112

## LISTE DE FIGURES ET DE GRAPHIQUES

<b>Fig. (I.1):</b> Spectre solaire hors atmosphère.	9
<b>Fig. (I.2) :</b> Panneaux solaires photovoltaïques	10
<b>Fig. (I.3) :</b> Principe de la conversion photovoltaïque	11
<b>Fig. (I.4) :</b> Collecteurs cylindro-paraboliques	12
<b>Fig. (I.5) :</b> Centrale solaire à tour	13
<b>Fig. (I.6) :</b> Quelques Différents types de collecteurs paraboliques	13
<b>Fig. (I.7) :</b> Carte d'irradiations solaires.	14
<b>Fig. (I.8) :</b> Carte des ressources géothermiques.	16
<b>Fig. (I.9) :</b> Schéma d'une éolienne.	17
<b>Fig. (I.10) :</b> Eoliennes à axe vertical	17
<b>Fig. (I.11) :</b> Eoliennes à axe horizontal	18
<b>Fig. (I.12) :</b> Carte de la vitesse du vent.	18
<b>Fig. (I.13) :</b> Principe de fonctionnement de l'énergie hydraulique.	19
<b>Fig. (I.14) :</b> Répartition des terres utilisées par l'agriculture	21
<b>Fig. (II.1) :</b> Conception de Léonard de Vinci (1452-1519)	24
<b>Fig. (II.2) :</b> Projet de moteur solaire proposé par Isidoro Cabanyes	24
<b>Fig. (II.3) :</b> La cheminée solaire présentée par Bernard Dubos	25
<b>Fig. (II.4) :</b> Cheminée solaire dans le désert marocain	25
<b>Fig. (II.5) :</b> Proposition d'une cheminée solaire	25
<b>Fig. (II.6) :</b> Photo des différents compartiments de la centrale à cheminée solaire	33
<b>Fig. (II.7) :</b> Photo de la centrale à cheminée solaire de Jinshawan, en Mongolie en Chine.	33
<b>Fig. (II.8) :</b> Photo de la centrale à cheminée solaire pilote de Kerman en Iran	34
<b>Fig. (III.1) :</b> Diagramme schématique de la Centrale à cheminée solaire	37
<b>Fig. (III.2) :</b> Schéma de principe du collecteur solaire	38
<b>Fig. (III.3) :</b> Bilan thermique du collecteur solaire	39
<b>Fig. (III.4) :</b> Construction typique de la cheminée	41
<b>Fig. (III.5) :</b> Méthodes d'installation typique pour une turbine de la cheminée solaire	43
<b>Fig. (III.6) :</b> Le tube de stockage d'eau absorbe la chaleur pendant la journée	45
<b>Fig. (III.7) :</b> Tube de stockage d'eau pendant la nuit	45
<b>Fig. (III.8) :</b> Effet de la température ambiante et l'éclairement sur la production d'énergie	46

<b>Fig. (III.9) :</b> Effet de la hauteur de la cheminée et du diamètre du collecteur sur la production d'électricité pour un éclairement de 600 W/m <sup>2</sup>	47
<b>Fig. (III.10) :</b> Variation de la puissance électrique en fonction de débit	48
<b>Fig. (III.11) :</b> Production annuelle d'énergie de l'électricité par la cheminée solaire	48
<b>Fig. (IV.1) :</b> Transfert de chaleur par conduction	52
<b>Fig. (IV.2) :</b> Transfert de chaleur par radiation	58
<b>Fig. (IV.3) :</b> Représentation schématique d'un angle solide	59
<b>Fig. (IV.4) :</b> Schéma montrant la luminance d'un élément de surface ds.	60
<b>Fig. (IV.5) :</b> Processus de réception d'un rayonnement par un corps	60
<b>Fig. (IV.6) :</b> Schéma montrant l'intensité énergétique dans une direction donnée	61
<b>Fig. (V.1) :</b> Une photo d'un (CCS) à Ouargla, Algérie.	66
<b>Fig. (V.2) :</b> Une vue de l'installation de cheminée sur un système de cheminée solaire.	67
<b>Fig. (V.3) :</b> Construction de la structure de support de charge de cheminée.	67
<b>Fig. (V.4) :</b> Conception des couvercles appliqués à l'entrée du collecteur.	68
<b>Fig. (V.5) :</b> Les matériaux couvrent le toit du collecteur solaire (film plastique PVC et verre transparent).	69
<b>Fig. (V.6) :</b> Construction de la zone du collecteur de cheminée solaire	69
<b>Fig. (V.7) :</b> Diagramme schématique de la jonction incurvée dans la région de transition collecteur-cheminée.	70
<b>Fig. (V.8) :</b> Diagramme schématique de la jonction droite dans la région de transition collecteur-cheminée.	70
<b>Fig. (V.9) :</b> Système de régulation du débit de cheminée (Guide d'air).	71
<b>Fig. (V.10) :</b> La configuration de système CCS à collecteur hélicoïdal.	72
<b>Fig. (V.11) :</b> Les étapes d'isolation thermique du sol de la cheminée.	73
<b>Fig. (V.12) :</b> Schéma de principe d'un hybride (CCS) avec un échangeur de chaleur géothermique.	74
<b>Fig. (V.13) :</b> Image montrant l'échangeur thermique en spirale	75
<b>Fig. (V.14) :</b> Image d'une couche de granules de caoutchouc noir de 0,1 m.	76
<b>Fig. (V.15) :</b> Image de l'appareil de source d'eau chaude	76
<b>Fig. (V.16) :</b> Diagramme schématique des dimensions et de la distribution des thermocouples dans le prototype de cheminée solaire.	78
<b>Fig. (VI.1) :</b> Profils quotidiens de rayonnement solaire et de température ambiante pour une journée type (8 mars 2019).	80
<b>Fig. (VI.2) :</b> Distributions des températures de l'air en différents points sous le collecteur au cours d'une Journée typique	82

<b>Fig. (VI.3) :</b> Distribution des températures de l'air à différentes hauteurs dans une cheminée sur une Journée typique	82
<b>Fig. (VI.4) :</b> Variations de température sous-collecteur à différentes heures quotidiennes d'une journée typique	84
<b>Fig. (VI.5) :</b> Température de la cheminée change à différentes heures quotidiennes d'une journée typique	84
<b>Fig. (VI.6) :</b> Corrélation entre l'intensité solaire, la température ambiante et la température au centre du collecteur.	85
<b>Fig. (VI.7) :</b> Corrélation entre le rayonnement solaire, la température ambiante et la vitesse de l'air sur le col de la cheminée.	86
<b>Fig. (VI.8) :</b> Vitesse du vent en fonction du temps local pour un Jour ordinaire et un Jour venteux.	87
<b>Fig. (VI.9) :</b> Variation de la température au centre du collecteur dans deux cas différents (Jour ordinaire et Jour venteuse)	88
<b>Fig. (VI.10) :</b> Comparaison de la vitesse de l'air à l'entrée de la cheminée dans deux cas différents (Jour ordinaire et Jour venteux).	89
<b>Fig. (VI.11) :</b> Variation de la température par rapport au matériau des couvercles de collecteurs variables	91
<b>Fig. (VI.12) :</b> Variation de la différence de température par rapport au matériau des couvercles de collecteurs variables.	91
<b>Fig. (VI.13) :</b> Variation de la différence de température par rapport au matériau des couvercles de collecteurs variables.	92
<b>Fig. (VI.14) :</b> Comparaison des températures mesurées de capteur avec les hauteurs d'ouverture de collecteur au point F	93
<b>Fig. (VI.15) :</b> Comparaison de la différence de température mesurée avec les cas de hauteurs d'ouverture de collecteur au point F	94
<b>Fig. (VI.16) :</b> Comparaison de la vitesse de l'air mesurée avec les cas de hauteurs d'ouverture de collecteur	94
<b>Fig. (VI.17) :</b> Comparaison de la température du flux d'air mesurée en point J1 pour les types de jonction	95
<b>Fig. (VI.18) :</b> Comparaison de la vitesse d'écoulement d'air mesurée en point J1 pour les types de jonction.	96
<b>Fig. (VI.19) :</b> Vitesse de l'air (point J1), avec et sans Guide d'air.	97
<b>Fig. (VI.20) :</b> Température au centre du collecteur (point F), avec et sans Guide d'air	98
<b>Fig. (VI.21) :</b> L'influence de la hauteur du Guide d'air sur la température au centre du collecteur (Point F).	99
<b>Fig. (VI.22) :</b> L'influence de la hauteur du Guide d'air sur la vitesse de l'air (point J1).	99

<b>Fig. (VI.23) :</b> Comparaison de la vitesse d'air entre une CCS (classique), une CCS (collecteur hélicoïdal) et une CCS (collecteur hélicoïdal + guide d'air).	101
<b>Fig. (VI.24) :</b> Comparaison de température du point F entre une CCS (classique), une CCS (collecteur hélicoïdal) et une CCS (collecteur hélicoïdal + guide d'air).	101
<b>Fig. (VI.25) :</b> Distribution de la température sous le collecteur dans le premier cas (a)	103
<b>Fig. (VI.26) :</b> Distribution de température sous le collecteur dans le deuxième cas (b)	104
<b>Fig. (VI.27) :</b> Température du centre du collecteur dans les deux cas (a) et (b)	104
<b>Fig. (VI.28) :</b> Différence de température de l'eau chaude (entrée-sortie) dans les deux cas	105
<b>Fig. (VI.29) :</b> Vitesse de l'air du (CCS) dans les deux cas (a) et (b)	106
<b>Fig. (VI.30) :</b> Température du centre du collecteur en fonction de l'heure locale (jour)	107
<b>Fig. (VI.31) :</b> Vitesse d'air en fonction de l'heure locale (jour),	108
<b>Fig. (VI.32) :</b> Effet du débit d'eau géothermique.	109
<b>Fig. (VI.33) :</b> Effet de la température d'entrée d'eau géothermique.	109
<b>Fig. (VI.34) :</b> Puissance de sortie Vs. Heure du jour avec / sans géothermale	110
<b>Fig. (VI.35) :</b> Evolution des revenus et des dépenses d'investissement dans le cas d'un système classique (CCS).	113
<b>Fig. (VI.36) :</b> Evolution des revenus et des dépenses d'investissement dans le cas du système hybride (CCS/géo).	113

## Nomenclature

### Symboles

<b>A</b>	Surface (m <sup>2</sup> ).
<b>q</b>	Intensité du rayonnement solaire (W/m <sup>2</sup> ).
<b>T</b>	Température (°C).
<b>ΔT</b>	Différence de température (°C).
<b>Q̇</b>	Débit volumique (m <sup>3</sup> /s).
<b>ṁ</b>	Débit massique (kg/s).
<b>Cp</b>	Capacité thermique de l'air (J/kg·K).
<b>v</b>	Vitesse de l'air (m/s).
<b>P</b>	Puissance (W).
<b>p</b>	Pression (Pa).
<b>ΔP</b>	Différence de pression (N/m <sup>2</sup> ).
<b>H</b>	Hauteur (m).
<b>g</b>	Accélération de la pesanteur (m/s <sup>2</sup> ).
<b>h<sub>c</sub></b>	Coefficient de transfert de chaleur par convection (W/m <sup>2</sup> ·°C).
<b>U</b>	Vitesse du fluide en (m/s).
<b>D</b>	Diamètre de la conduite (m).

### Nombres adimensionnels

<b>Re</b>	Nombre de Reynolds
<b>Pr</b>	Nombre de Prandtl
<b>Nu</b>	Nombre de Nusselt
<b>Gr</b>	Nombre de Grashof
<b>Ra</b>	Nombre de Rayleigh

### Symboles grecques

<b>η</b>	Rendement (%).
<b>ρ</b>	Masse volumique du fluide (kg /m <sup>3</sup> ).
<b>Φ</b>	Flux de chaleur (W).
<b>λ</b>	Conductivité thermique (W/m·°C).
<b>μ</b>	Viscosité dynamique du fluide (kg/ms).

### Indices

<b>coll</b>	collecteur
<b>ch</b>	cheminée
<b>tot</b>	totale
<b>max</b>	maximale
<b>amb</b>	ambiante
<b>élec</b>	électrique
<b>tur</b>	turbine
<b>géo</b>	Eau géothermique

### Abréviations

<b>CCS</b>	Centrale à Cheminée Solaire
<b>LCC</b>	Life Cycle Cost
<b>LCOE</b>	Levelized Cost Of Electricity
<b>TRI</b>	Taux de rentabilité interne

# Sommaire

<b>Remerciements</b>	
<b>Résumé</b>	
<b>Liste des tableaux</b>	
<b>Liste des figures et des graphiques</b>	
<b>Nomenclature</b>	
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>Partie théorique</b>	
<b>CHAPITRE I : Ressources énergétiques renouvelables et leurs systèmes de production d'électricité</b>	
I.1. Introduction	6
I.2. Energie solaire	6
I.2.5. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire	9
I.2.6. Captation de rayonnement solaire	10
I.2.7. Potentiel de l'énergie solaire	14
I.3. Energie géothermique	14
I.3.1. Potentiel de l'énergie géothermique	15
I.4. Energie éolienne	16
I.4.3. Potentiel éolien	18
I.5. Energie hydraulique	19
I.5.3. Potentiel de l'hydroélectricité	20
I.6. Energie de la biomasse	20
I. 6.1. Procédés de conversion de la biomasse en énergie	21
I.6.2. Potentiel de la Biomasse	21
I.7. Conclusion	22
<b>Chapitre II : Revue bibliographique</b>	
II.1. Introduction	24
II.2. Chronologie de la centrale à cheminée solaire	24
II.3. Etudes analytiques et de simulation	26
II.4. Les études expérimentales	29
II.5. Systèmes de cheminées solaires hybrides et applications spéciales	31
II.6. Projets de centrale à cheminées solaires	33
II.7. Conclusion	34
<b>Chapitre III : Généralités sur les centrales à cheminée solaire</b>	
III.1. Introduction	36
III.2. Le concept de la centrale à cheminée solaire	36
III.3. Configuration de la centrale à cheminée solaire	38
III.3.1. Collecteur solaire	38
III.3.1.1 Rendement thermique du collecteur	40
III.3.2. Cheminée	40
III.3.2.1. Rendement de la cheminée	41
III.3.3. La turbine de production d'énergie	43
III.4. Système de stockage thermique d'énergie	44
III.5. L'effet des principaux paramètres sur les performances de la centrale à cheminée solaire	46
III.6. Avantages et inconvénients de la cheminée solaire	49
III.7. Conclusion	50
<b>Chapitre IV : Généralités sur les modes du transfert thermique</b>	
IV.1. Introduction	52
IV.2. Conduction	52
IV.2.1. Loi de Fourier	53
IV.3. Convection	53
IV.3.1. Nombres adimensionnels	55

IV.4. Le rayonnement	57
IV.4.1.Principe de transfert de chaleur par rayonnement	57
IV.4.2.Définitions préliminaires	58
IV.4.3.Processus de réception d'un rayonnement par un corps	60
IV.4.4. Lois du rayonnement	61

### **Partie pratique**

#### **Chapitre V : Conception du prototype de la cheminée solaire**

V.1. Introduction	65
V.2. Conception expérimentale	65
V.2.1. Conception du prototype et choix des dimensions	66
V.2.2. Cheminée	66
V.2.3. Collecteur solaire	68
V.2.4. Isolation absorbante	72
V.3. Système hybride	73
V.3.1. Conception de l'échangeur de chaleur	75
V.3.2. Dispositif de la source d'eau chaude	76
V.4. Les grandeurs mesurées pendant les expériences	77
V.5. Les appareils de mesure utilisés dans l'expérience sont	77
V.5. L'emplacement des thermocouples	78

#### **Chapitre VI : Résultats et discussion**

VI.1. Introduction	80
VI.2. Champ de température	80
VI.2.1 Distribution instantanée de la température	81
VI.2.2 Distribution quotidienne de la température	83
VI.3. L'influence des conditions climatiques	85
VI.4.Impact des matériaux de fabrication	90
VI.5. Effets dimensionnels géométriques	92
VI.6.Système d'hybridation: Eau géothermique / centrale à cheminée solaire	102
VI.6.1.Mesures pendant 24 heures	102
VI.6.2 Performance de la CCS pendant la journée	107
VI.6.3. Effet du débit d'eau géothermique	108
VI.6.4. Effet de la température d'entrée d'eau géothermique	109
VI.7. Etude économique du système	110
VI.7.1. La puissance théorique générée par la turbine	110
VI.7.2. Coût d'investissement total	111
VI.7.3. Tarification de l'énergie	112
VI.7.4. La rentabilité de système	113

<b>Conclusion générale</b>	<b>115</b>
----------------------------	------------

<b>Références bibliographiques</b>	<b>119</b>
------------------------------------	------------

<b>Annexes</b>	<b>128</b>
----------------	------------

<b>Publication</b>	<b>131</b>
--------------------	------------

# Introduction générale

## Introduction générale

La tendance de la consommation d'énergie est très rapide et elle retient l'attention ces dernières années. Dans les pays développés, la tendance est bien supérieure à la moyenne mondiale. Un fait reconnu pour les sociétés humaines est que les besoins mondiaux en énergie augmentent rapidement, ainsi les sources d'énergie fossile bon marché s'épuisent lentement mais certainement au cours des prochaines décennies. Pour conserver ces précieuses sources de combustibles fossiles pour les générations futures, pour éviter les dommages environnementaux causés par la combustion de ces combustibles et pour répondre à la demande croissante d'énergie, il n'y a pas d'autres moyens que de se tourner vers l'utilisation d'énergies propres et renouvelables [1].

Les sources d'énergies renouvelables fournissent environ 10.3% des besoins énergétiques totaux du monde. En conséquence, au fil des années, de nombreux scientifiques ont travaillé sur la recherche et le développement de ce type d'énergie. Les principales raisons de ces activités peuvent s'expliquer par des facteurs tels que le réchauffement climatique, l'augmentation des prix des vecteurs énergétiques et la baisse des réserves de combustibles fossiles. Les chercheurs constatent que la pollution résultant de la production et de l'utilisation de combustibles fossiles est la principale raison du réchauffement climatique [2]. Les autres effets destructeurs des combustibles fossiles comprennent les pluies acides et les effets de serre.

Le soleil est la source d'énergie la plus abondante et la plus disponible pour la terre. La plupart des types d'énergie, y compris l'énergie éolienne, les combustibles fossiles, la biomasse...etc., proviennent du soleil. L'énergie solaire à un taux de 120 PW (chaque péta watt équivaut à  $10^{15}$  watts) brille à la surface de la terre, ce qui signifie que l'énergie reçue du soleil en une journée peut répondre aux besoins du monde pendant 20 ans [3]. D'après, la figure 1 (**Annexe 1**), le potentiel de chaque type de source d'énergie renouvelable est calculé sur la base de la technologie actuelle [4].

Selon la figure 2 (**Annexe 1**), plus de 79.9% de la consommation d'énergie mondiale en 2018 provient directement de combustibles fossiles, où elle fournit également environ 2,2% d'énergie nucléaire et 17.9% d'énergies renouvelables. Avec le besoin croissant d'énergie et la limitation des ressources en combustibles fossiles, les êtres humains sont plus conscients de l'importance des énergies renouvelables [5].

Avec les progrès ultérieurs, le potentiel de consommation de chaque source d'énergie renouvelable est augmenté. Par ailleurs, les besoins mondiaux entraînent une augmentation annuelle de 5% dans le secteur de l'énergie [3]. Cependant, l'énergie solaire peut répondre aux besoins croissants et continus du monde.

Il ne fait aucun doute que dans un proche avenir, la production d'énergie électrique à partir d'énergies renouvelables peut être l'une des méthodes les plus importantes et les plus fondamentales. La centrale à cheminée solaire (CCS) est une technologie relativement nouvelle pour la production d'électricité à partir du rayonnement solaire. La CCS est une centrale thermique la plus simple, qui peut convertir l'énergie solaire en énergie thermique dans le collecteur et la transformer en énergie mécanique dans une turbine. L'énergie radiante reçue du collecteur est convertie en énergie thermique où elle est responsable d'échauffement de l'air circule à travers le collecteur et la cheminée. L'air circule à travers l'éolienne située dans la partie supérieure de la cheminée où la turbine sera mise en rotation et ainsi générer de l'énergie électrique à partir du générateur [6].

La technologie des cheminées solaires est l'une des techniques de récupération et de production de l'énergie solaire où elle absorbe le rayonnement solaire diffusé directement et dispersé, aussi bien, une partie de cette énergie est convertie en énergie électrique et réduit l'effet de serre [7].

Une cheminée solaire ou une tour d'énergie solaire est une méthode pour produire l'électricité en appliquant trois dispositifs de base :

1. **Collecteur:** C'est un capteur solaire contient un plafond transparent et recouvre l'air circule chauffé par l'énergie radiante du soleil.
2. **Cheminée ou Tour:** C'est un long cylindre situé au centre du collecteur solaire et fait circuler l'air chaud sous le couvercle en verre du collecteur à travers la cheminée.
3. **Turbine:** une ou plusieurs turbines sont placées; servent à convertir le courant d'air ascendant en énergie mécanique, puis électrique.

Le Sud Algérien présente un gisement solaire important, ce qui permet de donner une contribution dans l'installation d'une cheminée solaire dans notre région, car cette technologie est appropriée pour être appliquée dans les zones chaudes, sèches ou désertiques, dont l'intensité moyenne de la lumière solaire est élevée [8]. Le développement de l'énergie solaire dans le Sud Algérien s'avère plus qu'une nécessité surtout dans ces moments de transitions. Pas mal de pays même ceux qui ne disposent pas de ce potentiel énergétique sont investis dans ces domaines de recherches, car la sécurité énergétique est mise en jeu.

Le présent travail rentre dans le cadre de la mise en valeur des énergies renouvelables spécifiquement le cas de l'énergie solaire au Sud Algérien ainsi les applications et les perspectives de cette alternative. Comme nous pouvons le comprendre à travers l'intitulé de notre sujet «**Cheminée solaire applications et perspectives cas du Sud Algérien**», l'énergie solaire est au centre de notre étude.

La CCS à échelle pilote est construit dans la zone du campus de l'Université d'Ouargla au niveau du laboratoire de génie des procédés (LGP), qui est située dans le sud de l'Algérie où les taux d'irradiation solaire sont caractérisés comme étant élevés.

L'objectif de cette étude est de comprendre le fonctionnement de la centrale à cheminée solaire (CCS), et aussi, d'étudier expérimentalement l'influence des conditions climatiques notamment le rayonnement solaire et la température ambiante et des paramètres géométriques sur l'efficacité de production de la cheminée solaire. En plus, à l'influence du système d'hybridation sur les performances de la cheminée et sur la durée de fonctionnement après le coucher de soleil en utilisant de l'énergie géothermale nommée par l'ALBIEN. Ce dernier peut servir pour maintenir élevée la température du collecteur pendant la nuit, il est en abondance dans la région d'Ouargla et se caractérise par une température qui peut atteindre 80 °C.

Le présent travail s'articule donc autour des points suivants :

- ❖ Une introduction générale précède les six chapitres constituant ce manuscrit.
- ❖ Le premier chapitre est consacré à une présentation du cadre général de l'étude à travers une synthèse bibliographique détaillée sur les énergies renouvelables où le potentiel des énergies renouvelables en Algérie est mis en évidence.
- ❖ Dans le deuxième chapitre, nous avons exposé une synthèse bibliographique sur les travaux effectués dans le domaine des cheminées solaires. Ce chapitre regroupe aussi une présentation des différentes tours solaires à travers le monde.
- ❖ Dans le troisième chapitre, une rétrospective sur les moyens de domestication de l'énergie solaire à savoir la cheminée solaire. Ainsi que le principe et le mode de fonctionnement d'une cheminée solaire.
- ❖ Le quatrième chapitre contient quelques généralités et des notions de base relatives aux phénomènes de transfert de chaleur.
- ❖ Le cinquième chapitre, s'intéresse à la description détaillée du protocole expérimental à travers les phases de conception du prototype de la cheminée solaire, le suivi et les différentes mesures des paramètres considérés dans le cadre de cette étude.
- ❖ Le sixième chapitre montre les résultats obtenus accompagnés de discussions sur l'évolution des paramètres étudiés ceux ayant trait au rendement de la cheminée solaire.

Cette étude s'achève par une conclusion générale suivie par une exposition des perspectives pour une continuité probable de ce travail.

# Partie théorique

Chapitre I :  
Ressources énergétiques  
renouvelables et leurs  
systèmes de production  
d'électricité

### I.1. Introduction

Une source d'énergie telle que l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, et généralement de la biomasse humide ou sèche est renouvelable si le fait qu'elle soit consommée ne limite pas son utilisation dans le futur à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Par contre, les combustibles fossiles et nucléaires ne sont pas considérés comme renouvelables.

Depuis les années 70, les chocs pétroliers successifs démontrent les risques économiques et géopolitiques de la production d'énergie reposant sur l'exploitation des ressources fossiles, dont les réserves sont mal réparties et épuisables. Par ailleurs, la solution proposée concerne la promotion de l'énergie nucléaire émergente. Cependant, si l'option électronucléaire a suscité après son lancement de grands espoirs, la réalité s'est révélée beaucoup moins rose. Une bonne partie des pays industrialisés utilisant cette technologie ont décidé l'arrêt définitif de la construction des centrales nucléaires [9].

De plus, une grande partie du monde ne sera sans doute jamais raccordée aux réseaux électriques conventionnels dont l'extension s'avère trop coûteuse pour les territoires isolés, peu peuplés ou difficiles d'accès.

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateau à voile sont largement contribués au développement de l'humanité. Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres [10]

- elles sont généralement moins perturbatrices de l'environnement, elles n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets;
- elles sont inépuisables;
- elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux;
- elles offrent une importante indépendance énergétique.

Ces énergies renouvelables sont présentées, ainsi que leurs modes de productions énergétiques dans les paragraphes suivants.

### I.2. Energie solaire

Le soleil envoie de l'énergie sous forme de rayonnement sur environ 150 millions de kilomètres d'espace car son spectre est principalement divisé entre des longueurs d'onde de 0.3  $\mu\text{m}$  et 0.4  $\mu\text{m}$ .

L'atmosphère terrestre perturbe cette répartition spectrale, modifie l'intensité du rayonnement solaire incident qui est réfléchi, diffusé et absorbé par les gaz, les aérosols et les nuages. Dans les conditions les plus favorables, cette puissance rayonnée atteint environ 1000 Watts par mètre carré au sol [11].

Pour répondre aux besoins, exige la mise au point des filières techniques de conversion de l'énergie solaire ainsi que des machines adaptées. Les capteurs à effet de serre, permettent le chauffage des piscines, de l'eau sanitaire et des locaux, et alimentent en chaleur les séchoirs, les distillateurs et les machines frigorifiques.

Les collecteurs solaires à concentration permettent d'atteindre des températures élevées de l'ordre de 350 °C, et d'une manière plus complexe quelques milliers de degrés. Ils alimentent généralement des installations agro-alimentaires, des usines de dessalement et des centrales thermiques solaires de production d'électricité.

Enfin les modules photovoltaïques convertissent directement, l'énergie solaire en électricité. Les applications sont multiples : radio, téléphone, télévision, éclairage, pompage, irrigation, réfrigération, force motrice, et couvre une vaste gamme de puissance allant de quelques watts à plusieurs mégawatts [12].

### **I.2.1. Soleil**

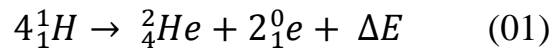
Le soleil est une étoile autour de laquelle gravite la terre. Son énergie provient des réactions thermonucléaires de fusion de l'hydrogène en hélium. Sa température superficielle moyenne est estimée à 5800 °K. La surface lumineuse habituellement visible, ou photosphère, est d'environ 100 km d'épaisseur. La chromosphère est la couche inférieure de l'atmosphère solaire, entre la photosphère et la couronne. Les taches solaires sont des taches sombres sur la surface de la photosphère qui correspondent à des zones plus froides, elles ont une très grande diversité de forme et d'étendue. Les observateurs comme Galilée, ont vu que les taches se déplaçaient au fil du temps, toujours dans le même sens, ainsi montrant la rotation du soleil. Le globe solaire limité par la photosphère à un rayon égal à 696000 km, soit environ 109 fois le rayon équatorial de la terre. Sa densité moyenne n'est que de 1,41 de sorte que sa masse est seulement 333.000 fois celle de la terre, pour un volume 1300000 fois plus important. La distance moyenne de la terre au soleil est voisine de 150 millions de km. Le rayonnement solaire met environ 8 minutes pour nous parvenir [13].

### **I.2.2. Origine de l'énergie solaire**

Le soleil tire son énergie des réactions thermonucléaires se produisant en permanence dans son noyau, dont la température atteint 15 millions de degrés. Compte tenu des températures et des

pressions énormes qui y règnent, toute la matière se trouve à l'état gazeux ou sous forme de plasma. La couche externe du soleil, la photosphère, celle qui est visible de la terre, a une température considérablement plus faible qui décroît vers l'extérieur, jusqu'à environ 5800 °K.

Les réactions thermonucléaires qui se produisent dans le noyau du soleil transforment chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium selon l'équation suivante :



L'hydrogène, qui représente 71% de la masse de la photosphère, n'est plus présent à 34% dans la partie centrale du Soleil, en raison de cette transformation permanente amorcée il y a 4.5 milliards d'années. Et les 4 millions de tonnes manquantes volatilisées désintégrées dans de gigantesques explosions nucléaires, Le processus mis en jeu est bien compris depuis la célèbre relation d'Albert Einstein ( $E = mc^2$ ) qui montre que toute disparition de masse ( $m$ ) entraîne une production d'énergie égale au produit de cette masse par le carré de la vitesse de la lumière. La perte de masse du soleil par unité de temps vaut  $4,28.10^9$  kg/s ; et l'énergie émise par seconde par le soleil est donc d'environ  $3,85.10^{20}$  MW. Sur le plan énergétique un réacteur de centrale nucléaire produit typiquement 1000 MW. Le Soleil fournit donc une puissance équivalente à celle de  $4.10^{17}$  réacteurs nucléaires, un chiffre véritablement astronomique. Cependant, seule une petite partie de cette puissance est reçue par la terre du fait du faible angle solide sous lequel est vue notre planète à partir du soleil, environ deux milliards de fois moins, ce qui donne un chiffre qui reste fort respectable (environ  $1,9.10^{11}$  MW). Le système terre atmosphère réfléchit environ 30 % de l'énergie solaire interceptée et absorbe les 70 % restants qui sont presque intégralement transformés en chaleur [13].

### I.2.3. Les différentes composantes du rayonnement solaire

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol on distingue plusieurs composantes [14]:

- **Rayonnement solaire direct** : C'est le rayonnement reçu directement du soleil, sans diffusion.
- **Rayonnement diffus** : Il est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols).
- **Albédo** : C'est la partie réfléchi par le sol. Il est déterminé à l'aide d'un appareil albedomètre et dépend de l'environnement du site.
- **Rayonnement solaire global** : C'est la somme des différents rayonnements, on le mesure avec un pyranomètre.
- **Durée d'insolation** : C'est le temps pendant lequel le rayonnement solaire direct est supérieur à un seuil de  $120\text{W/m}^2$  ; elle est exprimée en dixième d'heure.

### I.2.4. Spectre solaire

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde  $\lambda$  :

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800 K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom d'AM0. Sa distribution en énergie est répartie en [14] :

- Ultraviolet UV  $0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$  6.4%
- Visible  $0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$  48.0%
- Infrarouge IR  $0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$  45.6%

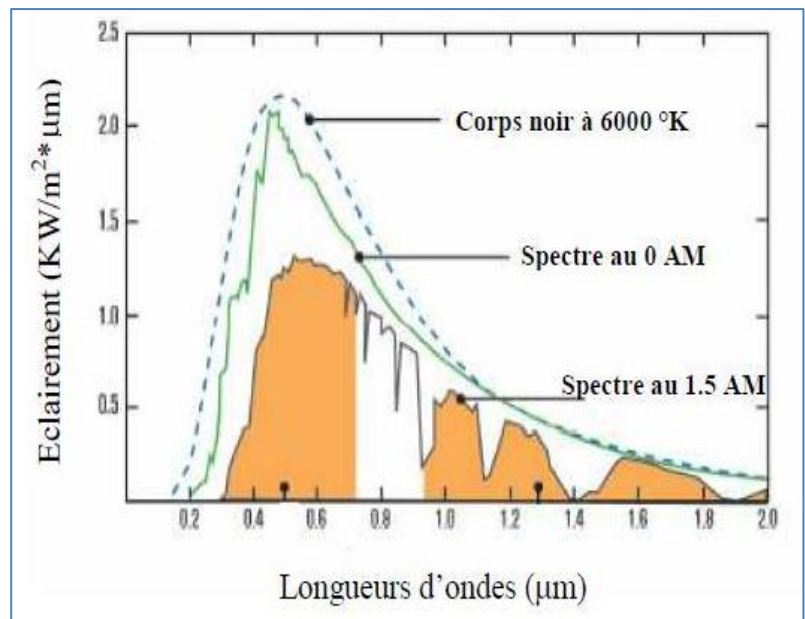


Fig. (I.1): Spectre solaire hors atmosphère.

### I.2.5. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire

➤ **Les avantages :**

- L'énergie solaire est inépuisable et non polluante.
- L'énergie est propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre.
- L'énergie solaire thermique permet d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage.
- L'installation des panneaux solaires thermiques permet de réaliser des économies conséquentes.
- Les frais de maintenance et de fonctionnement d'une installation thermique sont relativement faibles.

➤ **Les inconvénients :**

- Le cout d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé.
- L'énergie solaire est une énergie intermittente. Il faut donc un système de chauffage d'appoint.
- La production d'énergie solaire n'est possible que lorsqu'il y a du soleil.
- Il faut pouvoir stocker la chaleur dans des ballons des dalles chauffantes.
- Les panneaux solaires contiennent des déchets toxiques : cuivre et chrome.

## I.2.6. Captation de rayonnement solaire

L'énergie solaire est composée de deux très importantes sources pour produire l'électricité quand on peut utiliser les énergies photoniques ou bien les énergies thermiques :

### I.2.6.1. Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la transformation directe d'une partie de rayonnement ou de lumière de soleil en énergie électrique, grâce à des cellules solaires.



**Fig. (I.2) :** Panneaux solaires photovoltaïques

Le mot 'photovoltaïque' vient du grec 'photo' qui signifie lumière et de 'voltaïque' qui tire son origine du nom d'un physicien italien Volta qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité. L'effet photovoltaïque, est découvert par Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique.

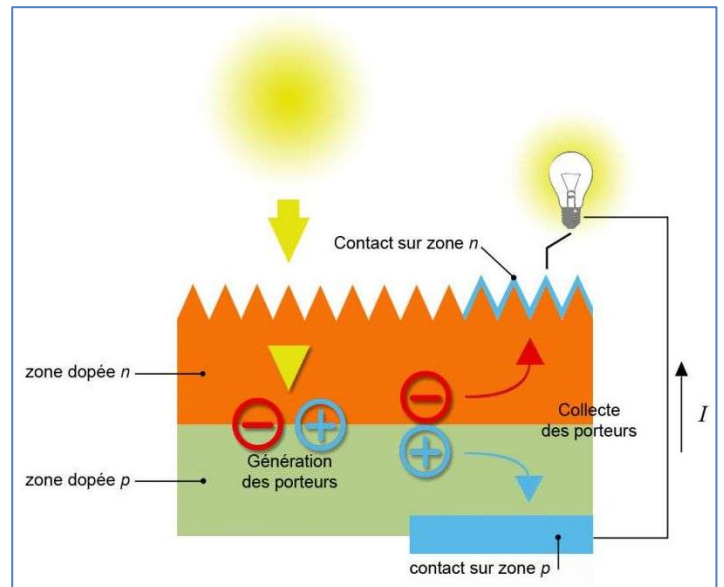
L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante dans le domaine spatial. Les recherches d'après-guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille, mais il faudra attendre la crise énergétique des années soixante-dix pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres [15].

#### I.2.6.1.1. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les cellules solaires permettent de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type **n** et dopée de type **p**. Lorsque la première est mise en contact avec la deuxième, les électrons en excès dans le matériau **n** diffusent dans le matériau **p**.

La zone initialement dopée **n** devient chargée positivement, et la zone initialement dopée **p** chargée négativement.

Un champ électrique est créé entre elles qui tend à repousser les électrons dans la zone **n** et les trous vers la zone **p**. Une jonction (dite p-n) est formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones **n** et **p**, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction.



**Fig. (I.3) :** Principe de la conversion photovoltaïque

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone **n** rejoignent les trous de la zone **p** via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiels: le courant électrique circule [14].

#### I.2.6.1.2. Type de cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules photovoltaïques, les plus répandues sont constituées de semi-conducteur, principalement à base de Silicium [15]. On trouve trois principaux types de cellules :

- **Cellules monocristallines** : sont les premières générations de photopiles, elles ont un excellent rendement ainsi une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère.
- **Cellules polycristallines** : sont caractérisés par un rendement élevé et un coût de production moins élevé ainsi un procédé nécessitant moins d'énergie.
- **Cellules amorphes** : possèdent un rendement faible et un coût de production plus bas ainsi une durée de vie plus faible,

Forte de cette progression, la profession du photovoltaïque investit beaucoup en recherche et développement sur l'amélioration des technologies actuelles et l'avènement de nouvelles alternatives. L'électricité d'origine photovoltaïque coûte cher actuellement, par rapport à l'électricité fournie sur le réseau. Toutefois, il s'agit d'une source d'électricité extrêmement précieuse pour les endroits éloignés des réseaux électriques, notamment dans les pays en développement où l'électrification complète n'est pas encore terminée [16].

### I.2.6.2. Energie solaire thermique

A la différence du solaire photovoltaïque, on désigne par énergie solaire thermique la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. La production de cette énergie peut être soit utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir une énergie électrique). Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Le solaire thermique se décline de différentes façons :

- En usage direct de la chaleur : chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire.
- En usage indirect où la chaleur sert pour un autre usage : l'énergie solaire thermodynamique utilise le solaire thermique pour produire de l'électricité selon le même principe qu'une centrale électrique classique mais en utilisant des centrales hélios thermoélectriques

#### I.2.6.2.1. Collecteurs cylindro-paraboliques

Ce type de centrale se compose d'alignements parallèles de longs miroirs hémicylindriques, qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Les rayons solaires sont concentrés sur un tube horizontal dans lequel circule un fluide caloporteur (généralement une huile synthétique). Les tuyaux étant noirs, ils absorbent toute la chaleur du soleil et permettent à la température du fluide de monter jusqu'à 500 °C.

La chaleur récupérée produit de la vapeur grâce à un échangeur de vapeur qui alimente la turbine et produit de l'électricité ; Certaines centrales sont désormais capables de produire de l'électricité en continu, nuit et jour, grâce à un système de stockage de la



**Fig. (I.4) :** Collecteurs cylindro-paraboliques

chaleur. Si ce n'est pas le cas, une partie annexe de la centrale prend le relais et produit de l'électricité en brûlant des carburants traditionnels (gaz, charbon...) une fois le soleil couché [17].

#### I.2.6.2.2. Centrales solaires à tour

Le principe des centrales à tour est basé sur des héliostats au sol réfléchissent les rayons du soleil vers une chaudière en haut d'une tour où un liquide (généralement du sel fondu) est chauffé jusqu'à 2000°C. Ce liquide porte ensuite à ébullition de l'eau dont la vapeur actionne des turbines et produit de l'électricité [18].

Dans le monde, plusieurs dizaines de centrales à tour sont dénombrés aujourd'hui, et c'est pour le moment la manière la plus répandue de produire de l'électricité grâce au solaire thermique.



**Fig. (I.5) :** Centrale solaire à tour

### I.2.6.2.3. Collecteurs paraboliques

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils sont constitués d'une grande parabole de révolution réfléchissante et d'un moteur « Stirling » au foyer de la parabole. Le tout pivote sur 2 axes pour suivre le déplacement du soleil afin de concentrer son rayonnement sur le foyer de la parabole réfléchissante. Le rapport de concentration est généralement d'environ 4000 et la température obtenue compris entre 500 et 1000°C.

La chaleur du soleil fait travailler un fluide comprimé afin de générer de l'électricité. Chaque capteur est en fait une mini-centrale, qui produit de l'électricité de manière autonome ; l'association de plusieurs collecteurs paraboliques permet d'augmenter la puissance finale qui est de 15kW dans la plupart des cas.

Il existe de nombreuses centrales de ce type à travers le monde, mais on trouve rarement le même type de parabole d'une centrale à l'autre (comme en témoignent les 2 photographies ci-dessus) nous sommes encore donc à la phase d'expérimentation, mais nous avons déjà constaté que cette technologie ne l'est probablement pas la plus rentable [19].



**Fig. (I.6) :** Quelques Différents types de collecteurs paraboliques

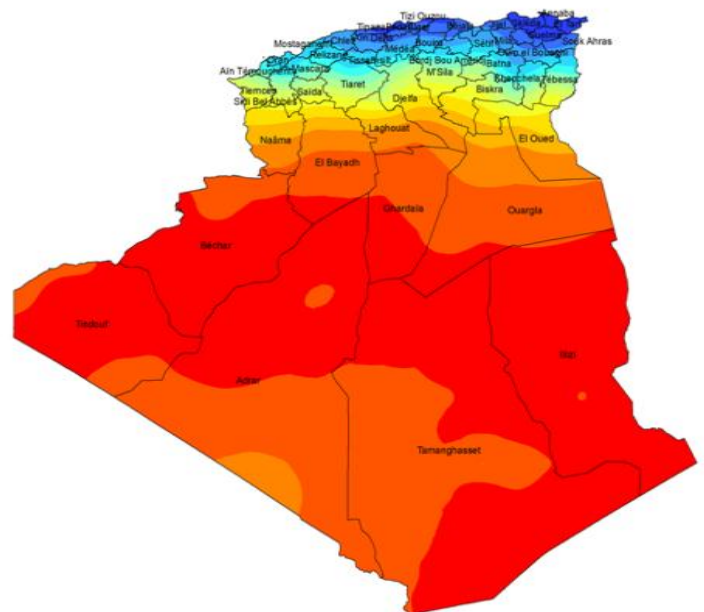
### I.2.7. Potentiel de l'énergie solaire

Par sa situation géographique, les pays possèdent un potentiel très important en énergie solaire. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

**Tableau (I.1) : Potentiel Solaire en Algérie**

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée Moyenne d'Ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie Moyenne Reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5kWh sur la partie majeure du territoire national, soit près de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263 kWh/m<sup>2</sup>/an au Sud du pays. Ce qui correspond à une capacité électrique 8 fois supérieur aux réserves de gaz naturel du pays, et au plus grand champ solaire du monde [20].



**Fig. (I.7) : Carte d'irradiations solaires [20].**

D'une manière globale, l'Algérie dispose un potentiel énergétique solaire d'environ 169 900 TWh/an, soit 3900 fois sa consommation actuelle en électricité pour le CSP et 13.9TWh/an pour le PV. Le gisement solaire constitue, sans aucun doute, le gisement d'avenir pour l'Algérie. La disponibilité de grands espaces au Sahara et dans la steppe et une forte intensité solaire (2200 kW/m<sup>2</sup>/an) représentent des atouts majeurs pour produire une énergie renouvelable, propre et durable en Algérie [20].

### I.3. Energie géothermique

Le principe de la géothermie est de récupérer la chaleur présente dans les sols. L'eau réchauffée au contact des roches du sous-sol est le moyen utilisé pour véhiculer et remonter à la surface cette chaleur.

Il faut bien comprendre que la chaleur qui est recherchée pas l'eau. Tout cela en veillant à protéger l'environnement, à reconstituer le réservoir et à réduire les problèmes de corrosion dû à la salinité.

Les ressources géothermiques sont utilisées dans une gamme de températures allant de 15 à plus de 250 °C. Cette diversité permet de nombreuses applications, telles que le chauffage de locaux à basse température jusqu'à la conversion en électricité, en passant par la pisciculture, le chauffage des serres ou encore le séchage de produits industriels. L'état actuel des techniques ne permet pas la récupération de la chaleur dans tous les types de terrain ; seules les structures géologiques contenant de l'eau sont exploitables, car l'énergie géothermique peut être remontée à la surface par pompage de cette eau [21].

Les possibilités d'utilisation de l'énergie géothermique dépendent du niveau de température de l'eau.

On distingue 3 types d'énergie géothermie :

- **La géothermie à haute énergies :** La haute température des eaux et de la vapeur d'eau très chaud dans le sous-sol terrestre est entre 80 °C et 300 °C, elle permet de produire l'électricité.
- **La géothermie à basse énergie :** La géothermie de l'eau comprise entre 30 °C et 100 °C, cette technologie est utilisée principalement pour le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur.
- **La géothermie à très basse énergie :** elle est utilisée dans de petites installations, qui peut être mise en place au niveau d'un quartier ou d'une maison isolée, sa température est comprise entre 10 °C et 30 °C.

**Tableau (I.2) :** Les avantages et les inconvénients de l'énergie géothermiques

Les avantages	Les inconvénients
- L'énergie géothermique n'est pas couteuse et pas polluante. - La pompe est réversible, elle peut aussi produire du froid. - Un système est sans odeur.	- Les difficultés de transport. - Son utilisation doit se faire sur place. - Les risques de tremblement de terre.

### I.3.1.Potentiel de l'énergie géothermique

La compilation des données géologiques, géochimiques et géophysique a permis de tracer une carte géothermique préliminaire. Plus de deux cent (200) sources chaudes sont inventoriées dans la partie Nord du Pays. Un tiers environ 33% d'entre elles ont des températures supérieures à 45 °C

Il existe des sources à hautes températures pouvant atteindre 118 °C à Biskra. Des études sur le gradient thermique ont permis d'identifier trois zones dont le gradient dépasse les 5°C/100m :

- ✓ **Zone de Relizane et Mascara**
- ✓ **Zone d'Aïn Boucif et Sidi Aïssa**
- ✓ **Zone de Guelma et Djebel El Onk**

Le potentiel total de l'énergie géothermique en termes d'électricité est estimé à 700MW [22].

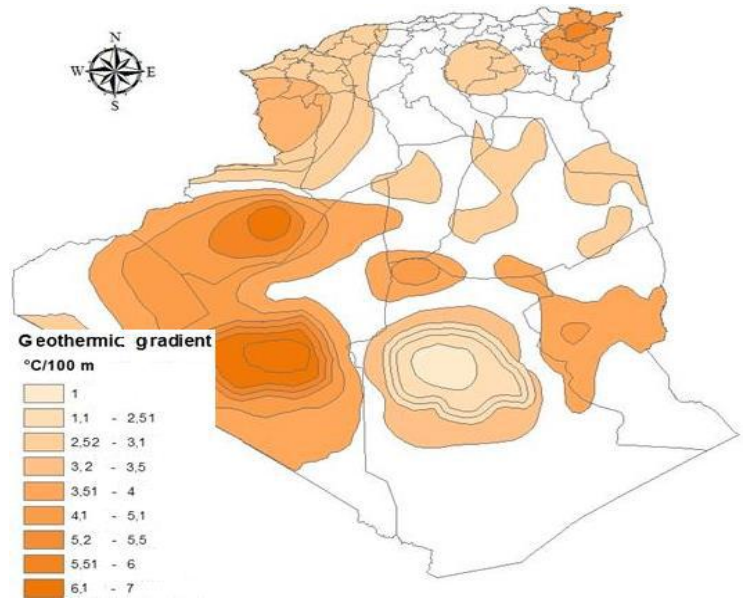


Fig. (I.8) : Carte des ressources géothermiques.

#### I.4. Energie éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie obtenue à partir la force du vent, elle est destinée à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Une source d'énergie renouvelable, inépuisable et gratuite.

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Ensuite cette énergie est ensuite transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'une machine électrique. Les termes « parc éolien » ou « ferme éolienne » sont utilisés pour décrire les unités de production groupées, installées à terre « on shore » ou dans la mer « offshore ». Les coûts d'investissement sont relativement élevés, surtout pour le «offshore », mais l'énergie primaire est gratuite et l'impact environnemental est petit. Dans certaines régions, les éoliennes posent quand même quelques problèmes, liés au bruit de basse fréquence, désagréable pour les personnes qui habitent à côté et les impacts avec les troupeaux sur les oiseaux [23].

##### I.4.1. Principe de fonctionnement

Un système éolien fait la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique selon les étapes suivantes :

- ❖ La transformation d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique au niveau de la turbine ;
- ❖ Une génératrice électrique, qui fait la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.
- ❖ Un système d'orientations pour orienter la nacelle face au vent.
- ❖ Un système électrique, pour gérer la connexion au réseau et la marche de l'éolienne.

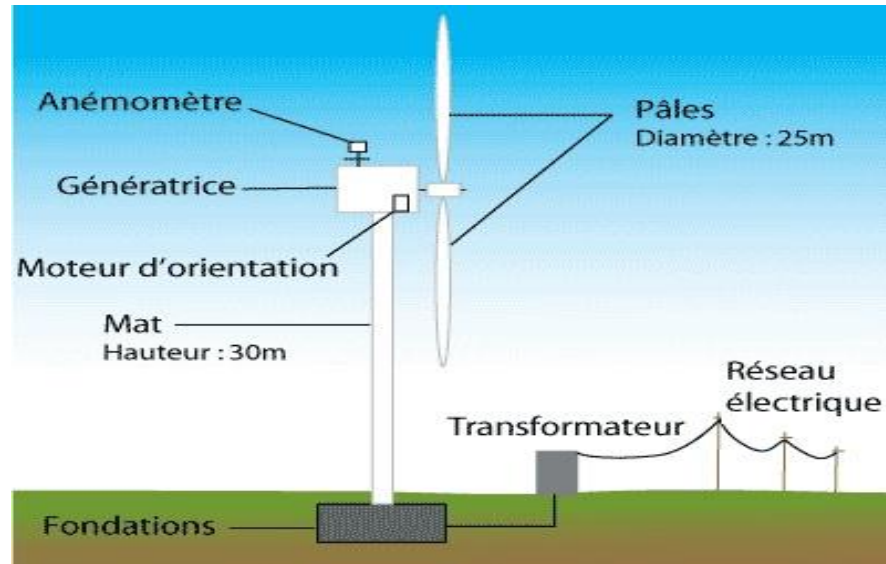


Fig. (I.9) : Schéma d'une éolienne.

#### I.4.2. Différents types d'éoliennes

Les éoliennes peuvent être classées selon deux catégories : celles à axe vertical et celles à axe horizontal :

##### I.4.2.1. Les éoliennes à axe vertical

Cette technologie d'éoliennes est bien adaptée aux zones de vents perturbés par des habitations et le relief de la végétation. Elles peuvent aisément s'intégrer à l'architecture des bâtiments et sont d'une conception très simple (roue montée sur un axe qui entraîne directement une génératrice). Le principe aérodynamique permet de bons rendements pour des vitesses de vent faible, une autorégulation en vitesse pour les vents forts et un niveau sonore très faible voir inaudible. Par contre, elles ne conviennent pas pour la conversion de grandes puissances. Suite aux recommandations récentes en matière de production de l'énergie électrique par des sources renouvelables, ces structures connaissent un fort regain d'intérêt depuis une dizaine d'années pour des applications, à petite et moyenne puissances, en milieu urbain [24].



Fig. (I.10) : Eoliennes à axe vertical

### I.4.2.2. Les éoliennes à axe horizontal

Les turbines à axe horizontal sont de loin les plus utilisées. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois ou plusieurs pales.

Toutefois, les structures les plus courantes sont à trois pales. Une éolienne à axe horizontal est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pales sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion. Par conséquent, ce type de turbines doit toujours être orienté face au vent. Par comparaison à la turbine à axe vertical, pour la même vitesse de vent, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie grâce à un meilleur coefficient de puissance. Par ailleurs, elles ont un coût moindre et une efficacité accrue due à leur position à plusieurs dizaines de mètres du sol [24].



Fig. (I.11) : Eoliennes à axe horizontal

Tableau (I.3) : Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne

Les avantages	les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le vent est disponible partout.</li> <li>- Soutien des extrémités de réseau.</li> <li>- La production est décentralisée.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Production intermittente.</li> <li>- Le bruit pour certaines machines mal conçues.</li> <li>- Le coût, nécessitant des aides financières.</li> </ul>

### I.4.3. Potentiel éolien

L'Algérie a un régime de vent modéré et une étude de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie.

La figure (I.12) montre que le sud du pays est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s. Elle dépasse même la valeur de 6 m/s sans atteindre 7 m/s dans la région d'Adrar et se situe entre 5 m/s et 6 m/s

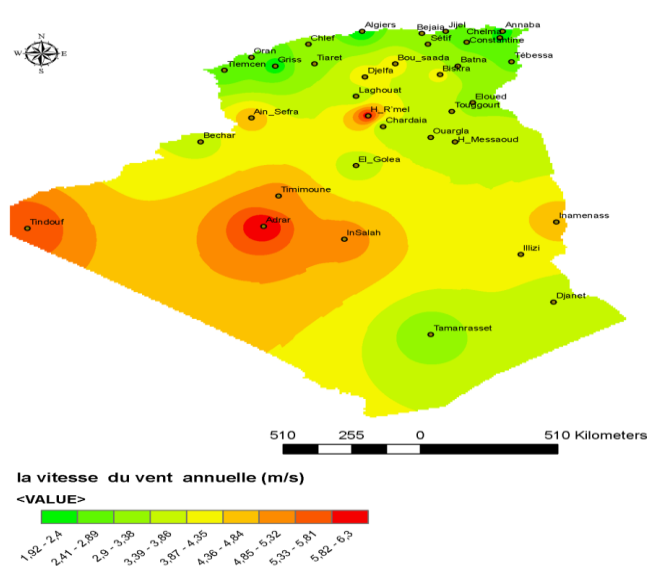


Fig. (I.12) : Carte de la vitesse du vent.

pour la région de Tindouf, et entre 4 et 5 m/s dans la chaîne passant par Bechar, Timimoun, In Salah et Tamanrasset et à Biskra. Elle peut atteindre de 4 m/s à Alger, Ghardaïa et Hassi Messaoud [25].

### I.5. Energie hydraulique

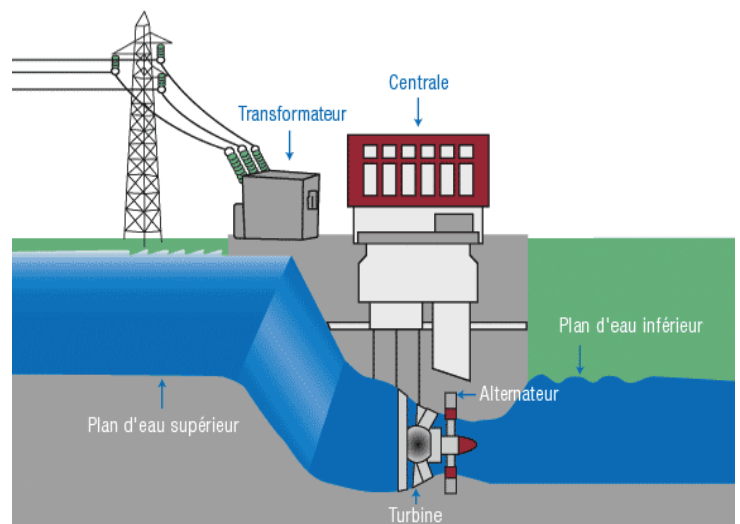
L'énergie hydraulique est utilisée aujourd'hui depuis environ 3000 ans, en plus de l'énergie mécanique et électrique. Cette électricité " houille blanche " participe grandement au développement énergétique propre. C'est une énergie solaire et renouvelable, car le soleil est à l'origine du cycle de l'eau, dont est issue l'énergie hydraulique [26].

#### I.5.1.Principe de fonctionnement

L'énergie d'un cours d'eau ou d'une chute d'eau fait tourner une petite turbine (une hélice) qui crée de l'énergie mécanique, convertie par un alternateur en électricité.

La puissance et l'énergie produite dépendent du débit et de la hauteur de chute. Le cours d'eau doit donc garder un débit minimum quelle que soit la saison pour assurer une production d'électricité même en période d'étiage.

Dans la majorité des cas, une partie du cours d'eau est dérivée par un canal d'amenée pour obliger l'eau à passer dans la turbine. Si le débit est trop faible, il est possible de stocker l'eau dans un réservoir tampon et d'ouvrir les vannes du canal d'amenée quelques heures par jour. La production d'électricité peut être donc continue ou discontinue en fonction des ressources hydrauliques [27].



