

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Énergies Renouvelables

Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

Contribution à la configuration de tour solaire pour la production d'électricité en Algérie

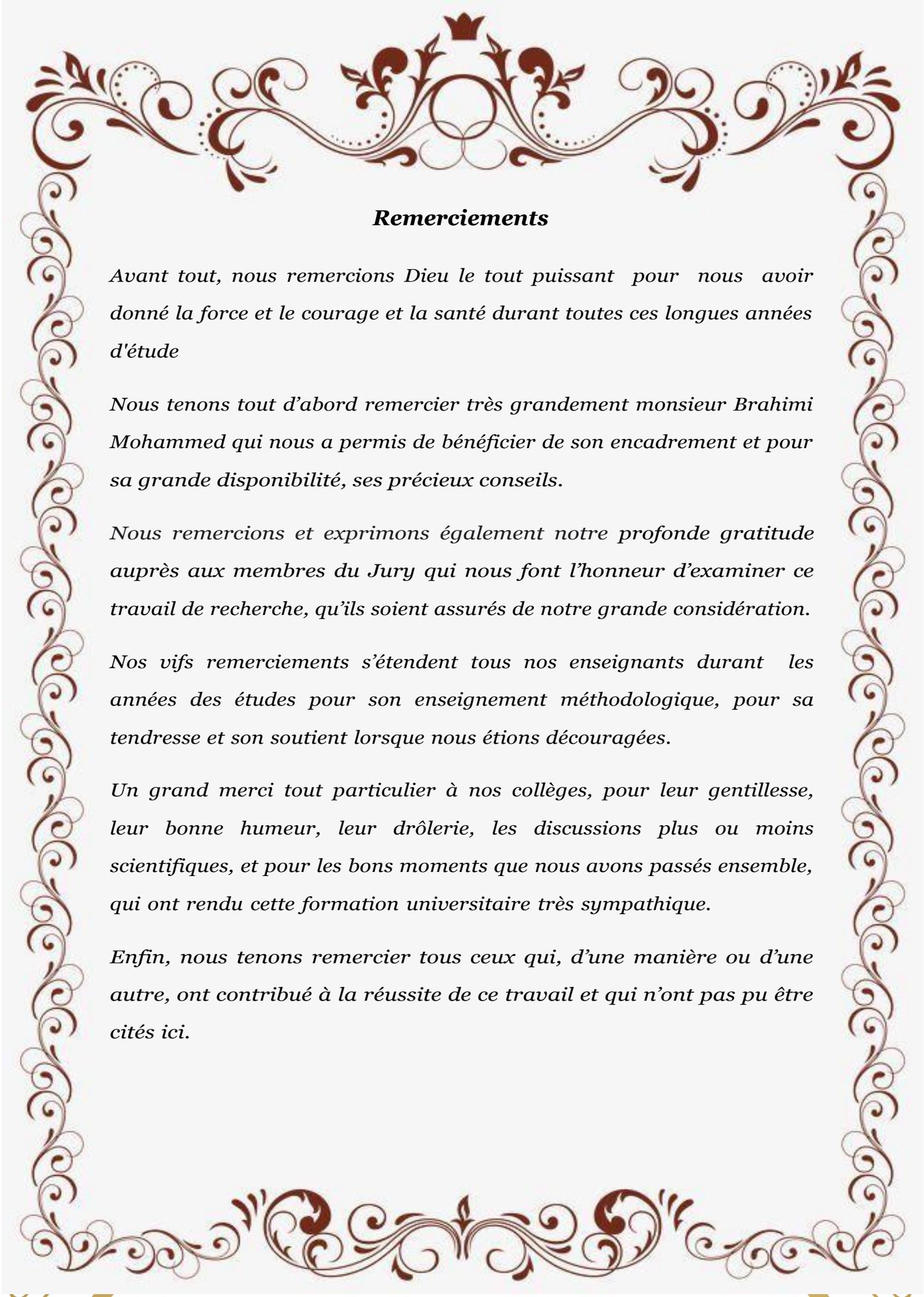
Présenté par :

- Chiha Zoulikha
- Drif Ikram
- Laradji Slimane

Soutenu en : 2022 devant le Jury :03/07/2022

M.TOUMI Khaled	MAA	Centre Universitaire Naâma	Président
M. BRAHIMI Mohammed	MCB	Centre Universitaire Naâma	Encadreur
M. TAIBI Ibrahim	MAA	Centre Universitaire Naâma	Examineur

Naama – Algérie - 2022



Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant pour nous avoir donné la force et le courage et la santé durant toutes ces longues années d'étude

Nous tenons tout d'abord remercier très grandement monsieur Brahimi Mohammed qui nous a permis de bénéficier de son encadrement et pour sa grande disponibilité, ses précieux conseils.

Nous remercions et exprimons également notre profonde gratitude auprès aux membres du Jury qui nous font l'honneur d'examiner ce travail de recherche, qu'ils soient assurés de notre grande considération.

Nos vifs remerciements s'étendent tous nos enseignants durant les années des études pour son enseignement méthodologique, pour sa tendresse et son soutien lorsque nous étions découragées.

Un grand merci tout particulier à nos collègues, pour leur gentillesse, leur bonne humeur, leur drôlerie, les discussions plus ou moins scientifiques, et pour les bons moments que nous avons passés ensemble, qui ont rendu cette formation universitaire très sympathique.

Enfin, nous tenons remercier tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réussite de ce travail et qui n'ont pas pu être cités ici.

Dédicace

*Au moment d'écrire les dernières lignes de ce travail,
il n'y avait rien de beau à offrir comme le fruit du travail que
j'ai consacré du fond du cœur à ceux que j'aime.*

Je dédie ce modeste travail :

*À mes très chers parents qui m'ont guidée durant les moments les plus
Pénibles de ce long chemin, ma mère qui a toujours cru en mes capacités
et qui a été à mes côtés durant toute ma vie. Et mon père qui a sacrifier
toute sa vie afin de me voir devenir ce qui je suis ce jour-là.*

À mon cher frère et mes chères sœurs

À toutes ma famille sans exception

*À mes amis qui partagez avec moi la réalisation de cette mémoire de
master*

À tous mes professeurs précisément mon encadreur

Sans oublier mes collègues et mes amis partout

À tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science

*À tous qui ont contribué à la réalisation de ce modeste travail de près
ou de loin*

DRIF IKRAM

Dédicace

Je dédie sincères gratitude ce mémoire

*À mes chers parents, ma mère et mon père qui ont beaucoup
Sacrifié et m'ont encouragé et éclairé le chemin en me donnant la
main et Douaa tout au long de mes années d'étude,*

*À mes chers frères Fethi, Boutkhile, Aymen et ma chère sœur
Imene pour leur encouragement*

À tous les membres de ma grande famille Chiha et Sekkouri

*À tous mes chères amies Ikram, douaa, Hafsa, Slimane et Omar
qui ont été avec moi dans la prospérité et l'adversité*

*À tous mes enseignants qui m'ont enseigné durant mon parcours
universitaire*

À chaque personne qui nous a aidés de près ou de loin

À tous ceux que j'aime.

CHİHA ZOULIKHA

Dédicace

*La souffrance m'a appris que la vie est une
douleur et un espoir qui peuvent être atteints par le travail.*

Je dédie ce modeste travail

*À deux personnes les plus chères qui existent, à la chose
la plus précieuse que je possède au monde, mes honorables
parents, que Dieu les préserve et prolonge leur vie.*

*À ma chère épouse Kheira et mes enfants Anfal,
Nour el-Houda, Hajar, Abd el-Hadi et Mohammed Mouad*

*À la famille de Laradji et à la famille Boukhaloua,
chacun son nom.*

*À mes chers frères, et mes chères sœurs
À mes collègues et proches, que Dieu les protège.*

LARADJI SLIMANE

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les énergies solaires

Figure (I.1) : Structure de production d'électricité d'origine renouvelable 2016.

Figure (I.2) : Les énergies renouvelables.

Figure (I.3) : Types de rayonnement solaire reçus au sol.