**Fig. (I.13) :** Principe de fonctionnement de l'énergie hydraulique.

#### I.5.2. Les types de l'énergie hydraulique

- **Énergie des vagues :** utilise la puissance du mouvement des vagues,
- **Énergie marémotrice :** issue du mouvement de l'eau créé par les marées (variations du niveau de la mer, courants de marée),
- **Énergie hydrolienne :** les hydroliennes utilisent les courants sous-marins,
- **Énergie thermique des mers :** produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans,
- **Énergie osmotique :** la diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau salée de la mer est source d'énergie.

**Tableau (I.4) :** Les avantages et les inconvénients de l'énergie hydrauliques

Les avantages	les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas de pollution.</li> <li>- Production décentralisée d'électricité.</li> <li>- Démarrage des centrales. arrêt très rapides</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Changement du débit et du niveau de l'eau</li> <li>- Perturbation de l'écosystème.</li> <li>- Danger pour les gens en aval au barrage.</li> </ul>

### I.5.3.Potentiel de l'hydroélectricité

Les quantités globales tombant sur le territoire algérien sont importantes et estimées à 65 milliards de m<sup>3</sup>, mais finalement profitent peu au pays : nombre réduit de jours de précipitation, concentration sur des espaces limités, forte évaporation, évacuation rapide vers la mer.

Schématiquement, les ressources de surface décroissent du nord au sud. On évalue actuellement les ressources utiles et renouvelables de l'ordre de 25 milliards de m<sup>3</sup>, dont environ 2/3 pour les ressources en surface. 103 sites de barrages sont recensés. Plus de 50 barrages sont actuellement en exploitation [28].

Le niveau de production des centrales hydroélectriques reste «insignifiant», en contribuant très peu au bilan énergétique de l'Algérie, précisant que la production de la filière hydraulique ne représente que 389,4 GWh des 28950 GWh produits par SPE, la filiale de production d'électricité de SONELGAZ, tandis que l'essentiel de la production électrique, soit 28560 GWh, est assurée par le gaz [29].

### I.6. Energie de la biomasse

La biomasse, qui est un énorme réservoir d'énergie, contient diverses matières premières organiques d'origine végétale : cultures spécifiques, et valorisation des déchets agricoles, industriels ou ménagers. C'est une puissance stockable et non oscillante, mais elle présente de nombreux avantages.

Face à la menace de l'effet de serre, l'utilisation de la biomasse a un rôle neutre : exploités à des fins énergétiques, les végétaux restituent le carbone stocké durant leur croissance.

La valorisation énergétique de la biomasse conduit à trois principaux produits, en fonction du type de biomasse et des techniques mises en œuvre. Les trois produits énergétiques utiles de la biomasse sont la chaleur, l'électricité (ou les deux combinées en cas de cogénération) ainsi que le transport (les biocarburants). Ces produits présentent des caractéristiques physiques très variées : solide (paille, copeaux, bûches), liquide (huiles végétales, bio alcool), gazeux (biogaz) [30].

### I. 6.1. Procédés de conversion de la biomasse en énergie

La voie utilisée pour la production de l'énergie est la voie sèche utilisant la biomasse solide. Elle est principalement constituée par la filière thermochimique, qui regroupe les technologies **de la combustion, de la gazéification et de la pyrolyse**.

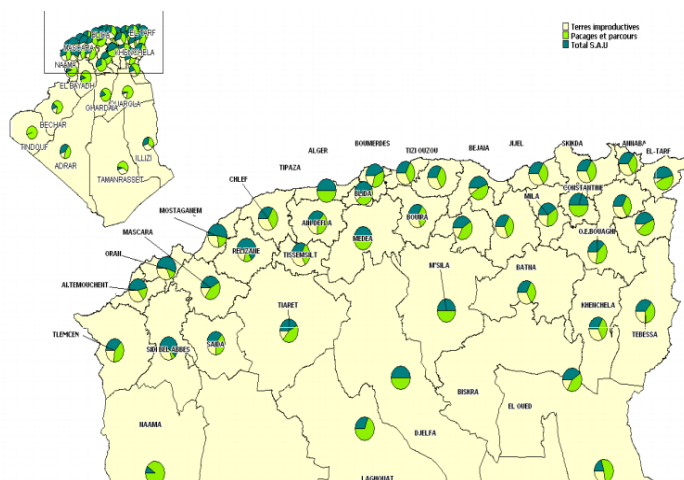
Certaines techniques de la filière thermochimique (combustion, pyrolyse) peuvent également traiter des biomasses humides. Mais ceci se réalise aux dépens de l'efficacité énergétique. Il peut être plus intéressant avec ces biomasses humides - déchets organiques verts très humides, déchets ménagers, effluents d'élevage, d'agro-industrie - de les traiter par voie humide. La principale filière de cette voie est la bio-méthanisation qui produit un gaz riche en méthane et à haute valeur calorifique. Ce biogaz est brûlé en chaudière pour la production de chaleur ou dans un moteur à combustion interne pour la production d'électricité ; il est également possible de combiner chaleur et électricité (cogénération) à partir d'une installation de bio méthanisation [30].

**Tableau (I.5) :** Les avantages et les inconvénients de l'énergie biomasses

Les avantages	les inconvénients
- Une source renouvelable.	- Grande nécessité de l'eau.
- Disponible dans les pays en développement	- Très cher
- Pollution terrestre réduit.	- Potentiel d'infection respiratoire.

### I.6.2.Potentiel de la Biomasse

Le potentiel de la biomasse est relativement limité. La surface boisée couvre environ 250 millions d'hectares et qui représente 10% de la superficie totale du pays ou le Sahara couvre presque 90% du territoire. Les forêts occupent une superficie de l'ordre de 4.2 millions d'hectares représentant ainsi 1.8% de cette surface, alors que les zones alfatières n'occupent que près de 2.5 millions d'hectares, c'est à dire un peu plus de 1% de l'étendue du territoire. Par contre, les terres dites improductives s'étendent sur plus de 188 millions d'hectares représentant 79 % de la superficie totale.



**Fig. (I.14) :** Répartition des terres utilisées par l'agriculture

Le potentiel actuel est évalué à environ 37 MTEP (tonne équivalent pétrole). Le potentiel récupérable est de l'ordre de 3.7 MTEP. Le taux de récupération actuel est de l'ordre de 10 %, cinq millions de tonnes de déchets urbains et agricoles ne sont pas recyclés. Ce potentiel représente un gisement de l'ordre de 1.33 MTEP /an [20].

### **I.7. Conclusion :**

Les énergies renouvelables ont un attrait certain lorsqu'on considère qu'elles peuvent fournir de l'électricité, écologiquement et à bon marché, aux populations isolées, des localités n'ont en effet pas les moyens de se relier à un réseau d'électricité, mais elles peuvent tirer profit des techniques qui ont été mises au point pour domestiquer les sources naturelles d'électricité et de chaleur.

Étant donné que trois milliards de personnes n'ont pas d'électricité, il ne fait aucun doute que les énergies renouvelables peuvent jouer un rôle clé et concourir au développement économique des régions pauvres.

On peut domestiquer l'énergie lumineuse du Soleil pour chauffer l'eau des piscines, des maisons et des usines, chauffer des locaux, produire de l'électricité, distiller de l'eau et cuire des aliments.

On peut exploiter de diverses façons l'énergie solaire stockée dans des matières organiques. Le bois et la tourbe produisent de la chaleur lorsqu'on les brûle, et les céréales de l'éthanol lorsqu'on les fermente.

# Chapitre II :

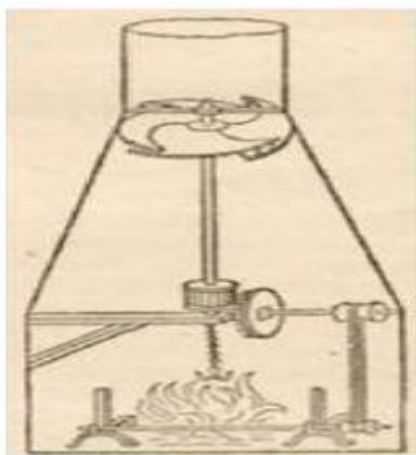
## Revue bibliographique

## II.1. Introduction

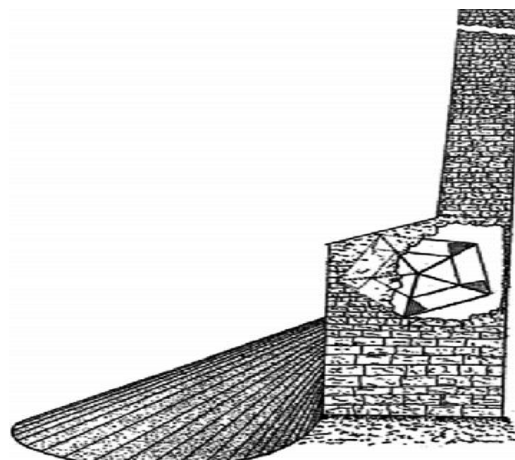
Plusieurs études ont été entreprises sur les cheminées solaires, les auteurs ont essayé de toucher les différents éléments afin d'améliorer les performances, et cela à travers des modifications sur la forme du collecteur, la cheminée et la turbine. Contrairement à d'autres qui ont étudié l'écoulement de l'air et le transfert de chaleur pour comprendre les phénomènes hydrodynamique et thermique impliqués, notamment sur cette base une répartition de la recherche bibliographique a été faite et ci-dessous sera notre thème principal qu'on va développer avec rigueur et minutie.

## II.2. Chronologie de la centrale à cheminée solaire

À ce jour, de nombreux chercheurs à travers le monde ont présenté divers projets de tours solaires. Et le génie Léonardo De Vinci (1452-1519) a été l'un des précurseurs qui a imaginé croquis d'une tour solaire appelée «smoke-jack», comme le montre la **Fig. (II.1)**. Au XVIII (18) siècle Avant l'année 1903, Un certain Isidoro Cabanyes, un ingénieur espagnol a été le premier à proposer l'idée d'utiliser une cheminée solaire pour produire de l'électricité. Et il a fait la présentation d'un appareil se composant d'un chauffage aérien attaché à une maison avec une cheminée. À 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.2)**. [31].



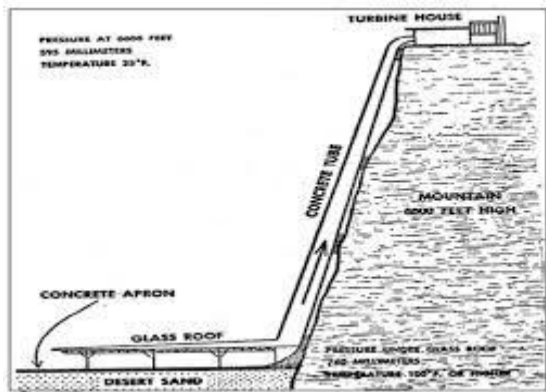
**Fig. (II.1)** : Conception de Léonard de Vinci (1452-1519) [31].



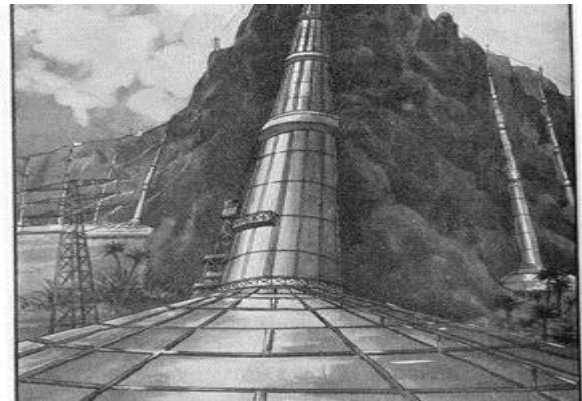
**Fig. (II.2)** : Projet de moteur solaire proposé par Isidoro Cabanyes [31].

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.3**) [31]. L'auteur affirme qu'un air ascendant d'une vitesse de 50 m/s peut être atteint dans la cheminée, dont une quantité énorme d'énergie peut être extraite par des éoliennes. , Et l'une des premières représentations d'une tour solaire a été rédigée en 1931 par un auteur Allemand : Hanns Günther. La Fig.IV.4 montre une représentation futuriste de la cheminée solaire présentée par Günther (1931) [31]. La Fig.II.5 montre une

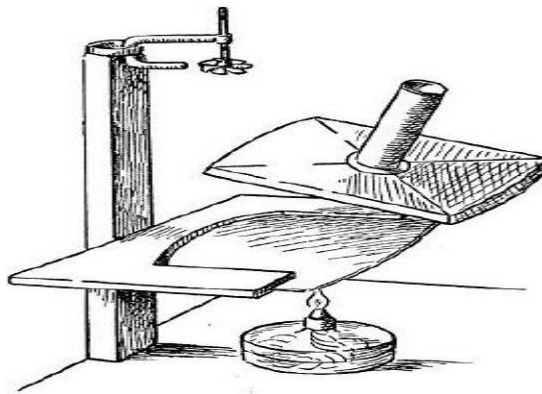
expérience simple proposée par Dubos confirmant son concept, la plaque et la lampe à alcool représentent le désert du Sahara et la chaleur solaire, respectivement. La petite roue éolienne placée sur le dessus représente les turbines. Si la lampe à alcool est placée sous la plaque, l'air chaud circule de façon concentrique à travers la plaque afin d'atteindre le tube. Par conséquent, le flux ascendant pousse la roue éolienne. [32]



**Fig. (II.3) :** La cheminée solaire présentée par Bernard Dubos



**Fig. (II.4) :** Cheminée solaire dans le désert marocain



**Fig. (II.5) :** Proposition d'une cheminée solaire

Entre 1940 et 1960, le français Edgard Nazare, après avoir observé plusieurs tourbillons des able (dust devil) dans le sud saharien, et en avoir mesuré les caractéristiques grâce à son déclinomètre-alidade de poche, imagina un dispositif totalement révolutionnaire : la tour à dépression, aujourd'hui appelée tour à vortex. C'est en 1956 qu'il déposa son premier brevet à Alger. Ce brevet fut redéposé à Paris le 3 août 1964 sous le numéro 1.439.849 (P.V. 983.953). Il s'agissait de générer artificiellement une ascendance atmosphérique tourbillonnaire dans une sorte de tour en forme de tuyère de Laval et d'en récupérer une partie de l'énergie au moyen de turbines.

En 1975 l'ingénieur canadien Louis M. Michaud publia son projet Vortex Power Station dans le bulletin de la Société américaine de météorologie. Il s'agissait également de générer une ascendance atmosphérique tourbillonnaire, mais dans une tour cylindrique. [32]

Face à des concepts originaux, la première action exceptionnelle pour le développement des centrales solaires à effet de cheminée était celle d'ériger un prototype en 1982 à Manzanares, Ciudad Real, à 150km au Sud de Madrid, Espagne. Sous l'impulsion de crédits et de chercheurs allemands. Ce prototype avait une tour de 200 m de haut et un collecteur de 45000 m<sup>2</sup>, et a atteint une production de 44 MWh/an, pour une puissance de pointe de 50 kW (soit un ratio égal à 880 h d'équivalent temps à pleine puissance par an, ce qui ne fait que 10% du nombre d'heures dans une année. On reviendra plus loin sur la faiblesse de ce ratio). L'article en deux parties, "Solar Chimney", donne une bonne idée de ce qu'étaient l'état de la réflexion et les attentes de ses promoteurs au moment de sa construction [33].

### II.3. Etudes analytiques et de simulation

Depuis, de nombreuses études et recherches ont été menées pour développer les performances des centrales à cheminée solaires; et des modèles mathématiques ont été développés pour prédire les performances des centrales à cheminée solaires.

La littérature de cette section peut couvrir les catégories d'études numériques, de simulation, analyse d'exergie, d'analyse CFD, d'analyse dimensionnelle et de faisabilité. Selon ce qui a été fait jusqu'à présent, un résumé des travaux antérieurs est présenté dans le **Tableau II.1**.

**Tableau (II.1) : Résumé des études analytiques et de simulation.**

Auteurs	Titre bref	Points forts	Réf.
Weinrebe et Schiel	Tour solaire ascendante et tour d'énergie descendante	Développement d'un modèle thermodynamique simple, une cheminée solaire génère une énergie plus élevée qu'une tour solaire (2001).	[34]
Mulet	La cheminée solaire: efficacité, conception et performances globales	Une enquête sur l'efficacité de la centrale à cheminée solaire, (1987).	[35]
Padki et Sherifto	Cheminée solaire pour la production d'électricité dans les zones rurales	Développement d'une équation différentielle gouvernante, (1989)	[36]
Padki et Sherifto	Cheminée solaire pour la production d'électricité de moyenne à grande échelle.	Production d'électricité à différentes échelles pour les situations villageoises, (1989)	[37]
Padki et Sherif	Un modèle analytique simple pour les cheminées solaires	Utilisation d'une équation pour étudier l'effet des paramètres géométriques et opérationnels sur la performance, (1999)	[38]
Lodhi	Application du concept d'hélio-aéro-gravité	Estimation commerciale pour l'installation d'une centrale à cheminée solaire de 100 MW dans les pays en développement, (1999).	[39]
Chitsomboon	Potentiel et efficacité de la cheminée solaire dans la production d'énergie électrique	Ils ont constaté que la relation entre la puissance et le rendement est linéaire avec la hauteur de la tour	[40]

		(2000).	
Chitsomboon	Un modèle analytique validé pour l'écoulement dans une cheminée solaire	Un modèle analytique basé sur les interactions d'écoulement dans la serre et d'écoulement dans la cheminée a été proposé, (2001).	[41]
Dai et coll.	Centrales à cheminée solaires dans les régions du nord-ouest de la Chine.	Une relation non linéaire a été obtenue à partir de la tendance croissante de la puissance de sortie avec la taille de l'usine, (2003).	[42]
Haaf	Cheminées solaires: partie II	Une valeur de 2/3 a été rapportée pour la première fois comme le rapport de perte de charge dans la turbine, (1984).	[43]
Backstrom et Fluri	Condition de puissance maximale du fluide dans la cheminée solaire	Etude sur le taux de perte de charge dans les turbines, une valeur plus élevée de 2/3 a été trouvée, (2006).	[44]
Kreetz	Etudes théoriques et conception d'un réservoir d'eau temporaire	La possibilité d'un fonctionnement consécutif jour et nuit de la cheminée solaire a été étudiée en utilisant de l'eau remplie sous le toit du collecteur, (1997).	[45]
Bernardes et coll.	Analyse technique, économique et écologique	Évaluation de l'utilisation des tubes remplis d'eau sur le plancher du collecteur pour augmenter la puissance après le coucher du soleil, (2004).	[46]
Tingzhen et coll.	Analyse numérique du flux et du transfert de chaleur	L'effet de la couche de stockage d'énergie sur l'écoulement a été analysé, (2008).	[47]
Tingzhen et coll.	Analyse numérique de la cheminée solaire avec une couche de stockage d'énergie	Etude de la couche de stockage d'énergie sur l'écoulement dans la cheminée solaire, (2009).	[48]
Zheng et coll.	Simulation numérique instable avec la couche de stockage d'énergie	Les effets de divers matériaux de stockage d'énergie sur la puissance de sortie à différentes insulations solaires ont été présentés (2010).	[49]
Hurtado et coll.	Évaluation de l'influence de l'inertie thermique du sol	Une augmentation significative de la puissance de sortie a été obtenue avec l'augmentation de la compression du sol, (2012).	[50]
Daba	Modélisation de la cheminée solaire avec et sans stockage d'énergie thermique	L'efficacité de l'usine serait améliorée en utilisant des réservoirs de stockage thermique selon une analyse comparative, (2011).	[51]
Pretorius	Optimisation et contrôle d'une cheminée solaire à grande échelle	Un collecteur à double toit est proposé et une réduction significative des performances de l'usine est causée par la végétation, (2007).	[52]
Bernards et coll.	Analyse numérique dans un radiateur solaire radial	Une étude théorique d'une cheminée solaire en régime permanent et à convection naturelle a été réalisée (1999).	[53]
Yan et coll.	Analyse des thermo-fluides	Une jonction courbe produit le débit le plus élevé, (1991).	[54]
Kirstein et Backsrtom	Écoulement à travers une section de transition entre le collecteur et la	Le nombre de Reynolds a été pris en compte dans la simulation par	[55]

	cheminée	CFD, (2006).	
<b>Backsrtom et coll.</b>	Chute de pression dans les cheminées solaires	Évaluation du débit à travers une grande cheminée solaire représentative, (2003).	<b>[56]</b>
<b>Pretorius et Kröger</b>	Évaluation critique de la performance	Évaluation de la centrale à cheminée solaire, (2006).	<b>[57]</b>
<b>Kolb et Helmrich</b>	La conception aérodynamique d'une cheminée solaire	Une seule turbine à axe vertical et plusieurs configurations caractéristiques de turbine à axe horizontal ont été comparées pour un CCS de 200 MW en utilisant la méthode CFD, (1996).	<b>[58]</b>
<b>Denantes et Bilgen</b>	Turbines contrarotatives	Évaluation de deux turbines contrarotatives sans aubes directrices et avec aubes directrices d'admission, (2006).	<b>[59]</b>
<b>Fluri et Backstrom</b>	Comparaison des approches de modélisation et des schémas des turbines	Les performances de différentes configurations, y compris une turbine à rotor unique avec aubes directrices et sans aubes ont été comparées, (2008)	<b>[60]</b>
<b>Tingzhen et coll.</b>	Simulation de cheminée solaire couplée à une turbine	Systèmes classés MW équipés d'une turbine à 3 et 5 pales ont été présentés, (2008).	<b>[61]</b>
<b>Zhang et coll.</b>	Etude numérique sur le système UFAD	Tous les types de cheminées solaires avaient un excellent potentiel pour améliorer le débit d'air et la distribution de la température, (2013).	<b>[62]</b>
<b>Al-Kayiem et coll.</b>	Analyse de la hauteur de la cheminée et de la surface du collecteur	Analyse d'une cheminée solaire inclinée sur le toit, (2014).	<b>[63]</b>
<b>Naraghi et Blanchard</b>	Simulation de vingt-quatre heures	Les propriétés importantes de la plaque absorbante peuvent être utilisées pour augmenter sa masse thermique, (2015).	<b>[64]</b>
<b>Liu et Li</b>	Performance de chauffage, PCM	Les comportements du PCM au cours de ses processus de fusion et de solidification ont été analysés, (2015).	<b>[65]</b>
<b>Zhou et coll.</b>	Effets du vent sur une centrale à cheminée solaire	Des simulations CFD d'une centrale à cheminée solaire ont été réalisées, (2016).	<b>[66]</b>
<b>Hu et coll.</b>	Analyse numérique et géométrique	Impact de la géométrie de cheminées divergentes sur la puissance d'une centrale solaire à cheminée, (2017).	<b>[67]</b>
<b>Najm et Shabaan</b>	Etude numérique et optimisation des performances des capteurs solaires de cheminée	La densité de la centrale solaire à cheminée dans différentes conditions a été simulée, (2018)	<b>[68]</b>
<b>Rabehi et coll.</b>	Simulation numérique d'une centrale solaire à cheminée avec modèle de ventilateur	La température et la pression à l'intérieur du collecteur ont augmenté et la vitesse a diminué pendant que la turbine fonctionnait, (2018)	<b>[69]</b>
<b>Ayadi et coll.</b>	Analyse numérique de l'effet de la hauteur du toit du collecteur sur les	Les caractéristiques thermiques de l'air à l'intérieur de la cheminée	<b>[70]</b>

	performances de la cheminée solaire ont été présentées, (2018).	
Amudam et Chandramohan	Influence du système de stockage d'énergie thermique sur les performances du CCS	Le modèle numérique 3D a été développé pour identifier l'effet du stockage d'énergie thermique, (2019). [71]
Li et coll.	Etude sur les performances d'un collecteur solaire avec captage et stockage de chaleur.	a proposé un nouveau modèle de collecteur pour combiner la cheminée solaire avec la production agricole, (2019). [72]

#### II.4. Les études expérimentales

Outre les études numériques et analytiques, de nombreux travaux expérimentaux ont été réalisés dans le domaine de la centrale à cheminée solaire. Le Tableau II.2 présente un résumé des études expérimentales dans la littérature étudiée.

**Tableau (II.2) :** Résumé de l'étude expérimentale de la cheminée solaire.

Auteurs	Titre bref	Points forts	Réf.
Zhou et coll.	Champ de température du collecteur solaire	Une cheminée solaire 5W sur le toit avec 8 m de hauteur, (2008)	[73]
Ketlogetswe et coll.	Production d'énergie solaire par cheminée	Une cheminée renforcée de verre de 22 m de hauteur, (2008).	[74]
Maia et coll.	Évaluation de l'influence des paramètres géométriques et des matériaux	Un prototype a été construit pour valider les modèles théoriques, les caractéristiques géométriques de base ont été prises en compte, (2009)	[75]
Kasaeian et coll.	Etude expérimentale des effets climatiques	Les effets des paramètres climatiques ont été étudiés sur une cheminée solaire de 12 m de haut, (2011).	[76]
Najmi et coll.	Etude sur l'optimisation d'une cheminée solaire typique	Utiliser du caoutchouc ou de l'asphalte au bas du collecteur et du double vitrage pour le plomb supérieur du collecteur pour produire plus de puissance, (2011).	[77]
Gholamalizadeh et Mansouri	Une approche globale pour concevoir et améliorer une cheminée solaire	Les effets des paramètres géométriques sur les performances de la cheminée ont été étudiés, (2013).	[78]
Mehla et coll.	Analyse d'un champ de vitesse utilisant un diamètre de cheminée variable	Le rapport du diamètre de la cheminée à la hauteur de la cheminée de 0,1 était optimal pour une cheminée de 0,8 m de hauteur, (2011)	[79]
Al-Dabbas	Centrale à cheminée solaire en Jordanie	La vitesse de l'air, la température, le rayonnement solaire et la différence de tension ont été mesurés, (2012)	[80]
Bugutekin	Effet du diamètre du collecteur sur les performances de la cheminée solaire	Un système de cheminée de 15 m de hauteur et 0,8 m de diamètre a été étudié, (2011)	[81]
Chappell et coll.	Conception et test d'une cheminée solaire à petite échelle	Conception et fabrication pour un faible coût des matériaux et un	[82]

		entretien minimal, (2012).	
<b>Khanal et Lei</b>	investigation sur une cheminée solaire à paroi passive inclinée	Différents angles d'inclinaison de la paroi passive ont été étudiés, (2014).	<b>[83]</b>
<b>Shahreza et Imani</b>	investigation sur une cheminée solaire innovante	Une cheminée solaire avec deux intensificateurs solaires, (2015).	<b>[84]</b>
<b>Al-Azawie et coll.</b>	Etude sur l'absorption des matériaux du sol	La céramique, la sciure de bois, le sable, le bois peint en vert foncé, la pierre noire et le galet ont été étudiés comme matériaux de base, (2014).	<b>[85]</b>
<b>Aja et coll.</b>	Effet de la vitesse et de la direction du vent	La vitesse du vent a un effet significatif sur la perte de chaleur par convection, (2013).	<b>[86]</b>
<b>Li et Liu</b>	Etude des performances thermiques d'une cheminée solaire associée au PCM.	Performance de la cheminée solaire avec PCM dans trois flux de chaleur différents, des effets positifs ont été observés, (2014).	<b>[87]</b>
<b>Kasaeian et coll.</b>	Optimisation des paramètres géométriques d'une cheminée solaire à Téhéran	Un modèle mathématique a été validé avec les données expérimentales, (2014).	<b>[88]</b>
<b>Ghalamchi et coll.</b>	Etude des effets géométriques et climatiques sur les performances d'une petite cheminée solaire	Etude expérimentale des effets géométriques et climatiques pour une cheminée de 2 m de haut, (2015).	<b>[89]</b>
<b>Tan et Wong</b>	Influences de la vitesse de l'air ambiant et de la charge thermique interne	Développement de la vitesse de l'air dans la cheminée solaire pour une vitesse de l'air ambiant supérieure à 2,00 m/s, (2014).	<b>[90]</b>
<b>Okada et coll.</b>	Amélioration de la production d'électricité à l'aide d'une tour de diffusion	La vitesse de l'air dans la turbine augmentée par la tour de diffusion, (2015).	<b>[91]</b>
<b>Nasirivatan et coll.</b>	Optimisation d'une centrale à cheminée solaire utilisant un vent électrique / corona	L'EHD a augmenté le coefficient de transfert de chaleur de l'absorbeur (2015).	<b>[92]</b>
<b>Ghalamchi et coll.</b>	Etude des performances thermiques d'une cheminée solaire avec différents paramètres.	Optimisation d'un montage pilote de la cheminée solaire de 3 m de hauteur, (2016).	<b>[93]</b>
<b>Ahmed et Patel</b>	les études computationnelles et expérimentales sur les centrales solaires à cheminée	Le système expérimental a été conçu et optimisé sur la base de résultats numériques détaillés, qui avaient un diamètre de collecteur de 3,2 m et une hauteur de cheminée de 4 m. (2017)	<b>[94]</b>
<b>Ahmed et Hussein</b>	Nouveau design de la cheminée solaire	Les panneaux photovoltaïques en tant que toit de collecteur ont un meilleur système de fonction pourrait changer l'énergie thermique en énergie cinétique,(2018).	<b>[95]</b>
<b>James et coll.</b>	investigation sur une cheminée solaire à micro-échelle	Un modèle à micro-échelle d'un tel système a été installé pour étudier sa faisabilité dans les conditions du Kerala. Comme la hauteur de la cheminée était de 3 m seulement, (2019).	<b>[96]</b>
<b>Golzardi et coll.</b>	Comment l'entrée du collecteur	l'évaluation expérimentale des	<b>[97]</b>

	influence les performances de la cheminée solaire	paramètres les plus importants responsables de la formation des écoulements secondaires est la hauteur d'entrée du collecteur, (2020).	
Mehdipour et coll.	Justification expérimentale des mauvaises performances thermiques et d'écoulement de la cheminée solaire	Les raisons de la mauvaise performance des cheminées solaires courantes sont largement discutées et les effets de l'angle et du rayon du collecteur et de la hauteur de la cheminée sont complètement évalués, (2020).	[98]
Khidhir et coll.	l'effet de la concentration thermique dans une cheminée solaire	Construction d'une plate-forme expérimentale modifiée avec un réflecteur d'imagerie solaire et détaillant l'effet de concentration solaire à la base de la cheminée, (2020).	[99]

### II.5. Systèmes de cheminées solaires hybrides et applications spéciales

Les cheminées solaires préliminaires étaient les seules systèmes à cheminée qui ont été étudiés pour obtenir de l'électricité. Dans les années actuelles, des efforts ont été faits pour combiner les cheminées solaires avec certaines applications spéciales. Et celle-ci sont soit expérimentales, soit numériques.

L'application commune et les systèmes hybrides se limitent à la ventilation des bâtiments, hybride avec géothermie, hybride avec dessalement de l'eau, hybride avec séchage, hybride avec photovoltaïque et quelques travaux sur un hybride avec les systèmes à combustibles fossiles. Le Tableau II.3 présente un résumé des systèmes de cheminées solaires hybrides et des applications spéciales.

**Tableau (II.3) : Résumé des systèmes de cheminées solaires hybrides et des applications spéciales**

Auteurs	Titre bref	Points forts	Réf.
Chen et Qu	Flux d'air dans un système de séchage par cheminée solaire avec un absorbeur poreux.	Les effets de l'angle d'inclinaison de l'absorbeur et de la hauteur du système de séchage sur le transfert de chaleur, (2014).	[100]
Liu et coll.	Effet cheminée dans un double mur hybride solaire	Divers espaces dans les murs de la cheminée et flux de rayonnement ont été évalués (2015).	[101]
Cao et coll.	Une cheminée combinée géothermie-solaire	L'utilisation de l'eau géothermique basse température pour la cheminée solaire, (2014).	[102]
Zou et He	Système hybride tour de refroidissement-cheminée solaire	Générer beaucoup plus de puissance par rapport à une cheminée solaire commune, (2015).	[103]
Ghorbani et coll.	Production d'électricité avec de la chaleur à basse température	Une cheminée solaire avec une tour de refroidissement à sec a été conçue et le rendement calculé (2015).	[104]
Rabani et coll.	Un nouveau mur Trombe conçu en	Augmentation de 30% de	[105]

	combinaison avec une cheminée solaire	l'efficacité thermique avec un système de pulvérisation d'eau, (2015).	
<b>Mareeswaran et coll.</b>	Refroidissement des cellules solaires par cheminée	Un moyen passif de refroidissement du solaire photovoltaïque dans les centrales solaires a été préparé pour surmonter sa température de fonctionnement croissante et son faible rendement, (2015).	<b>[106]</b>
<b>Ming et coll.</b>	dessalement d'eau de mer basé sur une centrale à cheminée solaire	Le modèle 3D a été développé pour le refroidissement de l'air et la condensation à l'intérieur de la cheminée, (2017).	<b>[107]</b>
<b>Asayesh et coll.</b>	une cheminée solaire combinée pour le dessalement et la production d'électricité	Un code dimensionnel est développé pour la simulation d'une cheminée solaire hybride, et le code est validé à l'aide des données expérimentales d'une simple cheminée solaire, (2017).	<b>[108]</b>
<b>Maia et coll.</b>	Analyse thermodynamique du processus de séchage dans une petite cheminée solaire.	Un modèle basé sur les première et deuxième lois de la thermodynamique a été développé, en utilisant les conditions ambiantes et les données de paramètres de débit d'air obtenues dans le prototype expérimental (2017).	<b>[109]</b>
<b>Zuo et coll.</b>	Une centrale à cheminée solaire associée au dessalement de l'eau de mer	Un dispositif de suralimentation nommé ventilateur à pression du vent est proposé basé sur SCPPCSD, (2018).	<b>[110]</b>
<b>Rahbar et coll.</b>	Deux nouvelles configurations de centrales à cheminée solaires	Amélioration des performances et optimisation de la centrale à cheminée solaire intégrée avec cellules photovoltaïques transparentes et méthode de dessalement, (2019).	<b>[111]</b>
<b>Kiwan et coll.</b>	Un nouveau système hybride intègre la cheminée solaire	Une cheminée solaire hybride / système thermique photovoltaïque pour la production directe d'électricité et la distillation de l'eau, (2020).	<b>[112]</b>

## II.6. Projets de centrale à cheminées solaires

### a. Prototype de Manzanares

Le premier prototype expérimental d'une centrale à cheminée solaire a été conçu par le bureau d'études Schlaich Bergermann et Partner de Stuttgart [113]. Le distributeur d'électricité espagnol « Union Electrica Fenosa » a proposé le site de Manzanares (ville espagnole située à 180 kilomètres au Sud de Madrid) et le ministère allemand de recherche (BMFT) a financé le projet. La construction du prototype a été terminée en 1982 et a fonctionné pendant plus de 7 ans. Sur la Fig. II.6, on montre des photos du prototype expérimental de Manzanares.



**Fig. (II.6) :** Photo des différents compartiments de la centrale à cheminée solaire de Manzanares

### b. La Centrale de Jinshawan-China

Réalisée à Jinshawan, en Mongolie intérieure (voir Fig. II.7) Chine du Nord, c'est une installation de production d'électricité combinant l'énergie solaire et l'énergie éolienne [31]. Fonctionnelle depuis le 10 Décembre 2010, cette unité de production de 200 kW de puissance peut fournir jusqu'à 400.000 kWh électrique par an, épargnant ainsi des émissions équivalent à de 100 Tonnes de CO<sub>2</sub> en charbon et économisant 900 Tonnes d'eau, par rapport à la production d'énergie au moyen d'une centrale thermique. Ce projet n'occupe du désert que des terres incultes. L'exploitation et l'entretien est également très simples et l'usine solaire ne produira aucune pollution. Cette tour solaire affiche d'excellentes performances en matière de protection de l'environnement.



**Fig. (II.7) :** Photo de la centrale à cheminée solaire de Jinshawan, en Mongolie en Chine.

### c. La Centrale de Kerman-Iran

L'intensité d'irradiation solaire moyenne à Kerman, Iran (latitude  $30^{\circ} 17'$  Nord et la longitude  $57^{\circ} 5'$  Est), est plus de 2000 ans kWh/m<sup>2</sup> et l'ensoleillement est d'environ 2800 h en un an. Afin d'évaluer la faisabilité de la CCS en tant que source d'énergie applicable pour l'environnement, une centrale pilote dans cette région désertique a été construite sur la base des évaluations initiales (Fig. II.8). La centrale pilote de Kerman, dotée d'une tour d'environ 60 m de hauteur et de 3 m de diamètre et d'un collecteur à simple vitre d'environ 40 m de diamètre est capable de produire près de 400 W de puissance électrique pour une insolation de 800 W/m<sup>2</sup> [114].



**Fig. (II.8) :** Photo de la centrale à cheminée solaire pilote de Kerman en Iran

### II.7. Conclusion

Une étude bibliographique approfondie, qui nous a permis d'avoir une vision plus complète sur le phénomène que nous nous proposons d'étudier. Cette recherche bibliographique sur les études théoriques, numériques et expérimentales des écoulements dans les cheminées solaires, nous a permis donc de faire une étude approfondie et nous a donné la possibilité de valider certains résultats, de notre étude avec les résultats expérimentaux et numériques des autres chercheurs.

# Chapitre III :

## Généralités sur les centrales à cheminée solaire

### III.1. Introduction

La production d'énergie actuelle à partir du charbon et du pétrole est nocive pour l'environnement et non renouvelable. De nombreux pays en développement n'ont pas les moyens d'acheter ces sources d'énergie et les centrales nucléaires représentent un risque inacceptable dans de nombreux endroits. Un approvisionnement énergétique insuffisant peut entraîner des coûts énergétiques plus élevés ainsi que la pauvreté, ce qui conduit généralement à des explosions de population.

Une technologie raisonnable pour l'utilisation de l'énergie solaire doit être simple et fiable, et peut être consultée par les pays technologiquement moins développés qui sont ensoleillés et ont souvent des ressources en matières premières limitées, ne devraient pas avoir besoin d'eau de refroidissement ou produit de la chaleur gaspillée et devrait être basée sur une production écologiquement rationnelle à partir de matériaux renouvelables.

La cheminée solaire remplit ces conditions et permet de faire un pas décisif vers une économie solaire globale. Des évaluations économiques basées sur l'expérience et les connaissances recueillies jusqu'à présent ont montré que même les cheminées solaires évaluées à 100 et 200 MW sont capables de produire de l'électricité à des coûts similaires à ceux des centrales électriques conventionnelles. C'est pourquoi il suffit de développer encore plus cette forme d'énergie solaire, même de grandes unités économiquement viables, car dans l'économie énergétique du futur, les cheminées solaires peuvent contribuer à assurer une utilisation économique et écologiquement appropriée de l'énergie dans les zones ensoleillées [115].

### III.2. Le concept de la centrale à cheminée solaire

La cheminée solaire est une génératrice de la puissance électrique à partir de l'énergie solaire, elle est constituée de trois composants principaux: le collecteur solaire, la cheminée (la tour), et la turbine éolienne.

Pendant une journée ensoleillée, le rayonnement solaire tombe sur le capteur solaire qui est généralement constitué d'un toit en verre. Le frais air introduit par les périphériques ouvert de collecteur est chauffé par les rayons solaires sous l'effet de serre [116]. Une partie des rayonnements solaires est réfléchi, absorbée et transmise car elle ne peut pas être entièrement utilisée. Les caractéristiques optiques du verre de collecteur telles que l'indice de transparence, le coefficient de réfraction et l'épaisseur du verre sont des facteurs clé qui influent sur la quantité de soleil absorbé d'une part ou d'une autre.

Brièvement, Les rayonnements solaires tombent à la surface de la terre où une partie est absorbée tandis que l'autre est réfléchi à partir de la surface inférieure du collecteur de verre où elle est à nouveau réfléchi vers le sol. Ces multiples réflexions de rayonnement persistent, amenant le sol à absorber une plus grande partie de cette énergie. La surface du sol chauffée va réchauffer l'air dans le collecteur par convection naturelle et provoquera une augmentation de la température. L'air flottant s'élève en haut de la cheminée localisée au centre du collecteur, crée ainsi un effet d'aspiration pour que l'air du périmètre du collecteur entre dans la région du collecteur et initie ainsi une convection forcée qui chauffe l'air du collecteur plus rapidement. Par convection mixte, l'air chaud du collecteur chauffe la face inférieure du toit du collecteur. À son tour, par convection naturelle est forcée, le toit du collecteur transfère l'énergie de sa surface à l'air ambiant qui lui est alentour. Lorsque l'air s'écoule du périmètre du collecteur vers la cheminée, sa température augmente tandis que la vitesse de l'air reste approximativement constante en raison de l'augmentation de la hauteur du collecteur. L'air chauffé monte dans la cheminée, où il se refroidit à travers les parois de la cheminée et transformé en énergie cinétique qui tourne les pales de la turbine, qui à leur tour fonctionné le générateur [117]. La différence de pression entre la base de la cheminée et la pression ambiante au sommet de la cheminée peut également estimée à partir de la différence de la densité. Ceci, à son tour, dépend des températures de l'air à l'entrée et à la sortie de la cheminée. La différence de pression disponible pour tourner la turbine peut être réduite par la perte de frottement dans la cheminée, qui est les pertes à l'entrée et la perte d'énergie cinétique de sortie [116]. La figure suivante montre l'air circulant à travers le collecteur et la cheminée traversant le générateur d'énergie à turbine.

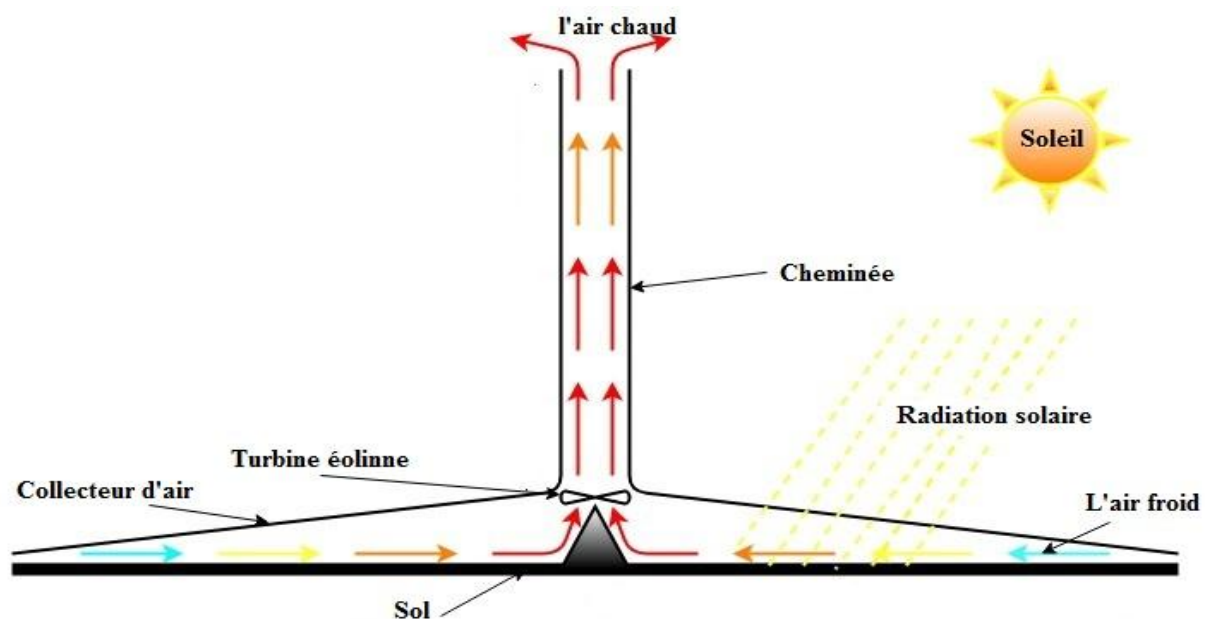


Fig. (III.1) : Diagramme schématisé de la Centrale à cheminée solaire

### III.3. Configuration de la centrale à cheminée solaire

La centrale à cheminée solaire se compose de trois composants principaux :

#### III.3.1. Collecteur solaire

Le collecteur solaire est considéré comme le composant principal de l'ensemble du système de centrale à cheminée solaire. A l'effet de serre le collecteur chauffe l'air entrant à travers ses parois latérales et le pousse dans la partie centrale où les turbogénérateurs sont utilisés pour la production d'électricité. Le collecteur a tendance à se plier à la base de la cheminée pour que le flux d'air monte dans la cheminée. Le collecteur peut être n'importe quel matériau de toiture en verre ou en film plastique avec des propriétés de transparence élevées pour permettre le passage du spectre solaire [118].

Un prototype a été construit à Manzanares où le collecteur de la cheminée solaire utilise une combinaison de verre et de matières plastiques afin d'étudier leur effets sur la durabilité et également l'efficacité de système. Les panneaux de toiture en verre étaient carrelés sur une section de 1,0 mètre sur 1,0 mètre tandis que les films en plastique étaient disposés en sections de 6,0 mètres sur 6,0 mètres. La forme géométrique du collecteur est une conception typique d'une cheminée solaire avec le bord extérieur du collecteur solaire à environ 2 mètres de hauteur du sol [119].

Le collecteur solaire agit comme un échangeur de chaleur qui convertit l'énergie du rayonnement solaire en énergie interne pour l'air sous le collecteur [120]. Il est noté que le collecteur permet le passage du rayonnement à ondes longues et l'empêche de sortir, et une isolation qui résiste au retour et à la perte de chaleur [122]. La figure suivante illustre le diagramme schématique du flux de chaleur du capteur solaire et de la surface du sol lorsqu'ils sont exposés au rayonnement solaire.

Comme il est illustré dans la Fig.III.2, il est évident que le collecteur solaire peut s'étendre horizontalement vers le sol avec un écart pour le trajet d'écoulement d'air. C'est ce qu'on appelle la hauteur du collecteur qui est

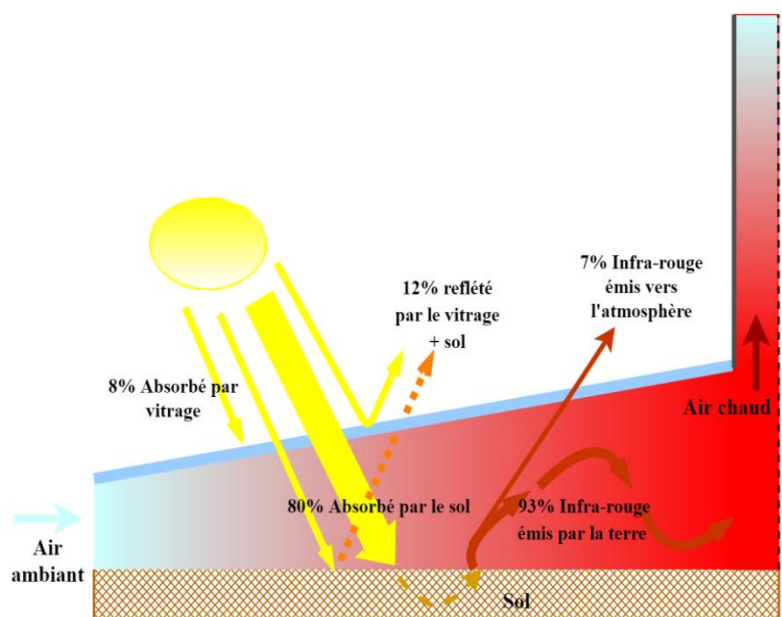


Fig. (III.2) : Schéma de principe du collecteur solaire

généralement de deux à six mètres au-dessus du sol. Pour un système conventionnel, il n'y a pas de pente pour le collecteur mais des études récentes ont montré que le collecteur en pente présente les avantages suivants [121]:

- 1- Réduisez la perte de frottement à la base de la cheminée pour permettre la transition en douceur du flux horizontal au flux vertical où l'air passera à travers la turbine. Cela peut être fait en augmentant la hauteur du toit à côté de la base de la cheminée.
- 2- Le collecteur incliné peut augmenter l'efficacité et également la production d'énergie comme a été observé pour un collecteur horizontal où un flux d'air avec moins de turbulence a été observé.

Plus la surface du collecteur solaire est grande, plus la production d'électricité est importante, ce qui a toujours été un obstacle car trouver une large espace pour l'installation de la centrale à cheminée solaire était difficile à obtenir. Bien que les collecteurs aient des coûts de construction faibles et un effet minimal sur les chutes de pression. Il est dit que l'utilisation d'un collecteur en verre vitré est la plus efficace car elle convertit environ 70% du rayonnement solaire en chaleur [122].

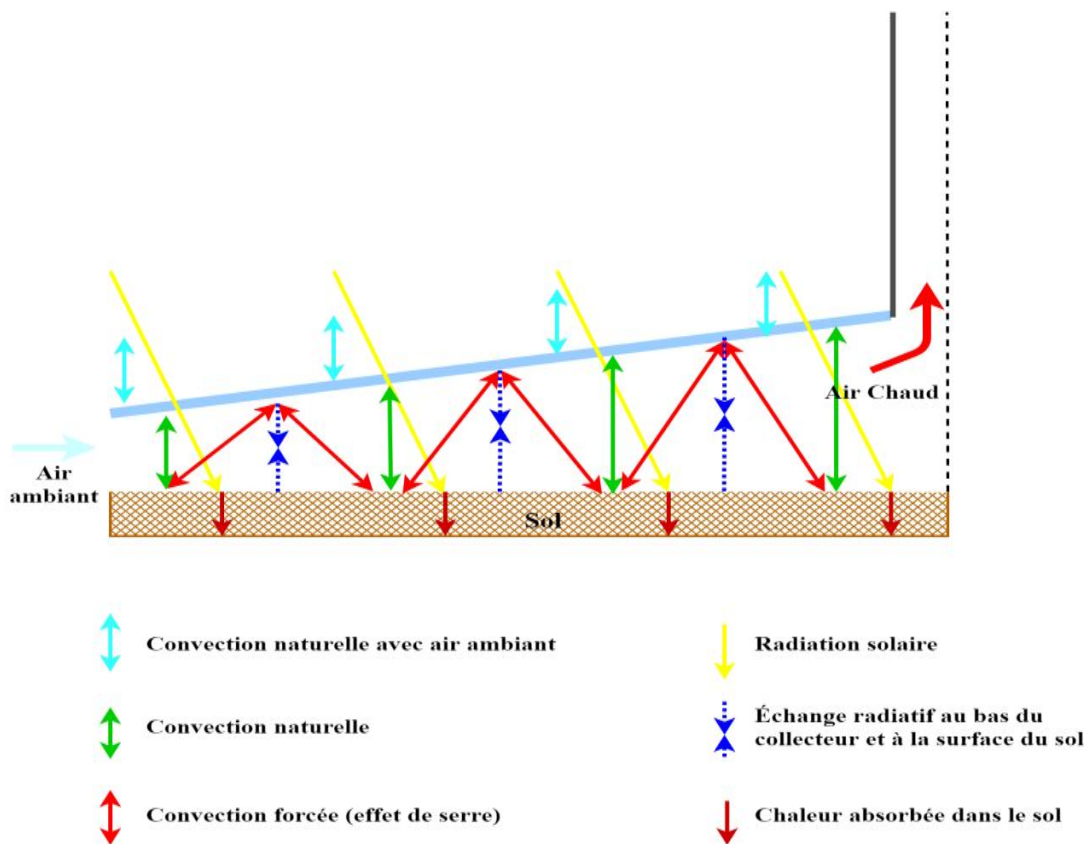


Fig. (III.3) : Bilan thermique du collecteur solaire

### III.3.1.1 Rendement thermique du collecteur

Le rendement thermique du collecteur est donné par la relation suivante [123] :

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{Q}}{A_{coll}q} \quad (02)$$

Où

$\dot{Q}$  : représente la puissance thermique gagnée par l'air ;

$A_{coll}$  : représente la surface du collecteur.

Le bilan énergétique établi entre l'entrée et la sortie du collecteur permet d'écrire :

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T_{coll} \quad (03)$$

Où

$\Delta T_{coll}$  : représente l'élévation de la température entre l'entrée et la sortie du collecteur ;

$\dot{m}$  : Le débit massique d'air à l'intérieur de la cheminée ; il peut être calculé par la formule suivante :

$$\dot{m} = \rho_{air} v_{ch} A_{ch} \quad (04)$$

Où

$\rho_{air}$  : la densité de l'air à la sortie du collecteur ;

$A_{ch}$  : représente la section perpendiculaire à l'axe de la cheminée ;

$v_{ch}$  : La vitesse de l'air à l'entrée de la cheminée.

### III.3.2. Cheminée

La cheminée solaire est également l'un des principaux composants d'une centrale solaire, tout comme les deux autres composants. En se référant à la figure III-1: Diagramme schématique de la Centrale à cheminée solaire, la cheminée est située au point central du collecteur, et également décrite comme étant un moteur thermique. Elle se compose d'un tube sous pression où le frottement est faible de la même manière qu'un tube de pression hydroélectrique. Une différence de température est créée au sein de la cheminée par l'air froid en haut de la cheminée et l'air chauffé sous le collecteur. Cela crée l'effet de cheminée, qui aspire l'air du bas de la cheminée vers le haut [124]. La poussée de l'air chauffé dans le collecteur est approximativement proportionnelle à l'élévation de la température de l'air dans le collecteur et au volume de la cheminée.

Selon les résultats de la littérature, la cheminée doit atteindre une hauteur suffisante pour permettre au flux d'air chaud de monter jusqu'à le haut de la sortie de cheminée. Par conséquent, l'augmentation de la hauteur de la cheminée est un facteur important pour améliorer l'efficacité de la cheminée et l'efficacité globale du système. La turbine est généralement située à la base de la cheminée pour faciliter la construction par rapport à l'emplacement au milieu de la cheminée ou à la sortie de la cheminée.

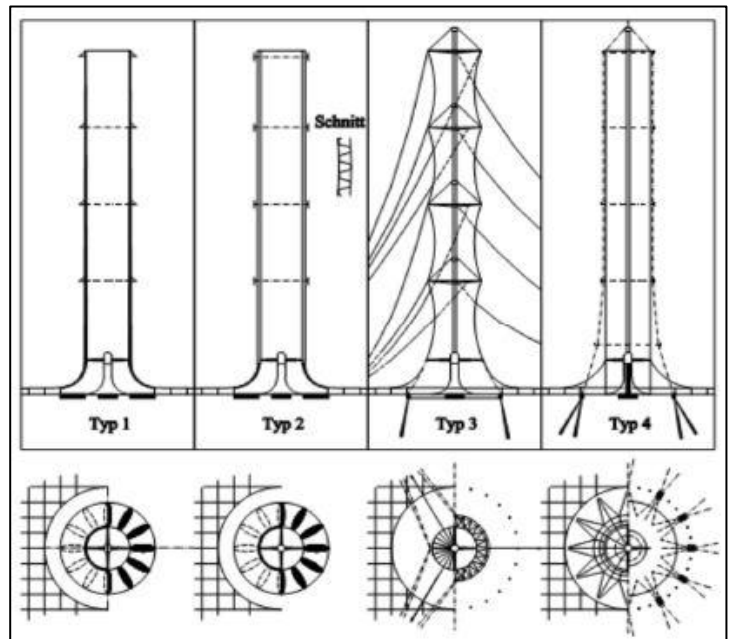


Fig. (III.4) : Construction typique de la cheminée

Il existe plusieurs types de configuration de la cheminée comme ils sont illustrés dans la figure III-4. Actuellement, la hauteur maximale de la tour est de 1500 mètres, et pour stabiliser la structure haute de la cheminée, un raidisseur à anneau de compression est installé avec un espacement vertical [125].

### III.3.2.1. Rendement de la cheminée

Le rôle de la cheminée comme a été précisé précédemment est la conversion de l'énergie thermique en énergie cinétique. Cette conversion a un rendement très bas. Ceci est dû au fait du passage direct de l'énergie de bas niveau (thermique), à une énergie de haut niveau (cinétique). Le rendement de la cheminée est alors exprimé par le rapport de la puissance d'air sur la quantité de chaleur absorbée dans le collecteur [123]:

$$\eta_{ch} = \frac{P_{tot}}{\dot{Q}} \quad (05)$$

$P_{tot}$ , représente la puissance totale d'écoulement (W), dépend de la chute de pression dans la cheminée.

L'énergie contenue dans l'écoulement d'air égale à :

$$P_{tot} = \Delta P_c v_{max} A_{coll} \quad (06)$$

$\Delta P_c$  Différence de pression (N/m<sup>2</sup>)

$v_{max}$  Vitesse maximale d'écoulement (m/s)

Le changement de pression dans la cheminée est lié à la variation de la flottabilité dans l'air chauffé:

$$\Delta P = (\rho_{atm} - \rho_{ch}) g H_{ch} \quad (07)$$

$H_{ch}$  : Hauteur de la cheminée (m)

Si maintenant on considère que le système n'est pas couplé avec une turbine  $\Delta P_{stat}=0$ , donc toute la différence de pression totale est utilisée pour accélérer l'air. Donc elle est convertie en énergie cinétique, alors on peut écrire :

$$P_{tot} = \frac{1}{2} \dot{m}_{air} v_{max}^2 \quad (08)$$

$\dot{m}_{air}$  : Débit massique d'air (kg/s)

$$(\rho_{atm} - \rho_{ch}) g H_{ch} v_{max} A_{coll} = \frac{1}{2} \dot{m}_{air} v_{max}^2 \quad (09)$$

On tire l'expression de la vitesse maximale d'écoulement  $v_{max}$ :

$$v_{max} = \sqrt{2 g H_{ch} \frac{\rho_{atm} - \rho_{ch}}{\rho}} \quad (10)$$

En utilisant l'approximation de Boussinesq et la loi des gaz parfaits, l'expression de la vitesse maximale se simplifie à :

$$v_{max} = \sqrt{2 g H_{ch} \frac{\Delta T}{T_{amb}}} \quad (11)$$

$\Delta T$  : Différence de température de l'air à l'entrée et à la sortie de collecteur (°C)

$T_{amb}$  : Température ambiante de lieu considéré (°C)

Combinant ceci avec notre seconde expression de la puissance d'écoulement (5), nous pouvons constater que le rendement de la cheminée est :

$$\eta_{ch} = \frac{g H_{ch}}{c_{p,air} T_{amb}} \quad (12)$$

$c_p$ : Capacité thermique de l'air (J/kg K)

Cette représentation simple montre une des caractéristiques de la cheminée solaire, qui énonce que le rendement de la cheminée dépend principalement de sa hauteur. Toutefois, il faut

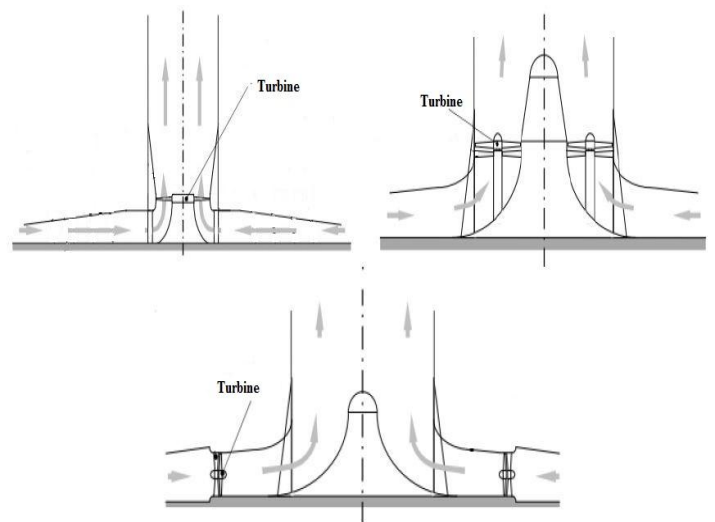
noter que le modèle établi est un modèle simple qui ne prend pas en considération les différentes pertes de chaleurs au niveau de la cheminée.

### III.3.3. La turbine de production d'énergie

La turbine de la cheminée solaire est un élément clé de l'installation car elle extrait l'énergie cinétique de l'air et la transmet au générateur. Les spécifications des turbines de la cheminée solaire sont similaires à celles des grandes éoliennes à plusieurs égards. Comme ils convertissent de grandes quantités d'énergie du flux d'air en énergie électrique. Les caractéristiques suivantes sont pour une turbine à cheminée solaire typique [126].

La turbine des cheminées solaires typiques est du type à flux axial. Elle a des caractéristiques entre celles des éoliennes et des turbines à gaz: elle a plus de pales que les éoliennes typiques (deux ou trois pales), mais pas autant que les turbines à gaz. Les pales du rotor sont réglables, comme celles des éoliennes, mais comme dans les turbines à gaz, le flux est enfermé, et certaines turbines de la cheminée solaires peuvent avoir des pales radiales provenant du guide d'entrée du flux [127].

La fonction principale de la turbine est la conversion efficace de la puissance du fluide (air) à la puissance de l'arbre. Une fonction secondaire des turbines de la cheminée solaires est le contrôle du débit et la puissance de la sortie par l'ajustement de ses angles de pale [128]. Cette caractéristique des turbines de la cheminée solaires conduit les chercheurs à adopter différentes méthodes lors de la conception de la turbine.



**Fig. (III.5) :** Méthodes d'installation typique pour une turbine de la cheminée solaire

Les turbines sont souvent positionnées à la base de la cheminée. L'utilisation des turbines permet d'extraire une quantité d'énergie disponible dans l'air en écoulement, sous forme d'énergie mécanique de rotation. Des générateurs couplés aux turbines permettent la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Les turbines utilisées dans les centrales à cheminée solaires sont des turbines à étage de pression. La puissance générée par la turbine est proportionnelle au produit du débit volumique et de la différence de pression à travers la turbine. Dans le but de maximiser ce produit, un système de contrôle est nécessaire pour le réglage de l'angle d'inclinaison des pales de la turbine [129].

La puissance électrique générée par la turbine est donnée par la formule ci-dessous [130] :

$$P_{elec} = \Delta p_{tot} \cdot Q_v \cdot \eta_{tur} \quad (13)$$

Où  $\Delta p_{stat}$ ,  $Q_v$ ,  $\eta_{tur}$  représentent la chute de pression statique à travers la turbine, le débit volumique et le rendement de la turbine et du générateur électrique respectivement.

Cependant Schlaich & al. [131] ont déterminé un optimum de chute de pression à travers la turbine qui correspond à 80% de la pression totale disponible. Donc on peut écrire que :

$$P_{elec} = 0.8 \Delta p_{tot} \cdot Q_v \cdot \eta_{tur} \quad (14)$$

En introduisant dans cette équation les rendements du collecteur et de la cheminée données par les équations (2) et (12) respectivement on aboutit à :

$$P_{elec} = 0.8 \eta_{coll} \cdot \eta_{ch} \cdot \eta_{tur} A_{coll} \cdot q \quad (15)$$

Ainsi, la puissance générée par la cheminée solaire est proportionnelle à la surface de collecteur et à la hauteur de la cheminée, donc elle est proportionnelle au volume de cylindre avec une base égale à la surface de collecteur et d'une hauteur égale à celle de la cheminée.

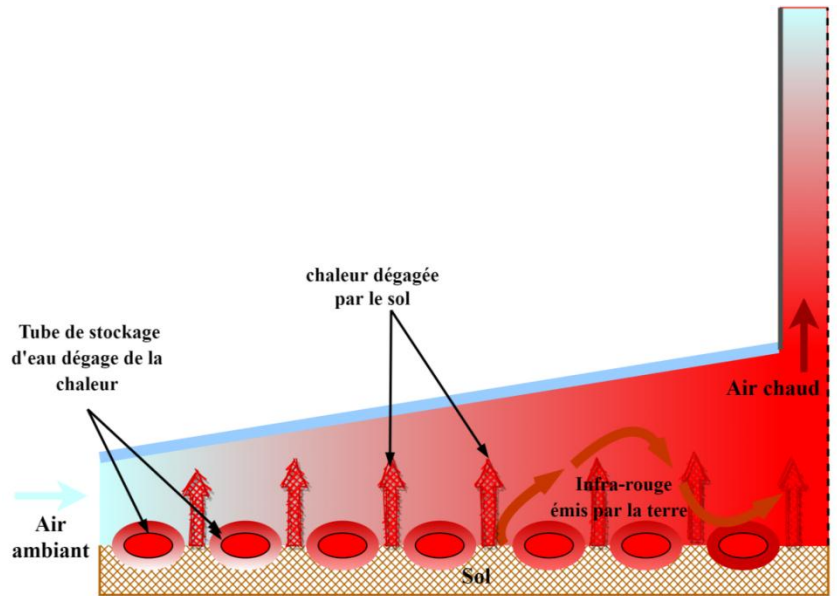
La puissance maximale est réalisée quand la chute de pression dans la turbine égale à deux tiers de toute la différence de pression disponible [123]:

$$P_{elc,max} = \frac{2}{3} \eta_{tub} \eta_{coll} \frac{g}{C_{p,air} T_{amb}} H_{ch} A_{coll} q \quad (16)$$

#### III.4. Système de stockage thermique d'énergie

Le sol sous le collecteur solaire se comporte comme un support de stockage, et il peut être chauffé par l'air pendant une période de temps significative après le coucher du soleil jusqu'à ce que la température atteigne l'équilibre avec la température ambiante. Le rendement de la centrale à cheminée solaire est inférieur à 2% et dépend principalement de la hauteur de la tour. En raison de la large couverture requise par le collecteur solaire, la centrale à cheminée solaire ne peut être construite que sur un terrain bon marché où elle se trouve généralement à les environs de la ville. Cependant, la surface sous le collecteur solaire peut être utilisée à des fins agricoles car elle utilise l'effet de serre [132]. Hedderwick [133] et Pretorius [134] étudient également la distribution de la température dans le sol sous le collecteur solaire où l'on constate que le sol joue un rôle important dans la consommation d'énergie. Différents types de sols ont été comparés, y compris les sols secs et humides. Ils ont découvert que la centrale à cheminée solaire utilisant un sol humide et du sable avait respectivement la production d'énergie la plus faible et la plus élevée et que différents matériaux entraînaient une variation de production d'énergie pendant la journée et la nuit [134].

L'une des découvertes de Manzanares est que la centrale de la cheminée solaire peut produire de l'électricité la nuit, mais pas aux mêmes rendements que pendant la journée. Cela est dû au fait que le sol sous le collecteur libère la chaleur qui y est stockée pendant la journée pendant la nuit, tandis que l'air de la nuit se refroidit. Dans une simulation moderne réalisée à l'université de Stellenbosch, elle est démontré qu'environ un sixième de la puissance maximale générée à midi est générée toute la nuit [130]. La figure III-6 illustre le tube de

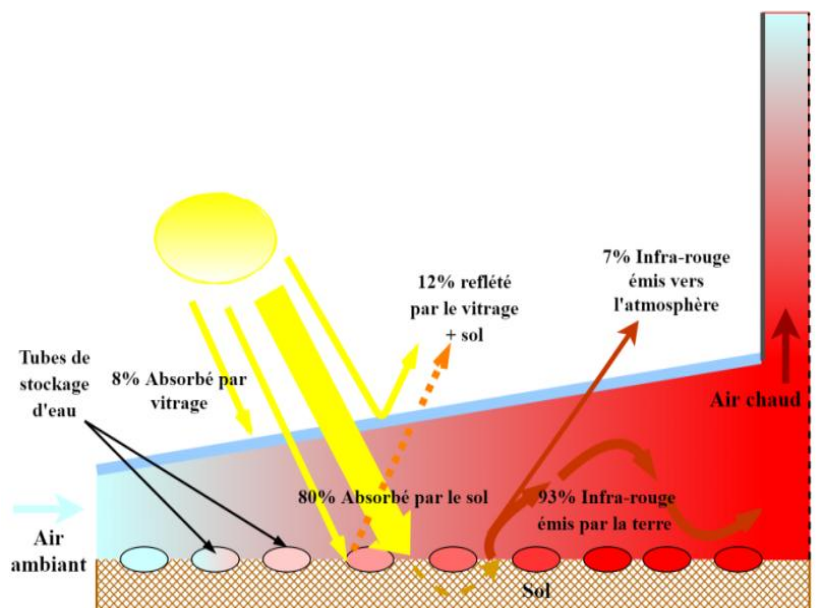


**Fig. (III.6) :** Le tube de stockage d'eau absorbe la chaleur pendant la journée

Stockage d'eau qui absorbe la chaleur pendant la journée et montre comment la chaleur est absorbée dans le stockage thermique lorsqu'il est exposé au rayonnement solaire.

Pour améliorer la capacité de stockage afin de permettre à l'usine de fonctionner pendant la nuit, il est proposé de placer des bobines de plastique noir remplies de tube d'eau sous le capteur solaire. L'eau est chauffée pendant la journée sera pompée dans un réservoir de stockage isolé où il peut être retourné aux serpentins pendant la nuit, ce qui permet à l'usine de fonctionner à pleine capacité pendant 24 heures par jour. La figure III-7 montre ce qui suit:

Comment le tube de stockage d'eau pendant la nuit libère la chaleur stockée dans le stockage thermique, et comment elle est renvoyée dans l'espace entre le collecteur et la surface de la terre afin que la cheminée solaire reste en fonctionnement pendant un faible rayonnement solaire [135].



**Fig. (III.7) :** Tube de stockage d'eau pendant la nuit

### III.5. L'effet des principaux paramètres sur les performances de la centrale à cheminée solaire

La performance d'une cheminée solaire est affectée par plusieurs paramètres, dont les conditions climatiques (température ambiante et radiation solaire) et les dimensions géométriques (hauteur de la cheminée, diamètre du collecteur, hauteur du collecteur et diamètre de la cheminée), car elle joue un rôle très important dans la production d'énergie électrique.

#### III.5.1.L'effet de la température ambiante et de l'éclairement solaire

La productivité de l'énergie électrique augmente avec l'augmentation de l'éclairement solaire et de la température ambiante, mais l'effet de l'éclairement solaire a plus d'importance que la température (voir Figure III.8.)[136].

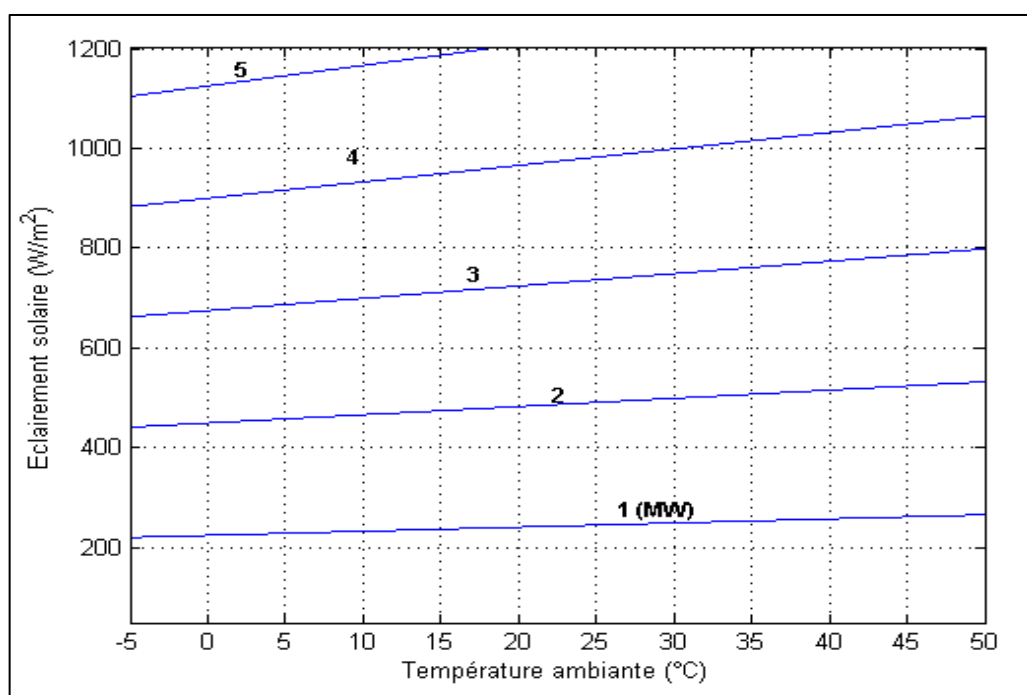


Fig. (III.8) : Effet de la température ambiante et de l'éclairement sur la production d'énergie [136].

#### III.5.2.L'effet du diamètre du collecteur et de la hauteur de la cheminée

La hauteur de la cheminée et le diamètre du collecteur ont un effet important sur la production de l'énergie électrique, la figure.III.9 illustre la production de l'énergie électrique en fonction de la hauteur de la cheminée et le diamètre du collecteur pour un éclairement de 600W/m<sup>2</sup>. L'augmentation de la production de l'énergie électrique est directement proportionnelle avec l'augmentation du diamètre du collecteur et de la hauteur de la cheminée, cette augmentation est rapide pour des petites dimensions et lente pour des grandes dimensions [136].

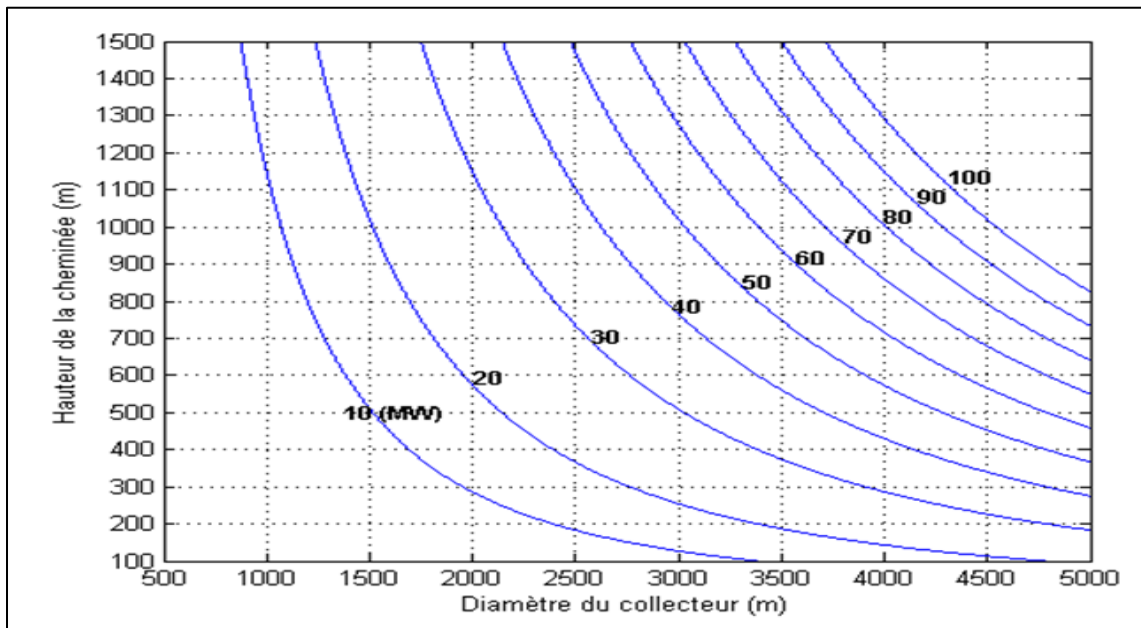


Fig. (III.9) : Effet de la hauteur de la cheminée et du diamètre du collecteur sur la production d'électricité pour un éclairement de  $600 \text{ W/m}^2$  [136]

### III.5.3. L'effet du débit massique

Une production d'énergie maximale est essentielle lors de la conception d'une centrale à cheminée solaire afin de prendre en compte la valeur du débit massique qui doit être optimisée en fonction des turbines dans le fonctionnement continu du système. La valeur du débit massique est affectée par plusieurs facteurs tels que l'augmentation de la température à l'intérieur du collecteur, les chutes de pression dans les turbines et la force motrice. Par conséquent, l'énergie générée dépend du débit massique où elle est diminuée à faibles débits, car les pertes de débit élevées qui se produisent en raison de l'augmentation des vitesses de l'air dans le système, où il y a une nette augmentation de la l'énergie générée avec l'augmentation du débit massique, d'autres paramètres tels que l'augmentation de la hauteur de la cheminée avec une quantité constante de rayonnement solaire contribuent à l'augmentation du débit massique. L'amélioration du débit massique est importante pour augmenter l'énergie générée; de plus, certains éléments sont utilisés comme l'insert d'un absorbeur intermédiaire avec une grande base de diamètre de capteur solaire afin d'augmenter la vitesse, la température de l'air et l'augmentation du débit massique ainsi que l'énergie totale générée. Le diagramme III.10 illustre la variation de l'énergie électrique en fonction du débit massique pour quelques valeurs d'éclairement solaire [137].

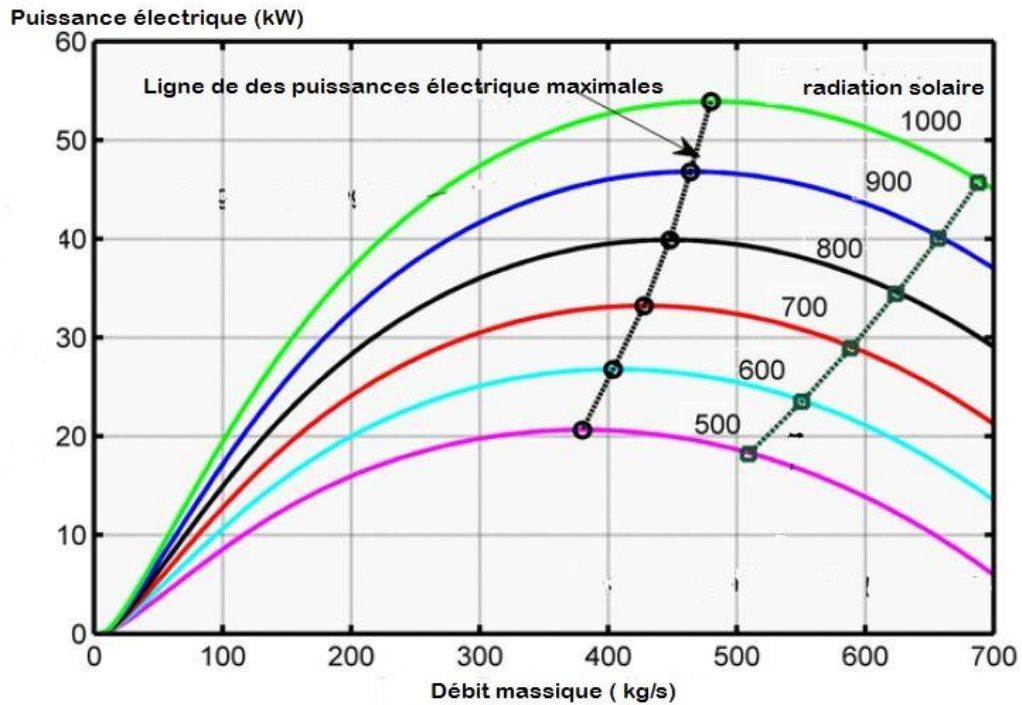


Fig. (III.10) : Variation de la puissance électrique en fonction de débit [137]

### III.5.4. L'effet de vitrage

Il est avantageux d'augmenter la capacité du toit de collecteur, en fournissant un double vitrage. L'énergie produite par la cheminée solaire est proportionnelle aux nombres du vitrage du toit comme le montre la figure

III.11, on voit clairement que le toit de double vitrage permet d'augmenter la quantité de l'électricité produite d'une manière importante. Toujours au meilleur coût: si le verre n'est pas cher et le béton cher alors le collecteur sera grand avec une forte proportion de double vitrage et une cheminée relativement faible, et si le verre est coûteux, il y'aura un grand collecteur et un simple vitrage ou peut être un film de plastique avec une grande tour. [138]

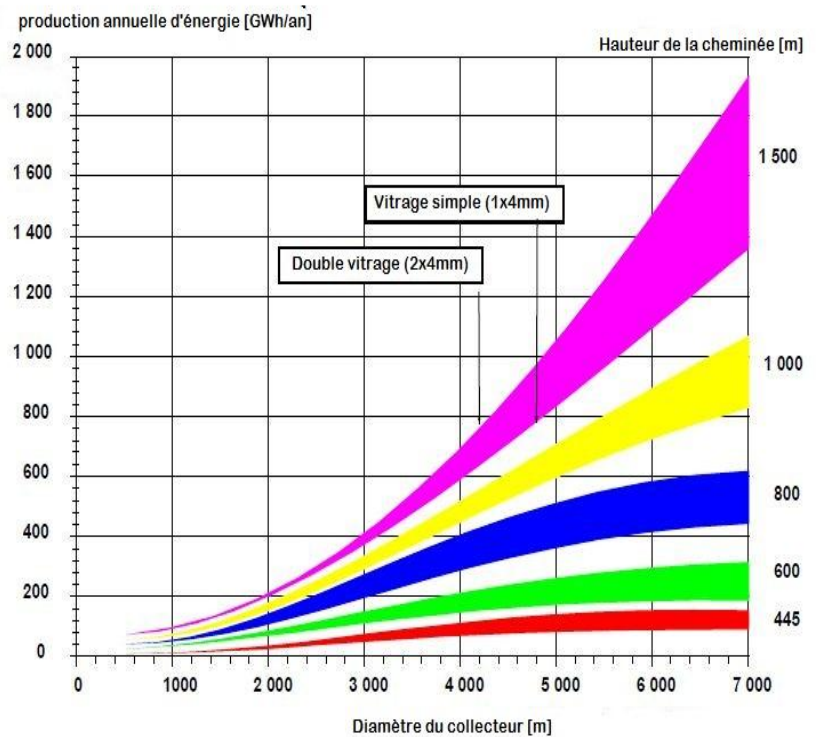


Fig. (III.11) : Production annuelle d'énergie de l'électricité par la cheminée solaire [138]

### III.6. Avantages et inconvénients de la cheminée solaire :

#### Avantage [139]:

- Les centrales électriques de cheminée solaires utilisent la radiation solaire (direct et diffuse), donc peut fonctionner dans les conditions nuageuses.
- Les Cheminées Solaires sont particulièrement adaptées à la production d'électricité dans les déserts et les terres arides sans valeur, mais riches en soleil.
- 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).
- Elles ne nécessitent pas d'eau de refroidissement et sont adaptées à des régions où règne une sécheresse extrême (pour mémoire, même les centrales solaires à concentration CSP ont besoin d'eau comme source froide).
- Les matériaux nécessaires à la construction d'une Cheminée Solaire: béton, verre et acier, sont disponibles en quantités suffisantes partout dans le monde.
- Leur construction ne provoque pas de dommages écologiques et peut employer la main d'œuvre locale.
- Vue de la robustesse de sa structure, la cheminée solaire n'a pas besoin d'un grand entretien et fonctionne naturellement. Elle n'exige pas des carburants non renouvelables pour le fonctionnement et ne produit pas n'importe quelles émissions.
- Elle a une longue durée de vie (au moins 80 à 100 ans). La technologie d'une centrale électrique de cheminée solaire ne deviendra pas périmée facilement.
- Des plantations peuvent être créées sous le collecteur.
- Plus de sécurité par rapport au nucléaire surtout à l'heure actuelle.

#### Inconvénients [139] :

- Quelques estimations disent que les coûts d'investissement pour la production d'électricité à partir de Cheminées Solaires est 5 fois plus important que celui à partir d'une turbine à Gaz. Bien qu'aucun carburant fossile ne soit nécessaire les investissements nécessaires pour une Tour Solaire sont importants.
- 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).
- Investissement de départ.
- La production n'est pas constante pendant le jour ou la nuit.
- La structure elle-même est massive et requiert beaucoup d'expertise en ingénierie et de matériaux pour sa construction.

### III.7. Conclusion

La technologie de la tour solaire présente un moyen d'exploiter la chaleur du soleil. Les investissements de départ sont importants mais prévisibles, et ils permettent de produire une électricité propre et renouvelable. Pour amortir les coûts de construction de la centrale, des subventions de l'État sont nécessaires, pour vendre l'électricité à un prix compétitif.

Les tours solaires sont très importantes pour le futur, par ce que nos ressources sont limitées. 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, 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.

# Chapitre IV :

## Généralités sur les modes du transfert thermique

### IV.1. Introduction

Le transfert thermique est la science qui tente à prédire le transfert d'énergie entre les molécules ou les particules de la matière à différentes températures. Le but est d'expliquer la manière et de prédire le taux d'échange de la chaleur sous certaines conditions spécifiques. Il complète les deux premiers principes de la thermodynamique par des lois expérimentales additionnels afin d'établir les proportions de transfert d'énergie.

Le transfert de chaleur est une science qui contient plusieurs concepts pratiques de base utilisés dans de nombreuses applications industriels. Le transfert de chaleur peut s'effectuer au moyen de trois mécanismes différents, la conduction, la convection et le rayonnement. Les connaissances de base dans ce domaine, sont donc indispensables pour comprendre et maîtriser l'utilisation pratique de ces phénomènes [140].

Le transfert de chaleur peut être défini comme étant la transmission de l'énergie d'une région à une autre une fois la différence de température entre elles établie. Il est régi par une combinaison de lois physiques et de relations empiriques déduites de l'expérimentation. Dans la littérature relative à cette discipline, on reconnaît généralement trois modes distincts de transmission de la chaleur :

- Conduction: transfert de chaleur survenant dans un médium stationnaire sous l'effet d'un gradient de température (fluide ou solide);
- Convection: transfert de chaleur survenant dans un fluide en mouvement sous l'effet d'un gradient de température.
- Rayonnement: transfert de chaleur induit par l'échange d'ondes électromagnétiques entre un corps émetteur et un corps récepteur.

### IV.2. Conduction :

La conduction est définie comme étant le mode de transmission de la chaleur au sein d'un milieu opaque (solide, liquide ou gazeux), sans déplacement de la matière, en présence d'un gradient de température. Elle s'effectue selon deux mécanismes différents: une transmission par vibration des molécules ou atomes et une transmission par les électrons libres. Ce mode se produit au sein d'une même phase au repos ou

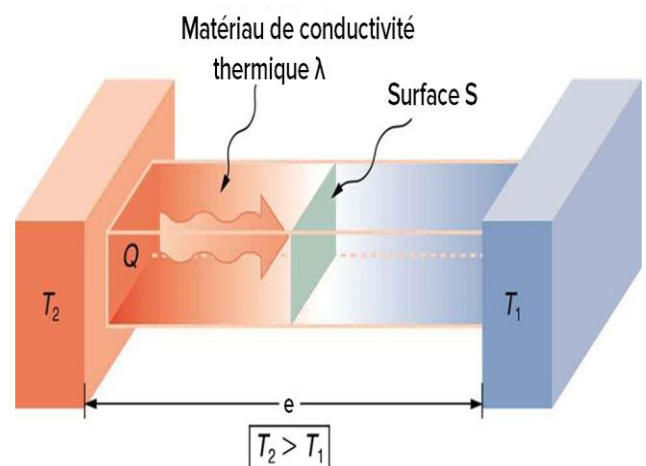


Fig. (IV.1) : Transfert de chaleur par conduction

mobile, en présence d'un gradient de température. Dans ce cas, le transfert de chaleur résulte d'un transfert d'énergie cinétique d'une molécule à une autre molécule adjacente. Ce mode de transfert est le seul à exister dans un solide opaque (qui absorbe tous les rayons). Pour les solides transparents, une partie de l'énergie peut être transmise par rayonnement. Avec les fluides (gaz ou liquides), la convection et le rayonnement peuvent se superposer à la conduction [140].

### IV.2.1. Loi de Fourier

L'intensité du transfert de chaleur est quantifiable par le flux de chaleur qui est proportionnel au gradient thermique via la conductivité thermique du milieu. Cette intensité est proportionnelle aussi à la surface à travers laquelle on évalue la puissance diffusée ainsi qu'à la durée du transfert.

La loi fondamentale de la transmission de la chaleur par conduction, a été proposée par le mathématicien et physicien Français, Jean Baptiste Joseph Fourier en 1822. Cette loi donnant le flux de chaleur traversant une surface s'exprime par la relation [141] :

$$\vec{\Phi} = -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (17)$$

$\overrightarrow{\text{grad}} T$ : Gradient de température.

Ou sous la forme suivante :

$$\Phi = -\lambda \cdot s \frac{\delta T}{\delta x} \quad (18)$$

Avec :

$\Phi$ : Flux de chaleur transmis par conduction (W).

$\lambda$ : Conductivité thermique du milieu (W/m. °C).

$x$ : Variable d'espace dans la direction du flux (m)

$s$ : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m<sup>2</sup>)

La présence du signe (-) dans le second membre des relations signifie que le flux de chaleur progresse dans le sens opposé au gradient de température, c'est-à-dire que le flux de chaleur se dirige des températures les plus élevées vers les températures les plus basses.

### IV.3. Convection :

La convection est basée sur le fait qu'il y a déplacement de matière, elle ne concerne que les fluides (liquides et gaz) ou les échanges entre un solide et un fluide.

La transmission de chaleur par convection peut se composer en deux mécanismes physiques:

- Transmission par le mouvement des molécules (diffusion). Ce phénomène est appelé advection (une masse de fluide qui se déplace transporte avec elle son énergie interne).
- Transmission par déplacement volumique (déplacement des volumes dans l'espace).

La convection est donc un mode de transport d'énergie (par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu) qu'on peut le définir aussi comme la réunion de deux modes de transfert de chaleur : la conduction, qui s'effectue à l'échelle microscopique, et l'advection, qui est de nature macroscopique.

La convection intervient, par exemple, à la surface de séparation entre un solide et un fluide (liquide ou gaz), ou bien, à la surface libre entre un liquide et un gaz, ou deux fluides non miscibles et l'un est en mouvement par rapport à l'autre[142].

Le transfert thermique par convection est divisé en deux parties suivant la nature de l'écoulement :

- La convection forcée apparaît lorsque l'écoulement est engendré par des moyens externes comme un ventilateur ou les vents atmosphériques
- La convection naturelle se produit lorsque l'écoulement est induit par une différence de masse volumique qui varie en fonction de la température au sein du fluide

On peut exprimer la quantité de chaleur transmise par convection entre une paroi solide et un fluide par la loi de Newton [141]:

$$\Phi = h_c \cdot S(T_p - T_\infty) \quad (19)$$

$\Phi$  : Flux de chaleur transmis par convection (w)

$h_c$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection (W/m<sup>2</sup>. °C)

$T_p$  : Température de surface du solide (°C)

$T_\infty$  : Température du fluide loin de la surface du solide (°C)

$S$  : Aire de la surface de contact solide/fluide (m<sup>2</sup>)

Le coefficient d'échange de chaleur par convection  $h$  est une fonction de l'écoulement du fluide, des propriétés thermiques du milieu fluide et de la géométrie du système. Sa valeur numérique n'est généralement pas uniforme sur une surface et elle dépend également de la position où on mesure la température. Ce mode de transfert est intimement lié au mouvement du fluide, donc il est important de connaître le mécanisme de l'écoulement du fluide avant d'étudier celui du transfert de la chaleur.

Dans l'étude hydrodynamique, il est important d'établir si le mouvement du fluide est laminaire ou turbulent. En fait, Lorsqu'un fluide s'écoule en mouvement laminaire le long d'une surface, la chaleur est transmise seulement par conduction dans le fluide et par convection à l'interface entre le fluide et la surface. Mais dans un écoulement turbulent, le mécanisme de transfert est favorisé par d'innombrables tourbillons. Les petits volumes de fluide, en se mélangeant avec d'autres, jouent le rôle de porteur d'énergie. Alors, un accroissement de turbulence amène une augmentation de la quantité de chaleur qui s'écoule par convection [143].

### IV.3.1. Nombres adimensionnels :

Le problème majeur préalable avant le calcul du flux consiste à déterminer ( $h_c$ ) qui dépend d'un nombre adimensionnel important de paramètres : caractéristiques du fluide, régime de l'écoulement, la température, et la forme de la surface d'échange.

Plusieurs nombres adimensionnels existent, et sont utilisés selon le cas, citons [144]:

#### IV.3.1.1. Le nombre de Reynolds :

Il représente le rapport des forces d'inertie aux forces visqueuses, il est donné par:

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot D}{\mu} \quad (20)$$

$Re > 10^4$  le régime est turbulent ;

$Re < 2300$  le régime est laminaire.

Où :

$\rho$  : Masse volumique du fluide en ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ;

$U$  : Vitesse du fluide en ( $\text{m}/\text{s}$ ) ;

$D$  : Dimension caractéristique de la géométrie considérée ( $\text{m}$ ) ;

$\mu$  : Viscosité dynamique du fluide ( $\text{kg}/\text{ms}$ ).

#### IV.3.1.2. Le nombre de Prandtl :

Il représente le rapport de la diffusivité moléculaire due à la quantité de mouvement par la diffusivité thermique, il est donné par:

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} \quad (21)$$

$c_p$  : Chaleur spécifique du fluide en ( $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ),

$\lambda$  : Conductivité thermique en ( $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ).

#### IV.3.1.3. Le nombre de Nusselt :

C'est un coefficient adimensionnel d'échange de chaleur, il représente le rapport du transfert de chaleur par convection à celui par conduction dans une couche de fluide d'épaisseur ( $e$ ). La forme adimensionnelle appropriée de ce paramètre ( $h$ ) est le nombre de Nusselt ( $Nu$ ) défini par:

$$Nu = \frac{h \cdot D}{\lambda} \quad (07)$$

$D$  : Dimension caractéristique de la géométrie considérée ( $\text{m}$ ).

A partir de la valeur locale de Nusselt, on peut premièrement, obtenir la valeur locale ( $h_c$ ) et ensuite, la valeur moyenne du coefficient du transfert de chaleur par convection ( $\overline{h_c}$ ) et une valeur moyenne du nombre de Nusselt ( $\overline{Nu_e}$ ).

$$\overline{Nu_e} = \frac{\overline{h_c} \cdot e}{\lambda} = f(Re_e, Pr) \quad (22)$$

#### IV.3.1.4. Le nombre de Grashof

Il représente le rapport des forces de flottabilité aux forces de viscosité, il est donné par:

$$Gr = \frac{\rho^2 \cdot \beta_T \cdot g(T_e - T_s) \cdot L^3}{\mu^2} \quad (23)$$

$L$  : Dimension caractéristique de la surface d'échange (m).

$\beta_T$  : Coefficient de dilatation de fluide en (K) pour les gaz parfaits, et il est équivalent à l'inverse de la température absolue :  $\beta_T = \frac{1}{T}$

#### IV.3.1.5. Le nombre de Rayleigh

Il fournit un critère de passage entre la convection libre laminaire et la convection libre turbulente, et il est défini par la relation :

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (24)$$

#### IV.3.1.6. Corrélations empiriques

##### A- Corrélations empiriques en convection libre

Les résultats expérimentaux relatifs au transfert de chaleur par convection naturelle, peuvent être corrélés par des expressions de type:

$$Nu = \phi(Gr) \cdot \psi(Pr) = C \cdot (Gr \cdot Pr)^m \quad (25)$$

A titre d'exemples, on peut citer:

1. Plaques et cylindres verticales:

- Pour  $10^4 < (Gr \cdot Pr) < 10^9 \Rightarrow Nu = 0.59(Gr \cdot Pr)^{0.25}$
- Pour  $10^9 < (Gr \cdot Pr) < 10^{13} \Rightarrow Nu = 0.021(Gr \cdot Pr)^{0.40}$

2. Cylindres horizontaux:

- Pour  $10^{-2} < (Gr \cdot Pr) < 10^2 \Rightarrow Nu = 0.1 \cdot 0.02(Gr \cdot Pr)^{0.148}$
- Pour  $10^2 < (Gr \cdot Pr) < 10^4 \Rightarrow Nu = 0.85(Gr \cdot Pr)^{0.148}$

3. Sphères de diamètre (D):

- Pour  $1 < (Gr_D) < 10^5 \Rightarrow \overline{Nu_D} = 2 + 0.392(Gr_D)^{0.25}$

**B- Corrélations empiriques en convection forcée**

❖ Ecoulement sur un plan

- Ecoulement turbulent:

$$\overline{Nu}_L = 0.035 Re_L^{0.8} \cdot Pr^{1/3}, \text{ pour } Re > 5 \cdot 10^5 \text{ et } Pr \geq 0.5$$

- Ecoulement laminaire:

$$\overline{Nu}_L = 0.628 Re_L^{0.5} \cdot Pr^{1/3}, \text{ pour } Re < 5 \cdot 10^5 \text{ et } 0.5 \leq Pr \leq 10$$

❖ Conduits et tubes

$$\overline{Nu}_D = 0.023 Re_D^{0.8} \cdot Pr^n; \text{ pour } 0.5 < Pr < 120; 6000 < Re < 10^7 \text{ et } \left(\frac{L}{D}\right) > 60.$$

n=0,4 en cas de chauffage et n=0,3 en cas de refroidissement.

❖ Conduits non circulaire

$$\overline{Nu}_{DH} = \overline{Nu}_C [1 + \{0.80(D_i/D_0)^{-0.18}\}^{15}]^{1/15}$$

**II.4. Le rayonnement**

Le rayonnement est le transfert d'énergie électromagnétique d'un milieu à haute température vers un autre milieu à basse température sans aucun support matériel (il peut s'effectuer dans le vide). En général, tout corps opaque ou partiellement opaque porté à une température supérieure à zéro Kelvin rayonne de l'énergie dans toutes les directions. Cette énergie est transportée sous forme d'une onde électromagnétique dont la propagation n'exige pas du support matériel. Ce type de transport de chaleur est analogue à la propagation de la lumière et il ne nécessite aucun support matériel, contrairement aux écoulements. Les gaz, les liquides et les solides sont capables d'émettre et d'absorber les rayonnements thermiques [141].

**II.4.1.Principe de transfert de chaleur par rayonnement**

C'est un mode d'échange de chaleur (d'énergie) sous forme d'ondes électromagnétiques selon la loi de Planck ( $E=h \cdot \nu$ ), tels que:  $\nu$  est la fréquence d'onde associée et  $h=6,62 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$  est la constante de Planck). Donc, il ne nécessite aucun support matériel, il est analogue à la propagation de la lumière. Il se propage de manière rectiligne à la vitesse de la lumière ( $C=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ). Le rayonnement thermique émis par les corps, se situe entre des longueurs d'ondes de  $0,1 \mu\text{m}$  à  $100 \mu\text{m}$ . Pratiquement, les trois modes de transfert de chaleur coexisteront. Mais, ce mode de transfert devient prépondérant à des températures supérieures aux températures ordinaires. Généralement, tous les corps (solides, liquides et gazeux) émettent un rayonnement de nature électromagnétique. On peut citer que, le vide et les gaz simples comme ( $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$  et  $\text{N}_2$ ) représentent des milieux parfaitement transparents mais, les gaz composés comme ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$  et  $\text{CH}_4$ ) et certaines liquides et solides comme (les verres et les polymères) sont partiellement transparents. La majorité

des solides et des liquides sont des corps opaques puisque ils stoppent la propagation du rayonnement juste au niveau de leur surface [145].

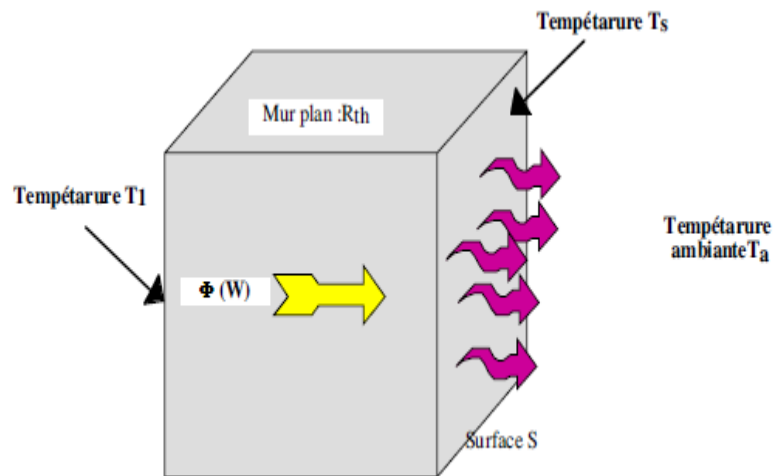


Fig. (IV.2) : Transfert de chaleur par radiation

### IV.4.2. Définitions préliminaires

Les grandeurs physiques seront désignées selon la composition spectrale ou la distribution spatiale du rayonnement [146]:

- ❖ **Grandeur totale:** elle est relative à l'ensemble du spectre;
- ❖ **Grandeur monochromatique:** elle concerne seulement un intervalle spectral étroit ( $d\lambda$ ), autour d'une longueur d'onde ( $\lambda$ );
- ❖ **Grandeur hémisphérique:** elle est relative à l'ensemble des directions de l'espace;
- ❖ **Grandeur directionnelle:** elle caractérise une direction donnée de la propagation.
- ❖ Pendant l'étude de l'équilibre thermique d'un système, tout corps doit être considéré comme:
  - **Emetteur:** s'il envoie un rayonnement lié à sa température (sauf s'il est parfaitement transparent);
  - **Récepteur:** s'il reçoit des rayonnements émis ou réfléchis et diffusés par les corps qui l'entoure.
  - **Corps opaque:** c'est un corps qui ne transmet aucun rayonnement à travers lui-même, il stoppe la propagation de tout rayonnement dès sa surface, il se réchauffe par l'absorption du rayonnement;
  - **Corps transparent:** c'est un corps qui transmet tout le rayonnement incident;
  - **Corps noir:** est celui qui absorbe toutes les radiations qu'il reçoit, il est caractérisé par un pouvoir absorbant ( $\alpha_{\lambda T}=1$ ). Tous les corps noirs rayonnent de la même manière à la même température, le corps noir rayonne plus qu'un corps non noir.
  - **Corps gris:** est celui dont le pouvoir absorbant ( $\alpha_{\lambda T}$ ) est indépendant de la longueur d'onde ( $\lambda$ ), il est caractérisé par ( $\alpha_{\lambda T} = \alpha_T$ ). Un corps gris à haute température pour ( $\lambda < 3\mu\text{m}$ , soleil), un corps gris à basse température pour ( $\lambda > 3\mu\text{m}$ , atmosphère).

- **Angle solide:** l'angle solide élémentaire ( $d\Omega$ ) sous lequel est vu, d'un point (O), le contour d'une petite surface ( $ds$ , assimilé à une surface plane) est donné par:

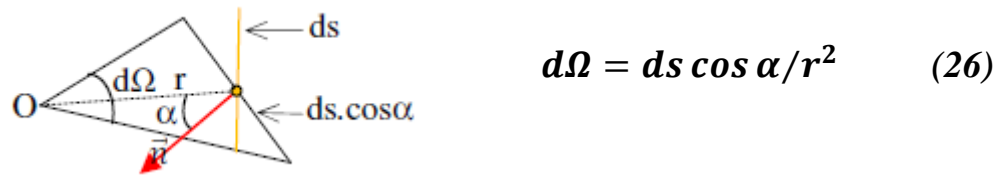


Fig. (IV.3) : Représentation schématique d'un angle solide

- Le flux envoyé par une surface ( $s$ ) sous un angle solide élémentaire ( $d\Omega$ ), entourant la direction ( $Ox$ ) est désigné par ( $d\phi_x$ ).
- Le flux d'une source ( $\phi$ ), c'est la puissance rayonnée par une surface ( $s$ ) dans tout l'espace qui l'entoure sur toutes les longueurs d'ondes et est donné par:

$$\phi = \int_s d\phi = \int_{\Omega} d\phi_x, [W] \quad (27)$$

- Le flux envoyé par un élément de surface ( $ds$ ) sous un angle solide élémentaire ( $d\Omega$ ) est désigné par ( $d^2\phi$ );
- Le flux envoyé dans tout l'espace par une surface élémentaire ( $ds$ ) est désigné par ( $d\phi$ ) et il est donné par:

$$d\phi = \int_{\Omega} d^2\phi \quad (28)$$

- **Emittance énergétique monochromatique:** l'émittance monochromatique d'une source à la température ( $T$ ) est donnée par:

$$M_{\lambda T} = d\phi_{\lambda}^{\lambda+d\lambda} / dS d\lambda ; [W/m^3] \quad (29)$$

Tels que  $d\phi_{\lambda}^{\lambda+d\lambda}$ : est le flux d'énergie émis entre les deux longueurs d'ondes ( $\lambda$ ) et ( $\lambda+d\lambda$ )

- **Emittance énergétique totale:** c'est la densité de flux émise par la surface élémentaire ( $ds$ ) sur tout le spectre des longueurs d'ondes, elle est donnée par:

$$M_T = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} M_{\lambda T} d\lambda = \frac{d\phi}{ds}; [W/m^2] \quad (30)$$

- **Intensité énergétique dans une direction:** c'est le flux par unité d'angle solide émis par une surface ( $ds$ ) sous un angle solide ( $d\Omega$ ) entourant la direction ( $Ox$ ), elle est donnée par:

$$I_x = d^2\phi_x / d\Omega \quad (31)$$

- **Luminance énergétique dans une direction:** c'est l'intensité énergétique dans la direction (Ox) par unité de surface émettrice apparente (la projection de la surface (s) sur le plan (⊥) à Ox), elle est donnée par:

$$L_x = I_x/ds_x = I_x/ds \cos \alpha = d^2\varphi_x/d\Omega ds \cos \alpha \quad (32)$$

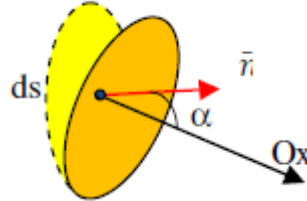


Fig. (IV.4) : Schéma montrant la luminance d'un élément de surface ds.

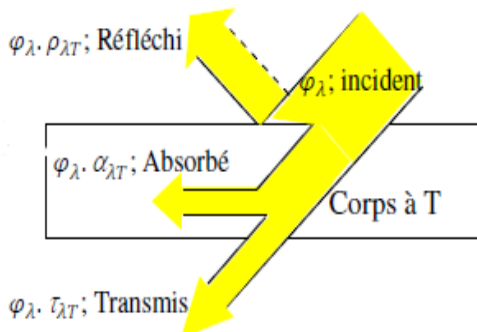
- **Eclairement** (relatif à un récepteur): C'est le flux reçu par unité de surface réceptrice, en provenance de l'ensemble des directions (≅ emittance).

#### IV.4.3. Processus de réception d'un rayonnement par un corps

Un point matériel chauffé émet un rayonnement électromagnétique dans toutes les directions situées d'un même côté du plan tangent au point matériel. Lorsque ce rayonnement frappe un corps quelconque, une partie de cette énergie peut être réfléchi, une autre transmise à travers le corps, et le reste est quantitativement absorbée sous forme de chaleur. (à mettre dans le chapitre correspondant) [145].

Lorsque un rayonnement incident d'énergie ( $\varphi_\lambda$ ) frappe un corps (C) à la température (T) (voir figure ci-contre), on remarque que:

- Une partie de l'énergie ( $\varphi_\lambda \cdot \rho_{\lambda T}$ ) est réfléchi par la surface (S) du corps;
- Une partie de l'énergie ( $\varphi_\lambda \cdot \alpha_{\lambda T}$ ) est absorbée par le corps en lui chauffant;
- Le reste de l'énergie ( $\varphi_\lambda \cdot \tau_{\lambda T}$ ) est transmise en continuant le chemin. Tel que;



$$\varphi_\lambda = \varphi_\lambda \rho_{\lambda T} + \varphi_\lambda \alpha_{\lambda T} + \varphi_\lambda \tau_{\lambda T} \quad (33)$$

D'où

$$\rho_{\lambda T} + \alpha_{\lambda T} + \tau_{\lambda T} = 1 \quad (34)$$

Fig. (IV.5) : Processus de réception d'un rayonnement par un corps.

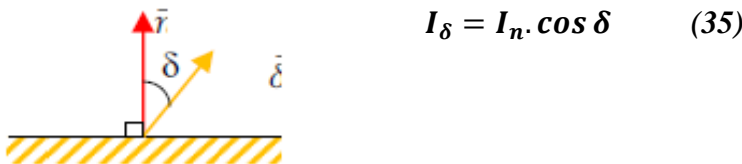
Qui représentent respectivement; le pouvoir monochromatique réfléchissant ( $\rho_{\lambda T}$ ), le pouvoir monochromatique absorbant ( $\alpha_{\lambda T}$ ) et le pouvoir monochromatique de transmittance ( $\tau_{\lambda T}$ ). Ces

pouvoirs sont fonctions de la nature du corps, son épaisseur, sa température (T), de la longueur d'onde ( $\lambda$ ), du rayonnement incident et de l'angle d'incidence.

**IV.4.4. Lois du rayonnement**

**1- Loi de Lambert**

L'intensité énergétique dans une direction ( $\delta$ ), est donnée par:



**Fig. (IV.6) :** Schéma montrant l'intensité énergétique dans une direction donnée

Lorsqu'un corps suit la loi de Lambert, l'emittance est proportionnelle à la luminance [147]:

$$M = \pi \cdot L; [W/m^2] \quad (36)$$

**2- Loi Kirchhoff**

– L'emittance monochromatique de tout corps est égale au produit de son pouvoir absorbant monochromatique ( $\alpha_{\lambda T}$ ) par l'emittance monochromatique du corps noir à la même température:

$$M_{\lambda T} = \alpha_{\lambda T} \cdot M_{0\lambda T}; [W/m^3] \quad (37)$$

Tel que  $M_{0\lambda T}$ : est l'emittance monochromatique du corps noir.

– L'emittance totale ( $M_T$ ) d'un corps gris à la température (T) est égale au produit de son pouvoir absorbant ( $\alpha_{\lambda T}$ ) par l'emittance totale ( $M_{0T}$ ) du corps noir à la même température.

**3- Loi de Planck**

L'emittance monochromatique du corps noir dépend seulement de la longueur d'onde ( $\lambda$ ) et de la température (T):

$$E_{\lambda} = \frac{d\phi_{\lambda}}{ds} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (38)$$

Tels que;

- $T$ : temprature en kelvin.
- $\lambda$ : longueur d'onde en  $\mu m$
- $C_1: 2\pi h c^2 = 3.74 \cdot 10^8 W \cdot \mu^4 m^{-2}$ ;  $c'$  est la constante de planck
- $C_2 = hc/k = 14400 \mu \cdot K$ ;  $k$ : constante de stefan – boltzmann
- $c$ : vitesse de la lumière ( $c = 3 \cdot 10^8 m/s$ )

#### 4- Lois de Wien

##### ❖ Première loi de Wien

La première loi de Wien permet d'exprimer ou d'évaluer les longueurs d'ondes correspondantes à l'émission monochromatique maximale (pour laquelle le rayonnement est maximal) en fonction de la température. Pour sa dérivation, il suffit d'annuler la dérivée de l'émission [147]:

$$\frac{M_{\lambda T}^0}{d\lambda} = 0 \Leftrightarrow \lambda_m = \frac{2898}{T}; [\mu m] \quad (39)$$

##### ❖ Deuxième loi de Wien

Cette loi exprime la valeur de l'émission monochromatique maximale, il suffit qu'on remplace ( $\lambda_m$ ) par sa valeur dans la loi de Planck pour obtenir:

$$M_{\lambda_m T}^0 = B \cdot T^5 \quad (40)$$

Avec ;  $B = 1.287 \cdot 10^{-5} [W \cdot m^{-3} \cdot K^{-5}]$  et  $T$  en kelvin.

#### 5- Loi de Stefan-Boltzmann

Elle donne l'émission totale du corps noir, avec la sommation de toutes les émissions monochromatiques pour toutes les longueurs d'ondes ou l'intégration de:

$$E = \frac{d\phi}{ds} = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda = M^o = \int_0^\infty M_{\lambda T}^0 d\lambda = \sigma \cdot T^4; [W/m^2] \quad (41)$$

Tel que :  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} [W/m^2 \cdot K^4]$ ; la constante de Stefan-Boltzmann.

# Partie pratique

# Chapitre V :

## Conception du prototype de cheminée solaire

## V.1. Introduction

Etant donné que le Sud Algérien dispose d'un gisement solaire assez considérable, une perspective peut s'ouvrir à nous et qui consiste à promouvoir le domaine des énergies renouvelables dans cette région en favorisant notamment, l'implantation des installations de conversion énergétique fonctionnant grâce au rayonnement solaire, dans le but d'alimenter en électricité les régions éloignées. Le but de cette démarche est d'offrir à la population locale toutes les commodités nécessaires à la vie quotidienne afin de réduire le phénomène d'exode et rendre la région plus attractive aux autres populations, notamment les touristes. Et pour ce fait, une étude préliminaire s'impose et elle doit se faire dans les meilleurs délais. Pour fonctionner au mieux, une cheminée solaire doit être construite dans une région très ensoleillée et disposant de nombreux espaces inhabités, ces dernières conditions sont disponibles dans la région d'Ouargla.

Notre étude a pour but d'améliorer et d'augmenter les valeurs de la performance de cheminée solaire. Ce travail a été effectué au laboratoire de génie des procédés (LPG) à l'Université d'Ouargla.

## V.2. Conception du prototype

La centrale à cheminée solaire a été conçue et fabriquée afin de mener une investigation expérimentale sur l'effet de plusieurs paramètres, notamment climatiques et techniques, sur les performances de ces centrales.

La cheminée solaire conçue est se compose de principalement:

- Collecteur d'air de 12 mètres de diamètre;
- Cheminée de 8 mètres de longueur.