Figure (I.4) : Ensoleillement global annuel dans le monde $\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an}$.

Figure (I.5) : Filière de conversion de l'énergie solaire.

Figure (I.6) : Énergie solaire thermique.

Figure (I.7) : Les serres de la Perrine.

Figure (I.8) : Capteur solaire thermique plan.

Figure (I.9) : Capteur solaire thermique cylindro-parabolique.

Figure (I.10) : Maison solaire.

Figure (I.11) : Four solaire d'Odeillo.

Figure (I.12) : La centrale thermique Thémis.

Figure (I.13) : Prototype de Manzanares en Espagne.

Figure (I.14) : Système Photovoltaïque.

Figure (I.15) : Collision entre un photon et un atome.

Figure (I.16) : Effet photovoltaïque.

Figure (I.17) : Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

Figure (I.18) : Courbe $I(V)$ d'un panneau à divers ensoleillements à $T=58.75^\circ\text{C}$.

Figure (I.19) : Courbe $P(V)$ d'un panneau à divers ensoleillements à $T=58.75^\circ\text{C}$.

Figure (I.20) : Courbes I(V) d'un générateur PV pour différentes températures à $G=1000\text{W/m}^2$.

Figure (I.21) : Courbes P(V) d'un générateur PV pour différentes températures à $G=1000\text{W/m}^2$.

Figure (I.22) : Cellules monocristallin.

Figure (I.23) : Cellules poly-cristallin.

Figure (I.24) : Cellules de deuxième génération.

Figure (I.25) : Cellule DSC (Dye Sensitized Cell) coupe explicative.

Figure (I.26) : Cellule photovoltaïque multi-jonction.

Figure (I.27) : Centrales à tour.

Figure (I.28) : Principe d'une centrale solaire thermodynamique.

Figure (I.29) : Représente conversion thermodynamique de l'énergie solaire.

Figure (I.30) : Part des énergies fossiles et renouvelables dans la production d'électricité dans Les pays arabes nord africains.

Figure (I.31) : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale au mois de juillet.

Figure (I.32) : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale au mois de décembre

Figure (I.33) : Programme algérien des énergies renouvelables 22 GW à L'horizon 2030.

Chapitre II : Description d'une tour solaire (cheminée)

Figure (II.1) : Le principe du gaz à effet de serre.

Figure (II.2) : Présentation de la convection dans une casserole.

Figure (II.3) : Schéma illustrant la circulation de l'air.

Figure (II.4) : Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'un Thermosiphon.

Figure (II.5) : Cheminée solaire.

Figure (II.6) : Principe de fonctionnement d'une cheminée solaire.

Figure (II.7) : Collecteur de cheminée solaire.

Figure (II.8) : Toit transparent de la serre.

Figure(II.9) : Cheminée solaire.

Figure(II.10) : La disposition d'une turbine dans une cheminée solaire.

Figure (II.11.a) : Turbines verticales.

Figure (II.11.b) : Petites turbines horizontales.

Figure (II.12) : Principe de fonctionnement d'une centrale cheminée solaire.

Figure (II.13) : Principe du stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des galets.

Figure(II.14) : Principe du stockage de la chaleur dans le collecteur par des tubes remplis d'eau.

Chapitre III : Configuration d'une tour solaire (à concentration)

Figure (III.1) : Les centrales à concentration

Figure (III.2) : Schéma d'une installation de centrale solaire cylindro-parabolique.

Figure (III.3) : Schéma de principe du système réflecteur linéaire de Fresnel.

Figure (III.4) : Présentation schématique d'un récepteur à réflecteur linéaire de Fresnel [2].

Figure (III.5) : Schéma de principe du système récepteur parabolique

Figure (III.6) : Description de système parabole-Stirling

Figure (III.7) : Central à tour.

Figure (III.8) : Centrale à tour.

Figure (III.9) : Schéma de principe du système récepteur à tour solaire.

Figure (III.10) : Schéma explicatif d'une installation d'une centrale à tour.

Figure (III.11) : Composants d'un héliostat.