Les dimensions du prototype sont résumées dans le tableau V.1. Où il a été Installé et testé dans le laboratoire de génie des procédés (LGP) de l'Université de Ouargla, au Sud de l'Algérie. L'emplacement du prototype a été choisi judicieusement pour s'assurer qu'il soit directement exposé au soleil sans aucune obstruction d'ombrage.

**Tableau (V.1) :** Dimensions principales du prototype (CCS).

Paramètre	Valeur (m)
Hauteur de la cheminée	8
Diamètre de la cheminée	0.2
Diamètre du collecteur	12
Hauteur de la sortie du collecteur au niveau du sol	1
Hauteur de l'ouverture à la périphérie	0.05-0.2



**Fig. (V.1) :** Photo du prototype d'une (CCS) à Ouargla, Algérie.

### **V.2.1. Conception du prototype et choix des dimensions**

Selon les études précédentes, les dimensionnels (la hauteur de la cheminée, son diamètre, et le diamètre du collecteur ...) affectent le rendement et la puissance totale générée. Le plus important est la hauteur de la cheminée par rapport au diamètre du collecteur qui a une influence très limitée sur le rendement. Cependant, le diamètre du collecteur a un impact majeur sur l'énergie récoltée. De plus, les dimensions de la centrale à cheminée solaire sont déterminées par le rapport entre la hauteur de la cheminée et le diamètre du collecteur. D'après des recherches antérieures, il a été constaté que le rapport du diamètre du collecteur à la hauteur de la cheminée a une large gamme de valeurs acceptables allant de (0.8 à 5). Dans cette investigation, un prototype de la centrale à cheminée solaire a été conçu en fonction du rapport entre le diamètre du collecteur et la hauteur de la cheminée. Cependant, le choix du diamètre de la cheminée a été fait en fonction de ce qui est disponible sur le marché intérieur, en tenant compte du diamètre approprié qui fournit un flux avec moins de friction.

### **V.2.2. Cheminée**

La cheminée est constituée d'un conduit en PVC standard de 0.2 m de diamètre, 6.2 mm d'épaisseur et 8 m de hauteur. Ce tuyau est recouvert d'une couverture en laine de verre (épaisseur 0.025 m et conductivité thermique  $\lambda = 0.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ) qui est utilisée comme isolant thermique pour réduire les pertes de chaleur de la paroi de la cheminée (Fig.V.2). L'isolation thermique est recouverte d'une feuille d'aluminium épaisse pour l'empêcher des influences extérieures, en particulier de l'humidité. Le conduit en PVC est montée sur un support en fer solide qui est fixé au

sol (Fig.V.3). Pour maintenir la cheminée verticalement, deux anneaux reliés à la cheminée ont été installés; chaque anneau était relié par trois fils d'acier galvanisé et renforcé par des fondations en béton.



**Fig. (V.2) :** Photo de la cheminée.



**Fig. (V.3) :** Structure métallique de la cheminée.

### V.2.3. Collecteur solaire

Habituellement, l'angle du collecteur conique incliné est un paramètre critique pour assurer une récolte maximale du rayonnement solaire. Pour atteindre cet objectif, l'angle de la pente et la latitude locale doivent être aussi égaux que possible; La ville d'Ouargla est située à la latitude de  $30.8^\circ$  Sud. Si nous concevons un capteur avec un angle de pente de  $30.8^\circ$ , la hauteur de sortie du collecteur appropriée est estimée au-dessus du niveau du sol en utilisant l'équation suivante :  $5 \left( \tan \frac{\pi}{6} \right)$ . Pour des raisons de frais de construction, l'angle d'inclinaison de notre collecteur de cheminée a été choisi à  $8^\circ$ ; par conséquent, en utilisant la relation précédente, la hauteur entre la sortie du collecteur et le niveau du sol est de 1 m.

Le collecteur solaire a une forme circulaire avec une inclinaison de 8 degrés et 12 m de diamètre. Le toit du collecteur solaire a été soulevé par un cadre en acier d'une hauteur de 0.2 m au rayon extérieur à 0.8 m au centre du capteur solaire directement sous l'entrée de la cheminée. Afin de permettre à l'air de circuler dans le système, la hauteur d'ouverture à la périphérie du collecteur a été choisie comme 0.02 mètre et a été construite pour être facilement réglable à différentes hauteurs (0.05-0.2 m) afin de fournir une entrée d'air (voir Fig.V.4). Deux matériaux ont été utilisés pour recouvrir le toit du collecteur, il s'agit d'un verre transparent de 0.005 m d'épaisseur et d'un film plastique PVC diffuseur thermique considère un assez bon facteur de transmission pour le rayonnement solaire égal à 0.88 avec 1 mm d'épaisseur (voir Fig.V.5). Cependant, le choix du matériau du toit du collecteur a été fait en fonction de ce qui est disponible sur le marché local.



**Fig. (V.4) :** Conception des couvercles appliqués à l'entrée du collecteur.



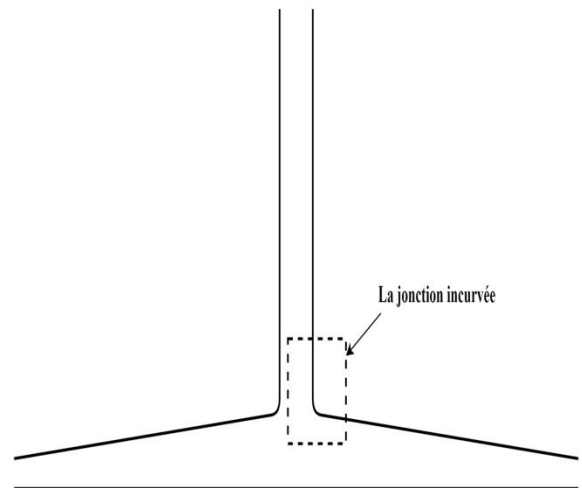
**Fig. (V.5) :** Les matériaux couvrent le toit du collecteur solaire (film plastique PVC et verre transparent).

Le socle central est relié à huit charnières qui sont uniformément réparties autour de la base. Ces charnières ont été assemblées à l'aide de tubes radiaux (diamètre 0,45 m, longueur 6 m, épaisseur 2 mm). Les tubes radiaux étaient soutenus par du fer en forme de T ( $0,03 \times 0,03 \times 0,03$  m) pour assurer une résistance suffisante pour résister les fluctuations météorologiques, en particulier aux vents forts et aux tempêtes de sable dans la région d'Ouargla, car l'installation pilote était à l'extérieur (voir Fig.V.6). Le piédestal centrale de la cheminée solaire est renforcée avec du béton pour assurer la stabilité du système.

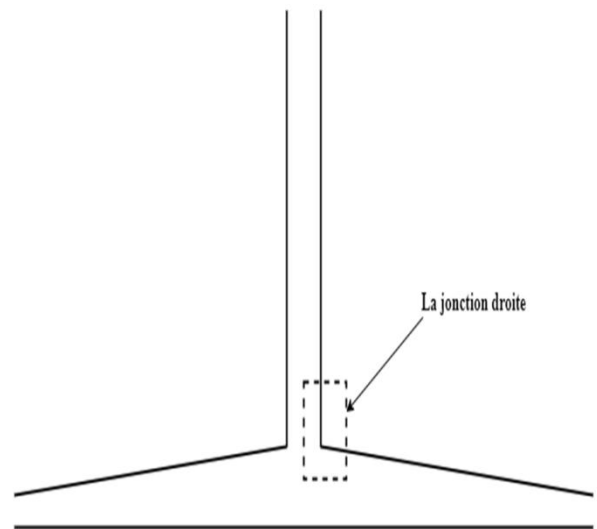
**Fig. (V.6) :** Construction de la zone du collecteur de cheminée solaire



L'air à l'intérieur d'une centrale à cheminée solaire se déplace horizontalement à travers le collecteur solaire, puis se tourne vers la direction verticale dans la cheminée. Le changement de direction d'écoulement se produit dans la section appelée la région de transition collecteur-cheminée. Il ne fait aucun doute que le champ d'écoulement dans la région de transition collecteur-cheminée est complexe en raison du changement de direction et de la confluence en aval du collecteur solaire. Nous constatons que quelques configurations géométriques ont généré des perturbations d'écoulement, qui se reflètent sur les comportements aérothermiques. Les modifications de forme géométrique peuvent éliminer cette perturbation dissipative. La jonction incurvée (comme le montre la fig.V.7) a été utilisée pour éliminer la recirculation et augmenter le débit d'air dans la région de transition du collecteur à la cheminée. Il a été comparé dans le cas d'une jonction droite (comme le montre la fig.V.8).

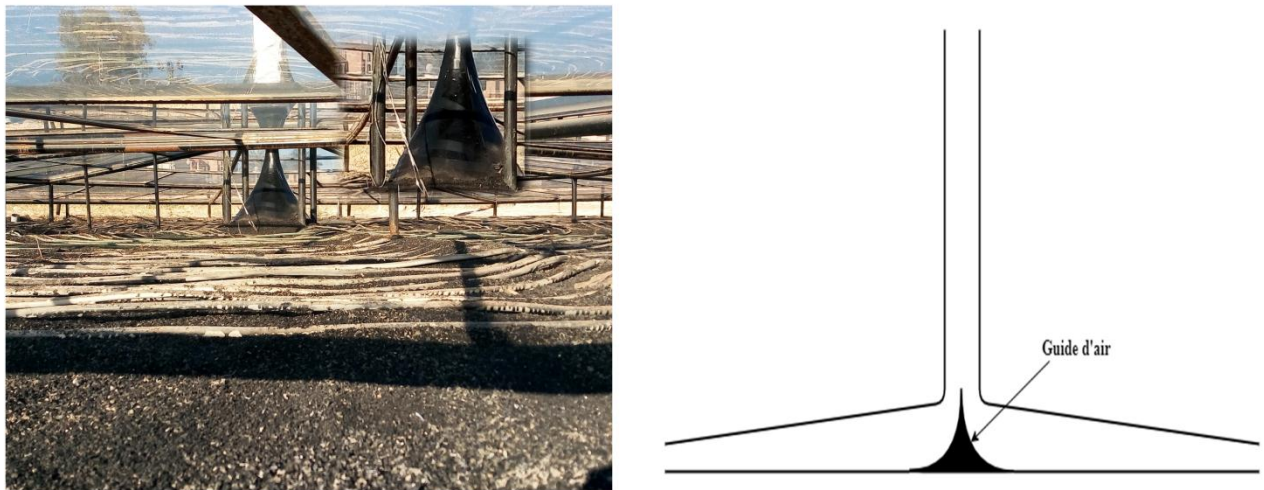


**Fig. (V.7) :** schéma de la jonction incurvée dans la région de transition collecteur-cheminée.



**Fig. (V.8) :** schéma de la jonction droite dans la région de transition collecteur-cheminée.

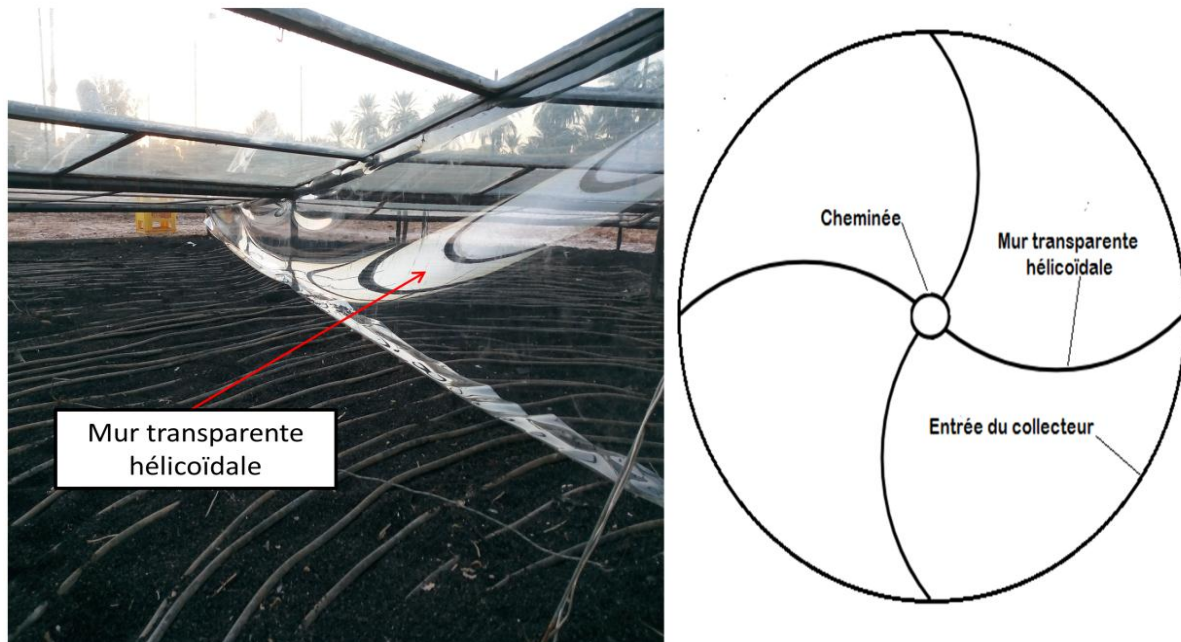
De plus, la nécessité de faire l'orientation de l'écoulement afin de faciliter le mouvement ascendant de l'air à l'entrée de la cheminée a été révélée; Guide d'air qui était similaire à un cône mais avait un profil incurvé a été ajoutée visant à réduire la perte causée par le changement de direction d'écoulement. Cette situation est illustrée à la fig.V.9 ci-dessous.



**Fig. (V.9) :** Système de régulation du débit de cheminée (Guide d'air).

### V.2.3.1 Système CCS à collecteur hélicoïdal

Lorsque la littérature a été examinée à la suite les mesures et les analyses des années passées, il a été observé que des turbulences se produisaient avec le déplacement de l'air chaud et de l'air froid dans la cheminée solaire, et pour éviter cela; un nouveau type de système de centrale à cheminée solaire à collecteur hélicoïdal est conçu; le collecteur a été séparé en quatre parties séparées les unes des autres par des murs hélicoïdale . Quatre murs transparents hélicoïdaux apparaissent sur la (fig.V.10), qui est en film plastique PVC; la raison de l'utilisation du film plastique PVC transparent comme matériau du mur est d'éviter l'ombrage du rayonnement solaire et choisir des matériaux peu coûteux. Grâce à la conception, l'air est amené à s'écouler le long du mur transparente hélicoïdale vers le centre du collecteur, par conséquent la longueur de trajet réelle le long de laquelle l'air est chauffé à l'intérieur du collecteur est de 10 m. Afin de réduire la perte de résistance, le mur hélicoïdale est installée dans la structure du collecteur.



**Fig. (V.10) :** La configuration de système CCS à collecteur hélicoïdal.

#### V.2.4. Isolation absorbante

Les performances de la centrale à cheminée solaire augmentent au cours de la journée expérimentale en raison de l'intensité solaire et de la température ambiante. A l'inverse, les performances se réduisent rapidement pendant la nuit en raison de la baisse rapide de la température ambiante et de la température de l'air chaud à l'intérieur du collecteur. Afin d'éviter les pertes de chaleur dans le sol du collecteur qui affectent considérablement l'efficacité de la centrale à cheminée solaire, un sol spécial est conçu pour absorber le rayonnement solaire pendant la journée et en même temps conserver la chaleur car il agit comme un support de stockage. Ainsi, pour éviter les pertes par le sol, des matériaux isolants ont été utilisés. La fosse a été forée à une profondeur de 0.3 m et un diamètre de 13 m contenant 7 couches isolantes différentes: gravier épais 0,05 m, sable 0.05 m, plastique, laine de verre-aluminium 0.025 m, 0.1 m de gravier, 0.1 m de sable et 0.01 m de plastique noir pour augmenter l'absorption maximale de l'intensité solaire comme le montre la (fig.V.11).

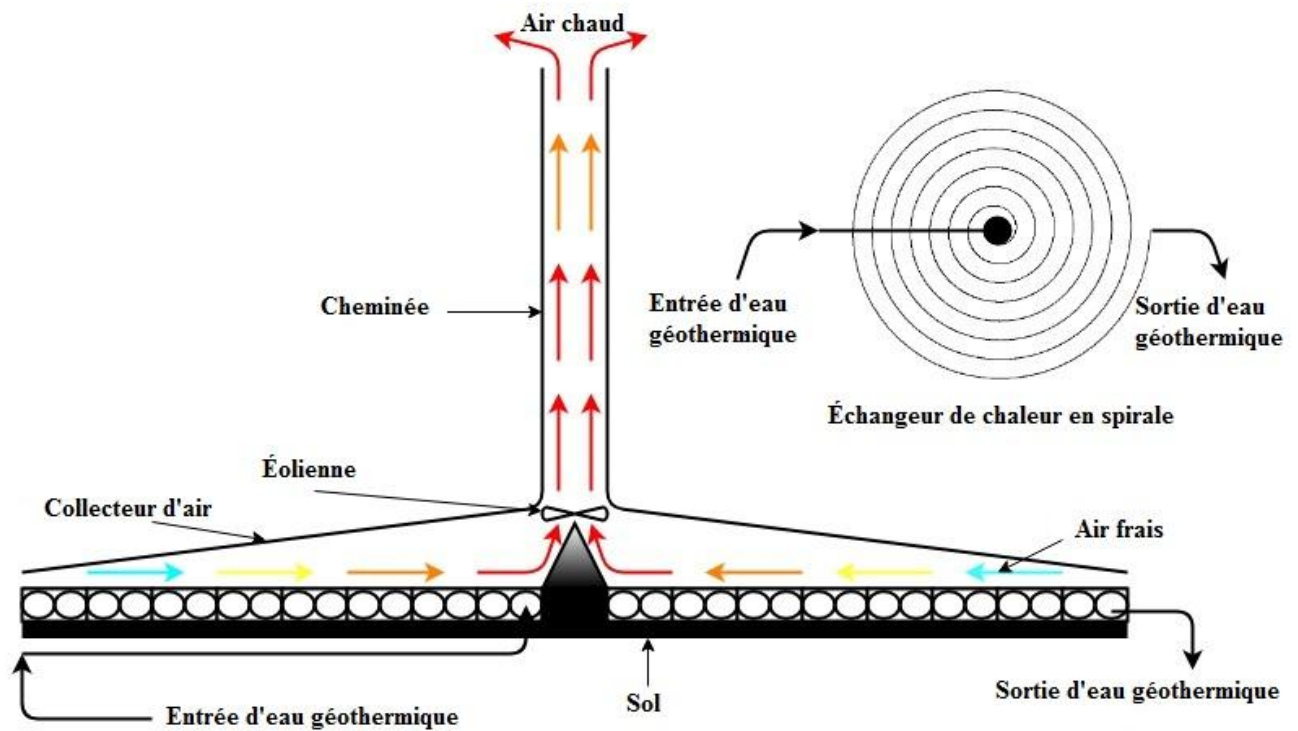


**Fig. (V.11) :** Les étapes d'isolation thermique du sol de la cheminée solaire (gravier épais, sable, plastique, folio en aluminium avec laine de verre, gravier, sable, plastique noir).

### V.3. Système hybride

La cheminée solaire est associée à un échangeur de chaleur (pipe en spirale), utilisant de l'eau géothermique. L'approvisionnement en énergie géothermique est l'une des raisons pour assurer le fonctionnement continu de la centrale à cheminée solaire en répondant à la demande d'énergie pendant la nuit indépendamment des changements climatiques externes. Il fournit un flux constant de chaleur au collecteur pendant la nuit, où la température baisse à l'intérieur du collecteur après le coucher du soleil. Dans ce cas, il est nécessaire de maintenir la température de l'air à un certain niveau à l'intérieur du collecteur, pour compenser la perte d'énergie.

Pour cette raison, on a utilisé le système hybride qui est représenté sur (fig.V.12), et qui fonctionne comme suit: L'eau chaude est pompée à partir du réservoir qui passe directement à travers les tuyaux placés au-dessus de la surface du sol sous le toit du collecteur. L'eau chaude commence à couler du centre du collecteur vers l'extérieur. L'échangeur de chaleur fournit la chaleur à l'air interne du collecteur. L'eau chaude échange la chaleur avec l'air et élève sa température conduisant à son écoulement à travers la cheminée provoquant, par conséquent, la rotation de la turbine générant l'énergie électrique.



**Fig. (V.12) :** Schéma de principe d'un hybride (CCS) avec un échangeur de chaleur géothermique.

Les conditions naturelles font du Sahara Algérien un endroit approprié pour construire des cheminées solaires. C'est donc un grand avantage car cela nous permet la continuité de fonctionnement de la cheminée. En effet, l'approvisionnement en énergie géothermique peut surmonter manque de rayonnement solaire et l'absence d'intensité solaire (pendant la nuit) et considérablement amélioré les performances de la (CCS) pour la production d'électricité.

En outre, plusieurs réservoirs géothermiques ont été identifiés en Algérie. Le réservoir géothermique albien couvre une superficie de 600 000 km<sup>2</sup> dans la région désertique; une grande partie de ce réservoir est capturée. L'eau est obtenue avec une grande quantité de températures autour de 42 °C à 98 °C grâce à l'exploitation de puits, comme le montre le tableau 1. La décharge thermique totale est estimée à 800 MW.

**Tableau (V.2) :** Caractérisation de l'eau géothermique de l'Albien dans le sud de l'Algérie.

Région	Température (°C)	Débit (L/s)	Profondeurs (m)
El-Oued	70	197	2000
Touggourt	98	150	1600
Ouargla	70-84	120	1000
Ghardaia	45-60	166	500
El-Goléa	42-50	22	200

### V.3.1. Conception de l'échangeur de chaleur

L'énergie géothermique albien est exploitée pour chauffer l'air à l'intérieur du collecteur. L'échangeur de chaleur en spirale se compose de serpentins de tuyaux multicouches disposés sur le fond du collecteur. La chaleur est ensuite diffusée à partir de l'eau thermique pour chauffer l'air provenant du périmètre du collecteur; l'eau géothermique est pompée directement dans le centre du collecteur avec une température chaude, puis s'écoule le long du périmètre du collecteur et sort à l'extrémité du tube en spirale à basse température.



**Fig. (V.13) :** Image montrant l'échangeur thermique en spirale

De plus, des granules de caoutchouc noir sont remplis entre des tubes d'échangeur thermique qui agissent comme un stockage thermique et maintiennent une plage de température moyenne, le caoutchouc noir se caractérise par son importante capacité d'absorption et son émissivité de rayonnement qui sont respectivement de 0.92 et 0.95 (Fig.V.14). La distance entre les tuyaux est de 10 cm. Les principales caractéristiques de l'échangeur thermique en spirale ont été résumées dans le Tableau V.3.

**Tableau (V.3) :** Principales dimensions et caractéristiques de l'échangeur thermique en spirale

Description	Valeur	Unité
Débit d'eau	(40 – 60)	L/min
Température de l'eau d'entrée	(75 – 85)	°C
Diamètre du tube	0.016	m
Distance entre les tuyaux	0.1	m
Diamètre de la spirale	11	m
Longueurs de spirale	700	m



**Fig. (V.14) :** Image d'une couche de granules de caoutchouc noir de 0,1 m.

### V.3.2. Dispositif d'eau chaude

Il s'agit d'un appareil composé de: Un réservoir d'une capacité de 200 L, une résistance conçue pour chauffer l'eau à l'intérieur du réservoir, un thermostat pour maintenir la température de l'eau entre (70 - 90) °C et une pompe intégrée délivrant un débit entre (40 - 60) L/min (Fig. V.15). Ce système alimente l'échangeur de chaleur en eau chaude, et qui va remplacer la source géothermique ALBIEN.



**Fig. (V.15) :** Dispositif d'eau chaude

#### **V.4. Les grandeurs mesurées pendant les expériences**

A partir de ces expériences, et pendant chaque demi-heure, et durant 24 heures, nous avons mesuré les grandeurs suivantes :

1. Radiance solaire;
2. Vitesse du vent;
3. Température ambiante;
4. Vitesse de l'air à l'entrée de la cheminée;
5. Température de l'eau de l'échangeur de chaleur;
6. Distribution de la température d'air dans le prototype.

#### **V.5. Les appareils de mesure utilisés dans l'expérience sont :**

##### **1. Appareil de mesure de rayonnement solaire global (Solari-mètre)**

Il est constitué d'une cellule solaire photovoltaïque, et un appareil électronique qui transforme le rayonnement en une lecture directe sur un petit écran numérique, et donne une valeur réelle du rayon incident sur la cellule solaire photovoltaïque en ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) avec une précision de  $<3\% \pm 1$  chiffre de 100 à 1000 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). (**Fig1-Annexe 2**)

##### **2. Appareil de mesure de la vitesse du vent (Anémomètre à hélice)**

L'anémomètre à hélice (UNI-T 361) pour mesurer la vitesse du vent à l'extérieur du collecteur, avec une précision de  $\pm (3\% + 0,5)$  m / s. Il fonctionne avec un l'hélice est un capteur cartésien mesurant la projection du vecteur vent sur son axe de rotation. (**Fig2-Annexe 2**)

##### **3. Appareil de mesure de la température ambiante et l'humidité (Hygromètre)**

C'est un appareil qui est installé à l'air libre à une hauteur entre (1 – 1,5 m) sur la surface de la terre pour mesurer : la température ambiante et l'humidité relative. (**Fig3-Annexe 2**)

##### **4. Appareil de mesure de la vitesse de l'air**

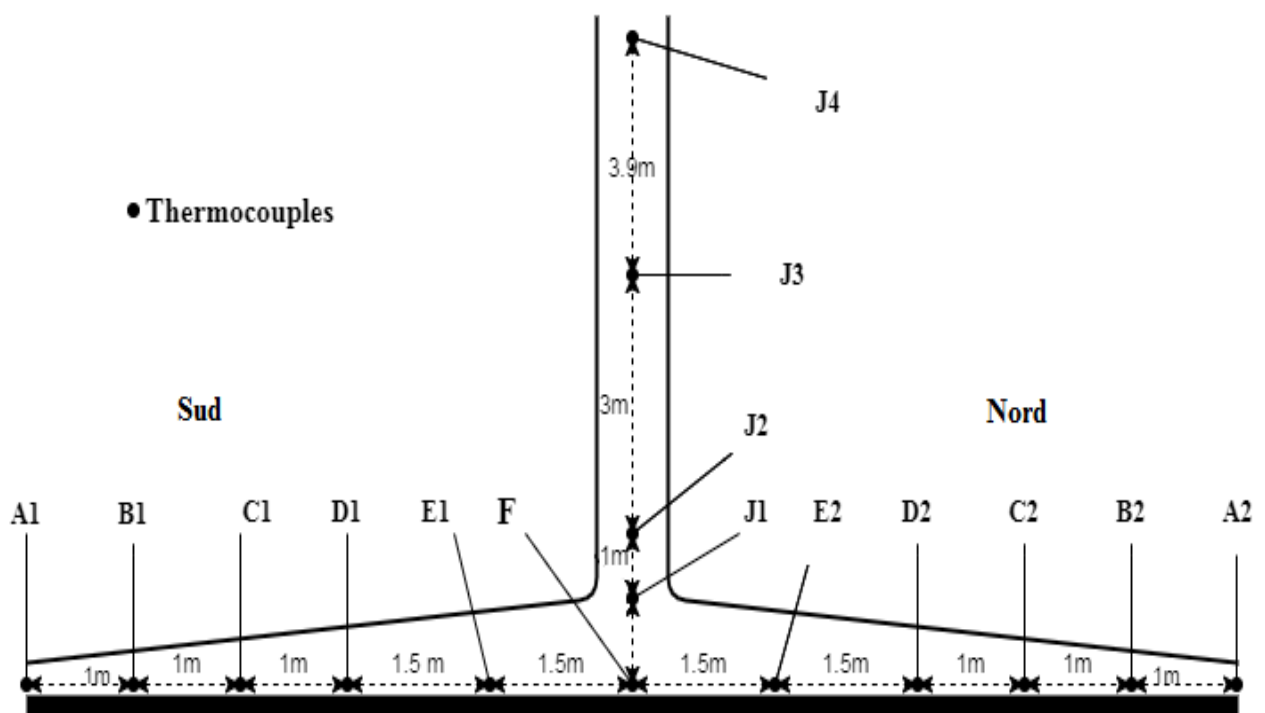
La vitesse de l'air à l'intérieur de la cheminée doit être mesurée ; il est nécessaire d'avoir un instrument de mesure ayant la meilleure précision possible, le choix est porté alors sur un anémomètre à hélice. Le testo 416 est un anémomètre compact avec sonde à hélice télescopique (long. max. 890 mm, diamètre 16 mm). Le débit dont le calcul est très précis ( $0,6 \rightarrow 40$  m/s ( $0 \rightarrow +60$  °C)), est affiché directement sur l'écran. (**Fig4-Annexe 2**)

## 5. Appareil de mesure de la température

C'est une paire de métal en forme de deux fils soudés avec une soudure autonome. Chaque thermocouple est lié à un appareil (millivoltmètre spécial) contenant un écran numérique. Cet appareil transforme la température en un courant électrique, d'où on peut lire à la suite la valeur de la température à l'endroit où les thermocouples ont été placés. (**Fig5-Annexe 2**) Le nombre de thermocouples doit être suffisant pour mesurer la température de toutes les surfaces et endroits (emplacements) dans la cheminée solaire.

### V.5. L'emplacement des thermocouples

La distribution de la température a également été mesurée dans quinze emplacements typiques. Des capteurs à thermocouples de type K (nickel-chrome / nickel-Alumel) ont été utilisés pour mesurer les températures à emplacements définis du collecteur et de la cheminée, comme sur la fig.V.16 qui représente les dimensions et la distribution du thermocouple. 4 thermocouples ont été installés à l'intérieur de la cheminée, pour donner une analyse précise de l'air en mouvement à travers la cheminée. 11 thermocouples ont été localisés dans le collecteur pour mesurer les températures de l'air le long du diamètre du collecteur, depuis les fronts Nord et Sud le long de l'axe médian du collecteur.



**Fig. (V.16) :** Diagramme schématique des dimensions et de la distribution des thermocouples dans le prototype de cheminée solaire.

# Chapitre VI :

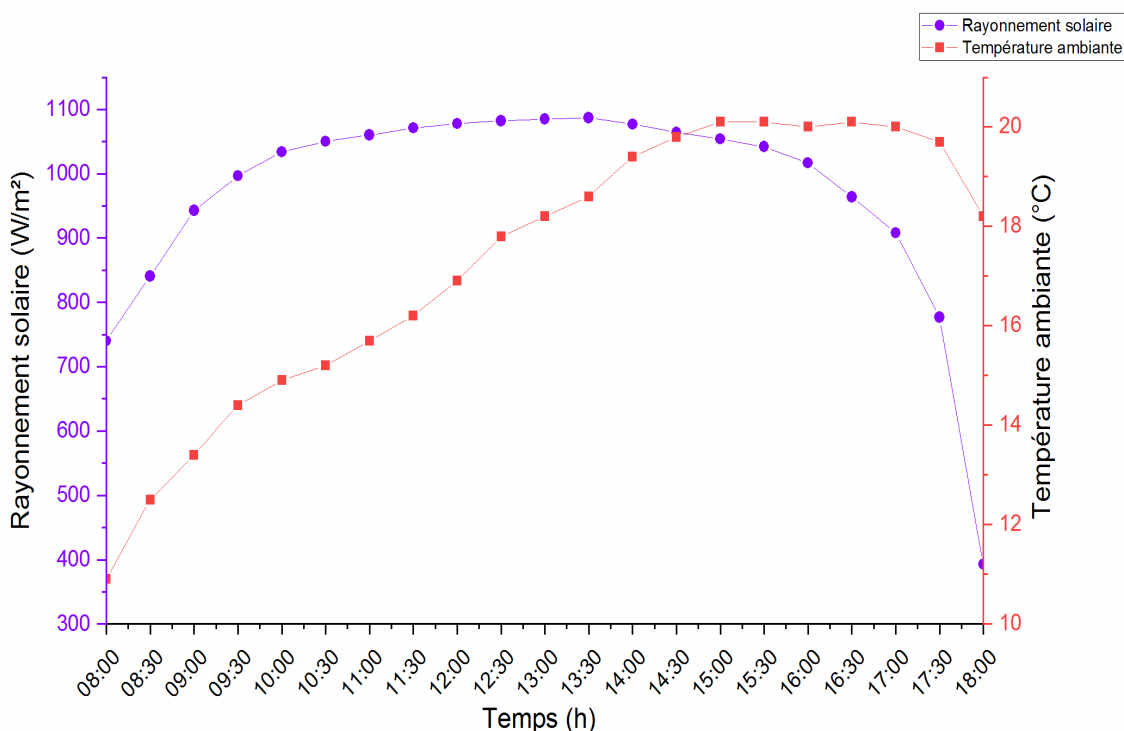
## Résultats et discussion

## VI.1. Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'analyse des résultats expérimentaux obtenus en ce qui concerne l'influence des conditions climatiques (rayonnement solaire et température ambiante) et des paramètres géométriques sur l'efficacité de production de la cheminée solaire, ainsi que l'influence du système d'hybridation sur les performances de la cheminée et sur la durée de son fonctionnement après le coucher de soleil. A travers les contours et les courbes de différentes grandeurs physiques, une discussion et interprétation auront lieu, afin de déterminer la configuration qui engendrera une amélioration du rendement de la cheminée solaire et son efficacité de production.

## VI.2. Champ de température

Une étude expérimentale de la variation du champ de température de l'entrée du collecteur au centre et le long de la hauteur de la cheminée a été réalisée. Pour se faire une idée de la variation des rayonnements solaires au cours de la journée, l'ensoleillement a été mesuré lors d'une journée typique de mars 2019; la température ambiante a également été tracée en fonction du temps comme il est présenté sur la fig. VI.1. Le maximum de rayonnement solaire au moment des mesures était d'environ  $1087 \text{ W/m}^2$  à 13h30. La température ambiante moyenne maximale de  $20.1 \text{ }^\circ\text{C}$  a également été enregistrée à 15h00.

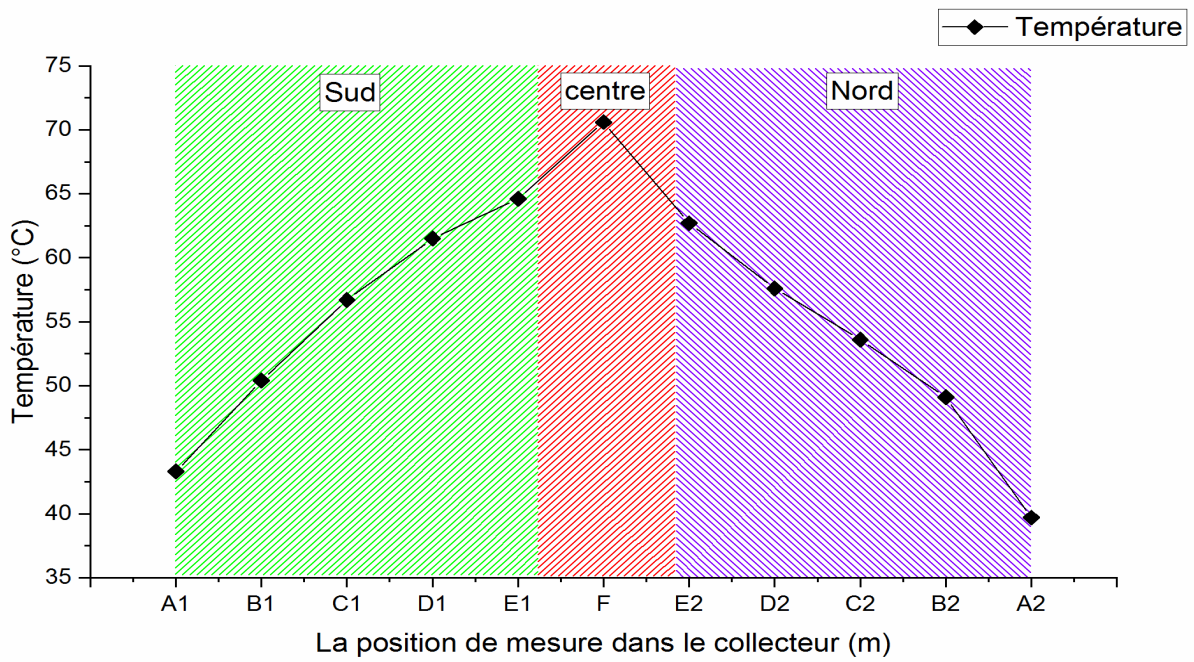


**Fig. (VI.1) :** Profils quotidiens de rayonnement solaire et de température ambiante pour une journée type (8 mars 2019).

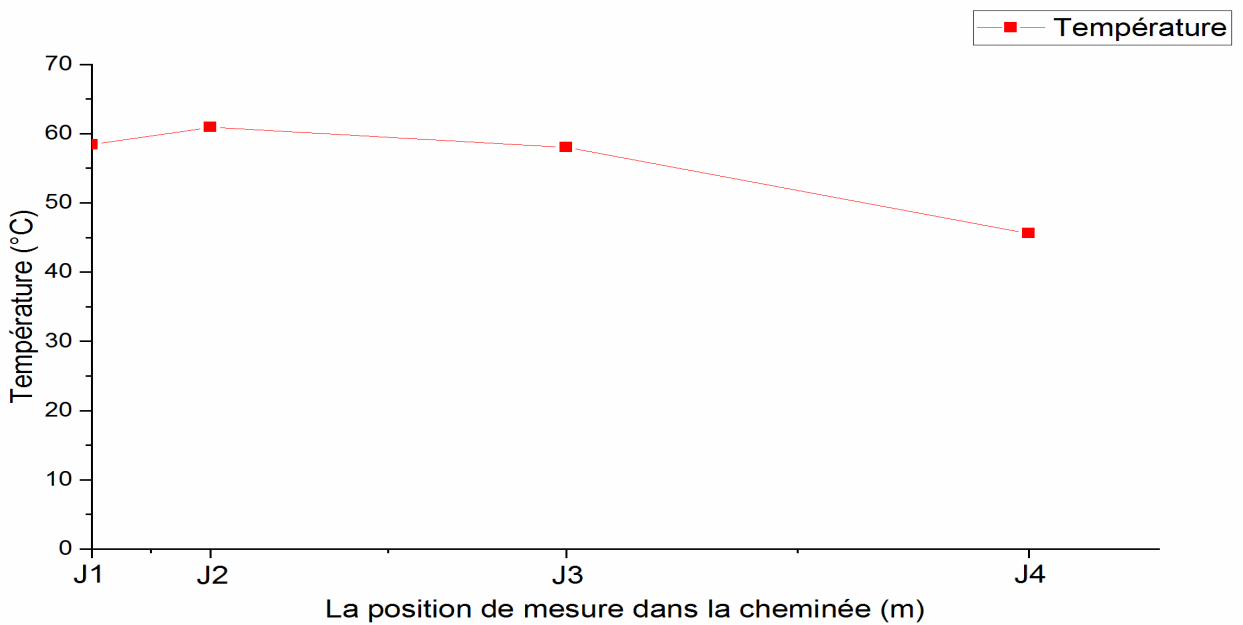
### VI.2.1. Distribution instantanée de la température

Les changements de température ont été obtenus à 13h30, le 8 mars 2019. La température ambiante était de 18.6 °C. Les températures de l'air le long du diamètre à l'intérieur du collecteur et les températures de l'air à l'intérieur de la cheminée en fonction de différentes hauteurs sont présentées dans les Fig. VI.2 et VI.3, respectivement. Certaines conclusions peuvent être tirées comme suit:

- 1- La figure VI.2 montre la répartition de la température de l'air sous le collecteur. La distribution de la température de l'air entre le côté sud et le côté nord varie considérablement. Cependant, la température de l'air aux points (A1-E1) du côté sud est supérieure à la température de l'air aux points (A2-E2) de la partie nord; car la fente sud du collecteur a été exposée pendant une plus longue période d'irradiation solaire.
- 2- L'irradiation solaire chauffe d'abord la couche absorbante, puis l'air froid en mouvement absorbe la chaleur de la couche absorbante chauffée par convection; les températures augmentent de la périphérie au centre du collecteur, en raison du déplacement de l'air. Par conséquent, la température de l'air a le niveau le plus élevé au centre du collecteur et la température la plus basse à l'ouverture du collecteur.
- 3- La lecture maximale de la température de l'air atteint 70.6 °C au point F, car le point F est proche du centre du collecteur. En revanche, la température de l'air au point A2 est la plus basse qui est égale à 39.7 °C, car le point A2 est situé dans la partie nord et a à voir avec l'ouverture du collecteur.
- 4- Le débit d'air est directement lié à l'effet de cette différence de température. La différence de température entre la température ambiante (8 mars 2019, à 13h30) et le point F (le centre du collecteur) a atteint 62 °C, cela crée un élan pour que le flux d'air génère plus d'énergie électrique.
- 5- La température de l'air à de long de la cheminée diminue de 60.9 °C à 45.6 °C, comme le montre la figure VI.3. Cela est dû à l'effet de la convection causée par le froid extérieur et à la perte de chaleur par frottement avec l'intérieur des murs de la cheminée lors de l'écoulement de l'air le long de la cheminée.
- 6- La température au point J1 à l'entrée de la tour est inférieure au point J2 en raison de la réponse d'un changement de vitesse brusque dû à la réduction de la zone d'écoulement et l'augmentation rapide des courants d'air et de la turbulence des molécules d'air tandis qu'elles montent dans la cheminée.



**Fig. (VI.2) :** Distributions des températures de l'air à différents points dans le collecteur au cours d'une Journée typique (selon hauteur de périphérie 0.05 m, température ambiante 18.6 °C, rayonnement solaire 1087 W/m<sup>2</sup>, date-heure: 8 mars 2019 – 13h30).

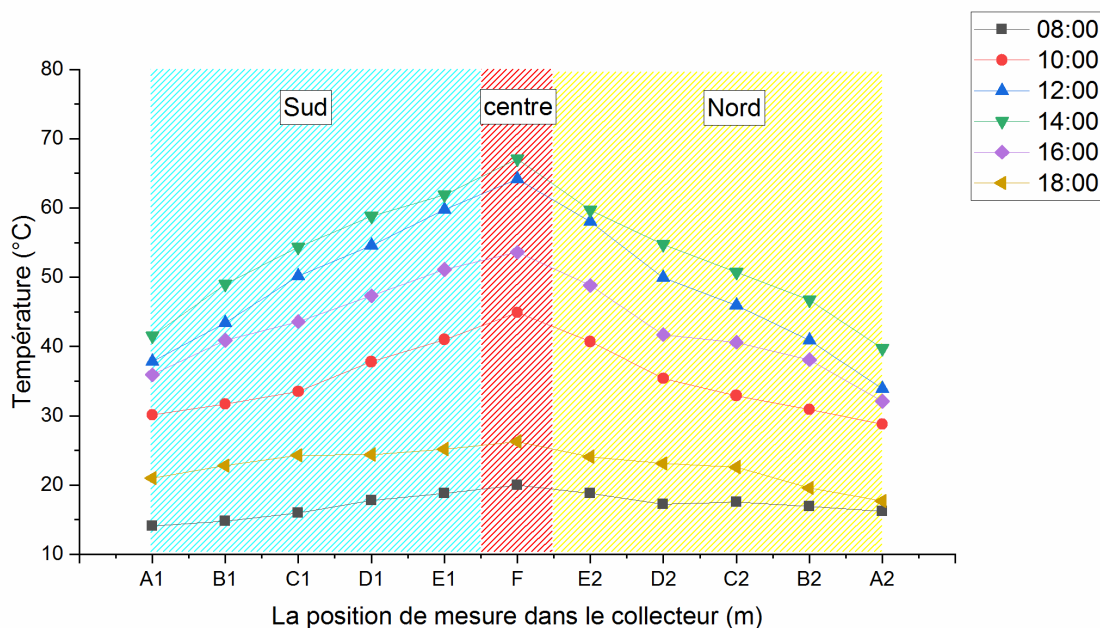


**Fig. (VI.3) :** Distribution des températures de l'air le long de la cheminée sur une Journée typique (selon hauteur de périphérie 0.05 m, température ambiante 18.6 °C, rayonnement solaire 1087 W/m<sup>2</sup>, date-heure: 8 mars 2019 - 13h30).

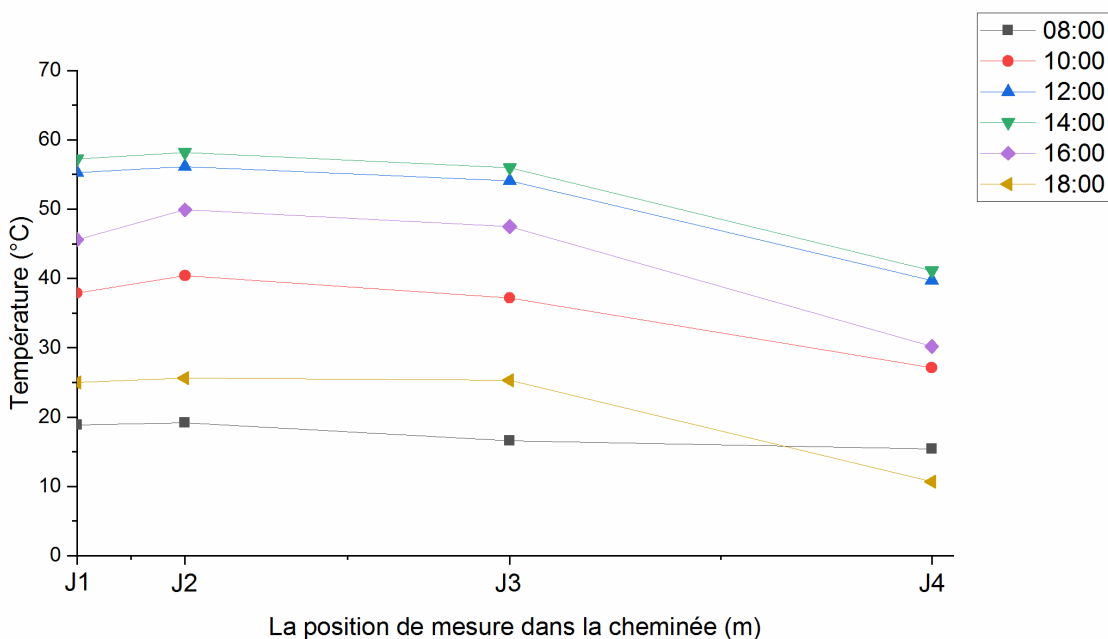
### VI.2.2. Distribution quotidienne de la température

La distribution de la température de l'air dans le collecteur et la cheminée a été mesurée à différents moments de la journée de 08h00 à 18h00 (le 8 mars 2019); Les figures VI.4 et VI.5 présentent cela. L'étude quotidienne montre que la température de l'air augmentant à la fois dans le collecteur et dans la cheminée avec une variation similaire au lever du soleil, atteint la valeur maximale à midi généralement entre 12h00 et 14h00, puis diminue avec le temps où le rayonnement solaire devient de plus en plus faible jusqu'au le coucher du soleil. Cela dépend principalement du fait qu'avant l'aube, l'absorbant avait restitué la quasi-totalité de la chaleur qui y était stockée la veille, et son chauffage dépendait du rayonnement solaire après l'apparition du soleil, ce qui provoque une élévation de sa température. Une fois que l'air interne est chauffé à une température suffisamment élevée par convection et rayonnement infrarouge de la couche absorbante chauffée, l'air interne est formé d'un courant normal. Le rôle de l'absorbeur est d'absorber et de stocker le rayonnement solaire, puis il est libéré sous forme de chaleur pour chauffer l'air entrant par convection et infrarouge. La température de l'air reste relativement stable à un niveau élevé pendant un certain temps entre 10h00 et 16h00 dans une journée typique. Dans l'après-midi, lorsque le rayonnement solaire devient beaucoup plus faible, l'absorbeur chauffé continue de libérer la chaleur stockée dans l'air interne, ce qui entraîne une diminution continue de sa température au cours du temps.

Selon la figure VI.5, le phénomène d'inversion thermique qui se produit durant la matinée à l'intérieur de la cheminée, peut expliquer par la formation d'une barrière thermique aux mouvements de convectifs qui limite le flux d'air à travers l'orifice de la cheminée. Cette inversion disparaît avant 10h00. Cependant, la distribution de température dans le sens vertical dans le collecteur reste normale. Selon la Fig. VI.4, avant le lever du soleil jusqu'à 08h00, la température de l'air à l'intérieur du collecteur est égale à la température ambiante. Après le lever du soleil, la couche absorbante absorbe et stocke le rayonnement solaire et, bien sûr, sa température est basse. Pour cette raison, une force d'entraînement faible est produite, de sorte que l'air peut à peine circuler à travers l'orifice de la cheminée en raison de la basse température et de la perte de chaleur à travers le collecteur et la paroi de la cheminée. Après une période de temps autour de 10h00, la température de l'air à l'intérieur du collecteur atteint un niveau qui permet la formation d'une force motrice appropriée pour pénétrer dans la barrière thermique. Après cela, l'air est constamment chauffé par convection à partir de la couche absorbante chauffée par le rayonnement solaire, et l'ouverture du périphérique du collecteur qui est généralement s'écoulé vers la sortie de la cheminée.



**Fig. (VI.4) :** Variations de température dans collecteur à différentes heures quotidiennes d'une journée typique (en fonction de la hauteur de la périphérie 0.05 m, température ambiante 18.6 ° C, date-heure: 8 mars 2019).



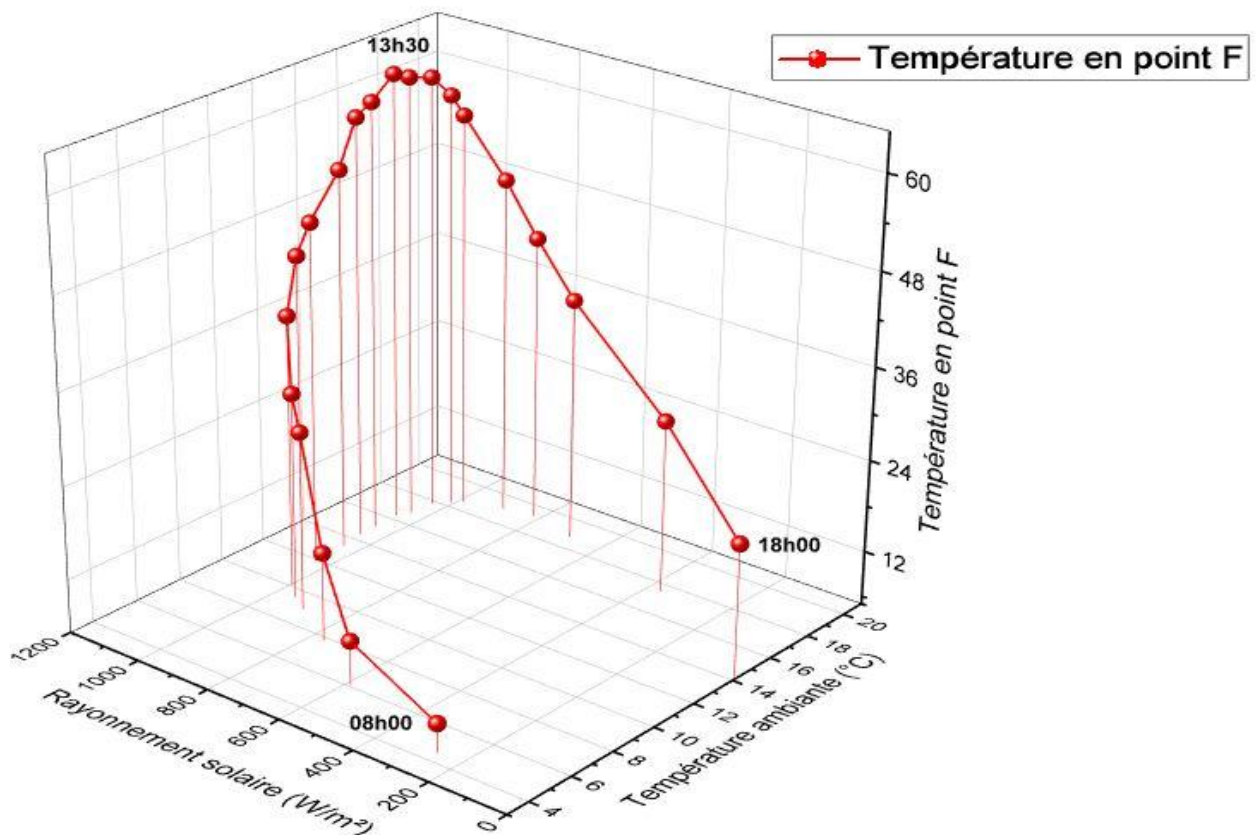
**Fig. (VI.5) :** Température de la cheminée change à différentes heures quotidiennes d'une journée typique (en fonction de la hauteur de la périphérie 0.05 m, température ambiante 18.6 ° C, date-heure: 8 mars 2019).

### VI.3. L'influence des conditions climatiques

Comme on le sait, il est très difficile de présenter une analyse empirique des effets des différents paramètres climatiques sur l'efficacité du système de centrale à cheminée solaire (CCS) en raison de la forte interdépendance de ces paramètres. Ainsi, l'analyse expérimentale du CCS en étudiant l'effet des paramètres climatiques sur la température de centre du collecteur et la vitesse d'air dans la cheminée en fonction du temps local pour devenir un moyen efficace de résoudre ce problème. Les principaux paramètres climatiques affectant l'efficacité du système sont le rayonnement solaire, la température ambiante et le vent. Ceux-ci seront discutés un par un.

#### VI.3.1. L'effet du rayonnement solaire et de la température ambiante sur la température de l'air:

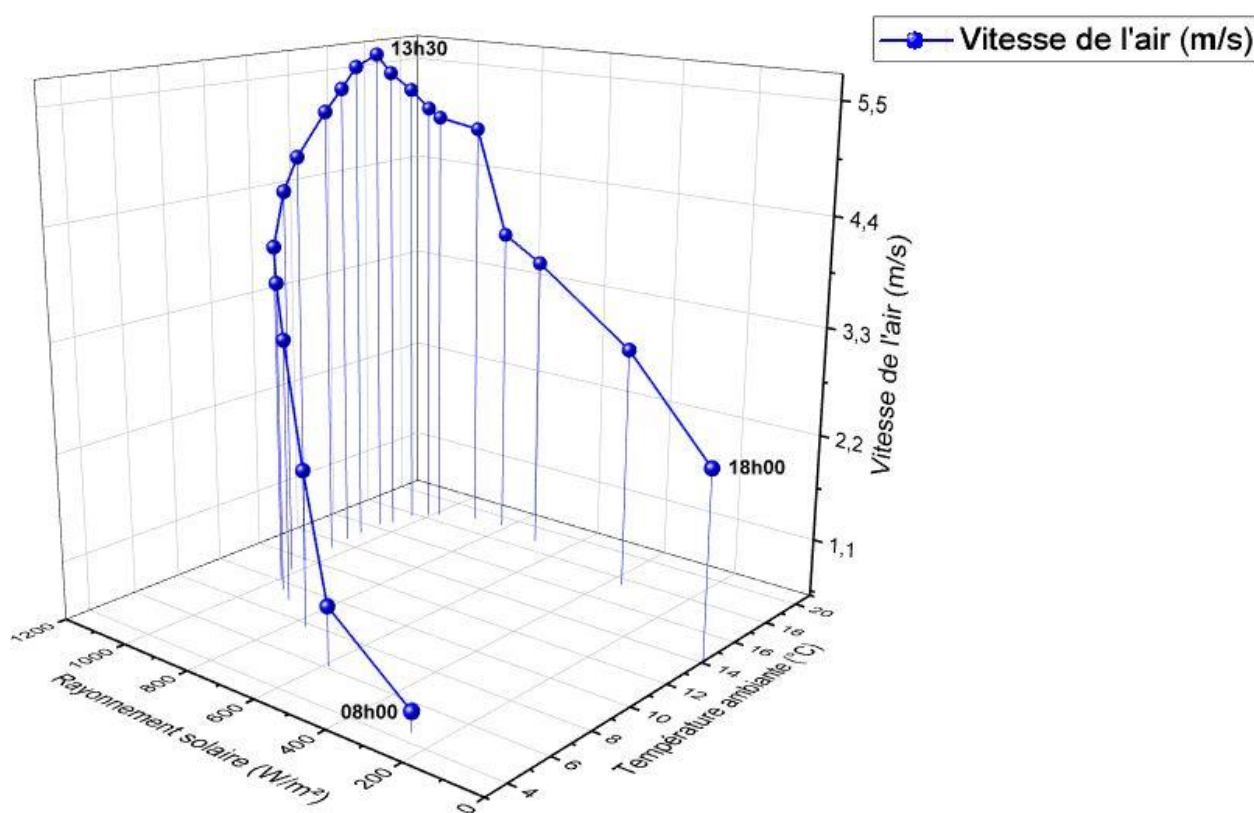
La figure (VI.6) montre une corrélation entre le rayonnement solaire ( $q$ ), la température ambiante ( $T_{amb}$ ) et la température au centre du collecteur ( $F$ ) en fonction du temps ( $t$ ). Cette figure montre que l'augmentation du rayonnement solaire entraînera une augmentation de toute la température, qui est la température ambiante ( $T_{amb}$ ) et la température au centre du collecteur ( $F$ ). L'augmentation de la température s'est produite parce que plus le rayonnement solaire ( $q$ ) reçu était élevé plus la chaleur était reçue. Comme on le sait que la chaleur est proportionnelle à la température.



**Fig. (VI.6) :** Corrélation entre l'intensité solaire, la température ambiante et la température au centre du collecteur.

### VI.3.2. L'effet de l'intensité solaire et de la température ambiante sur la vitesse de l'air:

La figure (VI.7) montre une corrélation entre le rayonnement solaire ( $q$ ) et la vitesse de l'air sur le col de la cheminée (Point J1). Cette figure montre que l'augmentation du rayonnement solaire ( $q$ ) entraînera une augmentation de la température de l'air ambiant ( $T_{amb}$ ) et une augmentation de la vitesse de l'air dans le col de la cheminée (Point J1). L'augmentation des températures causées par l'augmentation du volume d'air et la densité de l'air qui diminué. Le changement de la densité d'air sur le collecteur et le col de cheminée se traduira par la pression élevée. Ensuite, la haute pression exercera une force de flottabilité sur le col de la cheminée, la force de flottabilité se déplacera vers le haut jusqu'à la zone de basse pression. Le débit massique d'air a fait augmenter la vitesse de l'air dans le col de cheminée (Point J1).



**Fig. (VI.7) :** Corrélation entre le rayonnement solaire, la température ambiante et la vitesse de l'air sur le col de la cheminée.

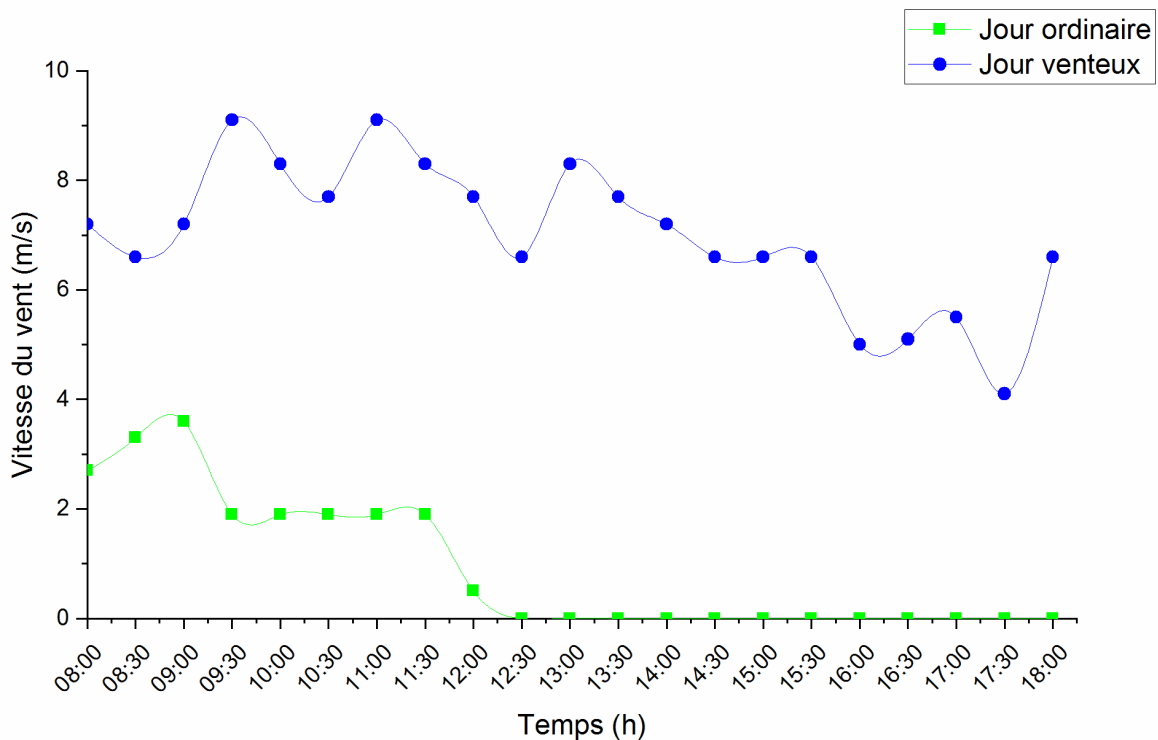
Cette figure montre que l'augmentation du rayonnement solaire ( $q$ ) entraînera une augmentation de la vitesse de l'air dans le col de cheminée (Point J1). L'augmentation de la vitesse de l'air au col de la cheminée (Point J1) fait que l'air se déplace plus rapidement vers la turbine et la puissance cinétique augmente. La rotation de la turbine entraîne une augmentation du régime de rotation et une diminution du moment d'une force de sorte que l'énergie de la turbine sera plus élevée. L'énergie de la turbine après ajustement au rendement du générateur peut être convertie en énergie électrique.

### VI.3.3. L'impact de la vitesse du vent

Le vent ambiant affecte le fonctionnement d'une centrale à cheminée solaire de plusieurs façons. Les pertes par convection du toit du capteur vers l'environnement sont augmentées lorsque le vent transversal souffle sur le toit. Le flux d'air à travers le CCS est également modifié par le vent soufflant à travers la sortie de la cheminée. De plus, le vent ambiant qui souffle sous le toit du collecteur affecte également le flux d'air à travers le CCS.

Les figures (Fig.VI.8, VI.9, VI.10), représentent l'impact de la vitesse du vent ambiant sur la performance de la cheminée solaire en fonction du temps local pour les deux cas étudiés (jour ordinaire et jour venteux).

La figure (VI.8) illustre l'évolution temporelle de la vitesse du vent pour un jour ordinaire et un jour venteux. La vitesse du vent et sa direction généralement n'étaient pas uniformes. La vitesse enregistrée pour un jour ordinaire (01/09/2018) variait entre 0 et 3.3 m/s; la valeur moyenne obtenue est de 0.9 m/s. Alors que la vitesse enregistrée pour un jour venteux (04/09/2018) est comprise entre 4.1 et 9.1 m/s; La valeur moyenne obtenue est de 7 m/s.

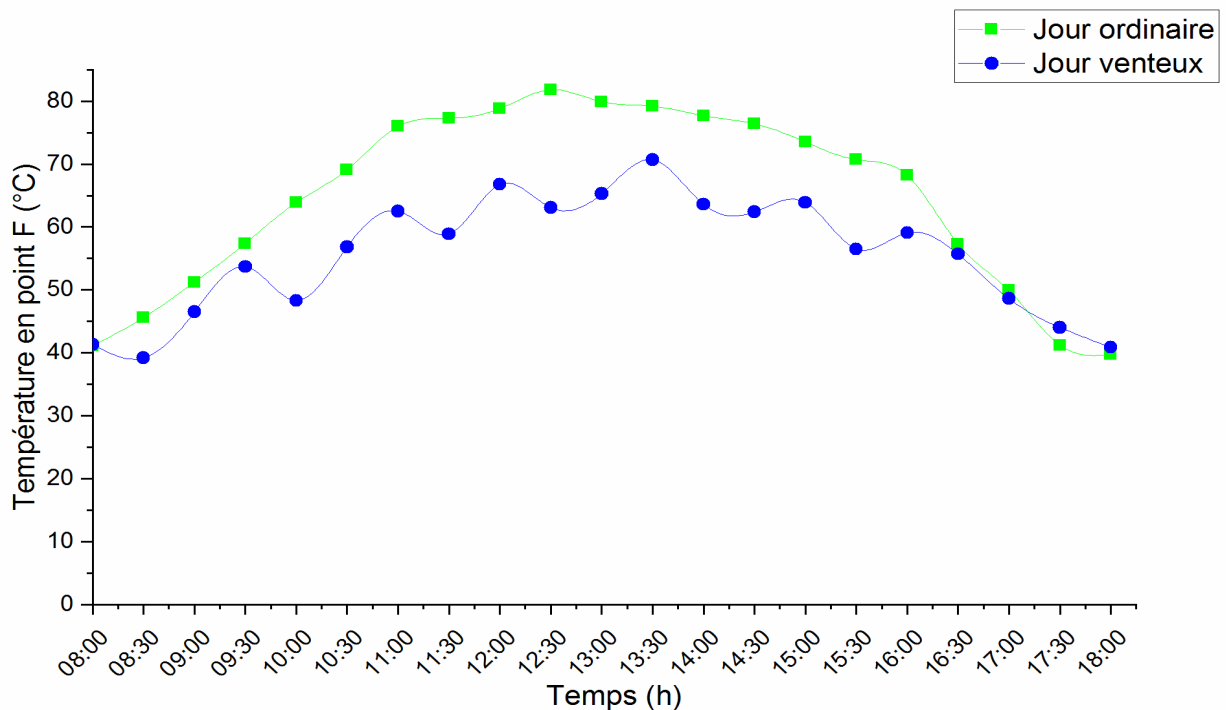


**Fig. (VI.8) :** Variation de la vitesse du vent durant deux journées type (Jour ordinaire et un Jour venteux).

La figure (VI.9) montre la variation de la température au centre du collecteur pour les :

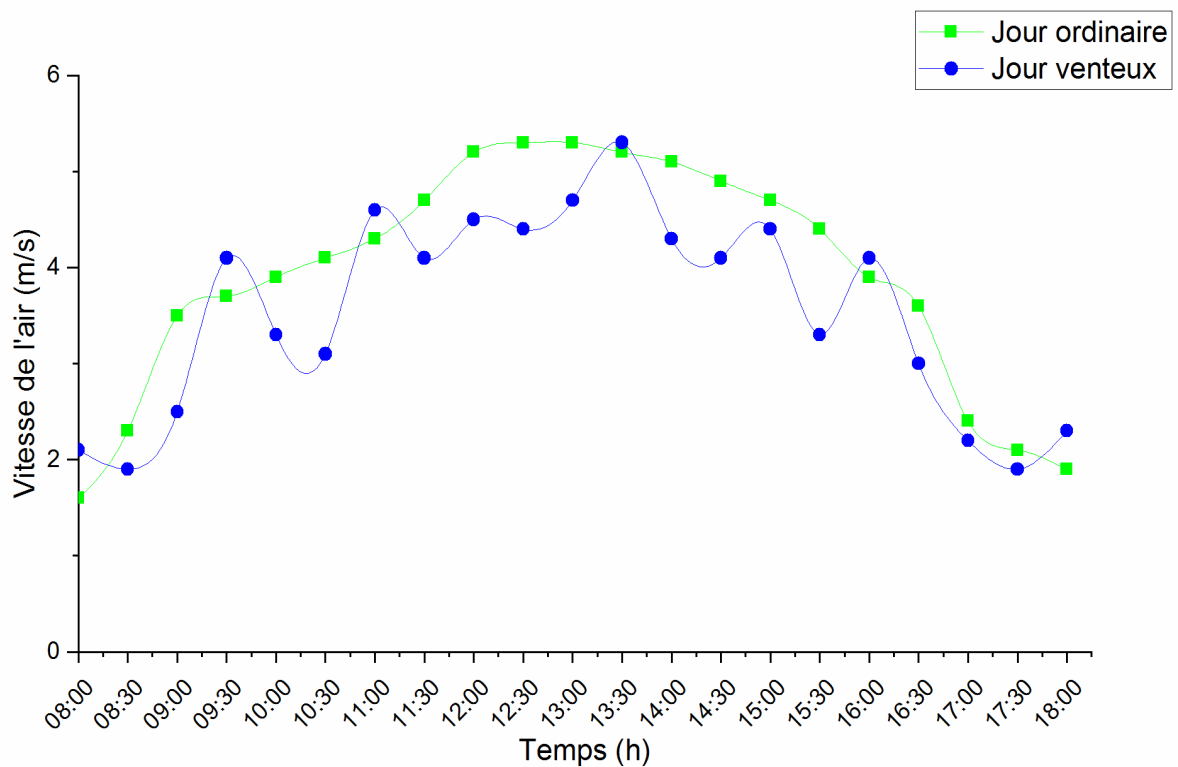
- Jour ordinaire
- Jour venteux

Dans le premier cas, On observe que la température de centre de collecteur au début était  $41.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  à 08h00 et augmente jusqu'au  $81.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  à 12h30. Recommence à diminuer jusqu'à  $39.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  à 18h00. Par contre, quand il y a du vent, la température au centre du collecteur atteint  $70.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  à 13h30; On note également le manque de stabilité de la température, car il y a une diminution et une augmentation la plupart du temps. On constate que lorsque la vitesse du vent est plus élevée, le système subit beaucoup de pertes qui conduisent à une diminution de la température au centre du collecteur. Ceci est dû au fait que le vent balayent le couvercle transparent, provoquant une perte de chaleur du collecteur vers l'environnement extérieur.



**Fig. (VI.9) :** Variation de la température au centre du collecteur dans deux cas différents (Jour ordinaire et Jour venteuse)

La figure (VI.10) montre une comparaison de la vitesse d'air à l'entrée de la cheminée le matin avec une journée venteuse et normale. La vitesse de l'air augmente en cas de temps orageux d'une façon irrégulière, en fonction de la vitesse des vents, pour atteindre sa valeur maximale de  $5.3\text{ m/s}$  à 13h30. Dans le cas normal, on observe une augmentation régulière de la vitesse de l'air pour atteindre  $5.3\text{ m/s}$  de 11h30 à 15h30. En effet, les conditions du vent provoquent du flux de convection de l'environnement vers la surface du collecteur, entraînant une légère augmentation de la vitesse de l'air à l'entrée de la cheminée mais avec une manière instable.



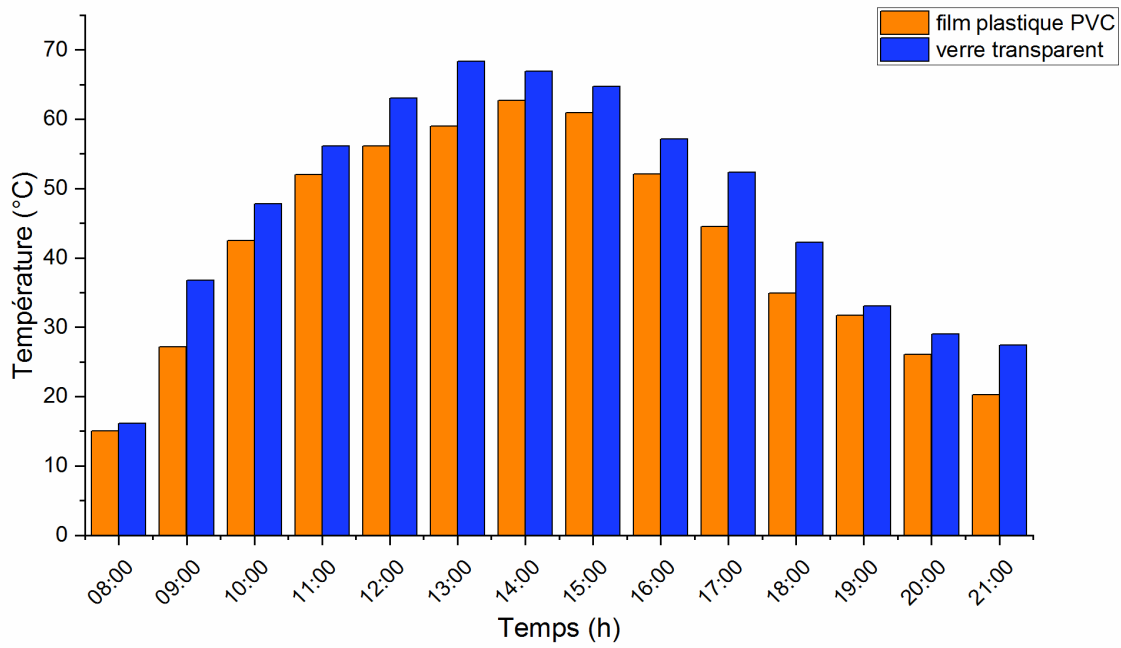
**Fig. (VI.10) :** Comparaison de la vitesse de l'air à l'entrée de la cheminée dans deux cas différents (Jour ordinaire et Jour venteux).

D'après les figures (VI.9) et (VI.10), il est évident que le vent dominants réduisent considérablement la puissance de sortie de la centrale à cheminée solaire. Ceci est principalement dû aux pertes de chaleur par convection du toit du collecteur vers l'environnement. Malgré des effets d'aspiration plus élevés à la sortie de la cheminée qui entraîneraient une plus grande production d'énergie, les conditions venteuses se traduisent par un coefficient de transfert de chaleur convectif accru, facilitant un plus grand flux de chaleur du toit du collecteur vers l'environnement et finalement une puissance plus faible.

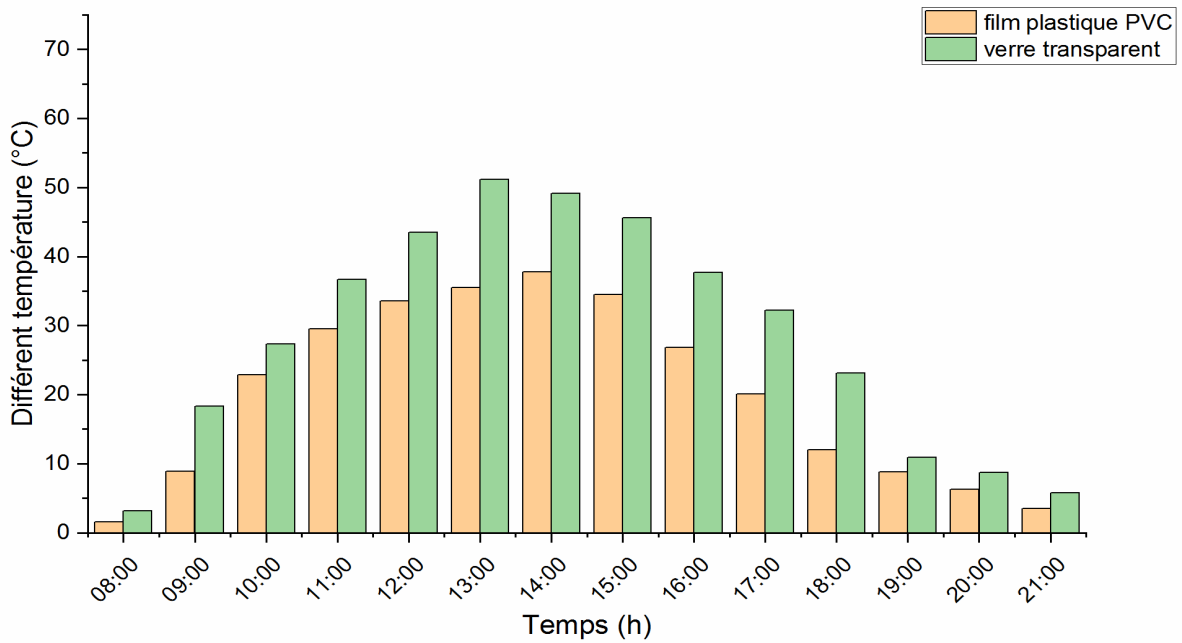
## VI.4. Impact des matériaux de fabrication

### VI.4.1. Influence du matériau de couverture

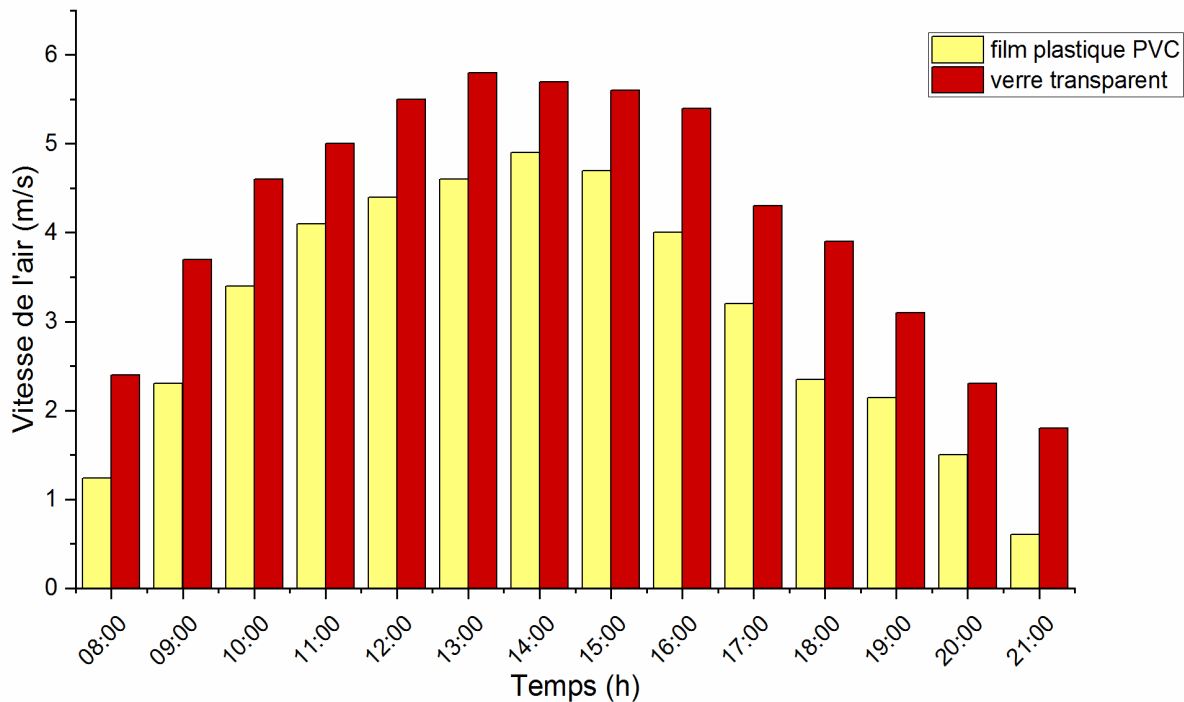
Une évaluation expérimentale du champ de température est réalisée pour étudier l'impact du matériau de couverture; dans les appareils solaires utilisent deux matériaux courants: un verre transparent de 0.005 m d'épaisseur et un film plastique PVC diffuseur thermique. La figure (VI.11) illustre le profil de température au centre du collecteur près du sol (au point F) pendant toute la journée du lever au coucher du soleil, dans les deux cas avec un film plastique PVC diffuseur thermique et avec verre transparent. Le premier cas utilisant un film plastique PVC diffuseur thermique comme matériau de couverture, la température maximale enregistrée au point F est de 62.7 °C à 13h30, de l'autre côté, lorsque le collecteur solaire est recouvert de verre transparent, la température au centre collecteur atteint 68.3 °C à midi 13h00; Ainsi, on peut observer que lorsque les matériaux avec des transmissions plus élevées à l'irradiation solaire sont utilisés, les températures du lit absorbeur sont plus élevées, ce qui entraîne des températures d'écoulement d'air plus élevées. La figure (VI.12) montre la différence de température entre la température du flux d'air à l'intérieur du collecteur et la température ambiante, l'écart de température entre le premier cas (avec un film plastique PVC diffuseur thermique) et le second cas (avec verre transparent) atteint parfois 10 à 15.7 °C. Où la différence maximale atteint 51.2 °C dans le cas du couvercle en verre transparent, cela s'explique par le fait que le verre transparent a une transmittance au rayonnement solaire plus élevée que le film plastique PVC diffuseur thermique (ce qui permet à une valeur plus élevée de rayonnement solaire d'atteindre le sol); la conductivité thermique du verre transparent est supérieure à la conductivité thermique du film plastique PVC diffuseur thermique. Par conséquent, le transfert thermique du couvercle au fond du collecteur est plus élevé. Le verre transparent a une transmittance moyenne de (90%) au rayonnement solaire et un facteur de conductivité thermique (1.1 W/m·°C). La comparaison des vitesses dans ces deux expériences montre que les vitesses maximales dans les deux cas (avec un film plastique PVC diffuseur thermique) et (avec verre transparent) sont respectivement de 4.9 m / s à 14h00 et de 5.8 m / s à 13h00. Les vitesses moyennes pour ces deux expériences sont de 3.10 et 4.22 m / s, en conséquence (figure.VI.13).



**Fig. (VI.11) :** Variation de la température par rapport au matériau des couvercles de collecteurs variables.



**Fig. (VI.12) :** Variation de la différence de température par rapport au matériau des couvercles de collecteurs variables.



**Fig. (VI.13) :** Variation de la vitesse de l'air par rapport au matériau des couvercles de collecteurs variables.

## VI.5. Effets dimensionnels géométriques

### VI.5.1. L'influence de la hauteur d'ouverture du collecteur

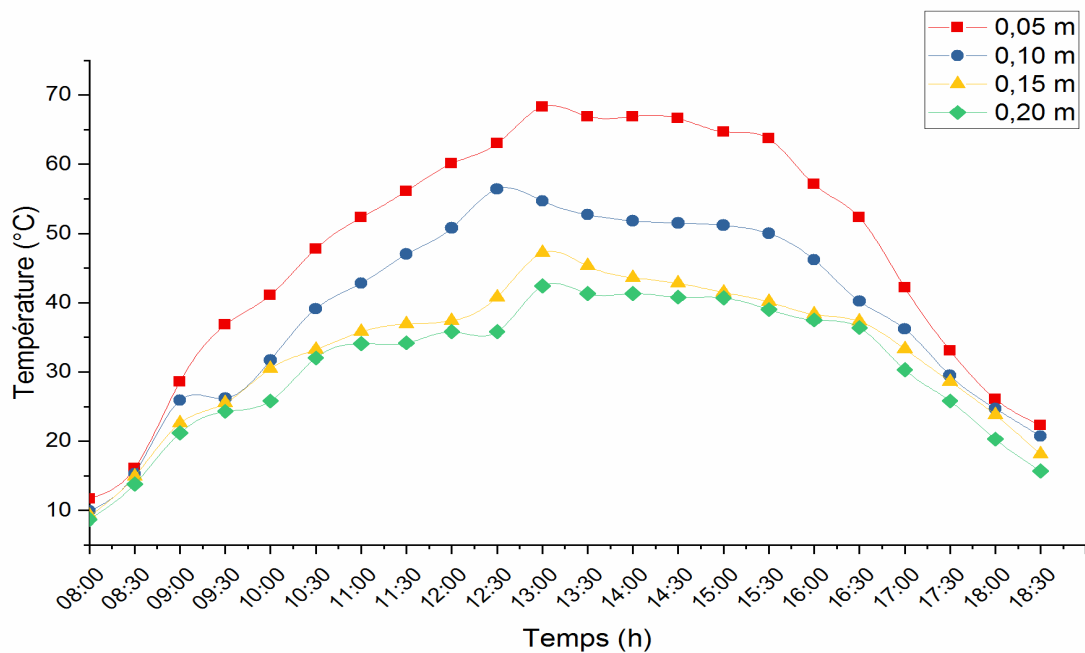
Dans le but de trouver le meilleur de la hauteur d'ouverture du collecteur pour produire plus d'énergie générée, l'influence de la hauteur d'ouverture du collecteur a été étudiée sur les performances de la cheminée solaire en prenant quatre hauteurs de 0.05 m à 0.20 m. Toutes les expériences ont été réalisées dans les mêmes conditions météorologiques pendant quatre jours consécutifs du 06 au 09 février 2019. La température ambiante moyenne était 21.5 °C et le temps était ensoleillé sans vent. Toutes les données étaient enregistrées du lever au coucher du soleil.

Les résultats suivants peuvent être rapportés, comme le montrent les figures VI.14, VI.15 et VI.16:

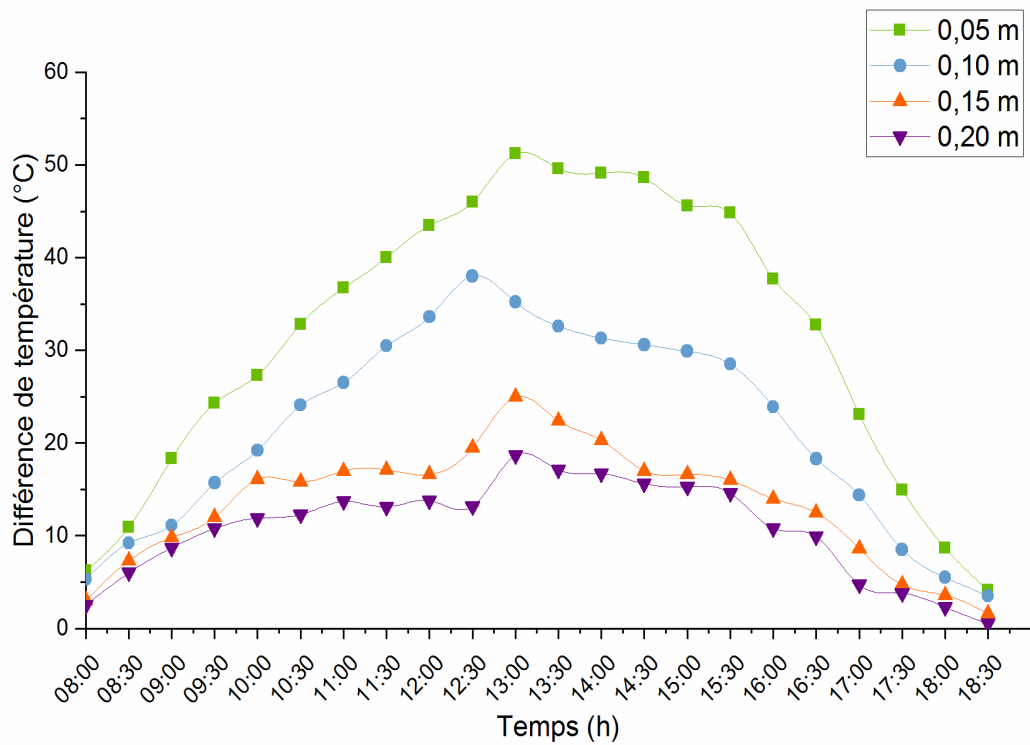
- 1- Une température maximale du collecteur a été enregistrer au point F (68.3 °C, 54.7 °C, 47.2 °C et 42.3 °C), la différence de température maximale entre la température du collecteur et la température de l'air ambiant est de (51.2 °C, 35.2 °C, 25 °C et 18.7 °C) et la vitesse maximale est de (5.8 m/s, 5.4 m/s, 4.7 m/s et 3.8 m/s) pour les hauteurs d'ouverture des collecteurs de 0.05 m, 0.10 m, 0.15 m et 0.20 m, respectivement. La différence de température augmente à cause de l'augmentation du débit d'air, donc une puissance de sortie plus élevée.

- 2- Dans le premier cas (0.05 m), la température de l'air est plus élevée que dans les autres cas. La raison principale de cette observation est que le débit d'air d'entrée est très faible dans ce cas, d'où une augmentation du taux de transfert de chaleur. Même, dans le collecteur, l'ouverture d'air est presque fermée, le vent a moins d'impact sur la température de l'air à l'intérieur.
- 3- La réduction de la température dans les deux cas (0.15 m) et (0.20 m) indique des pertes thermiques à l'intérieur du collecteur due à l'impact négatif du vent ambiant sur le flux d'air chaud. Cela signifie que dans ces cas, moins d'occurrence de réactions de serre. Cette perte de température peut avoir un impact négatif sur les performances du système car elle est fortement affectée par la différence de température entre le centre du collecteur et la température ambiante.
- 4- Il est évident que la hauteur de la périphérie d'ouverture du collecteur a un effet négatif sur la vitesse d'air. La diminution de la hauteur périphérique d'ouverture du collecteur entraîne une augmentation de la vitesse d'écoulement de l'air.

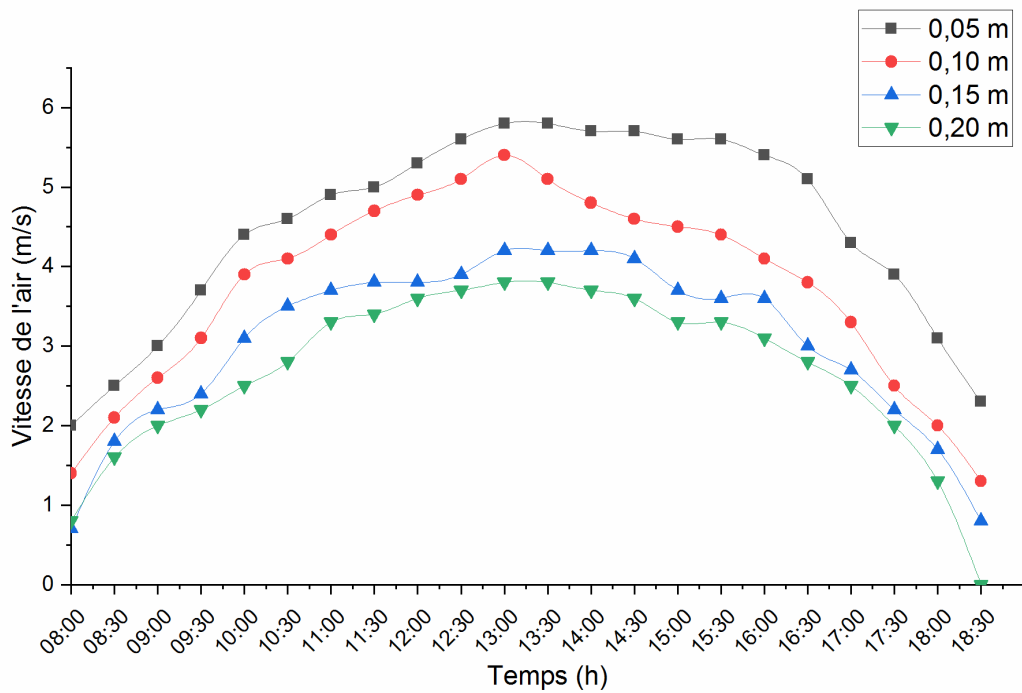
On peut conclure que la réduction de la hauteur d'ouverture du collecteur affecte de manière significative sur les performances de la centrale à cheminée solaire, ceci conformément aux rapports de Sandeep et al. [148] et Ghalamchi et al. [149]. Le meilleur rendement présentée dans cette étude avec une condition d'ouverture de 0.05 m, donc elle a été sélectionnée dans les expériences suivantes.



**Fig. (VI.14) :** Comparaison des températures mesurées de collecteur avec les hauteurs d'ouverture de collecteur au point F, date-heure: 06-09 février 2019.



**Fig. (VI.15) :** Comparaison de la différence de température mesurée avec les cas de hauteurs d'ouverture de collecteur au point F, date-heure: 06-09 février 2019.

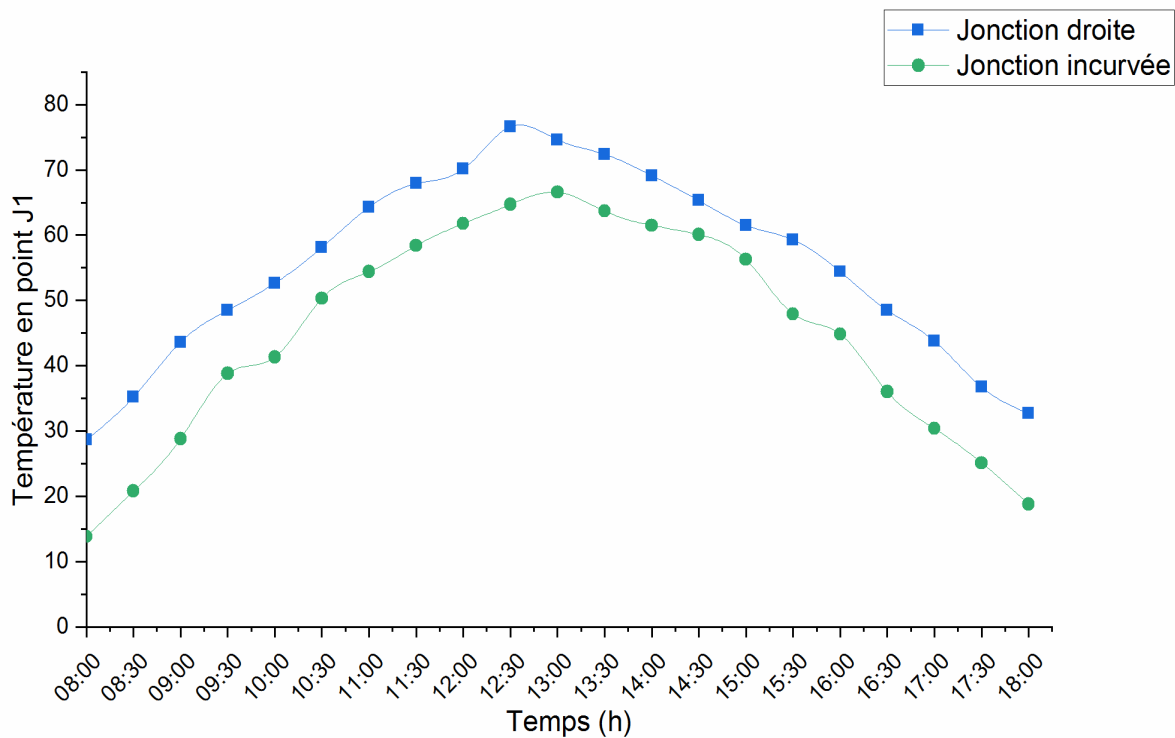


**Fig. (VI.16) :** Comparaison de la vitesse de l'air mesurée avec les cas de hauteurs d'ouverture de collecteur, date-Heure: 06-09 février 2019.

### VI.5.2. Effet de la région de transition collecteur-cheminée

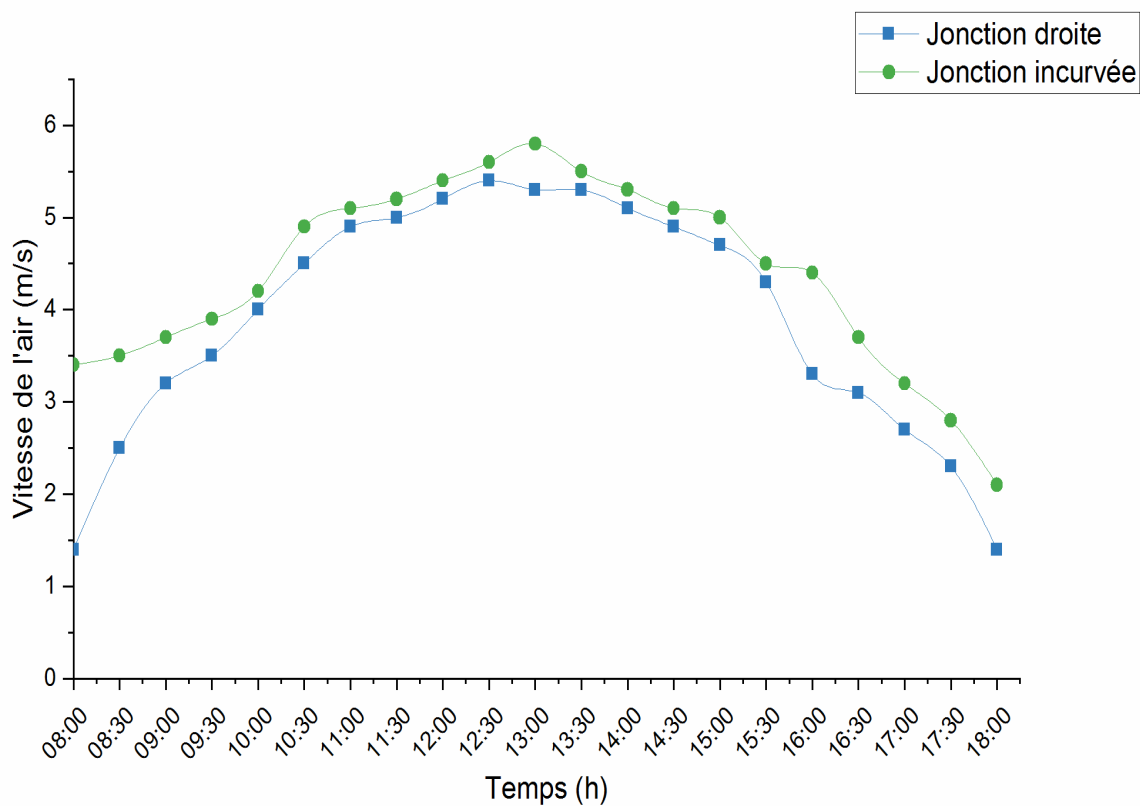
Dans cette partie, nous allons considérer l'effet du «type de jonction collecteur-cheminée» sur les paramètres de performance de la centrale à cheminée solaire. Deux types de centrales à cheminée solaires ont été expérimentés. Chacun diffère par le type de jonction, droite ou incurvée comme le montrent les figures (Fig.V.7 et Fig.V.8), les résultats de deux tests sont présentés graphiquement sous forme de courbes de performance pour prédire les performances de l'installation. Les résultats des données expérimentales des deux tests sont présentés sur les figures (VI.17) à (VI.18).

La figure (VI.17) montre qu'une jonction droite a la courbe de distribution de la température du flux d'air la plus élevée qu'une jonction incurvée. Ceci est dû à la différence de vitesse. Où, à mesure que la vitesse augmente, le débit massique d'air augmente. Cela provoque plus de flux d'air qui capte une grande quantité d'énergie lorsqu'elle entre dans le collecteur et sort de la cheminée.



**Fig. (VI.17) :** Comparaison de la température du flux d'air mesurée en point J1 pour les types de jonction.

La figure (VI.18) montre que la jonction incurvée a la courbe de distribution de la vitesse d'écoulement d'air la plus élevée qu'une jonction droite; tandis que près de la section d'entrée de la cheminée, la vitesse d'écoulement d'air de la jonction droite subit une baisse soudaine par rapport à la jonction incurvée. Ceci en raison des pertes mineures dues à la géométrie d'entrée. À une jonction droite, les pertes mineures seront élevées en raison de ce que l'on appelle le «phénomène de la veine contractée». Selon ce phénomène, la vitesse d'écoulement augmente brusquement au niveau de la zone d'entrée avec une chute brutale de pression en raison de la séparation d'écoulement et de la recirculation au niveau de la zone d'air mort près de la jonction droite dans la zone d'entrée de paroi de cheminée (Point J1). Ainsi, l'utilisation d'une jonction incurvée évitera ce phénomène et améliorera la vitesse d'écoulement.



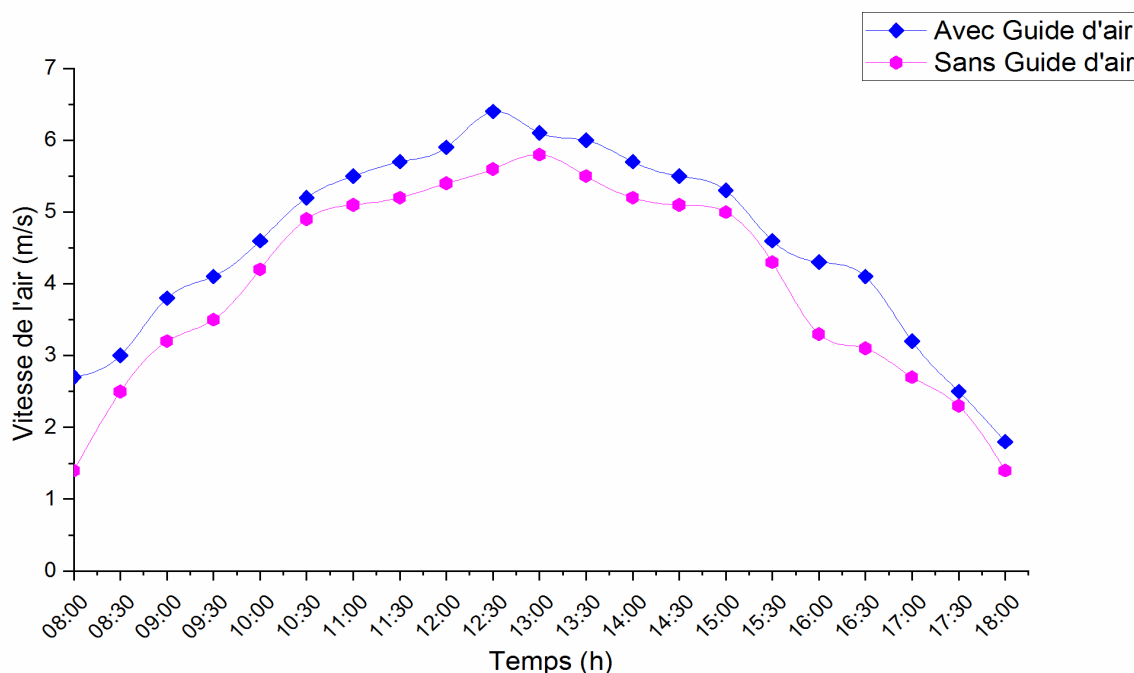
**Fig. (VI.18) :** Comparaison de la vitesse d'écoulement d'air mesurée en point J1 pour les types de jonction.

### VI.5.3. Impact de la géométrie du Guide d'air

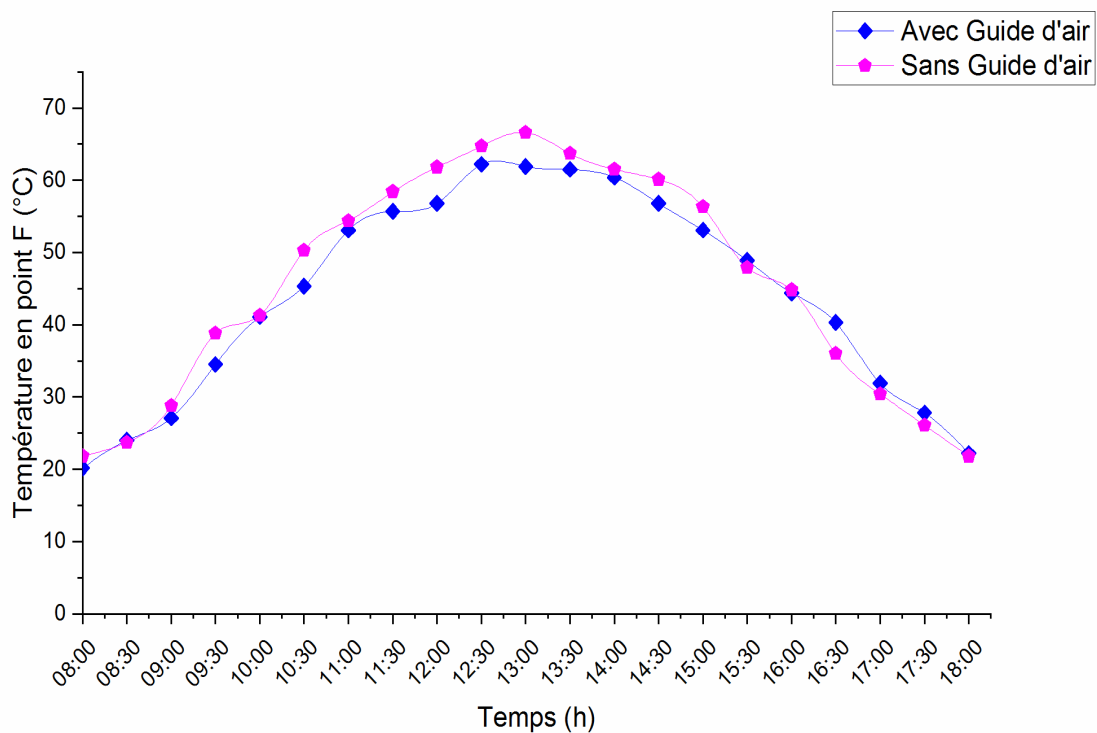
Considérant que la présence de Guide d'air peut avoir un impact significatif sur les performances de CCS mais que l'évaluation de ce problème est superficielle et ambiguë, cette étude visait à étudier le rôle du Guide d'air dans un CCS de manière plus complète en examinant le flux sous l'influence du Guide d'air avec des hauteurs variables. Cela peut nous aider à mieux comprendre les caractéristiques d'écoulement local dans le domaine de transition collecteur-cheminée avec le Guide d'air.

La figure (VI.19) illustre l'évolution de la vitesse de l'air en fonction du temps à l'entrée de la cheminée (point J1) pour les deux configurations (CCS (sans Guide d'air) et CCS (avec Guide d'air)). Les valeurs maximales de la vitesse d'air sont obtenues dans la configuration CCS (avec Guide d'air). Le minimum de la vitesse d'air est obtenu dans la configuration CCS (sans Guide d'air). L'augmentation de la vitesse d'air peut être expliquée par le rétrécissement de la section de passage, offerte au fluide en écoulement, provoquée par le guide d'air induisant une augmentation de la zone turbulente avec des zones de recirculation, ce qui provoque la destruction d'une partie importante de l'énergie cinétique. Selon la littérature [111-148], le diamètre de la cheminée a un effet significatif sur le rendement des centrales à cheminée solaires. L'existence d'un Guide d'air a réduit la section transversale des canaux d'écoulement à la région de transition collecteur-cheminée, ce qui a accéléré le flux d'air.

La figure (VI.20) indique l'effet de Guide d'air sur la température au centre du collecteur. La température était presque invariante avec ou sans Guide d'air.



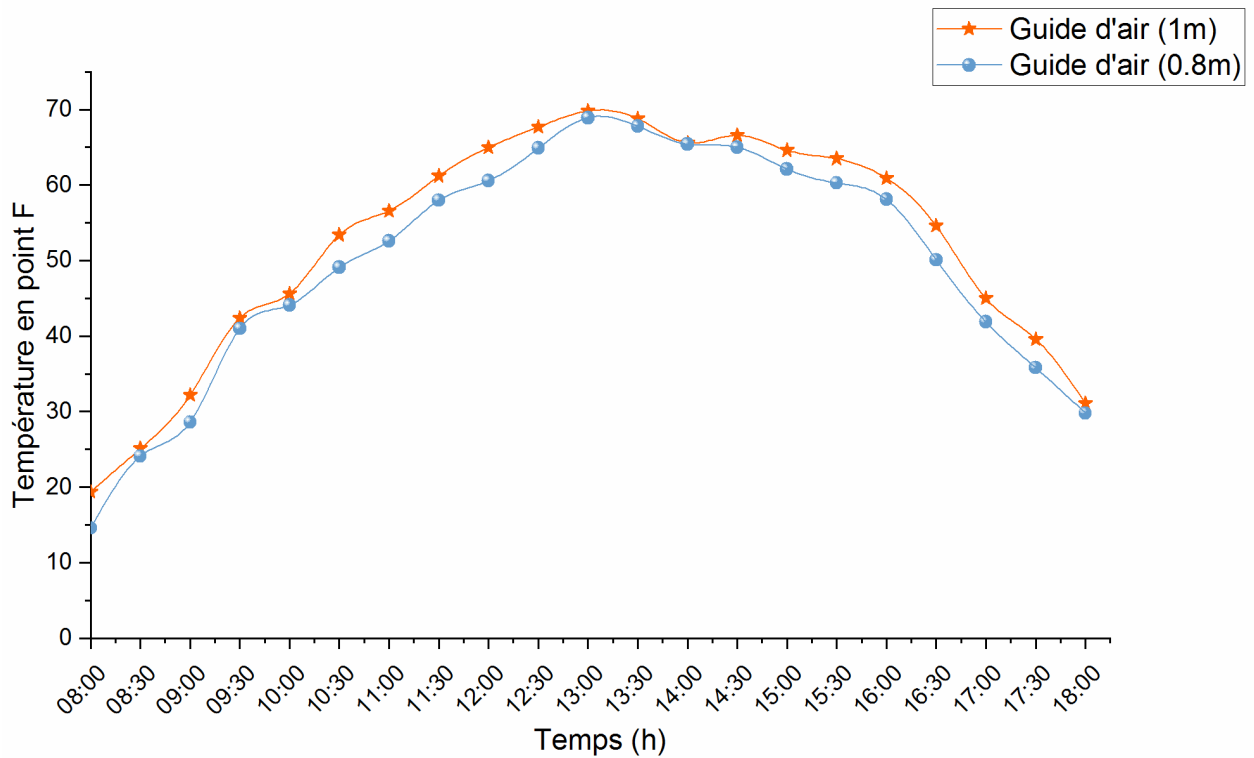
**Fig. (VI.19) :** Vitesse de l'air (point J1), avec et sans Guide d'air.



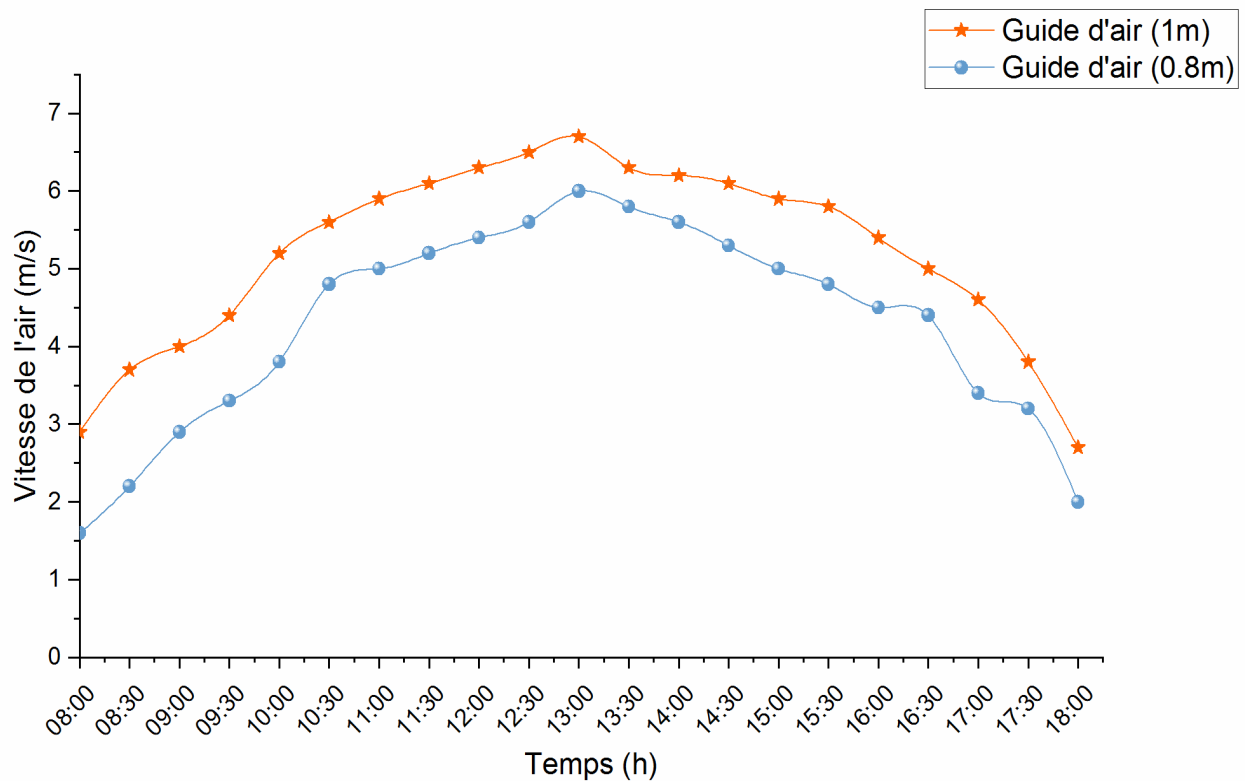
**Fig. (VI.20) :** Température au centre du collecteur (point F), avec et sans Guide d'air.

L'effet de la hauteur du Guide d'air a été discuté sur la base d'un ensemble du Guide d'air avec des hauteurs de 0.8 m à 1 m et un rayon du Guide d'air invariant. Le Figure (VI.21) conclut l'effet des hauteurs du Guide d'air sur les performances de l'installation, y compris la température de l'air au centre du collecteur (point F) et la vitesse d'air. La température de l'air au centre du collecteur a peu changé lorsque la hauteur Guide d'air est passée de 0.8 à 1 m. La température a atteint sa maximale lorsque la hauteur était de 1 m, mais les variations étaient assez faibles, soit  $69.8^{\circ}\text{C}$  pour la hauteur 1 m et  $68.9^{\circ}\text{C}$  pour la hauteur 0.8 m.

Figure (VI.22) ont également illustrées les contours de vitesse dans la région de transition collecteur-cheminée. La variation de vitesse causée par la modification de la hauteur Guide d'air. L'augmentation de la vitesse dans l'entrée de la cheminée a été observée dans le cas de 1 m, la vitesse maximale atteinte est de 6.7 m/s. La vitesse à l'entrée de la cheminée a été significativement améliorée par la présence du Guide d'air dans le CCS.