Figure (III.12) : Configurations de champ d'héliostats : (a) champ hémisphérique de la centrale « PS10/PS20 », (b) Champ circulaire de la centrale « Gemasolar ».

Figure (III.13) : Le concentrateur solaire avec une seconde réflexion en haut de tour dans la ville de Masdar, Abu Dhabi.

Figure (III.14) : Schéma d'un champ multi tours.

Figure (III.15) : Les récepteurs solaires ; (a) récepteur volumétrique, (b) récepteur à cavité, (c) récepteur de particule.

Figure (III.16) : Principe d'une centrale à tour à caloporteur sels fondus.

Figure (III.17) : Principe d'une centrale à tour à caloporteur eau-vapeur.

Figure (III.18) : Principe d'une centrale à tour à caloporteur air atmosphérique.

Figure (III.19) : Schéma de turbine à vapeur (Parsons).

Figure (III.20) : Générateur de vapeur.

Figure (III.21) : Condenseur.

Figure (III.22) : Réchauffeur.

Figure (III.23) : Pompe.

Figure (III.24) : Schéma d'un alternateur.

Figure (III.25) : Transformateur principal élévateur.

Figure (III.26) : Première mini tour solaire à concentration en Algérie, Ghardaïa.

Figure (III.27) : (a) À gauche : scénario de fourniture en électricité pour l'Algérie, (b) À Droite grille d'acheminement intégrant différents types d'ER.



Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les énergies solaires

Tableau (I.1) : Le programme des énergies renouvelables pendant la période 2015-2030.

Tableau (I.2) : Potentiel solaire en Algérie.

Tableau (I.3) : Représente les avantages de l'énergie solaire et les inconvénients de l'énergie solaire.

Chapitre II : Description d'une tour solaire (cheminée)

Tableau (II.1) : Echanges entre les différents domaines.

Tableau (II.2) : Technologies pour la cheminée.

Tableau (II.3) : Technologies pour le collecteur.

Tableau (II.4) : Points forts et les points faibles de la cheminée solaire.

Chapitre III : Configuration d'une tour solaire (à concentration)

Tableau (III.1) : Principales caractéristiques des sels fondus binaires (60% de $NaNO_3$ et 40% de KNO_3).

Tableau (III.2) : Les futurs projets des centrales thermodynamiques à concentration en Algérie.

Tableau (III.3) : Avantages et les inconvénients.

Liste des abréviations

ENR	Energie renouvelables.
CSC	Centrale solaire à concentration.
PV	Photovoltaïque.
T	La température (K)/(°C)/(F).
G	L'éclairement (W/m ²).
P	La zone P de la jonction.
N	La zone N de la jonction.
I_{cc}	Courant de court- circuit (A).
V_{co}	Tension de circuit ouvert (V).
P_{max}	Puissance maximale (W).
I	Le courant électrique (A).
V	La tension électrique (V).
P	La puissance.
cSi	Cellule silicium cristallin.
aSi	Cellule silicium amorphe.
CdTe	Tellure de cadmium.
CIGS	Diséléniure de cuivre indium et gallium.
DSC	Dye Sensitized Cell.
OPEP	Organisation des pays Exportation de pétrole.
ASA	Agence spatiale Allemande.
UDTS	Unité de développement de la technologie du silicium.
CS	Centrale solaire.

Résumé

A notre époque, sans électricité, la vie quotidienne serait difficilement envisageable. Il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue. Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il a fallu inventer et construire des centrales capables de produire de l'électricité en grande quantité. Nous allons étudier plus particulièrement l'énergie solaire.

La cheminée solaire est un dispositif solaire conçu pour transformer l'énergie des rayons solaires en énergie cinétique qui à son tour est transformée en énergie mécanique puis électrique. Le fonctionnement est basé sur l'échauffement par effet de serre d'un volume d'air, l'air chaud à masse volumique moins dense soumis à la poussée d'Archimède engendre un mouvement d'ascension créant un vent à la base de la cheminée. L'énergie cinétique du fluide sera exploitée pour faire tourner une turbine à vent. La cheminée solaire est déjà mise en application et a montré des résultats acceptables dans le domaine du développement et d'exploitation des énergies renouvelables. Cependant, l'investissement de départ est très important.