**Fig. (VI.21) :** L'influence de la hauteur du Guide d'air sur la température au centre du collecteur (Point F).



**Fig. (VI.22) :** L'influence de la hauteur du Guide d'air sur la vitesse de l'air (point J1).

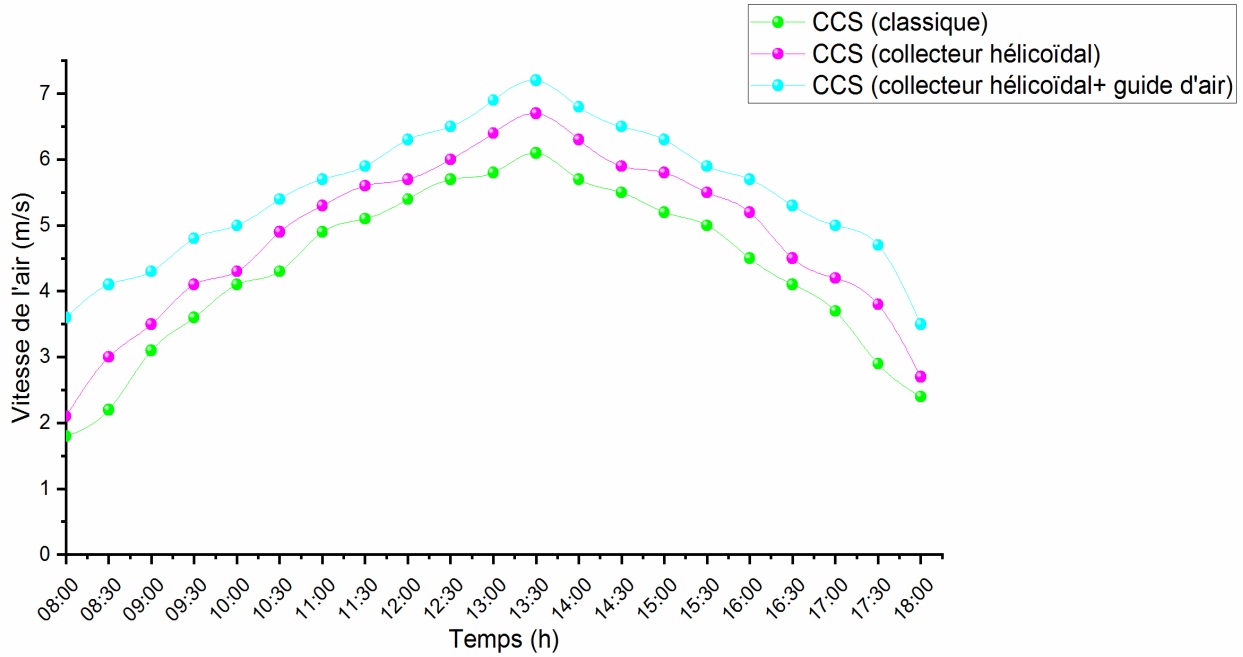
#### VI.5.4. Système CCS à collecteur hélicoïdal

Concernant le fait que la surface du collecteur est plutôt grande lors de la sélection du matériau du système CCS, le coût du collecteur et la puissance du système CCS augmentent avec l'augmentation de la surface du collecteur, en tenant compte du coût de la superficie du terrain et des matériaux, et la surface du collecteur a un effet spécifique sur l'efficacité économique de l'ensemble du système. Si la surface du collecteur est réduite de manière appropriée alors que la puissance de sortie maximale du système reste la même sous le même rayonnement solaire, l'efficacité du système CCS peut être augmentée et l'efficacité économique du système améliorée, tandis que l'investissement initial est réduit. Dans notre cas, un nouveau type de système de centrale à cheminée solaire à collecteur hélicoïdal est proposé, et une analyse expérimentale est effectuée sur les caractéristiques d'écoulement de fluide et de transfert de chaleur du système CCS (collecteur hélicoïdal) et comparée aux résultats expérimentaux du système CCS (classique).

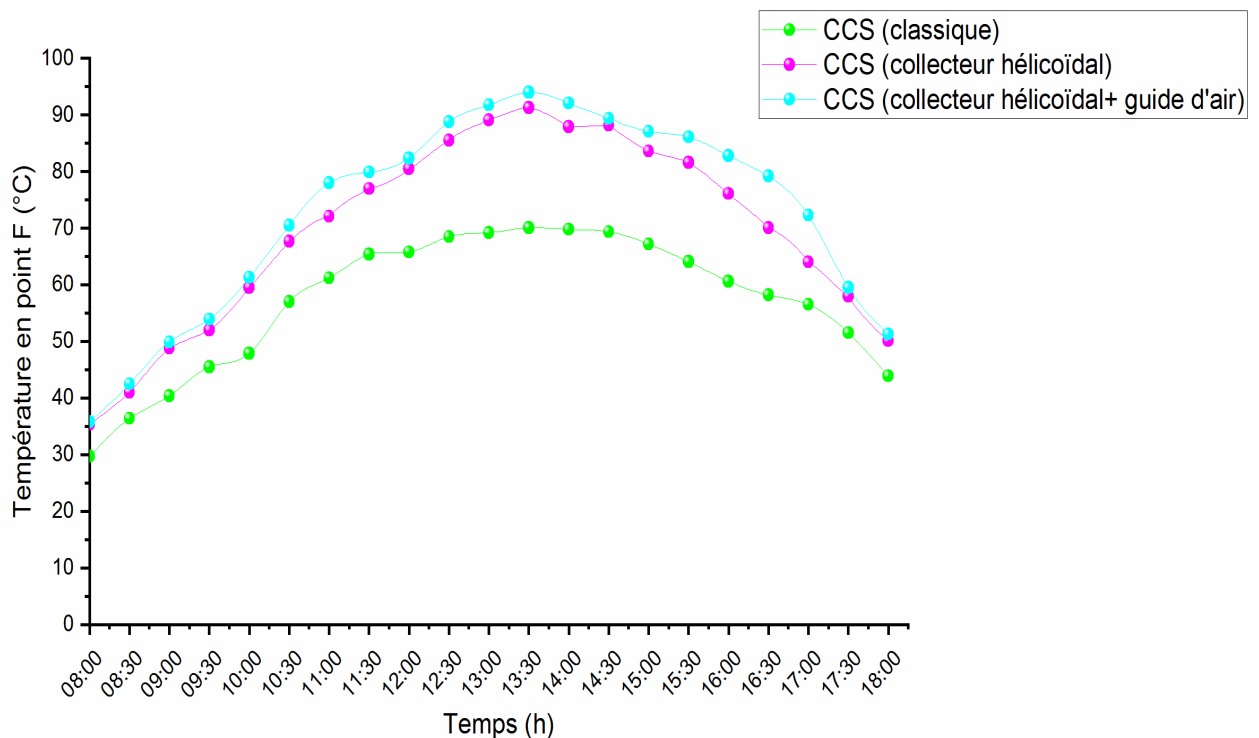
La figure (VI.23) montre une comparaison de la vitesse d'air entre une CCS (classique), une CCS (collecteur hélicoïdal) et une CCS (collecteur hélicoïdal + guide d'air). Il est clair sur cette figure que la vitesse d'air à l'intérieur de la cheminée pour les trois types est assez proche. La vitesse de la CCS (collecteur hélicoïdal + guide d'air) est peu plus élevée que celle de la CCS (classique) et la CCS (collecteur hélicoïdal), dont les trois principales raisons sont les suivantes: premièrement, le trajectoire de l'air dans le collecteur de la CCS (classique) n'est que de 6 m, qui est évidemment plus petite que celle de CCS (collecteur hélicoïdal) (10 m); deuxièmement, bien que l'application du type à collecteur hélicoïdal entraîne le fluide à s'écouler selon un trajet hélicoïdal vers la cheminée et que la longueur réelle du flux atteigne en conséquence 10 m, la direction du flux hélicoïdal continue de changer tout le chemin, ce qui entraîne une augmentation de la résistance du flux de fluide, qui non seulement diminue la vitesse d'écoulement du fluide, mais diminue également la hauteur de pression utilisée pour la génération de la turbine dans le système. Par conséquent, il est nécessaire de prendre en compte la résistance à l'écoulement et d'éviter son augmentation excessive lors de la conception des parois hélicoïdales collectrices. Troisièmement, l'ajout d'un Guide d'air augmente la vitesse du flux d'air par rapport à un collecteur hélicoïdal sans Guide d'air, car la vitesse maximale de l'air après l'ajout du Guide d'air atteint 7.2 m/s.

La figure (VI.24) montre une comparaison de température du point F entre une CCS (classique), une CCS (collecteur hélicoïdal) et une CCS (collecteur hélicoïdal + guide d'air). Comme illustré, les températures de ces deux types CCS (collecteur hélicoïdal) et CCS (collecteur hélicoïdal + guide d'air) sont également très proches l'une de l'autre et atteignant 91.3 °C et 94 °C respectivement, ce qui montre que la chaleur absorbée par le fluide pendant l'écoulement et l'élévation de température correspondante du système CCS à collecteur hélicoïdal sont proches l'une

de l'autre. Néanmoins, on constate par une observation supplémentaire que les distributions de température à l'intérieur du CCS (classique) et du CCS (collecteur hélicoïdal) sont remarquablement différentes l'une de l'autre, ce pour quoi la raison est que la direction d'écoulement du fluide dans le système CCS à collecteur hélicoïdal n'est pas radiale mais hélicoïdale, par conséquent, le changement de température montré à l'intérieur du collecteur est principalement le résultat de la différence du canal d'écoulement du fluide.



**Fig. (VI.23) :** Comparaison de la vitesse d'air entre une CCS (classique), une CCS (collecteur hélicoïdal) et une CCS (collecteur hélicoïdal + guide d'air).



**Fig. (VI.24) :** Comparaison de température du point F entre une CCS (classique), une CCS (collecteur hélicoïdal) et une CCS (collecteur hélicoïdal + guide d'air).

## **VI.6.Système d'hybridation: Eau géothermique / centrale à cheminée solaire**

Le nouveau concept de l'hybride (CCS) a offert plusieurs avantages car c'est un moyen innovant pour réduire les coûts des combustibles fossiles et d'optimiser leur consommation pour minimiser leurs influences négatives sur l'environnement. Il est basé sur l'échange thermique, qui permet un fonctionnement combiné avec le rayonnement du soleil et la chaleur géothermique pour produire de l'électricité de manière continue, même en l'absence de rayons du soleil. L'utilisation de l'énergie géothermique pour produire de l'électricité est considérée comme un moyen attractif et alternatif permettant d'atteindre un fonctionnement de 24 heures. Ainsi, la production d'énergie géothermique peut apporter une contribution majeure dans le domaine qui repose sur l'énergie solaire. C'est un avantage majeur car il permet un fonctionnement suivant la demande réelle d'électricité, sans limiter ses performances uniquement en heures d'intensité solaire, et cela améliore considérablement la capacité de la CCS à concurrencer les centrales électriques traditionnelles. Il ressort des enquêtes précédentes qu'il n'y a pas eu de tentative de mener une évaluation expérimentale de l'impact géothermique sur le (CCS). Par conséquent, il est utile d'étudier les performances expérimentales d'un prototype de cheminée solaire avec un système de chauffage géothermique pendant la nuit. Pour régler les problèmes fondamentaux évoqués ci-dessus, une centrale à cheminée solaire (CCS) a d'abord été conçue et construite dans le Laboratoire d'Ingénierie des Procédés de l'Université de Ouargla (Algérie) depuis octobre 2018. Un système de chauffage conçu par une conduite en spirale a été installé au sol à l'intérieur du collecteur solaire. De l'eau géothermique appelée Albien est utilisée; où ce réservoir est situé dans le sud de l'Algérie (région d'Ouargla) dont la température de l'eau y atteint 80 °C. Après cela, les performances quotidiennes et horaires d'un hybride (CCS) sont décrites et évaluées. Enfin, les résultats de l'impact de l'introduction de l'eau géothermique sont largement discutés.

Pour simplifier la présentation de cette investigation, ce paragraphe sera divisé en quatre parties essentielles; Étude d'une journée complète (24 heures), étude de jour, étude comparative nuit-jour et amélioration des performances. L'endroit où notre prototype est installé est caractérisé par une température de l'eau géothermique et un débit de 80 °C et 40 (l/min), respectivement.

### **VI.6.1.Mesures pendant 24 heures**

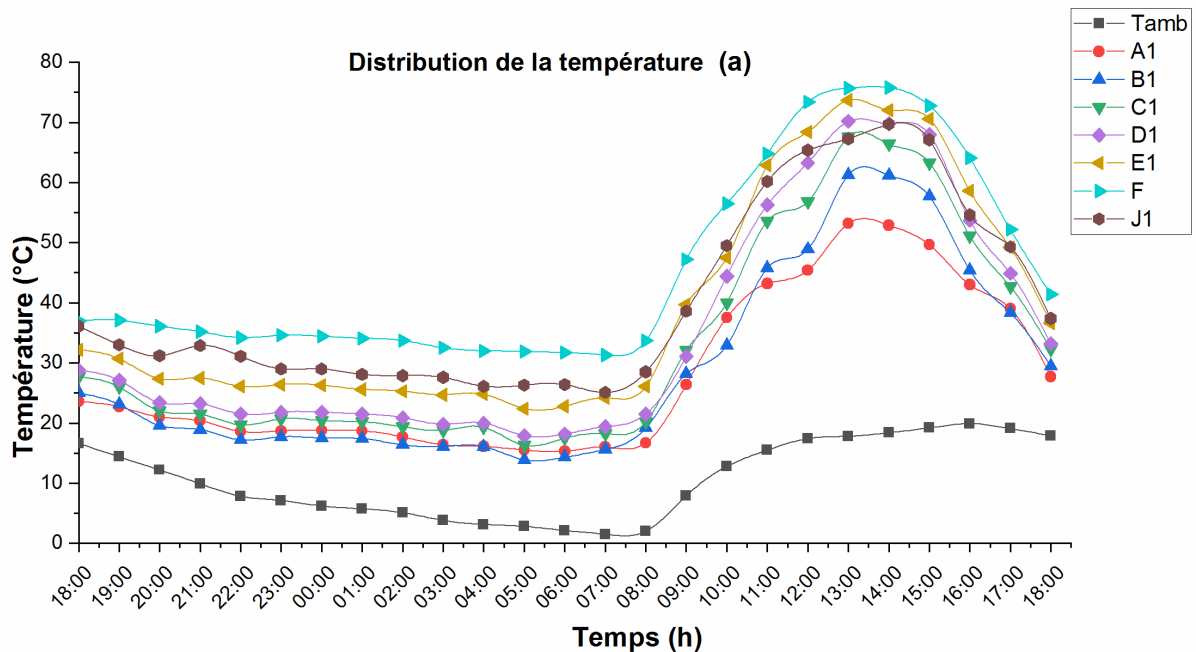
La figure (VI.25) montre la distribution de la température sous le collecteur de la périphérie vers son centre. Dans le premier cas (a), lorsque l'eau chaude entre dans le tube en spirale depuis le centre du collecteur et en sort à sa périphérie, la température de l'eau géothermique augmente de la périphérie vers le centre au sens logique.

La température (A1 à F) sous le collecteur augmente de la périphérie vers son centre dans la nuit avec une légère diminution entre 18h00 et 08h00 car la température ambiante diminue de 16.6

°C à 1.5 °C (collecteur froid). La température maximale de 37.1 °C est enregistrée au centre du collecteur près du sol.

De 8h00 à 18h00, la température ambiante augmente avec l'intensité solaire puis la température monte de la périphérie du collecteur vers son centre (A1 à F) remarquablement pour atteindre 75.9 °C au centre du collecteur à 14: 00 h (collecteur chaud).

La température (J1) à l'entrée de la cheminée est inférieure à (F) au centre près du sol en raison de la zone de perturbation et de la recirculation des particules d'air à l'entrée du collecteur.



**Fig. (VI.25) :** Distribution de la température sous le collecteur dans le premier cas (a) (13-14 / 02/2019)

La figure (VI.26) présente la distribution de température sous le collecteur dans le deuxième cas (b) lorsque l'eau chaude commence à tourner en spirale de la périphérie du collecteur vers son centre puis sort à l'extérieur. Dans ce cas, les températures mesurées sont inférieures au premier cas car la température de l'eau géothermique diminue de la périphérie vers le centre (sens illogique) contrairement au premier cas. Dans ce cas, le profil de température (A1-F) reste presque identique à la figure (VI.25) mais moins important sauf que la température (J1) à l'entrée de la cheminée est plus basse ce qui signifie que la zone de perturbation et de recirculation à l'entrée de cheminée devient importante.

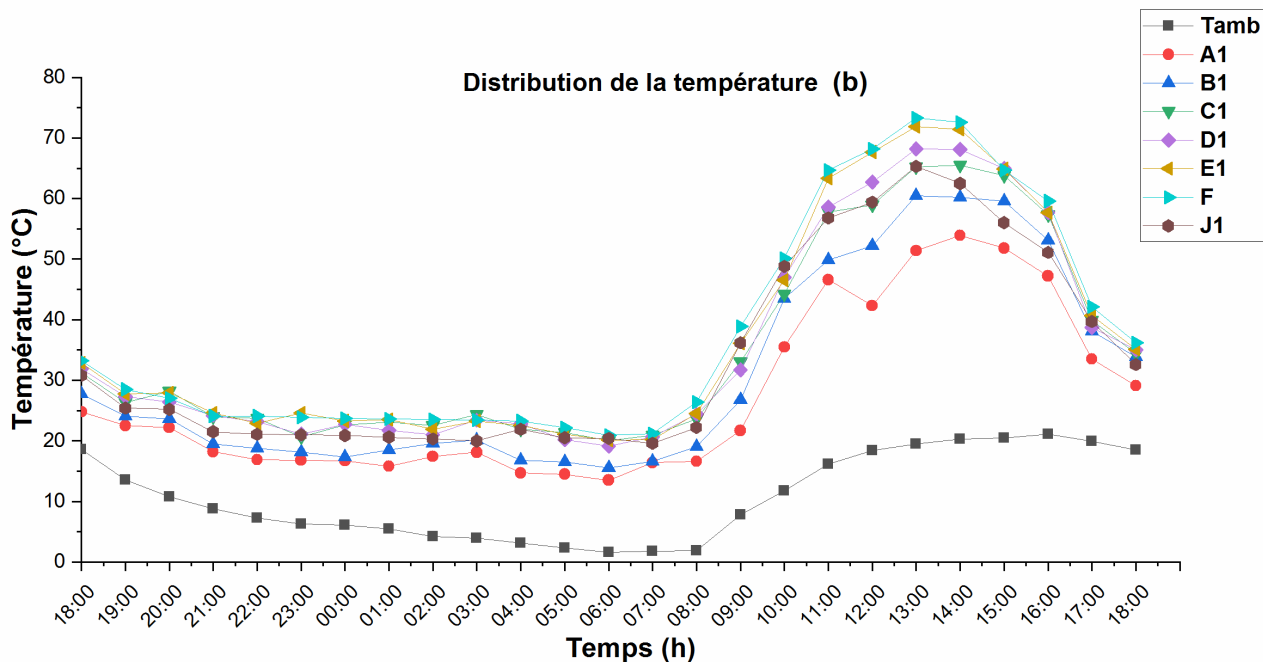


Fig. (VI.26) : Distribution de température sous le collecteur dans le deuxième cas (b) (15-16 / 02/2019).

La figure (VI.27) illustre le profil de température au centre du collecteur près du sol pendant la journée du coucher du soleil au coucher du soleil (24 heures) dans les deux cas (a) et (b). Il est clair que le sens logique de l'eau géothermique dans la spirale va du centre vers la périphérie; d'autres disent le premier cas (a) [42-45]. Dans la nuit, l'écart de température entre le premier cas (a) et le deuxième cas (b) atteint parfois 10 à 12 °C, cela s'explique par le fait que la température ambiante pendant la nuit est basse et peut diminuer jusqu'à 1.5 °C (collecteur froid).

Au contraire, en journée, l'écart de température entre les deux cas ne dépasse pas 5 °C en raison de la présence du rayon solaire et de l'amélioration de la température ambiante (collecteur chaud).

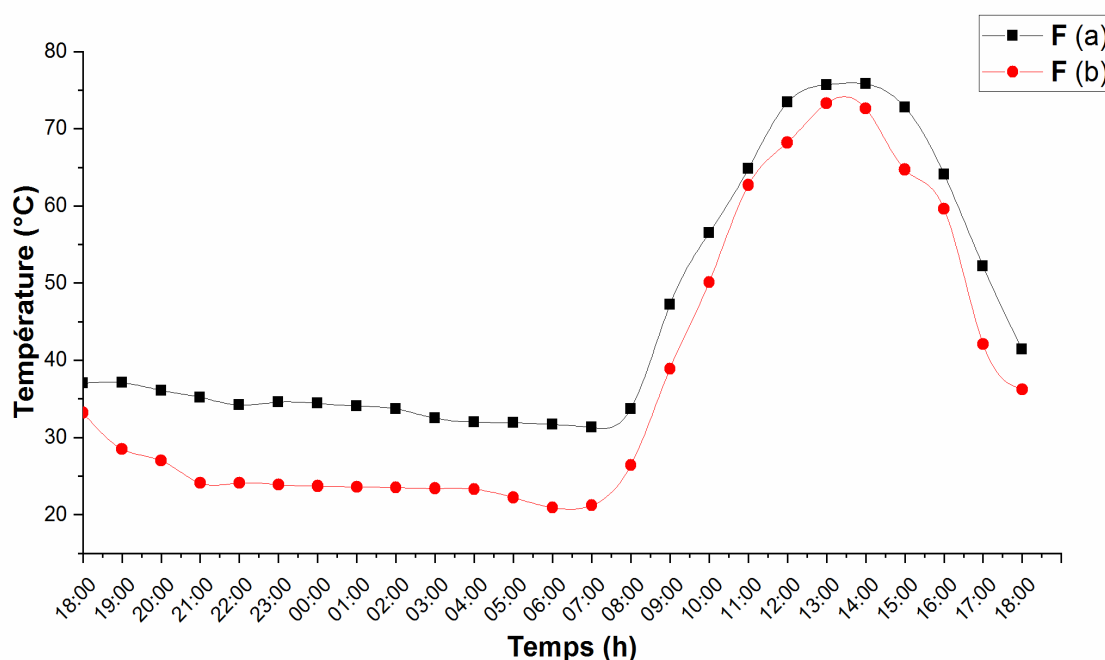
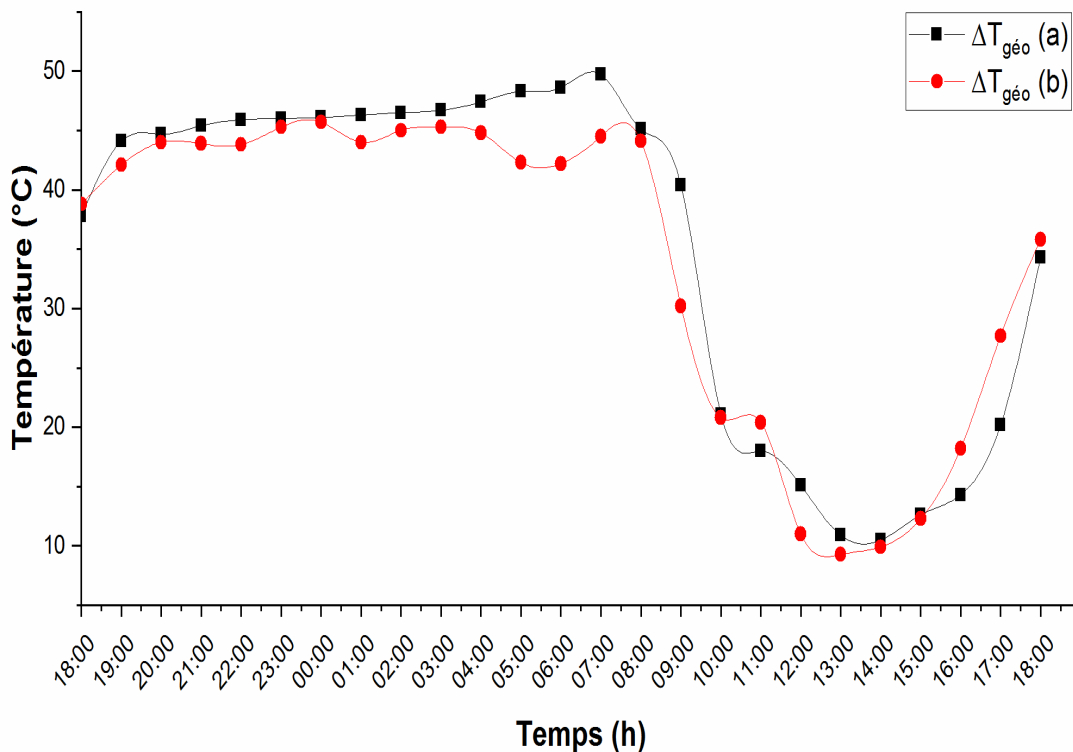


Fig. (VI.27) : Température du centre du collecteur dans les deux cas (a) et (b) (13-16 / 02/2019)

Sur la figure (VI.28), on peut voir la même tendance de la différence de température géothermique entre l'entrée en spirale et la sortie en spirale au centre près du sol pour les deux cas en fonction de l'heure locale pendant 24 heures de 18h00 à 18h00.

Il est clair que dans le premier cas, la différence de température est légèrement plus élevée que dans le second cas. Ce chiffre peut être divisé en deux parties: la première partie est de 18h00 à 08h00 (la nuit) en l'absence de rayons solaires et la seconde est du lever au coucher du soleil (jour). Dans un premier temps, la différence de température augmente lentement mais reste généralement entre 37.8 °C et 49.1 °C; ici, le transfert thermique de l'eau géothermique est très important en raison de la basse température ambiante enregistrée dans la nuit (collecteur froid).

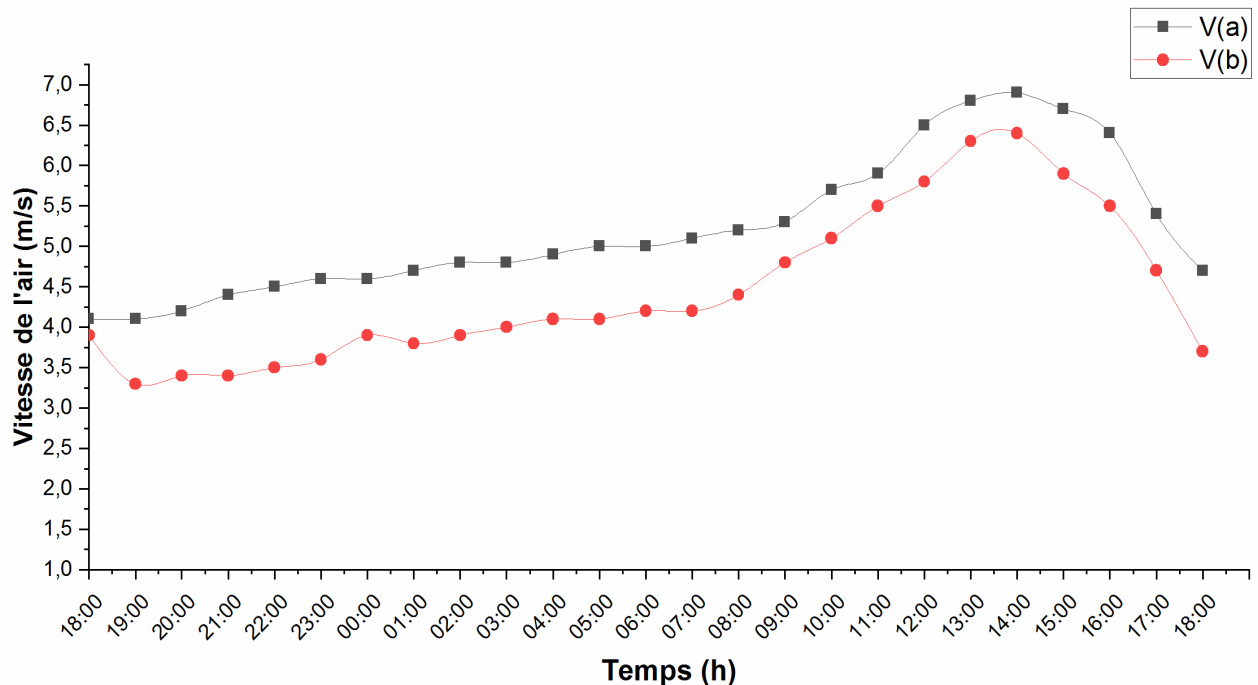
Dans la deuxième partie, après le lever du soleil, la cheminée absorbe facilement la chaleur des rayons solaires c'est pourquoi la différence de température de l'eau géothermique diminue rapidement de 49.9 °C à 10.4 °C à midi lorsque l'intensité solaire est élevée et recommence à augmenter avec la diminution de l'intensité solaire pour atteindre 37.6 °C au coucher du soleil.



**Fig. (VI.28) :** Différence de température de l'eau chaude (entrée-sortie) dans les deux cas (13-16 / 02/2019)

La figure (VI.29) montre la vitesse de l'air en fonction de l'heure locale de 18h00 à 18h00 dans les deux cas (a) et (b). Il est remarquable que la vitesse de l'air avant le lever du soleil (la nuit) augmente légèrement avec un écart de 1 m/s ou environ entre les deux cas; de l'autre côté, après le lever du soleil, le rehaussement enregistré devient important lorsque l'intensité solaire atteint sa valeur maximale. La vitesse maximale enregistrée est donc supérieure à 6.9 m/s pour le premier cas (a).

En conclusion, ces travaux résument que: la nuit (absence de radiante solaire), l'influence de l'eau géothermique se traduit par 5.1 m/s de vitesse du flux d'air dans les meilleures conditions; tandis que le couplage: chaleur solaire / géothermique conduit à un maximum de 6.9 m/s de la vitesse du flux d'air.



**Fig. (VI.29) :** Vitesse de l'air du (CCS) dans les deux cas (a) et (b) (13-16 / 02/2019).

Les résultats obtenus après l'utilisation de l'échangeur de chaleur en spirale ont montré une amélioration significative des performances (CCS) en travaillant jour et nuit sans rupture avec une performance de nuit à peu près similaire à celle de jour. En comparaison avec certaines recherches antérieures similaires dans la littérature, Fadaei et al [150] ont intégré un PCM et Li et al [72] ont combiné un collecteur avec une couche de stockage d'énergie pour améliorer les performances thermiques d'un (CCS), ils ont constaté que la température du collecteur a une tendance descendante lisse après le coucher du soleil. En revanche, l'échangeur de chaleur en spirale de notre étude maintient la température du collecteur élevée pendant la nuit quels que soient les changements météorologiques extérieurs qui sont assez similaires aux résultats d'Aurybi et al [151] qui utilisaient une source de chaleur externe pour améliorer les performances thermiques du (CCS). Leurs résultats ont indiqué que la température de l'air à l'intérieur du collecteur pourrait être augmentée en ajoutant des canaux d'amélioration thermique dans le (CCS).

### VI.6.2 Performance de la CCS pendant la journée

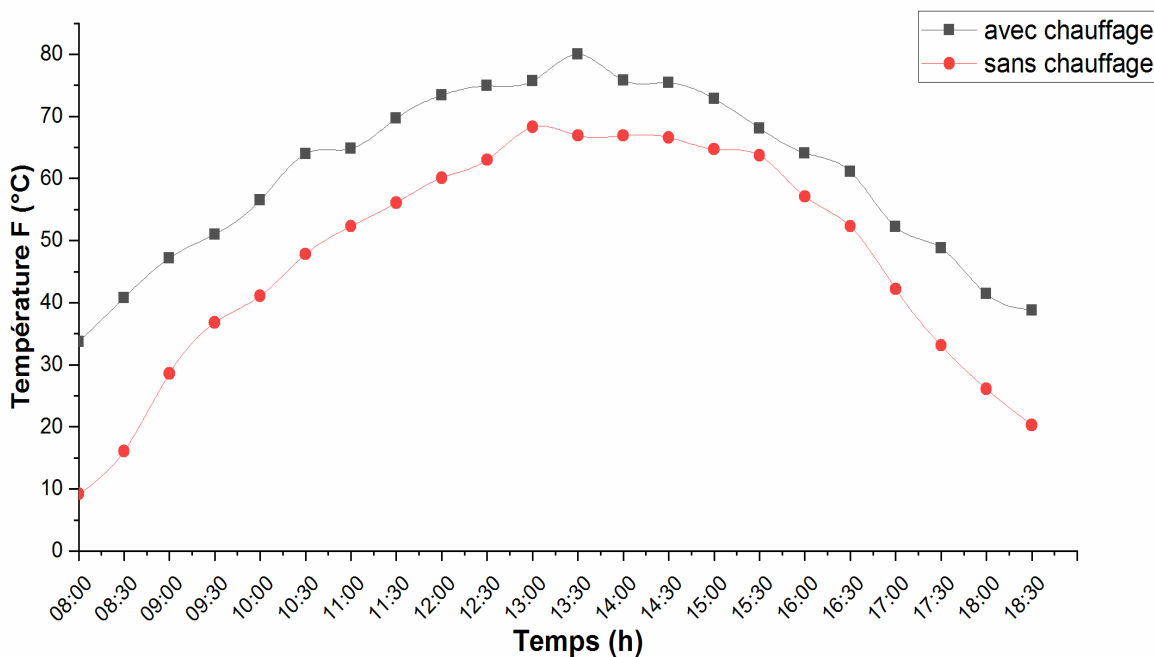
L'étude pendant le jour consiste à montrer uniquement l'effet de rayonnement solaire et le couplage: radiance solaire / eau géothermique à la fois sur la température centrale près du sol et sur la vitesse d'air.

La figure (VI.30) illustre l'évolution de la température au centre du collecteur dans deux cas différents lorsque:

- L'intensité solaire agit seule.
- L'intensité solaire est couplée à l'eau géothermique.

Dans le premier cas, la température maximale enregistrée au centre est proche de 68.3 °C à midi 13h00.

De l'autre côté, lorsque l'intensité solaire est combinée à l'eau géothermique, la température au centre du collecteur atteint 80 °C à 13h30; ainsi, le couplage nous donne un gain de température de 11.7 °C au centre du collecteur.

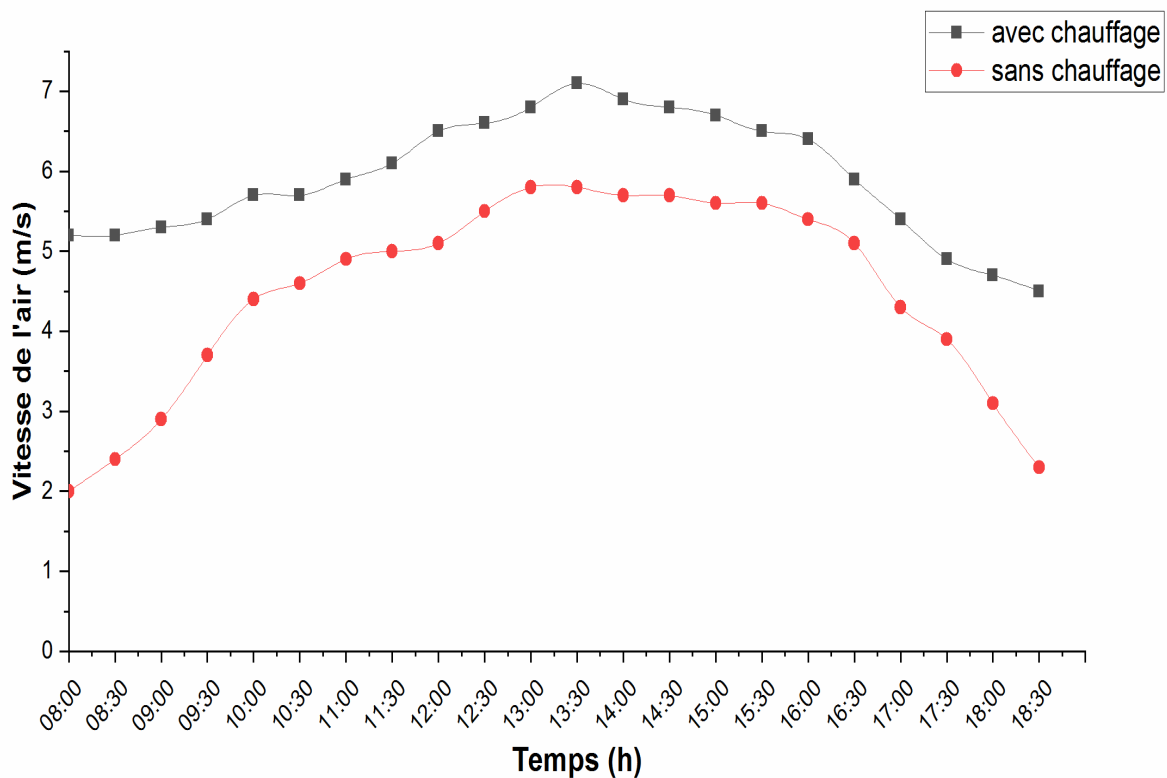


**Fig. (VI.30) :** Température du centre du collecteur en fonction de l'heure locale (jour) (10/02/2019).

La figure (VI.31) présente la vitesse de l'air en fonction de l'heure locale pendant la journée entre le lever et le coucher du soleil. La vitesse du flux d'air sous l'effet d'irradiance solaire uniquement augmente de 2 m/s à 08h00 pour atteindre le maximum de 5.8 m / s à midi.

De plus, lorsque le rayonnement solaire est combiné avec l'eau géothermique, la vitesse atteint 7.1 m/s, c'est-à-dire avec un gain de 2 m/s de vitesse du flux d'air. Ceci s'explique par la température élevée enregistrée au centre de la cheminée illustrée dans la figure précédente (Fig.VI.29). Ainsi, l'effet géothermique de l'eau est très important en cas de baisse du soleil ou pendant de la nuit. La fourniture d'un échangeur de chaleur géothermique est un support très

important qui assure la fonctionnant survie du système combiné plus efficacement par rapport au système classique (SCPP).

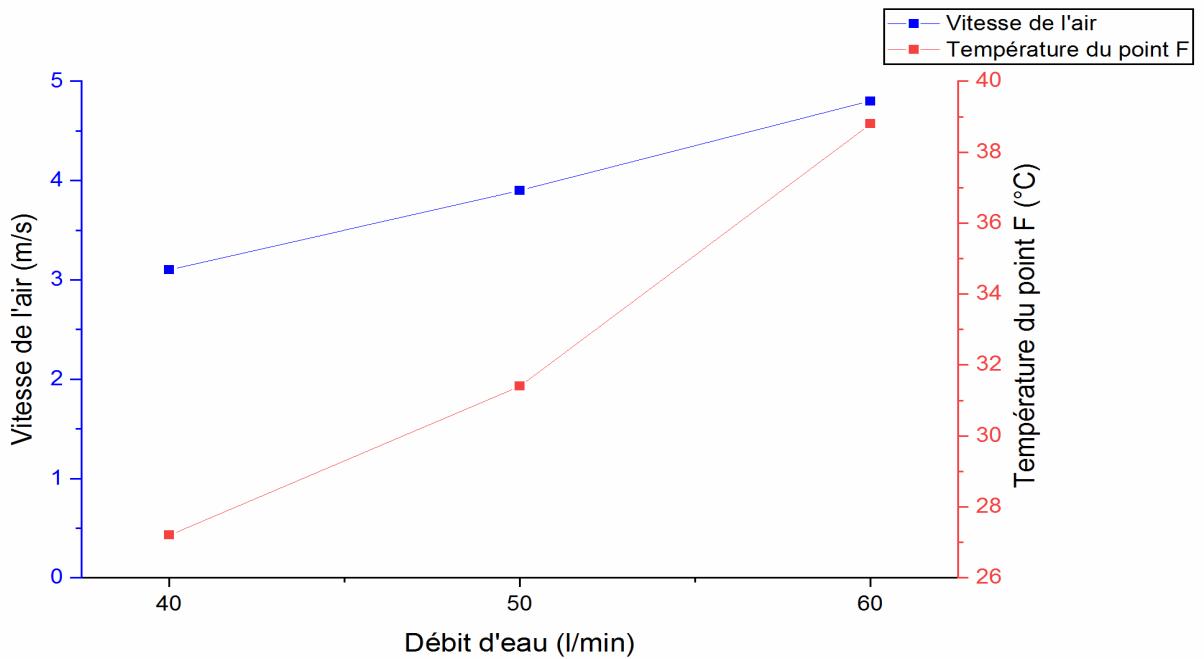


**Fig. (VI.31) :** Vitesse d'air en fonction de l'heure locale (jour), (10/02/2019).

### VI.6.3. Effet du débit d'eau géothermique

Afin d'examiner l'effet du débit d'eau géothermique sur les performances de transfert de chaleur du système de chauffage, figure (VI.32) affiche la variation de la quantité de chaleur en fonction du débit d'eau le long du tube spiralé. La température de l'eau d'entrée est constante (85 °C). Le débit d'eau variait de 40 à 60 l/min.

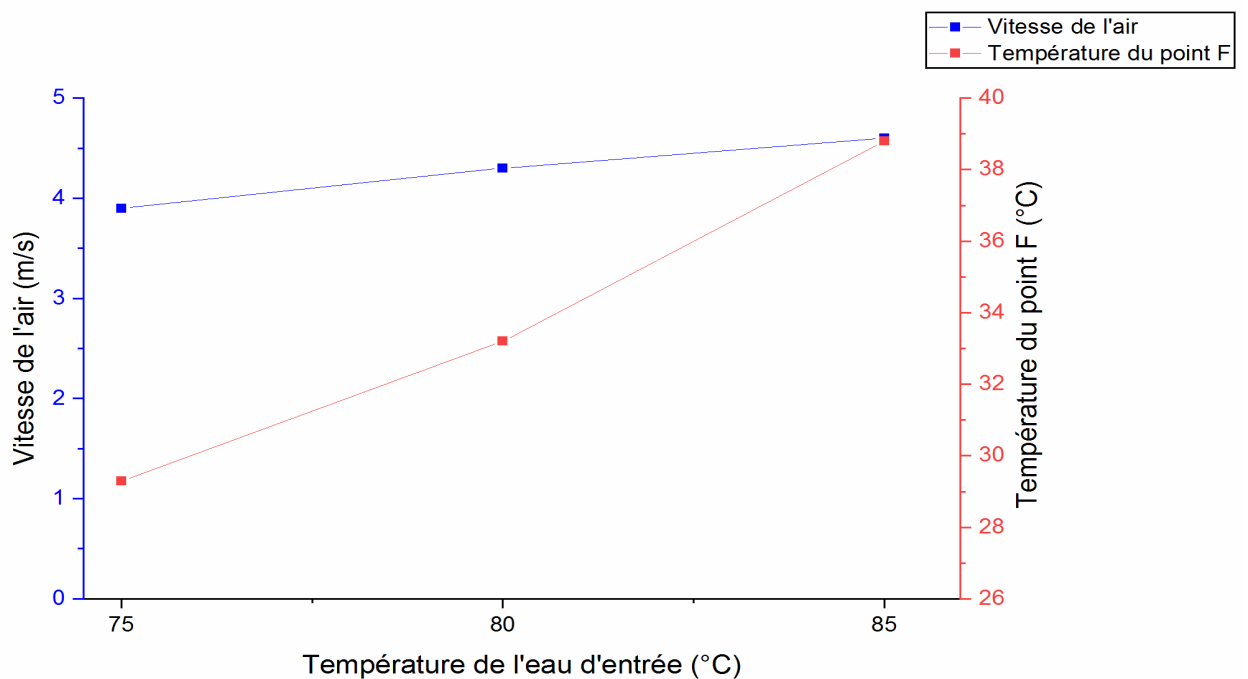
Comme prévu, nous pouvons remarquer sur la figure (VI.32) qu'il est avantageux d'augmenter le débit total d'eau géothermique. Trois tests ont été réalisés en faisant varier le débit avec un incrément de 10 l/min, dans les mêmes conditions météorologiques à 00h00 la nuit. Plus le débit d'eau est élevé, plus la quantité de chaleur récupérée par l'air traversant le collecteur est importante. La figure (VI.31) confirme également qu'il est préférable d'augmenter le débit d'entrée d'eau pour obtenir des vitesses d'air plus élevées. Cela est dû au fait que l'augmentation du débit permet à plus d'énergie de passer à l'air intérieur circulant à travers le collecteur.



**Fig. (VI.32) :** Effet du débit d'eau géothermique.

#### VI.6.4. Effet de la température d'entrée d'eau géothermique

La figure (VI.33) évalue l'influence de la variation de la température géothermique de l'eau à l'entrée de l'échangeur de chaleur de 75 à 85 °C. Le débit d'eau est réglé à 60 l/min. Les paramètres géométriques et opérationnels sont restés inchangés. Un examen plus approfondi de la figure (VI.33) révèle que la vitesse de l'air à la sortie du collecteur dépend fortement de la température d'entrée de l'eau. En fait, les températures d'entrée d'eau plus élevées signifient que plus d'énergie est disponible pour chauffer l'air à l'intérieur du collecteur, ce qui conduit à des vitesses d'air plus élevées. La vitesse de l'air augmente presque linéairement à mesure que la température d'entrée de l'eau augmente.



**Fig. (VI.33) :** Effet de la température d'entrée d'eau géothermique.

## VI.7. Etude économique du système

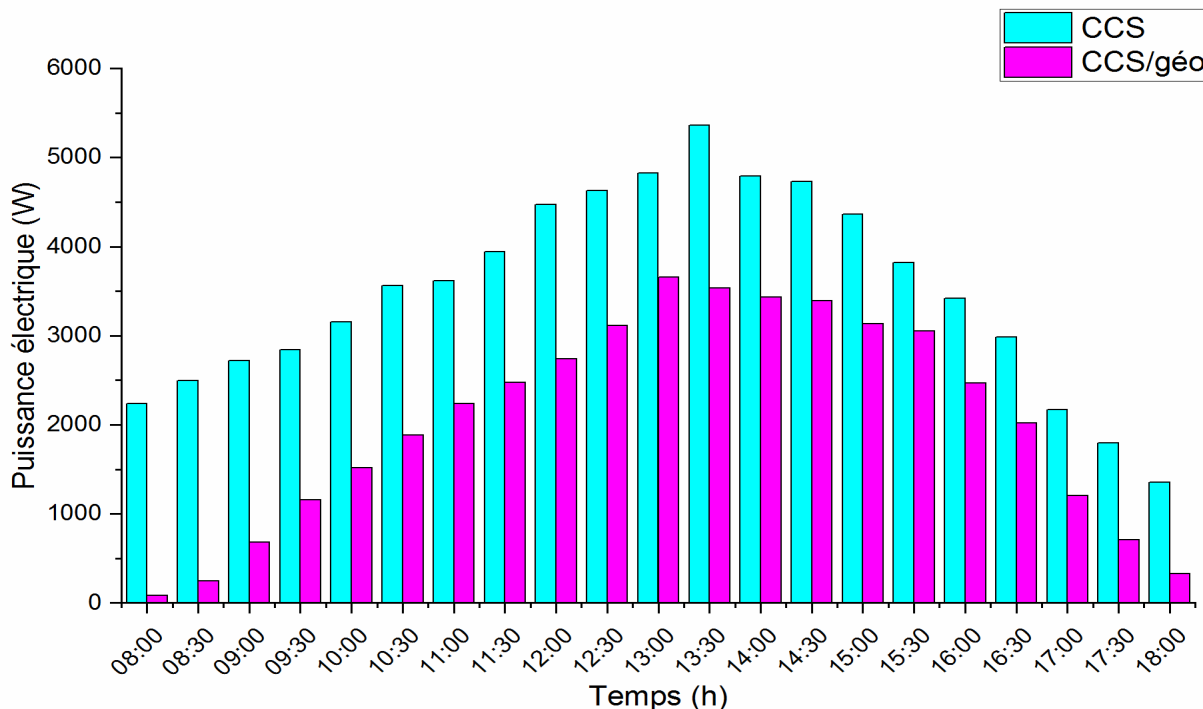
A l'heure actuelle, la démarche utilisée pour apprécier l'intérêt économique d'un système énergétique s'appuie sur un schéma de fonctionnement fixé. Ensuite, à partir d'un scénario incluant la durée de vie de système, ainsi qu'un taux d'actualisation, il est possible de calculer le coût de production d'énergie. Dans le cas de notre système, afin de calculer le coût de l'électricité produite, une analyse du coût de cycle de vie (Life Cycle Cost, LCC) [152], devra inclure le coût de financement du capital ainsi que la valeur actualisée des coûts d'exploitation, d'entretien et de remplacement sur la durée de vie prévue du système.

### VI.7.1. La puissance théorique générée par la turbine

La puissance théorique la plus élevée ( $P_{elec}$ ) générée par la centrale à cheminée solaire 3655.316 W sans géothermale et 5363.283 W avec géothermale Montréal sur la figure (VI.34), si le rendement de la turbine est de 80% et les pertes de transmission sont de 10%.

Ensuite, la puissance électrique totale produite en Wh pendant 10h, de 08h00 à 18h00 en une journée entière est:

- $P_{elec}$  Moyenne (avec géothermie) = 73274,62 Wh (763.28 Wh/m<sup>2</sup>)
- $P_{elec}$  Moyenne (sans géothermie) = 43075,37 Wh (448.70 Wh/m<sup>2</sup>)



**Fig. (VI.34) :** Puissance de sortie Vs. Heure du jour avec / sans géothermale

### VI.7.2. Coût d'investissement total :

Le coût d'investissement total est le coût global d'une installation du système qui est composé de deux parties distinctes: l'investissement initial et les frais d'exploitation et de maintenance. Le coût moyen actualisé d'électricité est le rapport des valeurs actualisées nettes des coûts de cycle de vie (life cycle Cost) du système de production d'électricité (coût d'investissement initial, dépenses de maintenance et de remplacement), sur la quantité d'énergie électrique produite durant la vie de système [153]. Les composants principaux de la cheminée solaire sont spécifiés dans le tableau 1 avec son coût correspondant.

**Tableau (VI.1) :** Coûts des composants de la centrale à cheminée solaire.

Matériels	QTT	P.UNIT (DA)	La somme (DA)
Laine de verre-aluminium	11	3000	33000
Wagee de griflette (m3)	1	3000	3000
Wagee de sable (m3)	1	1000	1000
Plastique noir (m)	100	50	5000
Caoutchouc noir (t)	1	60000	60000
Cornier N35	20	1000	20000
Fer A T N35	39	1000	39000
Peinture noir (kg)	10	200	2000
Verre N5 (m <sup>2</sup> )	55	1250	68750
Tube silicone	100	200	20000
plastique PVC (m)	20	1000	20000
Tube PVC Ø200 (6m)	2	5000	10000
Câble acier Ø2 (m)	60	50	3000
Fabrication			40000
		Sous-montant	<b>324750</b>
		T.V.A 19 %	<b>61702.5</b>
		Montant totale (DA)	<b>386452.5</b>
		Montant totale (\$)	<b>2760.38</b>

L'équation LCOE (Levelized Cost Of Electricity) (Coût moyen actualisé d'électricité \$/kWh) est un outil d'analyse qui peut être utilisé pour comparer des technologies alternatives lorsqu'il existe différentes échelles d'opération, d'investissement ou de périodes de fonctionnement. Le calcul pour le LCOE est la valeur actuelle nette du total des coûts du projet sur la durée du cycle de vie divisée par la quantité d'énergie produite pendant la durée de vie du système [154] :

$$LOCE = \frac{I_0 + \sum_{n=1}^N (C_{O\&M} + C_r) / (1+r)^n}{\sum_{n=1}^N E_{el,an} (1-deg)^n / (1+r)^n} \quad (42)$$

$I_0$  : Coût d'investissement initial (\$) ;

$N$  : Durée de vie de système (ans) ;

$C_{O\&M}$  : Coût de maintenance et d'exploitation (\$) ;

$C_r$  : Coût de remplacement (\$) ;

$r$  : Taux d'actualisation (%) ;

$E_{el,an}$  : Production annuelle d'énergie électrique (kWh/an) ;

$deg$  : Taux de dégradation (%).

**Tableau (VI.2) :** Coûts et autres paramètres pour l'analyse économique

	CCS	CCS/géo
Durée de vie [N]	20 ans	20 ans
Coût initiale [ $I_0$ ]	2 760.38 \$	3 260.38 \$
Coût de remplacement [ $C_r$ ]	285 \$	285 \$
Coût d'exploitation et de maintenance [ $C_{O\&M}$ ]	375 \$	375 \$
LCOE	0.096 \$/kWh	0.066 \$/kWh

### VI.7.3. Tarification de l'énergie

A l'échelle nationale, le secteur de l'énergie n'est pas encore libéralisé où les prix à la consommation domestique pour tous les produits énergétiques dans toutes leurs formes sont subventionnés par l'état (35% du prix de l'électricité est subventionné par l'état algérien). Les prix sont fixés sur la base de critères socio-économiques. Les subventions sont indirectes, elles ne sont pas assurées à travers des transferts directs du budget de l'état mais par le biais d'une réduction appliquée sur les bénéfices des sociétés étatiques de production, SONELGAZ pour l'électricité et le gaz [155]. Les tarifs de l'énergie sont en effet réglementés par l'état. Le niveau des tarifs de l'électricité en Algérie est fixé par décret sur la base de propositions soumises par la commission de régulation de l'électricité et du gaz (CREG) qui a été créée en vertu de la loi 02-01 du 05 février 2002 se rapportant à l'électricité et à la distribution du gaz par canalisation, en tant qu'organisme indépendant doté de la personnalité juridique et de l'autonomie financière. Il est vrai que le principe est là, mais la mise en œuvre proposée par le CREG n'est pas appliquée. Le tableau.5 montre le prix de l'électricité destinés au secteur résidentiel.

Le tarif européen est donné par la moyenne de 5 pays européens entourant la méditerranée (Portugal, Espagne, France, Italie et Grèce), les prix sont obtenus de l'Eurostat. Par ailleurs, tous les prix de tarif algérien sont convertis en Dollar 2020 (1 Dollar =140 DA).

**Tableau (VI.3) :** Prix d'électricité en Dinars Algérien (DA), en Dollar le tarif moyen européen en Dollar.

Forme d'énergie	Niveau	Tarif algérien			Tarif européen	
		DA/kWh	€ / kWh	\$ /kWh	€ / kWh	\$ /kWh
Electricité	Basse tension	0 – 125 kWh : 1.904	0.013	0.015	0.215	0.25
		>125 kWh : 4.472	0.029	0.035		

### VI.7.4. La rentabilité de système :

Les critères de rentabilité choisis dans le cadre de cette analyse sont le délai de récupération et le taux de rentabilité interne (TRI). Le délai de récupération correspond à la période de temps au bout de laquelle les rentrées nettes de fonds auront permis de rembourser l'investissement initial. Au-delà de cette période, l'énergie récupérée est considérée comme gain pour notre système. La figure suivante montre l'évolution des revenus et des dépenses d'investissement en fonction des années.

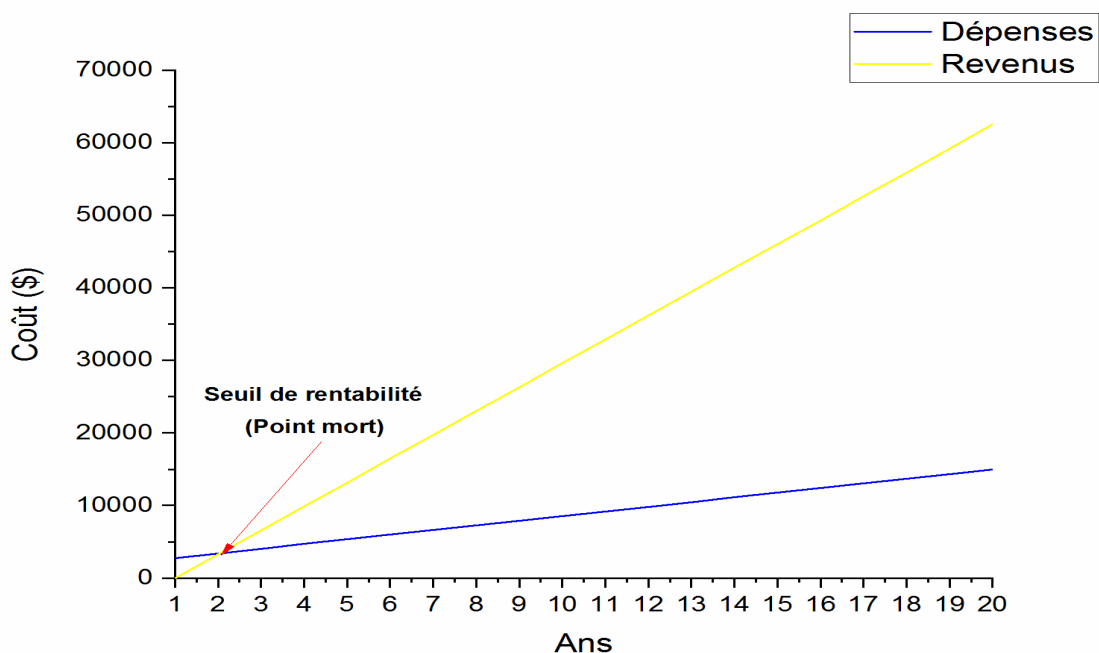


Fig. (VI.35) : Evolution des revenus et des dépenses d'investissement dans le cas d'un système classique (CCS).

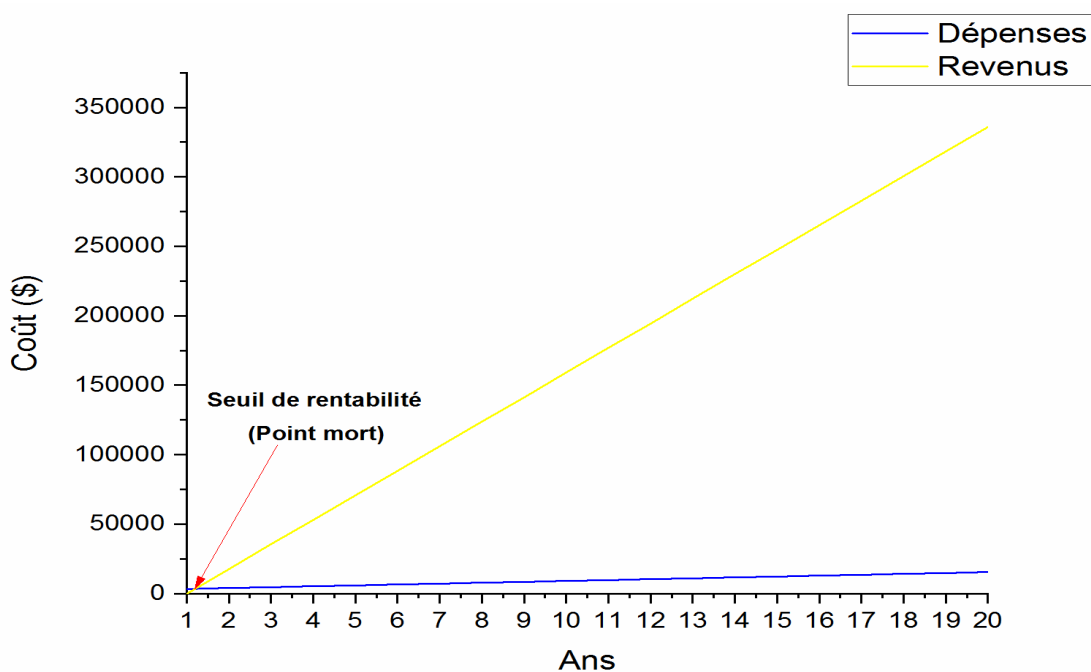


Fig. (VI.36) : Evolution des revenus et des dépenses d'investissement dans le cas du système hybride (CCS/géo).

Nous avons étudié la durée de vie de chaque composant du système, et nous avons pris la plus grande durée de vie qui est de 20 ans. Les composants des sous-systèmes qui ont des durées de vie inférieure à celle proposée, connaissons des remplacements en fonction des durées de vie de chaque sous-système. La courbe bleue qui représente les dépenses engagées pour réaliser le projet comprenant un cout initial (cout des équipements et auxiliaires) et des dépenses variables au cours des années (maintenance, exploitation et remplacement). La deuxième courbe en jaune représente les revenus issus de la production d'énergie électrique à partir de la CCS. Le point d'intersection des deux courbes représente l'égalité entre les dépenses et les revenus. La durée nécessaire à la récupération des investissements engagés est :

- Dans le cas d'un système classique (CCS), la période était de deux ans et un mois
- Dans le cas du système hybride (CCS/géo), la période était d'un an et trois mois

Les revenus peuvent être calculés à partir de la formule suivante :

$$Revenus = \sum_{n=1}^{N=20} [(E_{vente} \times P_{vente}) - (E_{acheter} \times P_{acheter})] \quad (43)$$

# Conclusion générale

## Conclusion générale

La centrale à cheminée solaire (CCS), en tant que technologie d'énergie solaire thermique est un fournisseur d'énergie prometteur pour les régions moins développées en raison de ses avantages de principe, de fonctionnement, de structures simples, de faibles coûts d'exploitation, de maintenance et de flexibilité pour varier les sources de chaleur. Au cours des dernières décennies, nombreuses études sont menées pour évaluer les performances des CCS et améliorer cette technologie. Néanmoins, la commercialisation de la technologie de CCS est lente en raison de la faible capacité de production d'électricité. Ainsi, ces dernières années, l'amélioration des performances de production d'électricité devient un objectif important des études sur cette technologie.

D'après, cette tendance, le présent travail vise à explorer des méthodes afin d'augmenter la puissance d'une CCS. Un prototype à petit échelle d'une CCS de 8 m de hauteur et 12 m de diamètre de collecteur est construit dans la zone du campus de l'Université d'Ouargla au niveau du laboratoire de génie des procédés (LGP), qui est située dans le sud de l'Algérie où les taux d'irradiation solaire sont élevés.

L'objectif principal de cette étude est d'atteindre une vitesse d'écoulement de l'air au sein de la cheminée la plus élevée dans le matin et la nuit afin d'utiliser cette vitesse pour faire lancer une turbine électrique. A travers une étude expérimentale, l'influence des conditions climatiques (rayonnement solaire et température ambiante) et des paramètres géométriques sur l'efficacité de production de la cheminée solaire est déterminé. De plus, l'influence du système d'hybridation sur les performances de la cheminée solaire et sur la durée de son fonctionnement après le coucher de soleil est étudiée avec l'utilisation de l'énergie géothermale nommée l'ALBIEN. Ce dernier peut servir pour maintenir la température élevée du collecteur pendant la nuit et il est aussi en abondance dans la région d'Ouargla.

Les résultats ont montré la faisabilité et les performances détaillées des concepts proposés, et des améliorations significatives des performances du système sont obtenues. Dans le contenu suivant, les réalisations cruciales de cette étude ont aboutis aux remarques qui sont résumées comme suit :

1. La température ambiante est un facteur important affectant les performances du système de cheminée solaire ;
2. En termes de transmissivité du rayonnement solaire, un verre de 0,005 m d'épaisseur peut être une bonne couverture pour un collecteur ;

3. Le sol spécialement préparé dans le système de cheminée solaire a atteint la température maximale ;
4. La chaleur sous le collecteur augmente vers la cheminée et diminue vers le haut dans la cheminée ;
5. Dans un système de cheminée solaire, le débit d'air à l'entrée du collecteur est légèrement plus élevé que sous le collecteur où il tombe vers une valeur minimale et remonte rapidement à l'entrée de la cheminée ;
6. Les vents ambiants affectent le fonctionnement d'une CCS de plusieurs façons. Les pertes par convection du toit du collecteur vers l'environnement sont augmentées lorsque les vents traversiers soufflent sur le toit. Le flux d'air à travers la CCS est également modifié par les vents soufflant à travers la sortie de la cheminée. De plus, les vents de travers ambiants qui soufflent sous le toit du collecteur affectent également le flux d'air à travers la CCS ;
7. Les performances de la cheminée solaire sont faibles le matin et le soir par contre autour des heures de midi elles sont très importantes ;
8. La mesure de la température pendant la journée montre que la distribution de la température dans l'incision sud est légèrement plus élevée que dans l'incision nord ;
9. La différence de température entre la sortie du collecteur et la température ambiante peut généralement atteindre 21-26 °C mais dans cette étude elle est de l'ordre de 52,1 °C, ce qui génère la force motrice du flux de l'air dans l'installation, c'est l'effet de serre produit dans le collecteur solaire. Il ressort des analyses de la distribution de température dans la cheminée solaire qu'une inversion de température de l'air apparaît dans cette cheminée après le lever du soleil ;
10. Il est observé dans les mesures que tant que la hauteur d'entrée d'air du collecteur augmente, les performances de la cheminée solaire diminuent et la hauteur la plus idéale devient 0,05 m. En outre, les performances du système de cheminée solaire sont négativement affectées car le collecteur de la partie d'entrée d'air est élevé, il rompt l'équilibre de la chaleur et du flux d'air entre le collecteur et le sol sous le collecteur ;
11. La géométrie de la zone d'entrée (type jonction collecteur-cheminée) a un effet sur les paramètres de performance. Les résultats ont montré que :
  - L'utilisation d'une jonction incurvée ou arrondie au lieu de la jonction droite minimise les pertes et maintient la vitesse le long de la région de la cheminée ;
  - L'utilisation d'une jonction incurvée ou arrondie avec guide d'air améliore la vitesse d'écoulement en dirigeant l'écoulement vers la cheminée sans formation de circulation au centre du collecteur ;

12. La forme de guide d'air, qui sert à canaliser l'écoulement du fluide à la sortie du collecteur, provoque une grande génération d'entropie éliminant ainsi une partie de l'énergie recueillie par le fluide chaud et de ce fait réduit les performances de la centrale ;
13. Un nouveau type de système de centrale à cheminée solaire à collecteur hélicoïdal est conçu. Les différences de paramètres caractéristiques d'écoulement de fluide et de transfert de chaleur entre l'usine prototype de cheminée solaire traditionnelle et le système de cheminée solaire à 4 parois hélicoïdales sont légères. Par conséquent, le système de cheminée solaire hélicoïdal de collecte de chaleur possède une meilleure efficacité économique et un avantage commercial plus important que le système de cheminée solaire traditionnel, en particulier lorsque nous prenons en compte l'investissement initial ;
14. Dans ce travail, la performance expérimentale d'une CCS utilise la chaleur résiduelle d'une centrale géothermique est étudiée. Les résultats obtenus montrent:
  - Le meilleur cas de direction de l'eau géothermique est du centre du collecteur vers sa périphérie ;
  - Pendant la nuit, le chauffage par des eaux géothermique conduit à une température centrale du collecteur de 37,1 °C et une vitesse d'écoulement d'air de 5,1 m/s dans les meilleures conditions pour la direction de l'eau géothermale ;
  - En revanche, le chauffage par l'intensité du soleil donne une température centrale du capteur de 68,3 °C et une vitesse du flux d'air de 5,8 m/s. de plus, le couplage entre la densité d'énergie solaire et l'eau géothermique se traduit par 80 °C de température centrale du collecteur et une vitesse d'écoulement d'air de 7,1 m/s.

Enfin, les caractéristiques climatiques du Sahara Algérien offrent de très bonnes conditions permettant certainement d'atteindre de bons rendements au niveau d'une cheminée solaire.

Cette étude a identifié avec succès certains domaines d'amélioration possible et des préoccupations possibles concernant la performance de la CCS, des améliorations majeures de la performance de la centrale sont également possibles au futur.

Les travaux futurs devraient concevoir un travail expérimental basé sur les meilleurs paramètres obtenus à partir des résultats numériques CFD, en comparant les résultats expérimentaux avec les résultats numériques et en examinant comment les résultats correspondent les uns aux autres. De plus, le prototype expérimental peut contenir une éolienne et étudier la conception de la turbine et son effet sur les performances de la centrale à cheminée solaire.

La recherche sur le développement d'une cheminée solaire avec des techniques d'hybridation devraient se poursuivre et étudier les effets de l'utilisation de ces techniques sur les performances de la centrale à cheminée solaire. En outre, des systèmes de stockage d'énergie peuvent être utilisés dans la centrale solaire à cheminée et peuvent être modifiés pour obtenir une puissance maximale.

En outre, d'autres systèmes d'énergie renouvelable peuvent être utilisés comme système hybride et tirer partie de l'utilisation de ces systèmes pour maximiser la puissance de sortie de la centrale à cheminée solaire.

Des études expérimentales devraient être menées à l'avenir pour évaluer l'effet de l'inclusion de différents types de végétation sous le toit collecteur du système. Ces expériences devraient tenir compte de l'influence sur la performance des plantes tout en examinant la viabilité de l'incorporation de la végétation - en termes de croissance des plantes et de capacité de survie dans un environnement difficile.

Finalement, une contribution précieuse serait le développement d'un modèle de coût complet de la centrale à cheminée solaire pour la conception d'une centrale à grande échelle, spécifique à un emplacement réel et basé sur des devis réels pour la construction, les matériaux, le transport, l'exploitation, la maintenance, le retour sur investissement, l'assurances et les frais fonciers.

# Référence bibliographiques

## Références bibliographiques

- [1] SEDADY, Fatima; BEHESHTINIA, Mohammad Ali. A novel MCDM model for prioritizing the renewable power plants' construction. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 2019.
- [2] You, W., Guo, Y., Zhu, H., & Tang, Y. Oil price shocks, economic policy uncertainty and industry stock returns in China: Asymmetric effects with quantile regression. *Energy Economics*, 2017, 68: 1-18.
- [3] LETCHER, Trevor M. (ed.). *Future energy: improved, sustainable and clean options for our planet*. Elsevier, 2020.
- [4] MATTOON, Richard H. Energy markets and the Midwest economy. *Economic Perspectives*, 2017, 29.4: 19-32.
- [5] Informe "Renewables 2020: Global Status Report 2020", REN 21. Disponible en: [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr\\_2020\\_full\\_report\\_en.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf)
- [6] MOKRANI, Omar Ben Elkhettab., SELLAMI, M. H., Ouahrani, M. R., & Segni, L. Experimental Investigation on The effects of opening areas on solar chimney performance. In: 2018 International Conference on Communications and Electrical Engineering (ICCEE). IEEE, 2018. p. 1-5.
- [7] KHIDHIR, Dara Khalid; ATROOSHI, Soorkeu A. Performance of a Solar Chimney with a Modified Collector Geometry: A Case Study from Erbil to the North of Iraq. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2020, 142.1.
- [8] ARZPEYMA, M., Mekhilef, S., Newaz, K. M. S., Horan, B., Seyedmahmoudian, M., Akram, N., & Stojcevski, A. Solar chimney power plant and its correlation with ambient wind effect. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, 141.2: 649-668.
- [9] INFIELD, David; FRERIS, Leon. *Les énergies renouvelables pour la production d'électricité. Techniques et Ingénierie*, Dunod/Dunod lusine nouvelle, 2013.
- [10] BAL, Jean-Louis. Les énergies renouvelables et la transition électrique. In: *Annales des Mines-Responsabilité et environnement*. FFE, 2019. P. 57-61.
- [11] KLEISSL, Jan. *Solar energy forecasting and resource assessment*. Academic Press, 2013.
- [12] KALOGIROU, Soteris A. *Solar energy engineering: processes and systems*. Academic Press, 2013.
- [13] SELLAMI, M. H. Etude et amélioration des techniques de distillation solaire dans la région sud-est algérien (Ouargla). PhD Thesis. Thèse de doctorat. Université Kasdi Merbah Ouargla. Algérie. 2014.
- [14] RANABHAT, K., Patrikeev, L., Antal'evna-Revina, A., Andrianov, K., Lapshinsky, V., & Sofronova, E. An introduction to solar cell technology. *Journal of Applied Engineering Science*, 2016, 14.4: 481-491.
- [15] AL-WAELI, A. H., Sopian, K., Kazem, H. A., & Chaichan, M. T. Photovoltaic/Thermal (PV/T) systems: Status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 77: 109-130.
- [16] KHELFAOUI, N., Djafour, A., Bouali, K., Danoune, M. B., Gougui, A., & Boutelli, H. Investigation of the Temperature Effect on the Electrical Parameters of a Photovoltaic Module at Ouargla City. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 2019, 20:4.
- [17] ABDESSEMED, A., Bougriou, C., Guerraiche, D., & Abachi, R. Effects of tray shape of a multi-stage solar still coupled to a parabolic concentrating solar collector in Algeria. *Renewable energy*, 2019, 132: 1134-1140.
- [18] ZHAO, Y., Dunn, A., Lin, J., & Shi, D. Photothermal Effect of Nanomaterials for Efficient Energy Applications. In: *Novel Nanomaterials for Biomedical, Environmental and Energy Applications*. Elsevier, 2019. p. 415-434.
- [19] JOARDDER, M. U. H., Halder, P. K., Rahim, M. A., & Masud, M. H. Solar pyrolysis: converting waste into asset using solar energy. In: *Clean Energy for Sustainable*

- Development. Academic Press, 2017. P. 213-235.
- [20] SETTOU, B., Settou, N., Gouareh, A., Negrou, B., Mokhtara, C., & Messaoudi, D. A high-resolution geographic information system-analytical hierarchy process-based method for solar PV power plant site selection: a case study Algeria. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2020, 1-16.
- [21] CHENAKER, Hichem; HOUHA, Belgacem; VINCENT, Valles. Hydrogeochemistry and geothermometry of thermal water from north-eastern Algeria. *Geothermics*, 2018, 75: 137-145.
- [22] OUALI, S., Hadjiat, M. M., Ait-Ouali, A., Salhi, K., & Malek, A. Cartographie et caractérisation des ressources géothermiques de l'Algérie. *Revue des Energies Renouvelables*, 2018, 21.1: 54-61.
- [23] IBRAHIM, Hussein. Étude et conception d'un générateur hybride d'électricité de type éolien-diesel avec élément de stockage d'air comprimé. Thèse de doctorat. Université du Québec à Chicoutimi, 2010
- [24] SCHAFFARCZYK, A. P. Types of wind turbines. In: *Introduction to Wind Turbine Aerodynamics*. Springer, Cham, 2020. p. 7-25.
- [25] DERAÏ, A.; KAABECHE, A.; DIAF, S. Etude de faisabilité technico-économique de fermes éoliennes en Algérie. *Revue des Energies Renouvelables*, 2017, 20.4: 693-712.
- [26] VIOLLET, Pierre-Louis. Histoire de l'énergie hydraulique: moulins, pompes, roues et turbines de l'Antiquité au XXe siècle. Presses des Ponts, 2005.
- [27] GINOCCHIO, Roger; VIOLLET, Pierre-Louis. L'énergie hydraulique. Lavoisier, 2012.
- [28] BOUZID, Touati. Les barrages et la politique hydraulique en Algérie: état, diagnostic et perspectives d'un aménagement durable. These de doctorat, Université de Mentouri–Constantine, 2010.
- [29] SMAÏ, D. Ali; ZAHI, Mohamed Lamine. Les Potentialites De L'algerie En Energies Renouvelables. *Recherches économiques et managériales*, 2016, 19: 7902-1112.
- [30] DAVIRON, Benoit. Biomasse: une histoire de richesse et de puissance. Ed. Quae, 2019.
- [31] AL-KAYIEM, Hussain H.; AJA, Ogboo Chikere. Historic and recent progress in solar chimney power plant enhancing technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 58: 1269-1292.
- [32] TAYEBI, Tahar; DJEZZAR, Mahfoud. Étude Numérique de la Convection Naturelle dans une Cheminée Solaire. Éditions universitaires européennes, 2014.
- [33] Haaf W, Friedrich K, Mayr G, Schlaich J. Solar chimneys part I: principle and construction of the pilot plant in Manzanares. *International Journal of Solar Energy*. 1983;2:3-20.
- [34] Weinrebe G, Schiel W. 'Up-Draught Solar Tower and Down-Draught Energy Tower—A Comparison. *Proceedings of the ISES Solar World Congress 2001*2001.
- [35] Mullett L. The solar chimney—overall efficiency, design and performance. *International Journal of Ambient Energy*. 1987; 8:35-40.
- [36] Padki M, Sherif S, Chan A. Solar chimney for power generation in rural areas. *Seminar on energy conservation and generation through renewable resources, Ranchi, India*1989. p. 91-6.
- [37] Padki M, Sherif S. Solar chimney for medium-to-large scale power generation. *Proceedings of the manila international symposium on the development and management of energy resources*1989. p. 423-37.
- [38] Padki M, Sherif S. On a simple analytical model for solar chimneys. *International journal of energy research*. 1999; 23:345-9.
- [39] Lodhi M. Application of helio-aero-gravity concept in producing energy and suppressing pollution. *Energy conversion and management*. 1999; 40:407-21.
- [40] Chitsomboon T. Potential and efficiency of solar chimney in the production of electrical energy. *Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand*. 2000; 11:33-44.
- [41] Chitsomboon T. A validated analytical model for flow in solar chimney. *International Journal of Renewable Energy Engineering*. 2001; 3:339-46.

- [42] Dai Y, Huang H, Wang R. Case study of solar chimney power plants in Northwestern regions of China. *Renewable energy*. 2003; 28:1295-304.
- [43] Haaf W. Solar chimneys: part ii: preliminary test results from the Manzanares pilot plant. *International Journal of Sustainable Energy*. 1984; 2:141-61.
- [44] Von Backström T.W, Fluri T.P. Maximum fluid power condition in solar chimney power plants – An analytical approach. *Solar Energy*. 2006; 80:1417-23.
- [45] Kreetz H. Theoretische Untersuchungen un Auslegungein est emporaren Wasserspeichers fur das Aufwindkraftwerk. Berlin: Energie und Verfahrens technik der TU Berlin; 1997.
- [46] Bernardes M. Technische, ökonomische und ökologische Analyse von Aufwindkraftwerken (Technical, Economical and Ecological Analysis of Solar Chimney Power Plants): Ph. D. thesis, Universität Stuttgart. (in German); 2004.
- [47] Tingzhen M, Liu W, Pan Y, Xu G. Numerical analysis of flow and heat transfer characteristics in solar chimney power plants with energy storage layer. *Energy Conversion and Management*. 2008; 49:2872-9.
- [48] Tingzhen M, Wei L, Yuan P. Numerical Analysis of the Solar Chimney Power Plant with Energy Storage Layer. *Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol I–Vol V)*: Springer; 2009. p. 1800-5.
- [49] Zheng, Y., Ming, T. Z., Zhou, Z., Yu, X. F., Wang, H. Y., Pan, Y., & Liu, W. Unsteady numerical simulation of solar chimney power plant system with energy storage layer. *Journal of the Energy Institute*. 2010; 83:86-92.
- [50] Hurtado F.J, Kaiser A.S, Zamora B. Evaluation of the influence of soil thermal inertia on the performance of a solar chimney power plant. *Energy*. 2012; 47:213-24.
- [51] Daba R. Modeling and Simulation of Solar Chimney Power Plant with and without the Effect of Thermal Energy Storage Systems: Addis Ababa Institute of Technology; 2011.
- [52] Pretorius J.P. Optimization and control of a large-scale solar chimney power plant: Stellenbosch: University of Stellenbosch; 2007.
- [53] Dos Santos Bernardes M.A, Molina Valle R, Cortez MF-B. Numerical analysis of natural laminar convection in a radial solar heater. *International journal of thermal sciences*. 1999; 38:42-50.
- [54] Yan M.Q, Sherif S.A, Kridli G.T, Lee SS, Padki M.M. Thermo-fluids analysis of solar chimneys. *Industrial Application Fluid Mechanic ASME FED-2*. 1991:125-30.
- [55] Kirstein C.F, von Backström T.W. Flow through a solar chimney power plant collector-to chimney transition section. *Journal of solar energy engineering*. 2006; 128:312-7.
- [56] Von Backström T.W, Bernhardt A, Gannon A.J. Pressure drop in solar power plant chimneys. *Journal of solar energy engineering*. 2003; 125:165-9.
- [57] S Pretorius J.P, Kröger D.G. Critical evaluation of solar chimney power plant performance. *Solar Energy*. 2006; 80:535-44.
- [58] Kolb S, Helmrich T. Aerodynamic design of a 200 MW solar chimney power plant: Diploma Thesis, Universität Stuttgart. (in German).(Cited on page 54.); 1996.
- [59] Denantes F, Bilgen E. Counter-rotating turbines for solar chimney power plants. *Renewable energy*. 2006; 31:1873-91.
- [60] Fluri T.P, von Backström T.W. Comparison of modeling approaches and layouts for solar chimney turbines. *Solar Energy*. 2008; 82:239-46.
- [61] Tingzhen, M., Wei, L., Guoling, X., Yanbin, X., Xuhu, G., & Yuan, P. Numerical simulation of the solar chimney power plant systems coupled with turbine. *Renewable Energy*. 2008; 33:897-905.
- [62] Zhang K., Zhang X., Li S., Wang G. Numerical study on the thermal environment of UFAD system with solar chimney for the data center. *Energy Procedia*, 2014, 48: 1047-1054.
- [63] Al-Kayiem, H. H., Sreejaya, K. V., Gilani, S. I. U. H. Mathematical analysis of the influence of the chimney height and collector area on the performance of a roof top solar chimney. *Energy and Buildings*. 2014; 68, 305-311.
- [64] Naraghi, M. H., Blanchard, S. Twenty-four hour simulation of solar chimneys. *Energy and*

- Buildings. 2015; 94, 218-226.
- [65] Liu, S., Li, Y. Heating performance of a solar chimney combined PCM: A numerical case study. *Energy and Buildings*. 2015; 99, 117-130.
- [66] Ahmadi GR, Toghraie D. Energy and exergy analysis of Montazeri Steam Power Plant in Iran. *Renew Sustain Energy Rev*. 2016; 56:454–63.
- [67] Hu S, Leung D, Chan JCY. Impact of the geometry of divergent chimneys on the power output of a solar chimney power plant. *Energy*. 2017; 120:1–11.
- [68] Najm OA, Shaaban S. Numerical investigation and optimization of the solar chimney collector performance and power density. *Energy Convers Manag*. 2018; 168:150–61.
- [69] Rabehi, R., Chaker, A., Ming, T., & Gong, T. Numerical simulation of solar chimney power plant adopting the fan model. *Renew Energy*. 2018; 126:1093–101.
- [70] Ayadi, A., Bouabidi, A., Driss, Z., & Abid, M. S. Experimental and numerical analysis of the collector roof height effect on the solar chimney performance. *Renew Energy*. 2018; 115:649–62.
- [71] Amudam Y, Chandramohan VP. Influence of thermal energy storage system on flow and performance parameters of solar updraft tower power plant: a three dimensional numerical analysis. *J Clean Prod*. 2019; 207:136–52.
- [72] Li, G., Huang, H., Zhang, J., & Zhang, H. Study on the performance of a solar collector with heat collection and storage. *Appl Therm Eng*. 2019; 147:380–9.
- [73] Zhou X, Yang J. Temperature field of solar collector and application potential of solar chimney power systems in China. *Journal of the Energy Institute*. 2008; 81:25-30.
- [74] Ketlogetswe C, Fiszdon JK, Seabe OO. RETRACTED: Solar chimney power generation project—The case for Botswana. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008; 12:2005-12.
- [75] Maia CB, Ferreira AG, Valle RM, Cortez MFB. Theoretical evaluation of the influence of geometric parameters and materials on the behavior of the airflow in a solar chimney. *Computers & Fluids*. 2009; 38:625-36.
- [76] Kasaeian AB, Heidari E, Vatan SN. Experimental investigation of climatic effects on the efficiency of a solar chimney pilot power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011; 15:5202-6.
- [77] Najmi M, Nazari A, Mansouri H, Zahedi G. Feasibility study on optimization of a typical solar chimney power plant. *Heat and Mass Transfer*. 2011; 48:475-85.
- [78] Gholamalizadeh E, Mansouri SH. A comprehensive approach to design and improve a solar chimney power plant: A special case – Kerman project. *Applied Energy*. 2013; 102:975-82.
- [79] Mehla, N., Makade, R., & Thakur, N. S. Experimental analysis of a velocity field using variable chimney diameter for solar updraft tower. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2011; 3, 3167- 3171.
- [80] Al-Dabbas M.A. The first pilot demonstration: solar updraft tower power plant in Jordan. *International Journal of Sustainable Energy*. 2012; 31:399-410.
- [81] Bugutekin A. Effect of the collector diameter on solar chimney power plants. *Energy education science and technology part A-energy science and research*. 2011; 27:155-68.
- [82] Chappell R.D, Congdon MJ, French JJ. Design, construction, and testing of a small scale solar chimney for nomadic herdsman. In: *Energy Sustainability*. American Society of Mechanical Engineers, 2012. P. 33-38.
- [83] Khanal, R., Lei, C. An experimental investigation of an inclined passive wall solar chimney for natural ventilation. *Solar Energy*. 2014; 107, 461-474.
- [84] Shahreza, AR., Imani, H. Experimental and numerical investigation on an innovative solar chimney. *Energy Conversion and Management*. 2015; 95, 446-452.
- [85] Al-AzawieSS., Hassan S., Zammeri MF. Experimental and numerical study on ground material absorptivity for solar chimney power applications. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2014, 186: 219-230.
- [86] Aja OC., Al-KayiemHH., Abdul Karim ZA. Experimental investigation of the effect of wind

- speed and wind direction on a solar chimney power plant. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2013, 179: 945-955.
- [87] Li, Y., & Liu, S. Experimental study on thermal performance of a solar chimney combined with PCM. *Applied Energy*. 2014; 114: 172-178.
- [88] Kasaeian, A., Ghalamchi, M., Ghalamchi, M. Simulation and optimization of geometric parameters of a solar chimney in Tehran. *Energy Conversion and Management*. 2014; 83: 28-34.
- [89] Ghalamchi, M., Kasaeian, A., Ghalamchi, M. Experimental study of geometrical and climate effects on the performance of a small solar chimney. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015; 43: 425-431.
- [90] Tan, AYK, Wong, NH. Influences of ambient air speed and internal heat load on the performance of solar chimney in the tropics. *Solar Energy*. 2014; 102: 116-125.
- [91] Okada, S., Uchida, T., Karasudani, T., Ohya, Y. Improvement in Solar Chimney Power Generation by Using a Diffuser Tower. *Journal of Solar Energy Engineering*. 2015; 137(3), 031009.
- [92] Nasirivatan, S., Kasaeian, A., Ghalamchi, M., &Ghalamchi, M. Performance optimization of solar chimney power plant using electric/corona wind. *Journal of Electrostatics*. 2015; 78: 22-30.
- [93] Ghalamchi, M., Kasaeian, A., Ghalamchi, M., &Mirzahosseini, A. H. An experimental study on the thermal performance of a solar chimney with different dimensional parameters. *Renewable Energy*. 2016; 91: 477-483.
- [94] AHMED, M. Rafiuddin; PATEL, Sandeep K. Computational and experimental studies on solar chimney power plants for power generation in Pacific Island countries. *Energy Conversion and Management*, 2017, 149: 61-78.
- [95] Ahmed OK, Hussein AS. New design of solar chimney (case study). *Case Stud Therm Eng*. 2018; 11:105–112.
- [96] James, A., Sam, A. P., Skaria, R. M., & Sreekanth, K. J. Investigations on a micro-scale solar chimney. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 2019, 6 (10).
- [97] GOLZARDI, Sajad; MEHDIPOUR, Ramin; BANIAMERIAN, Zahra. How collector entrance influences the solar chimney performance: experimental assessment. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, 1-14.
- [98] MEHDIPOUR, R.; GOLZARDI, S.; BANIAMERIAN, Z. Experimental justification of poor thermal and flow performance of solar chimney by an innovative indoor experimental setup. *Renewable Energy*, 2020, 157: 1089-1101.
- [99] KHIDHIR, Dara Khalid; ATROOSHI, Soorkeu A. Investigation of thermal concentration effect in a modified solar chimney. *Solar Energy*, 2020, 206: 799-815.
- [100] Chen, W., Qu, M. Analysis of the heat transfer and airflow in solar chimney drying system with porous absorber. *Renewable Energy*. 2014; 63: 511-518.
- [101] Liu , B., Ma, X., Wang, X., Dang, C., Wang, Q., & Bennacer, R. Experimental study of the chimney effect in a solar hybrid double wall. *Solar Energy*. 2015; 115, 1-9.
- [102] Cao, F., Li, H., Ma, Q., Zhao, L. Design and simulation of a geothermal–solar combined chimney power plant. *Energy Conversion and Management*. 2014; 84: 186-195.
- [103] Zou, Z., He, S. Modeling and characteristics analysis of hybrid cooling-tower-solar chimney system. *Energy Conversion and Management*. 2015; 95: 59-68.
- [104] Ghorbani, B., Ghashami, M., Ashjaee, M. Electricity production with low grade heat in thermal power plants by design improvement of a hybrid dry cooling tower and a solar chimney concept. *Energy Conversion and Management*, 2015; 94: 1-11.
- [105] Rabani, M., Kalantar, V., Dehghan, A.A., Faghih, AK. Empirical investigation of the cooling performance of a new designed Trombe wall in combination with solar chimney and water spraying system. *Energy and Buildings*. 2015; 102: 45-57.
- [106] Mareeswaran M., Gopal P., Senthilkumar T. Cooling of Solar Cells by Chimney – Forced Draft of Air. *JCHP, special issue*, 6, 2015: 167-169.

- [107] Ming, T., Gong, T., de Richter, R. K., Cai, C., & Sherif, S. A. Numerical analysis of seawater desalination based on a solar chimney power plant. *Applied Energy*, 2017, 208: 1258-1273.
- [108] Asayesh, Mohammad; KASAEIAN, Alibakhsh; ATAELI, Abtin. Optimization of a combined solar chimney for desalination and power generation. *Energy Conversion and Management*, 2017, 150: 72-80.
- [109] Maia, C. B., Ferreira, A. G., Cabezas-Gómez, L., Silva, J. D. O. C., & de Moraes Hanriot, S. Thermodynamic analysis of the drying process of bananas in a small-scale solar updraft tower in Brazil. *Renewable Energy*, 2017, 114: 1005-1012.
- [110] Zuo, L., Ding, L., Chen, J., Zhou, X., Xu, B., & Liu, Z. Comprehensive study of wind supercharged solar chimney power plant combined with seawater desalination. *Solar Energy*, 2018, 166: 59-70.
- [111] Rahbar, Kiyarash; RIASI, Alireza. Performance enhancement and optimization of solar chimney power plant integrated with transparent photovoltaic cells and desalination method. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 46: 101441.
- [112] Kiwan, Suhil, and Ismail Salim. A hybrid solar chimney/photovoltaic thermal system for direct electric power production and water distillation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2020, 38: 100680.
- [113] Schlaich J., R. Bergemann, W. Schiel and G. Weinrebe, Design of commercial solar updraft tower systems—utilization of solar induced convective flows for power generation. *J. Sol. Energy Eng.*, 2005, 127.1: 117-124.
- [114] GHOLAMALIZADEH, E.; MANSOURI, S. H. A comprehensive approach to design and improve a solar chimney power plant: A special case—Kerman project. *Applied Energy*, 2013, 102: 975-982.
- [115] ADEL, Momtaz Fahmy Sedrak. Numerical Simulation and Experimental Validation of a Solar Chimney. 2003. PhD Thesis. Helwan University.
- [116] Huang, M. H., Chen, L., He, Y. L., Cao, J. J., & Tao, W. Q. A two-dimensional simulation method of the solar chimney power plant with a new radiation model for the collector. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2017, 85: 100-106.
- [117] SEDIGHI, Ali Asghar; DELDOOST, Zeynab; KARAMBASTI, Bahram Mahjoob. Effect of thermal energy storage layer porosity on performance of solar chimney power plant considering turbine pressure drop. *Energy*, 2020, 194: 116859.
- [118] CAO, Fei, et al. Design and simulation of a solar double-chimney power plant. *Renewable Energy*, 2017, 113: 764-773.
- [119] CUCE, Erdem; SEN, Harun; CUCE, Pinar Mert. Numerical performance modelling of solar chimney power plants: Influence of chimney height for a pilot plant in Manzanares, Spain. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2020, 39: 100704.
- [120] NSAIF, Osama; AYLI, Ece; YAPICI, Ekin Özgirgin. Numerical Investigation On The Performance Of A Small Scale Solar Chimney Power Plant For Different Geometrical Parameters. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 122908.
- [121] MEHDIPOUR, R.; GOLZARDI, S.; BANIAMERIAN, Z. Experimental justification of poor thermal and flow performance of solar chimney by an innovative indoor experimental setup. *Renewable Energy*, 2020.
- [122] Mehdipour, R., Baniamerian, Z., Golzardi, S., & Murshed, S. S. Geometry modification of solar collector to improve performance of solar chimneys. *Renewable Energy*, 2020, 162: 160-170.
- [123] LAL, Shiv; KAUSHIK, S. C.; HANS, Ranjana. Experimental investigation and CFD simulation studies of a laboratory scale solar chimney for power generation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2016, 13: 13-22.
- [124] Bouabidi, A., Ayadi, A., Nasraoui, H., Driss, Z., & Abid, M. S. Study of solar chimney in Tunisia: Effect of the chimney configurations on the local flow characteristics. *Energy and Buildings*, 2018, 169: 27-38.
- [125] TOO, Jeffrey HY; AZWADI, CS Nor. A brief review on solar updraft power plant. *J. Adv.*

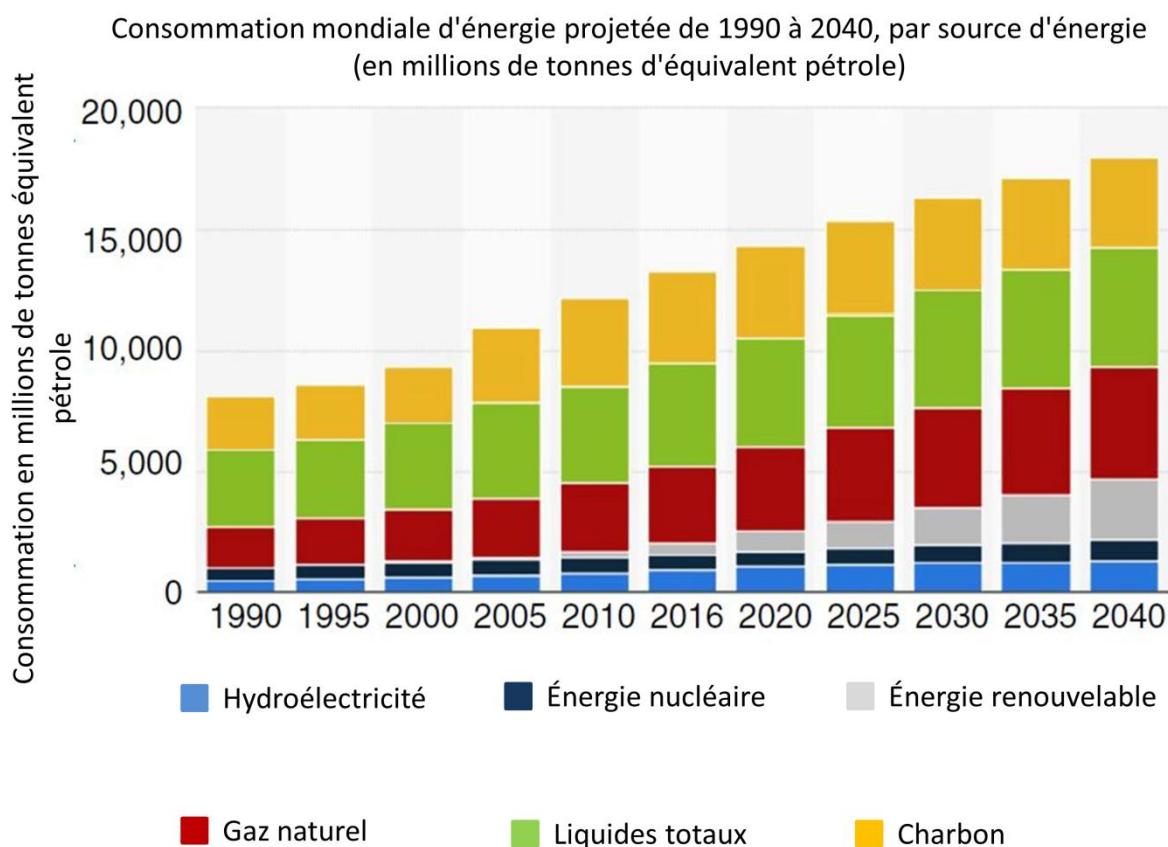
Rev. Sci. Res, 2016, 18: 1-25.

- [126] ELMAGID, Walid; KEPLER, István; MOLNAR, Ildiko. Efficient Axial Flow Turbine for Solar Chimney. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2020, 12.3.
- [127] ELMAGID, W. M. A.; KEPLER, I. Axial Flow Turbine for Solar Chimney. *Hungarian Agricultural Engineering*, 2017, 32: 29-37.
- [128] MEKHAIL, Tarek A.; FADEEL, W. Abdel; ELMAGID, W. M. Experimental and CFD of designed small wind turbine. *Int. J. Sci. Eng. Res.*, 2015, 6: 59-68.
- [129] Zuo, L., Qu, N., Liu, Z., Ding, L., Dai, P., & Xu, B. Performance study and economic analysis of wind supercharged solar chimney power plant. *Renewable Energy*, 2020
- [130] VON BACKSTRÖM, T. W.; GANNON, A. J. Solar chimney turbine characteristics. *Solar energy*, 2004, 76.1-3: 235-241.
- [131] BORETTI, Albert; AL-ZUBAIDY, Sarim. Maturity assessment of the solar updraft tower technology. *Renewable Energy Focus*, 2018, 27: 135-144.
- [132] MULLETT, L. B. The solar chimney—Overall efficiency, design and performance. *International journal of ambient energy*, 1987, 8.1: 35-40.
- [133] HEDDERWICK, Richard Anthony. Performance evaluation of a solar chimney power plant. 2000. PhD Thesis. Stellenbosch: University of Stellenbosch.
- [134] PRETORIUS, J. P.; KRÖGER, D. G. Critical evaluation of solar chimney power plant performance. *Solar Energy*, 2006, 80.5: 535-544.
- [135] Bouzaher, M. T., Bouchahm, N., Guerira, B., Bensaci, C. E., & Lebbi, M. On the thermal stratification inside a spherical water storage tank during dynamic mode. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 159: 113821.
- [136] LARBI, Salah; BOUHDJAR, Amor; CHERGUI, Toufik. Performance analysis of a solar chimney power plant in the southwestern region of Algeria. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 2010, 14.1: 470-477.
- [137] LI, Jing-yin; GUO, Peng-hua; WANG, Yuan. Effects of collector radius and chimney height on power output of a solar chimney power plant with turbines. *Renewable Energy*, 2012, 47: 21-28.
- [138] SCHIEL, W.; SCHLAICH, J. The solar chimney: electricity from the sun. Schlaich Eergermann und Partner, Germany: Stuttgart, Axel Menges, 1995, 245-267.
- [139] HAKIM, M. SEMAI. Recherche d'une configuration optimale d'une centrale solaire à cheminée. 2017. PhD Thesis. UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID-TLEMCEM
- [140] TAINE, Jean; ENGUEHARD, Franck; IACONA, Estelle. Transferts thermiques-5e édition: Introduction aux transferts d'énergie. Dunod, 2014.
- [141] BATTAGLIA, Jean-Luc; KUSIAK, Andrzej; PUIGGALI, Jean-Rodolphe. Introduction aux transferts thermiques-2e édition: Cours et exercices corrigés. Dunod, 2014.
- [142] BULLIARD-SAURET, Odin. Étude expérimentale de l'Intensification des transferts thermiques par les ultrasons en convection forcée. 2016. PhD Thesis.
- [143] BONNIN, Johanne; CHEDEVILLE, Olivier; FAUDUET, Henri. Génie chimique et des procédés-1re année: Écoulement des fluides, bilans et transferts thermiques-Cours et exercices corrigés. Dunod, 2019.
- [144] TAINE, Jean; PETIT, Jean-Pierre. Transferts thermiques. Sciences Sup. Paris, dunod edition, 2003.
- [145] Chen, Z., Ge, X., Sun, X., Bar, L., & Miao, Y. X. Natural convection heat transfer across air layers at various angles of inclination. *Engineering Thermophysics*, 1984, 26.7: 211-220.
- [146] BIANCHI, Ana-Maria; FAUTRELLE, Yves; ETAY, Jacqueline. Transferts thermiques. PPUR presses polytechniques, 2004.
- [147] BENALLOU, Abdelhanine. Transferts d'énergie par rayonnement. ISTE Group, 2018
- [148] PATEL, Sandeep K.; PRASAD, Deepak; AHMED, M. Rafiuddin. Computational studies on the effect of geometric parameters on the performance of a solar chimney power plant. *Energy conversion and Management*, 2014, 77: 424-431..
- [149] Ghalamchi, M., Kasaeian, A., Ghalamchi, M., & Mirzahosseini, A. H. An experimental study

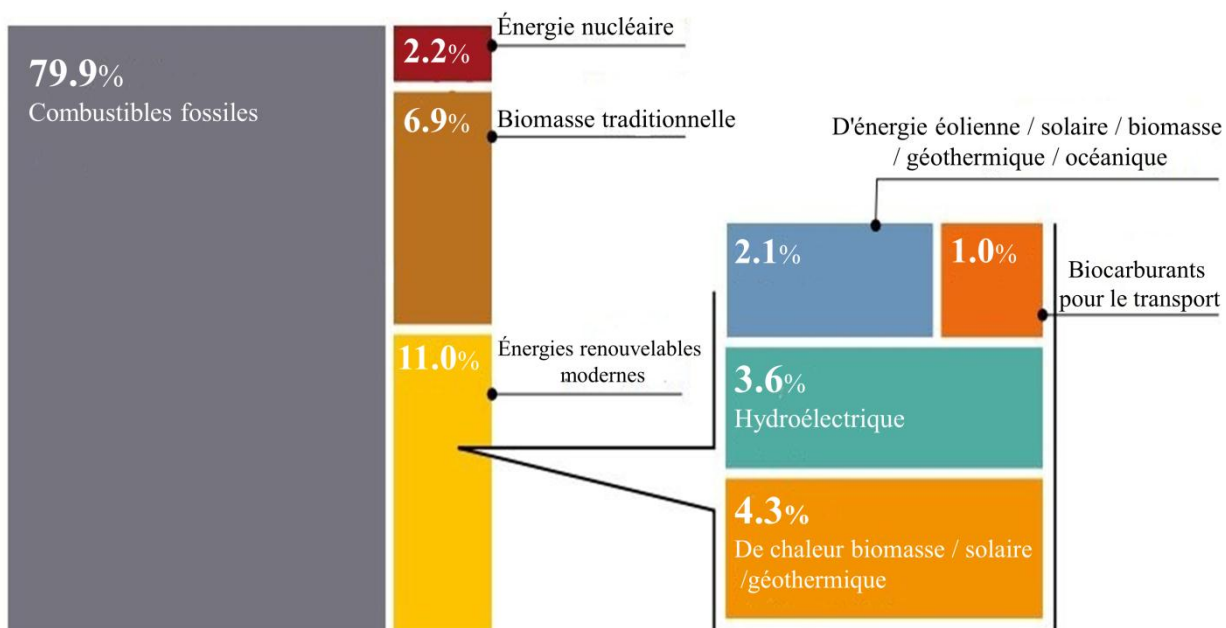
- on the thermal performance of a solar chimney with different dimensional parameters. *Renewable Energy*, 2016, 91: 477-483.
- [150] Fadaei, N., Kasaeian, A., Akbarzadeh, A., & Hashemabadi, S. H. Experimental investigation of solar chimney with phase change material (PCM). *Renewable energy*, 2018: 123: 26-35.
- [151] Aurybi, M. A., Gilani, S. I., Al-Kayiem, H. H., & Ismaeel, A. A.. Mathematical evaluation of solar chimney power plant collector, integrated with external heat source for non-interrupted power generation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2018: 30: 59-67.
- [152] Abdelsalam, E., Kafiah, F., Tawalbeh, M., Almomani, F., Azzam, A., Alzoubi, I., & Alkasrawi, M. Performance analysis of hybrid solar chimney–power plant for power production and seawater desalination: A sustainable approach. *International Journal of Energy Research*, 2020.
- [153] FULLER, Sieglinde; PETERSEN, Steve. LIFE-CYCLE COSTING MANUAL for the Federal Energy Management Program, NIST Handbook 135, 1995 Edition. 1996.
- [154] Abdelsalam, E., Kafiah, F., Alkasrawi, M., Al-Hinti, I., & Azzam, A. Economic Study of Solar Chimney Power-Water Distillation Plant (SCPWDP). *Energies*, 2020, 13.11: 2789.
- [155] CAVATORTA, Francesco; TAHCHI, Belgacem. Politique économique et résilience autoritaire en Algérie: les difficultés de la diversification économique. *Études internationales*, 2019, 50.1: 7-38.

# Annexes

## Annexe 1



**Fig. 1 :** Potentiel de chaque source d'énergie renouvelable en fonction du niveau technologique actuel [4]



**Fig.2** Part estimée des énergies renouvelables dans la consommation finale totale d'énergie, 2018 [5].

## Annexe 2

Les différents appareils de mesure utilisés :



Fig. 1 : Mac solar



Fig. 2 : L'anémomètre à hélice (UNI-T 361)

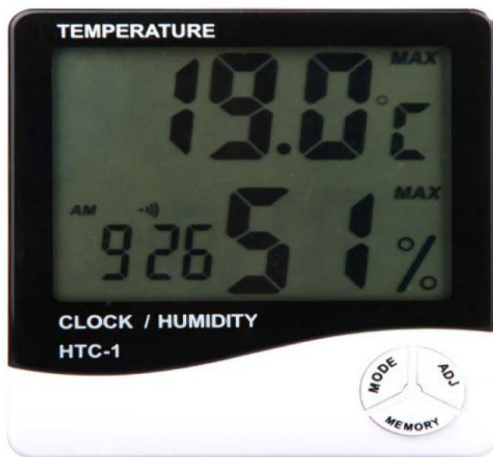


Fig. 3 : Hygromètre



Fig. 4 : anémomètre à hélice testo 416

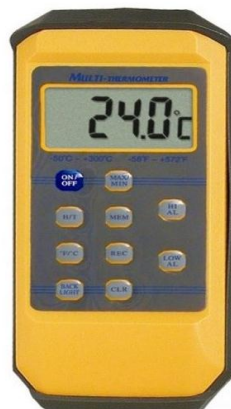
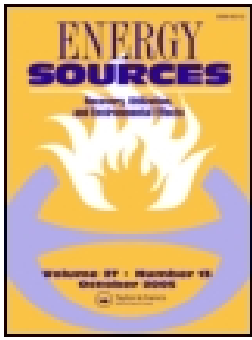


Fig. 5 : Température mètre

# Publication



## Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects

ISSN: (Print) (Online) Journal homepage: <https://www.tandfonline.com/loi/ueso20>

# Experimental investigations of hybrid: geothermal water/solar chimney power plant

Omar Ben El Khettab Mokrani , Med Ridha Ouahrani , Med Hassen Sellami & Ladjel Segni

To cite this article: Omar Ben El Khettab Mokrani , Med Ridha Ouahrani , Med Hassen Sellami & Ladjel Segni (2020): Experimental investigations of hybrid: geothermal water/solar chimney power plant, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, DOI: [10.1080/15567036.2020.1810830](https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1810830)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1810830>



Published online: 26 Aug 2020.



Submit your article to this journal [↗](#)





View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)



## Experimental investigations of hybrid: geothermal water/solar chimney power plant

Omar Ben El Khettab Mokrani <sup>a</sup>, Med Ridha Ouahrani<sup>a</sup>, Med Hassen Sellami <sup>b</sup>,  
and Ladjel Segni<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Department of Process Engineering and Petrochemical, Echahid Hamma Lakhar University El-Oued, El-Oued, Algeria;

<sup>b</sup>Process Engineering Laboratory (PEL), Kasdi Merbah University, Ouargla, Algeria

### ABSTRACT

This study aims to contribute to the operation's continuity of solar chimney power plant (SCPP) by integrating geothermal water as an additional heat source. A prototype of (SCPP) with 8 m height and 12 m of collector diameter was built in Ouargla University. A spiral pipe of geothermal water was installed inside the collector. During the experiments, the temperatures' profile were measured through the collector, the temperature of the chimney's entry as well as the air velocity in all cases namely: in the night under geothermal water heating and in daytime under solar irradiance coupled/uncoupled with geothermal water. The experiments carried out in winter 2019 show that the night heating with geothermal water resulted in an increase of the collector center's temperature to 37.1°C and the air velocity to 5.1 m/s in the optimal case when the geothermal water enters at the collector center and exits at its periphery. On the other hand, during daytime, when the heating is by the solar irradiance only, the collector center's temperature reaches 68.3°C and the air velocity reaches 5.8 m/s. Furthermore, coupling the solar irradiance with geothermal water leads to the rise of collector center's temperature to 80°C and the air velocity to 7.1 m/s.

### ARTICLE HISTORY

Received 21 May 2020

Revised 30 July 2020

Accepted 2 August 2020

### KEYWORDS

Solar chimney; solar irradiance; power generation; geothermal water; Ouargla

## Introduction

The energy issue has been a great interest in the past decades since the economic aspects depend on the working of the production means and economic development projects. Today, the whole world is racing to find new energy sources, as the country's political situation for a long time has been depending on their dominance and control over them. While the world's population has been increasing, more energy is needed which most of it is currently supplied from fossil fuels; therefore, the overuse of fossil fuels as an energy source made the whole world unaware of its risks, and the environment became struggling a circle of phenomena that have not occurred before; such as climate changes, global warming, and the ozone layer damage (Quaschnig 2010). Despite the negative impacts on the entire humanity, fossil fuels are still the primary energy source and it is widely used in all countries of the world, especially in the developing ones. Petroleum and natural gas recently caused the collapse of the global economy because of fluctuations in their prices, which made the importing and exporting countries concerned about the total dependence on petroleum as the sole and unique energy source (Destek and Sinha 2020). That is why the world has been turning to found alternatives to fossil fuels through the inexhaustible renewable energy compared to limited nonrenewable ones. The renewable energy concept reflects the meaning of the energy produced through natural a process, which is continuously renewed. Renewable energy is one of the cleanest and most

environmentally friendly energies, where there are several types, including solar, wind, geothermal, biomass and hydrodynamic energy (Alvarez, Marcovecchio, and Aguirre 2020). Some of them are currently being exploited while others are waiting for future technological progress and scientific development.

Solar energy is one of the most renewable energies exploited as the sun is the ultimate source of traditional and non-traditional energies. In photovoltaic cells or solar heat conversion, solar intensity is used directly to obtain electricity (Bendaoud et al. 2020). The solar intensity used as an energy source, it is common around the globe for many applications, such as water heating for household and business purposes; as well as (CSPP) “concentrated solar power plants”, which use the heat transfer of solar intensity to raise the temperature hundreds of degrees for the purpose to produce steam that operates turbines for producing electricity (Uçkan and Yousif 2020).

The solar chimney power plant (SCPP) or solar updraft tower can also be considered as a new development for the production of electric power by using the solar intensity. It is composed of three main parts: a chimney, a solar collector, and an electric generator. Figure 1 shows an (SCPP) which operates with the same principle as the hydraulic power plant, but instead water; the warm air is used to move turbines (Guo et al. 2016).

This power plant type uses solar intensity to raise the air’s internal energy. The sun’s radiation heats the air under the greenhouse impact in the collector that is open along its periphery and since the warmer air is lighter than cool air; it upturns to the top of the chimney that located in the collector center. A wind turbine is located in the path of the airflow at the base of the chimney in the aim to convert the thermal energy into kinetic energy which is converted into electrical energy by the wind turbine combination and generators (Guo et al. 2019).

The German science writer Hans Gunther proposed this concept in 1931 (Günther and De Haas 1931). Afterward, from 1980 to 1989, a prototype was developed in Manzanares (Spain) by Haaf et al. (1983); it was constructed with a chimney height of 195 m and a diameter of 10 m and the collector area equal to 46000 m<sup>2</sup> (Haaf 1984). The maximum power generation is 50 kW and 41 kW of power was produced in July and September 1987 (Terol 1987).

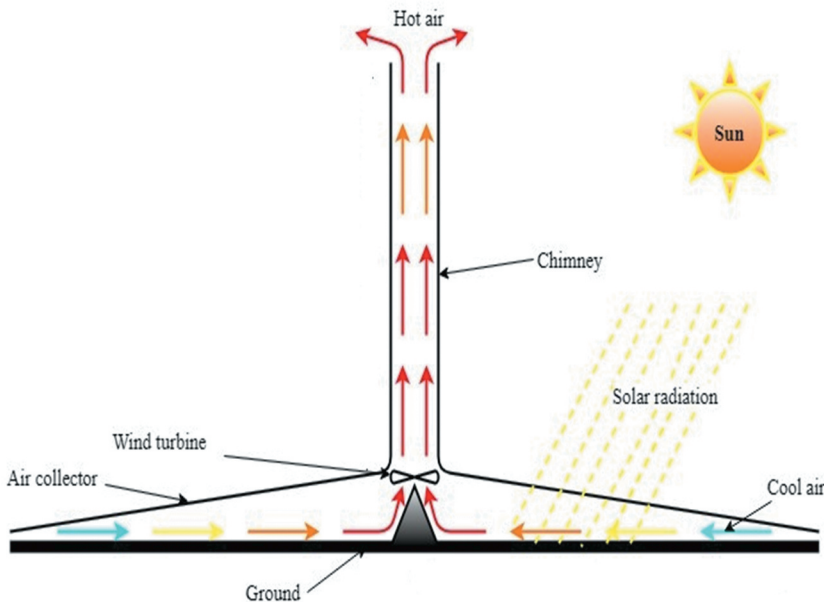


Figure 1. A cross-section of (SCPP).

Since, many studies and research have been conducted to develop (SCPP) performance. A mathematical model for predicting (SCPP)'s performance was developed. Nizetic, Ninic, and Klarin (2008) developed an analytical model to determine the potential for generating electricity in island countries surrounded by the Mediterranean Sea using the solar updraft tower (SUT) system. In their study, they estimated the mean electricity price and the amount of the produced energy. Gitan, Abdulmalek, and Dihrab (2015) developed an extensive mathematical model to assess the effect of the tracking solar collector upon the (SCPP) performance; they found that (SCPP) performed under the Malaysian climate conditions and the collector slope of  $10^\circ$  delivered the greatest power output the whole year.

P.J. Cottam et al. (2016) Contributed to the development of a static analytical model that accurately describes the thermodynamics of the solar collector and assessed the impact of various collector roof designs on the (SCPP) performance. The results showed that canopy height has a significant impact on (SCPP) performance and increases the power generation. D. Toghraie et al. (2018) studied numerically the effect of engineering parameters such as the chimney height and the collector radius on the performance of (SCPP) using the 3D CFD method; they showed that the (SCPP) efficiency has a positive relationship with the chimney height and the collector radius. A numerical analysis was also carried out by Kebabsa et al. (2020). They illustrated in their investigation the effect of collector entrance's geometry (slope, sloping distance) on the performance and the flow patterns within a solar updraft tower (SUT). Their findings showed that the proposed design is an effective way to improve the (SUT)'s performance. Further, a (SUT) with an appropriate collector slope can produce 16.36% of power compared to zero slope collectors. Silva et al. (2014) presented a mathematical model of airflow within a small solar chimney. The prototype architecture built in Belo Horizonte/Brazil was used as a default benchmark. The parametric analysis showed that the most significant parameters are: the tower diameter, the collector radius, and the tower height. The air flow rate, output temperatures, ground, and active efficiency were determined as the main variables in this study. P. Guo et al. (2015) compared the results of a 3D numerical simulation with a true fan and turbine model to study the variation in turbine performance at a velocity of rotation to investigate the option of energy regulation strategy for solar chimney turbines. The influence of the falling light angle and shadow on the (SCPP) performance was verified for the first time. Najm and Shaaban (2018) detailed a numerical investigation, where an improvement in the density of solar chimney energy under different operating conditions was achieved. In order to obtain an optimal collector radius, they used the CFD-limited ANSYS Fluent method. Their numerical simulation indicated that the optimum collector radius was 17 times the chimney radius at  $500 \text{ W/m}^2$  using the turbine with 160-pascal pressure reduction. A comprehensive study was made to identify the effect of divergent tower geometry on system performance of (SUT) power plants by Hu, Leung, and Chan (2017). Two geometric parameters with different scales were analyzed: the tower outlet area above its entrance, and the divergent angle of the tower. The numerical simulations showed that there is an optimal angle of the tower divergence to produce maximum power in the (SUT) system. Jameei et al. (2019) investigated numerically the stacks effect on solar chimney's performance. Due to the kinetic power importance of the heated air within the chimney on power generation from (SCPP), 15 of the chimney walls were simulated from a cylindrical model to an equivalent form. The results indicated that by changing the cylindrical shape to the cone cut by the spacing wall, the airflow within the chimney increased steadily and the maximum air velocity was recorded at the chimney base. Fei, Xuejun, and Razmjooy (2019) designed a new optimal configuration to produce both electricity and heat simultaneously using a hybrid system based on the solar chimney and solid oxide electrolysis cell. Then, in the aim to optimize their process in economic terms, they used the FSO analysis. The final results of the FSO were compared with NSGA-II from the literature to show the greater performance process. For the electricity production and fresh water, the mathematical model for the system study of distilled water production by the solar chimney (SCPWDP) was developed by Kiwan, Al-Nimr, Abdel Salam et al. (2018). The study included the effect engineering parameters and the optimal value determination of the water depth in the water section and its area. The results of the annual simulation of the (SCPWDP) system indicated that  $2.43 \text{ tons/m}^2$  of distilled water and about  $9.95 \text{ kW/m}^2$  of electrical power were produced.

In addition to numerical and analytical studies, many experimental works were carried out in the field of (SCPP). A solar chimney was designed by Zhou et al. (2007) with a 5 W output power; it had a collector diameter of 10 m and a chimney length of 8 m. Buğutekin (2012) conducted an experimental investigation studying the opening height impact of the collector perimeter on the behavior of solar chimneys. The collector diameter was 27 and 15 m and the depth was 0.5 and 0.8 m, respectively. Additionally, they made some changes to the collector's floor to preserve the heat stored during the day. Kasaeian, Heidari, and Vatan (2011) designed a pilot model for a solar updraft tower consisting of a 12 m of chimney height and a 10 m collector diameter, with these dimensions they recorded a maximum air velocity of about 3 m/s. Motsamai et al. (2013) provided an experimental study of a solar chimney with a capacity of 0.6 kW, with a total area of 225 m<sup>2</sup> and a chimney height of 20 m. Black granite rocks were used to store thermal energy absorbed during the day. In northern Tunisia, a (SCPP) prototype was created by Jemli et al. (2017) with a diameter of 8 meters and a height of 2 m. Electricity production estimated to be 0.3 W/m<sup>2</sup> during summer and 0.1 W/m<sup>2</sup> during winter; the storage system is designed to run the model during the night. Ghalamchi et al. (2016) evaluated experimentally the influence of different engineering parameters (collector's entrance height, chimney's diameter, and length ...) on (SCPP) performance. Also, the results showed that aluminum is better than iron as an absorbent material. Maximum air speed of 1.7 m/s was recorded. Kasaeian et al. (2017) studied the environmental temperature influence on the solar chimney performance, and then analyzed the solar chimney dimensions to find variables to predict the (SCPP) performance. Also, the mathematical model was developed and validated by using an experimental data. For this purpose, an experimental structure of solar chimney with a height of 7.4 m, and a diameter of 8 m and 0.2 m of the collector entry was built. Al-Kayiem, Mustafa, and Gilani (2018) proposed a new concept that was developed experimentally for the solar vortex engine (SVE). The goal is to replace the long and expensive tower in the (SUT) and adopt the proposed (SVE) as an alternative. The collector's diameter was 8.0 m and the height of the VGE rotary engine was 1.0 m. It is worthy to note in this context that Nizetic (2011) had investigated about the convective vortices used in the (SCPP) field and a detailed review of the technical utilization of artificial vortex to produce electricity was proposed. Hussain and Al-Sulaiman (2018) developed a new design for a solar chimney power plant (SCPP); reflectors were used to increase solar intensity. The results revealed that there was an increase in energy production and performance of (SCPP) by 133 and 22.6%, respectively, compared to the conventional (SCPP). Avci, Karakaya, and Durmuş (2020) performed a series of systematic analyzes by the CFD simulation in the aim to optimize the power output by analyzing the energy profile of solar chimney. Their numerical results were validated with an experimental testing using an (SCPP) prototype of 11 m length and 12 m width. Under 1057 W/m<sup>2</sup> of solar intensity, they could produce a maximum power of about 26.5 W.K. Bashirnezhad et al. (2018) conducted an experimental study to improve solar chimney performance using heat phase change materials PCM (soil, water, and paraffin as a thermal storage material). The experimental setup consists of a chimney with a 0.3 m diameter, a 12 m length, and an air collector entry with 11 m of diameter. The results showed an increase in (SCPP) performance with 22%, in the paraffin case. Kuscu and Eryener have studied the various effects of air flow rate on a small scale (SUT) performance experimentally (Kuscu and Eryener 2020); they concluded that it is possible to obtain up to 50% more power output by using an airflow controller in the solar updraft towers system. As a result, the use of a combined flow control and MPPT controller is the best method for controlling the power output.

The continuous operation of (SCPP) depends on the solar irradiance and therefore, cannot be operated continuously throughout the night. For this reason, several studies and researches have been conducted for continuous operation during the night, including the uses of the floor under the collector as an energy storage layer (Attig-Bahar et al. 2019), the use of rocks to store heat (Amudam and Chandramohan 2019), and the use of closed reservoirs filled with water (Choi et al. 2016). A new concept for Hussain (2007) has emerged by hybridizing a geothermal/solar chimney power plant using geothermal water pipes. This system allows the electric power generations even the solar intensity absences. In another study, Cao et al. (2014) analyzed the performance of the

geothermal/solar chimney power plant (GSCPP) with the same main dimensions in Manzanares and compared the results in a common model of two other models consisting of a complete solar system and a complete thermal system.

The new concept of the hybrid (SCPP) offered several possible benefits as it is an innovative way to decrease fossil fuel costs and optimizing their consumption to minimize their negative influences on the environment. It is based on the thermal exchange, which allows combination operation with both sun's heat and geothermal temperature to produce electricity in a continuous way even when there are no sun's rays. The use of geothermal energy to generate power is considered an attractive and alternative way that can achieve a 24-h operation. Thus, geothermal power generation could make a major contribution to the basic solar power supply. This is a major advantage as it allows operation according to actual electricity demand, without limiting its performance only in solar intensity hours and that significantly enhances SCPP's ability to compete with traditional power plants. It is found from the previous investigations that there is no attempt to conduct an experimental evaluation of the geothermal impact on the (SCPP). Therefore, it is meaningful to investigate the experimental performance of a prototype of solar chimney with a geothermal heating system during the night. To settle the above-mentioned fundamental issues, a solar chimney power plant (SCPP) was firstly designed and built in the Laboratory of Process Engineering at the University of Ouargla (Algeria) since October 2018. A heating system designed by spiral pipe was installed on the ground inside the solar collector. Geothermal water called Albian was used; where the Albian reservoir is located in southern Algeria (region of Ouargla) which the water temperature reaches 80°C there. After that, the daily and hourly performances of a (SCPP) hybrid are described and evaluated. Finally, the results of the impact of introducing geothermal water are widely discussed.

### **The basic principle**

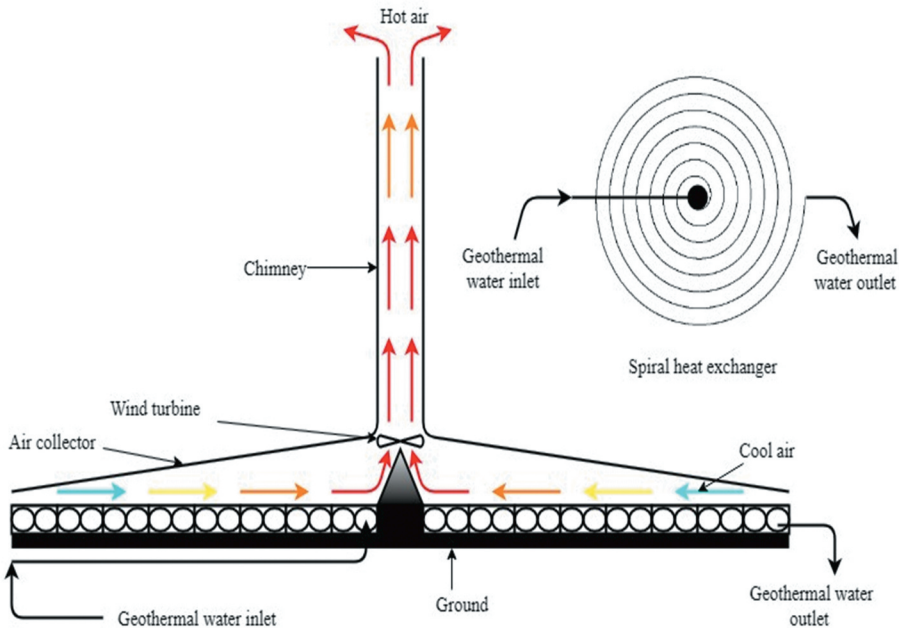
The solar chimney is associated with the heat exchanger (spiral pipe), using geothermal water. The geothermal supply is one of the reasons to ensure the continuous operation of (SCPP) by meeting the demand of the energy at night regardless of external weather changes. It provides a constant flow of heat to the collector during the night, where the temperature drops within the collector after sunset. In this case, it's necessary to maintain the air temperature at a certain level within the collector, to compensate the loss of energy.

For this reason, the hybrid system which is shown in [Figure 2](#), works as follows: The hot water is pumped from the reservoir which passes directly through the pipes placed above the ground surface under the collector roof. The hot water begins to spin from the collector center to the outside. The heat exchanger provides the heat to the internal air in the collector. Hot water exchanges the heat with the air and raises its temperature leading to its flow up through the chimney causing therefore, to the rotation of the turbine generating the electrical power.

Algerian Sahara is characterized by long solar intensity period around the year, with solar radiation lasting 2000 h per year and can reach 3900 h (highlands and deserts). The reception power is regularly on a horizontal surface of 1 m<sup>2</sup> at about 5 kWh on most Algerian territory, approximately 1700 kWh/m<sup>2</sup> per year in the north and 2263 kWh/m<sup>2</sup> per year in the south of the country (Abada and Bouharkat 2018).

Also, several geothermal reservoirs were identified in Algeria. Albian geothermal reservoir covers an area of 600000 km<sup>2</sup> in the desert region; a large part of this reservoir is captured. The water is obtained with a large amount from temperatures around 42°C to 98°C through the exploitation of wells, as shown in [Table 1](#). The Total thermal discharge is estimated at 800 MW (Saibi 2009).

These natural features make the Algerian Sahara an appropriate place to build solar chimneys. It is, therefore, a great advantage because it allows us the operation continuity of the chimney. This is because the geothermal energy supply can overcome the sunlight defects and the solar intensity absences (during the night) and greatly improved the (SCPP) performance for power generation.



**Figure 2.** Schematic diagram of a hybrid (SCPP) with a geothermal heat exchanger.

**Table 1.** Albian geothermal water characterization in South Algeria.

Region	Temperature (°C)	Flow rate (L/s)	Depths (m)
El-Oued	70	197	2000
Touggourt	98	150	1600
Ouargla	70–84	120	1000
Ghardaia	45–60	166	500
El-Golea	42–50	22	200

## Experimental procedure

In order to conduct a pilot investigation of solar chimney performance coupled to a spiral heat exchanger, an experimental setup is shown in Figure 3. It consists by an air collector of 12 m diameter and 8 m chimney length, as shown in Table 2. The prototype is installed and tested in the Process Engineering Laboratory (PEL) at Ouargla University, south of Algeria.

### Chimney design and choice of dimensions

According to the previous studies, the dimensional parameters (the height of the chimney, its diameter and the diameter of the collector ...) affect the output and the total energy generated. The most significant, is the chimney height compared with the collector diameter which has a very limited influence on the output. However, the diameter has a major impact on the energy harvested. In addition, the (SCPP) dimensions are determined by the ratio of chimney height to the collector diameter. From previous researches, it was found that the ratio of collector diameter to the chimney height has a wide range of acceptable values ranging from 0.8 to 5. In this investigation, a preliminary model of the (SCPP) was designed according to the ratio between the diameter of the collector and the height of the chimney. However, the choice of the chimney diameter was made according to what is available in the domestic market, taking into account the appropriate diameter that provides the flow with less friction.



**Figure 3.** A picture of a (SCPP) in Ouargla, Algeria.

**Table 2.** Main dimensions of the (SCPP) prototype.

Parameter	Value (m)
Chimney height	8
Chimney diameter	0.2
Collector diameter	12
Height from collector outlet to ground level	0.8
Height of the opening at the periphery	0.05–0.2

### **Chimney**

The chimney consists of standard PVC pipe of 0.2 m diameter, 6.2 mm thick and 8 m high. This pipe is covered with a glass wool blanket (thickness 0.025 m and thermal conductivity  $k = 0.7 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ) which is used as a thermal insulator to reduce heat loss from the chimney wall. Thermal insulation is covered with thick aluminum foil to prevent it from external influences, especially from the moisture. The PVC pipe is installed on the stanchion made of steel iron which in turn is installed on the ground. To keep the chimney vertically, two rings connected to the chimney were installed; each ring was connected by three galvanized steel wires and reinforced with concrete foundations.

### **Solar collector**

Usually, the slope conical collector angle is considered as a critical parameter to ensure the maximum harvesting of solar irradiance. To achieve this goal, the slope angle and the local latitude should be as equal as possible; Ouargla city is located at the latitude of  $30.8^\circ$  south. If we design a collector with a slope angle  $30.8^\circ$ , the suitable collector outlet height estimate above the ground level using the following equation:  $5(\tan \frac{\alpha}{6})$ . For construction fees reasons, the slope angle in our chimney collector was chosen to be  $8^\circ$ ; therefore, using the previous relationship the height from the collector outlet to the ground level is 0.8 m.

The collector has a circular shape of 12 m diameter. The collector roof is covered with a 5 mm thick of transparent glass. The roof of the solar collector shall be raised by a steel frame from a height of 0.2 m at the outer radius to 0.8 m in the collector center directly below the chimney entrance. In order

to allow the air to flow into the system, the periphery opening size of the collector was chosen as 0.02 m and was built to be easily adjustable.

The central base is connected to eight hinges that are uniformly distributed around the base. These hinges were assembled using radial tubes (diameter 0.45 m, length 6 m, thickness 2 mm). Radial tubes were supported by T-shaped iron ( $0.03 \times 0.03 \times 0.03$  m) to ensure sufficient strength to resist weather fluctuations, especially strong winds and sandstorms at Ouargla region because the pilot setup was outdoors. The central base of solar chimney is reinforced with concrete to ensure the system stability.

### **Absorber insulation**

The (SCPP) performance increases during the experimental day due to solar intensity and ambient temperature. Conversely, the performance is reduced quickly during the night due to the rapid decrease of ambient temperature and the hot air temperature inside the collector. In order to avoid heat loss in the collector floor which greatly affects the (SCPP) efficiency, a special floor is designed to absorb solar intensity during the day and at the same time maintain the heat behaving as storage medium. So, to prevent losses through the ground, insulating materials were used. The pit was drilled at a 0.3 m depth and a 13 m diameter containing 7 different insulating layers: thick gravel 0.05 m, sand 0.05 m, plastic, glass wool-aluminum 0.025 m, 0.1 m of gravel, 0.1 m of sand and 0.01 m of black plastic to increase the maximum absorption of solar intensity as shown in [Figure 4](#).

### **Description of heat exchanger**

The Albian geothermal energy is exploited to heat the air inside the collector. The spiral heat exchanger consists of coils of multi-layer pipes arranged on the collector floor. The heat is then spread from the thermal water to heat the air coming from the perimeter of the collector; the geothermal



**Figure 4.** The thermal insulation steps of the solar chimney's ground (a: thick gravel, b: sand, c: plastic, d: Aluminum folio with glass wool, e: gravel, f: Sand, g: black plastic).



**Figure 5.** Picture showing the spiral thermal exchanger.

water is pumped directly into the collector center with a hot temperature, and then flows along the perimeter of the collector and exits at the end of the spiral tube at a low temperature.

In addition, black rubber granules are filled between thermal exchanger tubes which act as a thermal storage and maintain an average temperature range. The distance between the pipes is 10 cm. the main characteristics of the spiral thermal exchanger are summarized in [Table 3](#).

### **Measurement tools**

The experiments were conducted during winter and spring of 2019. Solar radiance, wind speed, and ambient temperature were measured every 30 min with the air velocity in the chimney entry. The temperature distribution was also monitored in seven locations from the collector periphery opening to the entrance of the chimney ( $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$ ,  $T_5$  and  $T_6$ ) as shown in [Figure 6](#). The distance between two successive thermocouples' location is 1 m.

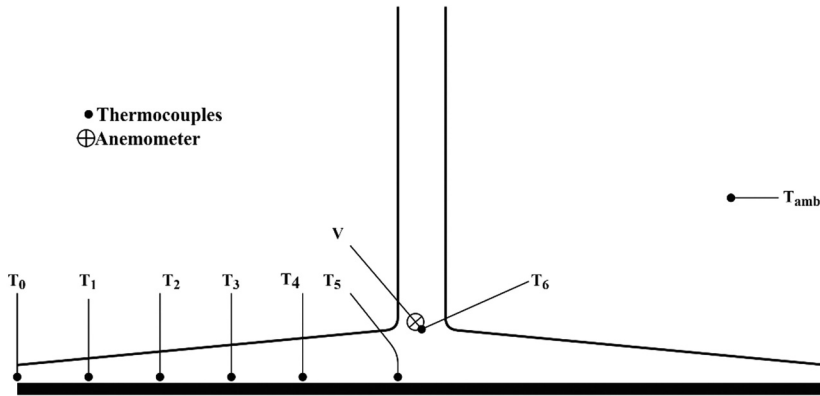
The instrumentations used in the experiment include:

- MacSolar (SLM018 c-E) to measure solar intensity with an accuracy of  $<3\% \pm 1$  digit de 100 to 1000 (W/m<sup>2</sup>). The solar intensity meter provides reading through the solar photovoltaic cell calibration.

- The propeller anemometer (Testo 416) to measure the velocity of airflow at the entrance of the chimney with an uncertainty of  $\pm 0.2$  m/s + 1.5% v.m.

**Table 3.** Main dimensions and characteristics of the spiral thermal exchanger.

Description	Value	Unit
Water flow rate	3	L/min
Inlet water temperature	80	°C
Tube diameter	0.016	m
Distance between the pipes	0.1	m
Spiral diameter	11	m
Spiral lengths	700	m



**Figure 6.** Schematic diagram of the temperature and velocity measurement points ( $T_0$ – $T_6$ : Temperature points; V: Velocity point).

- The propeller anemometer (UNI-T 361) to measure wind speed outside the collector, with an accuracy of  $\pm (3\% + 0.5)$  m/s.
- Seven thermocouples to measure temperature distribution throughout the (SCPP). All thermocouples are (Nickel-Chromium/Nickel-Alumel) type K, and the thermocouples were connected with a digital thermometer with an accuracy of  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ . Furthermore, another digital thermometer was installed with an accuracy of  $\pm 1^\circ\text{C}$  outside the setup to measure ambient temperature.

## Results and discussions

To simplify the presentation of this investigation, this paragraph will be divided into three essential parts; a full-day study (24 h), a daytime study, and a comparative study between nighttime and daytime. The place where our prototype is installed is characterized by geothermal water temperature and flow rate of:  $80^\circ\text{C}$  and 3 (L/min), respectively.

### Measurements for 24 hours

Figure 7 shows the distribution of the temperature under the collector from the periphery to its center in the first case (a) when the hot water enters to the spiral tube from the collector center and exits at its periphery. In this case, the geothermal water temperature increases from the periphery to the center in the logical sense.

The temperature ( $T_0$  to  $T_5$ ) under the collector increases from the periphery to its center in the night with a slight decrease between 18:00 h and 08:00 h because the environmental temperature decreases from  $16.6^\circ\text{C}$  to  $1.5^\circ\text{C}$  (cooled collector). The maximum temperature of  $37.1^\circ\text{C}$  is recorded in the collector center near the ground.

From 8:00 h to 18:00 h in daytime, the environmental temperature increases with solar intensity and then the temperature rises from the collector periphery to its center ( $T_0$  to  $T_5$ ) remarkably to reach  $75.9^\circ\text{C}$  in the collector center at 14:00 h (hot collector).

The temperature ( $T_6$ ) at the chimney entry is lower than ( $T_5$ ) at the center near to the ground because of the disturbance zone and recirculation of the air particles at the collector inlet.

Figure 8 presents the temperature distribution under the collector in the second case (b) when the hot water begins to spiral from the collector periphery to its center then exits outside. In this case, the measured temperatures are lower than the first case because the geothermal water temperature decreases from the periphery to the center (illogical sense) unlike the first case. In this case, the temperature profile ( $T_0$ – $T_5$ ) remains almost identical to Figure 7 but less important except that the

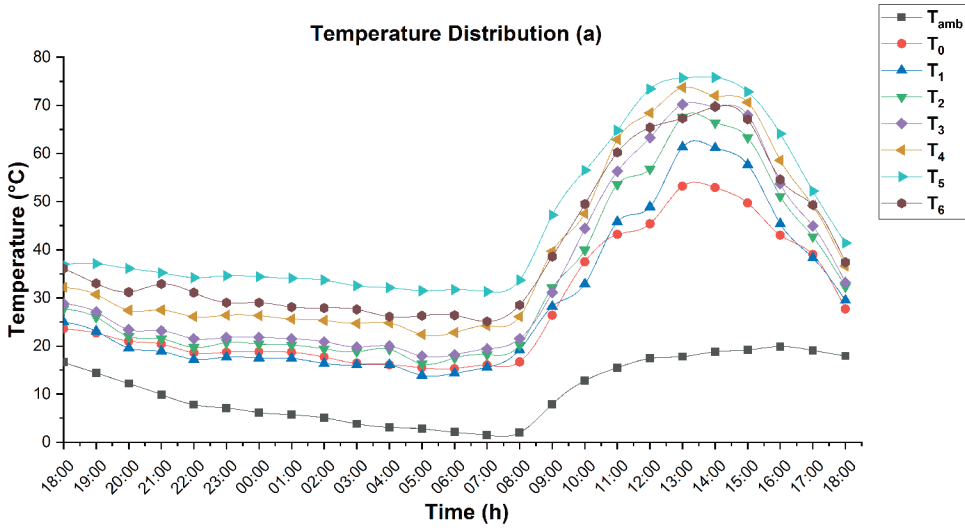


Figure 7. Temperature distribution under the collector in the first case (13–14/02/2019).

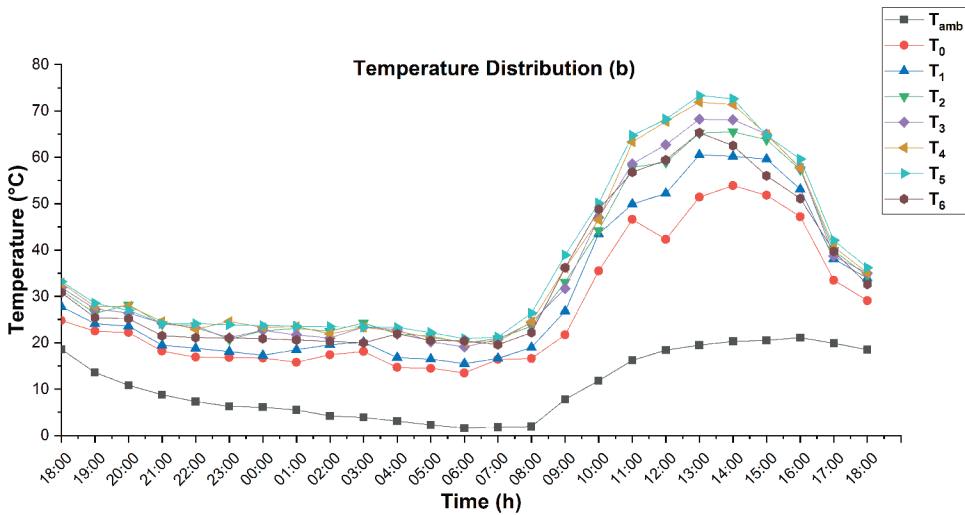


Figure 8. Temperature distribution under the collector in the second case (15–16/02/2019).

temperature ( $T_6$ ) at the chimney entry is lower which means that the disturbance and recirculation zone at the chimney entry becomes important.

Figure 9 illustrates the temperature profile at the collector center near the ground during the day from sunset to sunset (24 hours) in the two cases (a) and (b). It's clear that the logical sense of geothermal water in the spiral is from the center to the periphery; other says the first case (a). In the night, the gap of the temperature between the first case (a) and the second case (b) sometimes reaches 10 to 12°C, this is explained by the fact that the ambient temperature in the night is low and can decrease until 1.5°C (cold collector).

Contrarily, in daytime, the temperature gap between the two cases doesn't exceed 5°C because the sun ray's presence and the environmental temperature enhancement (hot collector).

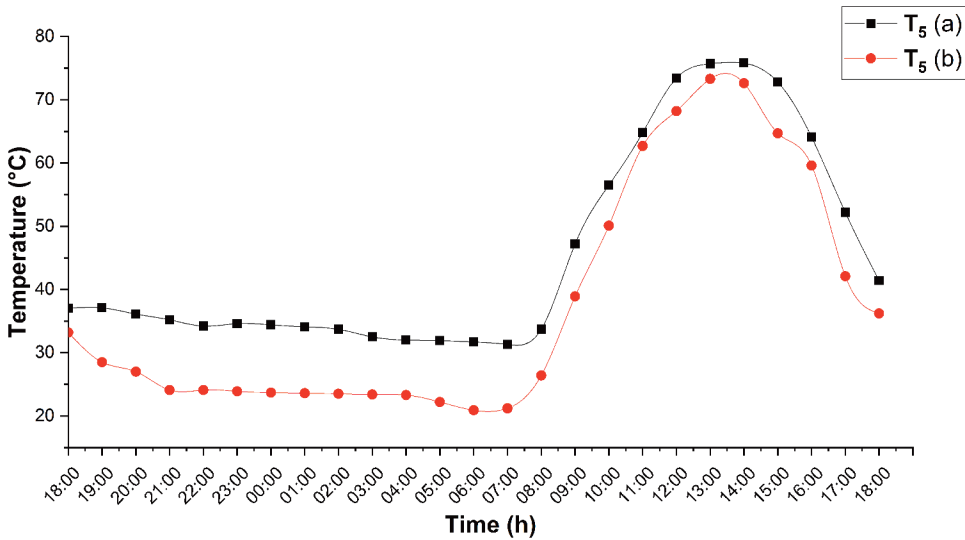


Figure 9. The temperature of the collector center in the two cases (a) and (b) (13–16/02/2019).

In Figure 10, we can see the same trend of the geothermal temperature difference between the spiral inlet and the spiral outlet in the center near the ground for the two cases versus local time during 24 h from 18:00 h to 18:00 h.

It's clear that in the first case, the temperature difference is slightly higher than the second case. This figure can be divided in two parts: the first part is from 18:00 h to 08:00 h (night time) in the absence of solar rays and the second is from the sunrise to the sun set (daytime). In the first part, the temperature difference rises slowly but stays generally between 37.8°C and 49.1°C; here, the thermal transfer from geothermal water is very important because of the low ambient temperature recorded in the night (cooled collector).

In the second part, after sunrise, the chimney absorbs heat easily from the solar rays that's why the temperature difference of geothermal water decreases rapidly from 49.9°C to 10.4°C at midday when

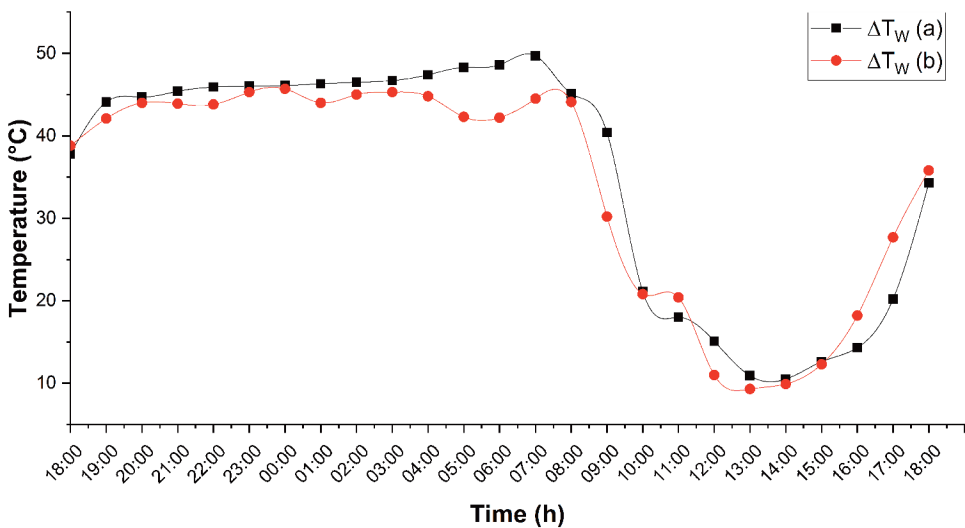


Figure 10. The hot water temperature difference (in – out) in the two cases (13–16/02/2019).

solar intensity is high and starts its increase again with the decrease of the solar intensity to reach 37.6° C at sunset.

Figure 11 shows the air velocity versus local time from 18:00 h to 18:00 h in the two cases (a) and (b). It's remarkable that the air velocity before sunrise (night time) enhances slightly with a gap of 1 m/s or so between the two cases; on the other side, after sunrise, the enhancement recorded becomes important when the solar intensity rises to its maximum value. The high velocity recorded therefore, is above 6.9 m/s for the first case (a).

In conclusion, this work summarize that: in the night (absence of solar irradiance), the influence of geothermal water results in 5.1 m/s of the airflow's velocity in the better conditions; while the coupling: solar/geothermal heat leads to a maximum of 6.9 m/s of the airflow's velocity.

The obtained results after using the spiral heat exchanger showed a significant improvement in the (SCPP) performance by working day and night without breaking with a night performance approximately similar to that of the daytime. In comparison with some previous similar research in the literature, Fadaei et al. (2018) have integrated a PCM and Li et al. (2019) have combined a collector with energy storage layer to improve the heat performance of an (SCPP), they found that the collector temperature has a smooth descending trend after sunset. In contrast, the spiral heat exchanger of our study maintains the collector temperature high during the night whatever the outside meteorological changes which are pretty similar to Aurybi et al. (2018) results that used external heat source to improve the heat performance of the (SCPP). Their results indicated that the air temperature inside the collector could be increased by adding thermal enhancement canals within the (SCPP).

### Daytime study

The daytime study consists in showing the solar radiance effect only and the coupling: solar irradiance/geothermal water on both of centre temperature near the ground and the airflow velocity.

Figure 12 illustrates the trend of the temperature at the collector center in two different cases when:

- The solar intensity acts alone.
- The solar intensity is coupled with geothermal water.

In the first case, the maximum temperature recorded in the center is near 68.3°C at midday 13:00 h.

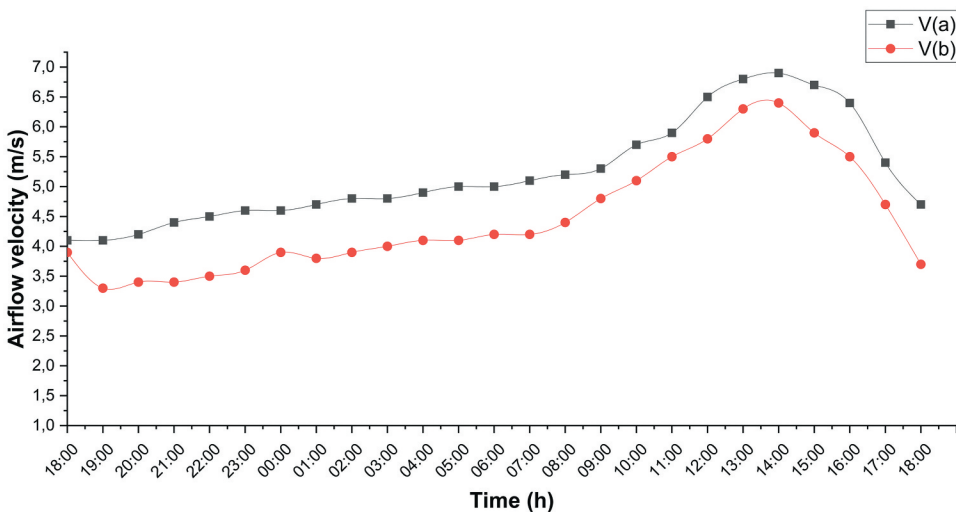


Figure 11. Air velocity of the (SCPP) in the two cases (a) and (b) (13–16/02/2019).

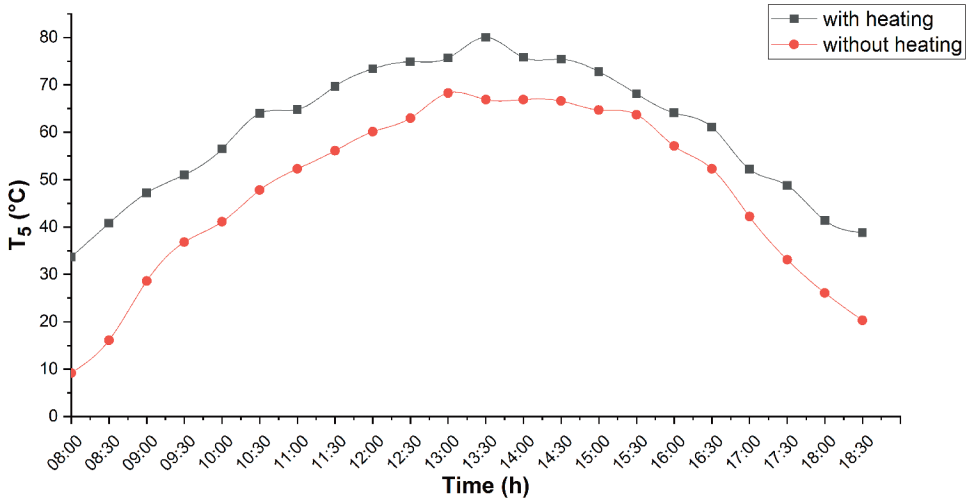


Figure 12. Temperature of the collector center versus local time (Daytime) (10/02/2019).

On the other side, when the solar intensity is combined with geothermal water, the temperature at the center of collector reaches 80°C at 13:30 h; so, the coupling gives us a temperature gain of 11.7°C in the collector center.

Figure 13 presents the air velocity versus local time during the daytime between sunrise and sunset. The airflow velocity under only the solar irradiance effect enhances from 2 m/s at 08:00 h to reach the max of 5.8 m/s at midday.

Furthermore, when the solar radiance is combined with geothermal water the velocity reaches 7.1 m/s, which is to say with a gain of 2 m/s of airflow’s velocity. This is explained by the high temperature recorded in the chimney center shown in the previous figure (Figure 12). So, the geothermal water effect is very important in the case of sunlight decline or at night. Providing the geothermal thermal exchanger is very substantial support and ensuring the survival of the combined system working more effectively compared with the classical (SCPP) system.

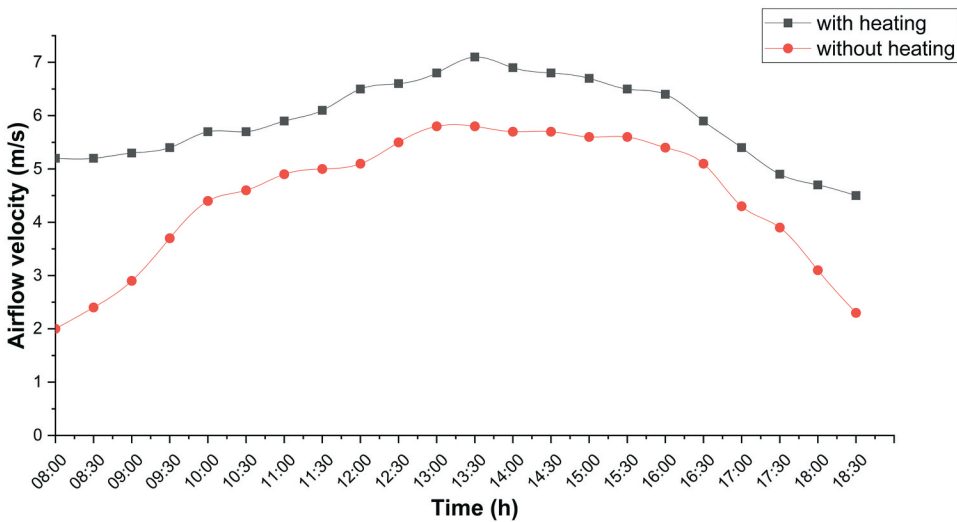


Figure 13. Airflow velocity versus local time (Daytime), (10/02/2019).

## Conclusions

Among the solar energy uses and its applications, are mentioned the solar chimneys intended primarily for electricity production. This aim of this work is to contribute to the continuity of the (SCPP)operating by integrating the geothermal water as suppliant energy.

A small-scale prototype of (SCPP) 8 m height and 12 m of collector diameter was built in Ouargla University. A spiral multi-layers pipe containing geothermal water was installed under the collector near the isolated blackened ground. The work is done for two opposite directions of geothermal water circulation. The temperatures profile measured through the collector from the periphery to its center and the air velocity in the nighttime under geothermal water heating and in the daytime under solar irradiance coupled/uncoupled with geothermal water. The results illustrate that:

The best case of geothermal water direction is from the collector center to its periphery. In the night, heating by geothermal water leads to 37.1°C of collector's center temperature and 5.1 m/s of airflow velocity in the best case of geothermal water direction. On the other hand, the heating only by solar intensity results in 68.3°C of collector's center temperature and 5.8 m/s of airflow velocity.

Furthermore, the coupling between solar intensity and geothermal water results in 80°C of collector's center temperature and 7.1 m/s of airflow velocity.

After these results, it can be affirmed that the (SCPP) is very suitable under geothermal/solar heating for our hot and arid zone. Also, further experimental and theoretical work is in advances to implement an overall evaluation of the hybrid system (geothermal/solar heating) and study the geometrical dimensions effects of the spiral heat exchangers (tube diameter and coil pitch) as well as the thermal exchanger operating conditions (the geothermal flow rate and inlet temperature) on the (SCPP)performance. Furthermore, as future study will plane to evaluate the economic aspects of using geothermal water in (SCPP) systems.

## Nomenclature

$H_{ch}$	Chimney height (m)
$D_{coll}$	Collector radius (m)
$G$	Solar radiation (W/m <sup>2</sup> )
$T$	Temperature (°C)
$\Delta T$	Temperature difference (°C)
$V$	Airflow velocity (m/s)
<b>Subscripts</b>	
$a$	Hot water begins to spin from the collector center to the collector perimeter and exits at the end of the spiral.
$b$	Hot water begins to spin from the collector perimeter to the collector center and to the outside.
$amb$	Ambient
$T_5$	Collector center temperature
$coll$	Collector
$ch$	Chimney
$W$	Geothermal water
$\Delta T_w$	Temperature difference between geothermal water inlet temperature and geothermal water outlet temperature

## Notes on contributors

**Omar Ben El-khettab Mokrani** is a Master's degree in Process Engineering. He is currently a Ph.D. of Process Engineering and a member of the process engineering Laboratory, Ouargla University, Algeria. his research interests include solar energy, solar chimneys, heating, energy storage..etc.

**Mohamed Ridha Ouahrani** is working as a professor at the process engineering and petrochemical department (Faculty of technology / Echahid Hamma Lakhdar University / El-Oued, Algeria) and team leader of organic and green chemistry with several published papers.

**Mohamed Hassen Sellami** is working as a professor, Department of process engineering and manager of Thermo-energy section, Laboratory of process engineering, Ouargla University, Algeria. He is having experience of Teaching and research experience in solar energy, Hydrogen production, solar chimneys, Heating, energy storage.....etc. He has published number of papers in International Journal and presented paper in Conferences / seminars.

**Segni Ladjel** is working as a professor and the manager of the process engineering laboratory teaching at the process engineering department (Faculty of Applied Sciences / Kasdi Merbah University / Ouargla-Algeria) and team leader of green chemistry and medicinal plants with several published papers.

## ORCID

Omar Ben El Khettab Mokrani  <http://orcid.org/0000-0002-0082-0178>

Med Hassen Sellami  <http://orcid.org/0000-0001-9408-0803>

## References

- Abada, Z., and M. Bouharkat. 2018. Study of management strategy of energy resources in Algeria. *Energy Reports* 4:1–7. doi:10.1016/j.egy.2017.09.004.
- Al-Kayiem, H. H., A. T. Mustafa, and S. I. U. Gilani. 2018. Solar vortex engine: Experimental modeling and evaluation. *Renewable Energy* 121:389–99. doi:10.1016/j.renene.2018.01.051.
- Alvarez, G. E., M. G. Marcovecchio, and P. A. Aguirre. 2020. Optimization of the integration among traditional fossil fuels, clean energies, renewable sources, and energy storages: An MILP model for the coupled electric power, hydraulic, and natural gas systems. *Computers & Industrial Engineering* 139:106141. doi:10.1016/j.cie.2019.106141.
- Amudam, Y. K., and V. P. Chandramohan. 2019. Influence of thermal energy storage system on flow and performance parameters of solar updraft tower power plant: A three dimensional numerical analysis. *Journal of Cleaner Production* 207:136–52. doi:10.1016/j.jclepro.2018.09.248.
- Attig-Bahar, F., Sahraoui, M., Guellouz, M. S., and Kaddeche, S. 2019. Effect of the ground heat storage on solar chimney power plant performance in the South of Tunisia: Case of Tozeur. *Solar Energy*, 193:545–555. doi:10.1016/j.solener.2019.09.058
- Aurybi, M. A., Gilani, S. I., Al-Kayiem, H.H., and Ismaeel, A. A. 2018. Mathematical evaluation of solar chimney power plant collector, integrated with external heat source for non-interrupted power generation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 30:59–67 doi:10.1016/j.seta.2018.06.012
- Avci, A. S., H. Karakaya, and A. Durmuş. 2020. Numerical and experimental investigation of solar chimney power plant system performance. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 1–19. doi:10.1080/15567036.2020.1744772.
- Bashirnezhad, K., Kavyanpoor, M., Kebriyae, S. A., and Moosavi, A. 2018. The experimental appraisalment of the effect of energy storage on the performance of solar chimney using phase change material. *Solar Energy*, 169: 411–423. doi:10.1016/j.solener.2018.05.001
- Bendaoud, B., Malek, A., Loukarfi, L., and Maammeur, H. 2020. Conceptual study of photovoltaic power plant connected to the urban electrical network in northern Algeria. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1–20. doi:10.1080/15567036.2020.1758852
- Buğutekin, A. 2012. An experimental investigation of the effect of periphery height and ground temperature changes on the solar chimney system. *Isi Bilimive Teknigi Dergisi–Journal of Thermal Science and Technology* 32:51–58.
- Cao, F., Li, H., Ma, Q., and Zhao, L. 2014. Design and simulation of a geothermal–solar combined chimney power plant. *Energy Conversion and Management*, 84: 186–195. doi:10.1016/j.enconman.2014.04.015
- Castro Silva, J. de O., de Morais Hanriot, S., and Maia, C. B. 2014. Parametric analysis of geometric configurations of a small-scale solar chimney. *Advanced materials research*, 1051, 975–979. doi:doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1051.975
- Choi, Y. J., Kam, D. H., Park, Y. W., and Jeong, Y. H. 2016. Development of analytical model for solar chimney power plant with and without water storage system. *Energy*, 112: 200–207. doi:10.1016/j.energy.2016.06.023
- Cottam, P. J., Duffour, P., Lindstrand, P., and Fromme, P. 2016. Effect of canopy profile on solar thermal chimney performance. *Solar Energy*, 129: 286–296. doi:10.1016/j.solener.2016.01.052
- Destek, M. A., and A. Sinha. 2020. Renewable, non-renewable energy consumption, economic growth, trade openness and ecological footprint: Evidence from organization for economic Co-operation and development countries. *Journal of Cleaner Production* 242:118537. doi:10.1016/j.jclepro.2019.118537.
- Fadaei, N., Kasaiean, A., Akbarzadeh, A., and Hashemabadi, S. H. 2018. Experimental investigation of solar chimney with phase change material (PCM). *Renewable Energy*, 123: 26–35. doi:10.1016/j.renene.2018.01.122

- Fei, X., R. Xuejun, and N. Razmjooy. 2019. Optimal configuration and energy management for combined solar chimney, solid oxide electrolysis, and fuel cell: A case study in Iran. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 1–21. doi:10.1080/15567036.2019.1680770.
- Ghahamchi, M., Kasaieian, A., Ghahamchi, M., and Mirzahosseini, A. H. 2016. An experimental study on the thermal performance of a solar chimney with different dimensional parameters. *Renewable Energy*, 91: 477–483. doi:10.1016/j.renene.2016.01.091
- Gitan, A. A., S. H. Abdulmalek, and S. S. Dhrab. 2015. Tracking collector consideration of tilted collector solar updraft tower power plant under Malaysia climate conditions. *Energy* 93:1467–77. doi:10.1016/j.energy.2015.09.009.
- Günther, H., and de Haas, W. 1931. Die künftige Energieversorgung der Welt. [Energy for the Future of the World] Franck'sche Verlagshandlung, Stuttgart
- Guo, P., Li, J., Wang, Y., and Wang, Y. 2015. Numerical study on the performance of a solar chimney power plant. *Energy Conversion and Management*, 105: 197–205. doi:10.1016/j.enconman.2015.07.072
- Guo, P., Li, J., Wang, Y., and Wang, Y. 2016. Evaluation of the optimal turbine pressure drop ratio for a solar chimney power plant. *Energy Conversion and Management*, 108: 14–22. doi:10.1016/j.enconman.2015.10.076
- Guo, P., Li, T., Xu, B., Xu, X., and Li, J. 2019. Questions and current understanding about solar chimney power plant: A review. *Energy Conversion and Management* 182:21–33. doi:10.1016/j.enconman.2018.12.063
- Haaf, W. 1984. Solar chimneys - Part II: Preliminary test results from the manzanares pilot plant. *International Journal of Solar Energy* 2 (2):141–61. doi:10.1080/01425918408909921.
- Haaf, W., K. Friedrich, G. Mayr, and J. Schlaich. 1983. Solar chimneys Part I: Principle and construction of the pilot plant in Manzanares. *International Journal of Solar Energy* 2:3–20. doi:10.1080/01425918308909911.
- Hu, S., D. Y. C. Leung, and J. C. Y. Chan. 2017. Impact of the geometry of divergent chimneys on the power output of a solar chimney power plant. *Energy* 120:1–11. doi:10.1016/j.energy.2016.12.098.
- Hussain, A. 2007. Hybrid geothermal/solar energy technology for power generation. Higher Institute of Engineering. Available: <https://d3pcsg2wj9izr.chttoudfront.net/files/24847/articles/14612/hgst.pdf>
- Hussain, F. M., and F. A. Al-Sulaiman. 2018. Performance analysis of a solar chimney power plant design aided with reflectors. *Energy Conversion and Management* 177:30–42. doi:10.1016/j.enconman.2018.09.043.
- Jameei, A., Akbarzadeh, P., Zolfagharzadeh, H., and Eghbali, S. R. 2019. Numerical study of the influence of geometric form of chimney on the performance of a solar updraft tower power plant. *Energy & Environment*, 30(4), 685–706 doi:10.1177/0958305X18802908
- Jemli, M. R., Naili, N., Farhat, A., and Guizani, A. 2017. Experimental investigation of solar tower with chimney effect installed in CRTEn, Tunisia. *International Journal of Hydrogen Energy* 42(13):8650–8660 doi:10.1016/j.ijhydene.2016.07.044
- Kasaieian, A. B., Amirifard, M., Ahmadi, M. H., and Kasaieian, F. 2017. Investigation of the effects of ambient temperature and dimensional parameters on the performance of solar chimney power plants. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 12(4):335–48 doi:10.1093/ijlct/ctw016
- Kasaieian, A. B., E. Heidari, and S. N. Vatan. 2011. Experimental investigation of climatic effects on the efficiency of a solar chimney pilot power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (9):5202–06. doi:10.1016/j.rser.2011.04.019.
- Kebabsa, H., Lounici, M. S., Lebbi, M., Daimallah, A. 2020. Thermo-hydrodynamic behavior of an innovative solar chimney. *Renewable Energy*, 145: 2074–90. doi:10.1016/j.renene.2019.07.121
- Kiwan, S., Al-Nimr, M., and Salam, Q. I. A. 2018. Solar chimney power-water distillation plant (SCPWDP). *Desalination*, 445: 105–114. doi:10.1016/j.desal.2018.08.006
- Kuscu, H., and D. Eryener. 2020. The effect of flow rate on small solar chimney performance. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 1–15. doi:10.1080/15567036.2020.1773970.
- Li, G., Huang, H., Zhang, J., and Zhang, H. 2019. Study on the performance of a solar collector with heat collection and storage. *Applied Thermal Engineering*, 147: 380–389. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.10.068
- Motsamai, O., Bafetanye, L., Mashaba, K., and Kgaswane, O. 2013. Experimental investigation of solar chimney power plant. *Journal of Energy and Power Engineering*, 7(10):1980–1984
- Najm, O. A., and S. Shaaban. 2018. Numerical investigation and optimization of the solar chimney collector performance and power density. *Energy Conversion and Management* 168:150–61. doi:10.1016/j.enconman.2018.04.089.
- Nizetic, S. 2011. Technical utilization of convective vortices for carbon-free electricity production: A review. *Energy* 36 (2):1236–42. doi:10.1016/j.energy.2010.11.021.
- Nizetic, S., N. Ninic, and B. Klarin. 2008. Analysis and feasibility of implementing solar chimney power plants in the Mediterranean region. *Energy* 33 (11):1680–90. doi:10.1016/j.energy.2008.05.012.
- Quaschnig, V. V. 2010. Renewable energy and climate change. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, United Kingdom doi:10.1002/9781119994381
- Saibi, H. 2009. Geothermal resources in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (9):2544–52. doi:10.1016/j.rser.2009.06.019.
- Terol, S. 1987. The present state of research at the solar chimney power plant in Manzanares (Spain) and future prospects for large scale plants. *Proc. International Congress on Renewable Energy Sources* 1:1644.

- Toghraie, D., Karami, A., Afrand, M., and Karimipour, A. 2018. Effects of geometric parameters on the performance of solar chimney power plants. *Energy*, 162: 1052–1061. doi:[10.1016/j.energy.2018.08.086](https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.086)
- Uçkan, İ., and A. A. Yousif. 2020. Investigation of the effect of various solar collector types on a solar absorption cooling system. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 1–18. doi:[10.1080/15567036.2020.1766599](https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1766599).
- Zhou, X., Yang, J., Xiao, B., Hou, G. 2007. Experimental study of temperature field in a solar chimney power setup. *Applied Thermal Engineering*, 27(11–12):2044–2050. doi:[10.1016/j.applthermaleng.2006.12.007](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.12.007)

## مخلص:

في مجتمعنا الحديث يتزايد استهلاك الطاقة بشكل هائل عامًا بعد عام بسبب متطلبات سبل العيش المريح ونمو سكان العالم واقتصادهم لكن للأسف فإن مصادر الطاقة التقليدية تعاني من مشاكل عدة نذكر منها التوفر والتلوث لذلك يجب علينا تطوير و استخدام مصادر الطاقات المتجددة و خاصةً مواردنا الطبيعية الهائلة التي مصدره الشمس. نظراً لأن طاقة الشمس ليست محدودة، فإن التحويل المباشر للطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية باستخدام محطات المداخن الشمسية يعتبر حلاً مثاليًا للطلب المتزايد على إمدادات الطاقة.

لتحقيق ما أوردنا ذكره تم بناء نموذج أولي صغير الحجم بارتفاع 8 أمتار و قطر مجمع 12 مترًا في منطقة الحرم الجامعي بورقلة على مستوى مخبر هندسة الطرائق (LGP) والذي يقع في جنوب الجزائر حيث تتميز معدلات الإشعاع الشمسي بارتفاعها على مدار السنة. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تحقيق أعلى سرعة لتدفق الهواء في المدخنة في الصباح والليل وذلك من أجل استخدام هذه السرعة لتحريك عفنات المولدات الكهربائية التي يمكن تثبيتها في أسفل المدخنة.

من خلال دراسة تجريبية ، تم تحديد تأثير الظروف المناخية (الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة المحيط.....الخ) والأبعاد الهندسية على كفاءة إنتاج المدخنة الشمسية. بالإضافة الى ذلك، تمت دراسة تأثير نظام التهجين على أداء المدخنة الشمسية وعلى مدة تشغيلها بعد غروب الشمس باستخدام الطاقات الحرارية للمياه الجوفية التي يطلق عليها ALBIEN حيث يمكن استخدام هذه الأخيرة في الحفاظ على ارتفاع درجة الحرارة داخل المجمع طوال الليل.

**الكلمات المفتاحية :** الطاقة المتجددة، طاقة كهربائية، محطات المداخن الشمسية ، جنوب الجزائر، الشروط المناخية، الأبعاد الهندسية.