L'énergie solaire permet de récupérer la chaleur du rayonnement solaire au sein d'un fluide caloporteur cela par la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Dans le domaine de conversion d'énergie solaire, il semble que la technologie des centrales solaires thermiques à tour est l'une des technologies les plus répandues pour la production de l'électricité à partir des sources d'énergie renouvelable. Les rayons du soleil sont concentrés sur un récepteur solaire en utilisant des héliostats qui actionnent une turbine à vapeur et produit d'électricité.

Les mots clés : l'électricité, énergie solaire, cheminée solaire, turbine, tour solaire à concentration.

Abstract

Nowadays, without electricity daily life would be difficult to envisage. Therefore, it is to find out how to produce this matter effectively and continuously. To meet the growing consumption of electricity, it was necessary to invent and build stations capable of producing electricity with large scale. In this regard, we will study more particulate the thermal solar energy.

The solar chimney is a solar device designed to transform the energy of the sun's rays into kinetic one, which in "turn" will be transformed into mechanical and then electrical energy. The operation is based on the heating by greenhouse effect of a volume of air. The hot air with

less dense density generates an ascending movement, and creates a wind at the base of the fireplace. The kinetic energy of the fluid will be used to turn a wind turbine. The solar chimney has already been implemented and has shown acceptable results in the field of development and the usage of renewable energies.

In this regard, we will study more particulate the thermal solar energy which allows to recover the heat of the solar radiation within a working fluid, that by the conversion of the solar energy into electrical energy. In the field of solar energy conversion, it is well known that the technology of solar thermal tower plants is one of the most common technologies for the production of electricity from renewable energy sources. The sun's ray's arc focused on a solar receiver using heliostats that drive a steam turbine and produce electricity.

Keywords: electricity, solar energy, solar chimney, turbine, concentrated solar tower.

ملخص:

في عصرنا هذا سيكون من الصعب تصور الحياة اليومية بدون كهرباء لذلك من الضروري معرفة كيفية انتاجها بشكل فعال ومستمر. لتلبية الاستهلاك المتزايد للطاقة الكهربائية. يتطلب اختراع و بناء محطات قادرة على انتاج الكهرباء بكميات كبيرة. سوف ندرس بشكل خاص الطاقة الشمسية.

المدخنة الشمسية لتوليد الطاقة الشمسية عبارة عن جهاز شمسي مصمم لتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية والتي بدورها تتحول إلى طاقة ميكانيكية تم كهربائية. تعتمد العملية على تسخين الدفيئة للحصول على حجم من الهواء ويخلق الهواء الساخن دو الكثافة حركة تصاعدية تخلق رياحا عند قاعدة الموقع. سيتم استخدام الطاقة الحركية لتشغيل توربينات الرياح. تم بالفعل إنشاء المدخنة الشمسية وقد أظهرت نتائج مقبولة في تطوير واستغلال الطاقات المتجددة.

الطاقة الشمسية تسمح باسترجاع حرارة الإشعاع الشمسي داخل مائع نقل الحرارة و ذلك بتحويل الطاقة الشمسية إلى الطاقة الكهربائية. في مجال تحويل الطاقة الشمسية من المعروف أن التكنولوجيا محطات الأبراج الشمسية الحرارية تعتبر واحدة من أكثر التقنيات الشائعة لإنتاج الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة تتركز أشعة الشمس على ممتص شمسي باستخدام المرايا العاكسة المسطحة مما يؤدي الى تحريض التوربين البخارية التي تحول الطاقة الحركية إلى طاقة كهربائية.

الكلمات المفتاحية: الكهرباء, الطاقة الشمسية, المدخنة الشمسية, المروحة, البرج الشمسي المركز.

Table des matières

Remerciements	II
Dédicaces	III
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	X
Liste des abréviations	XI
Résumé	XII
Introduction générale.....	2

Chapitre I : Généralité sur les énergies solaire

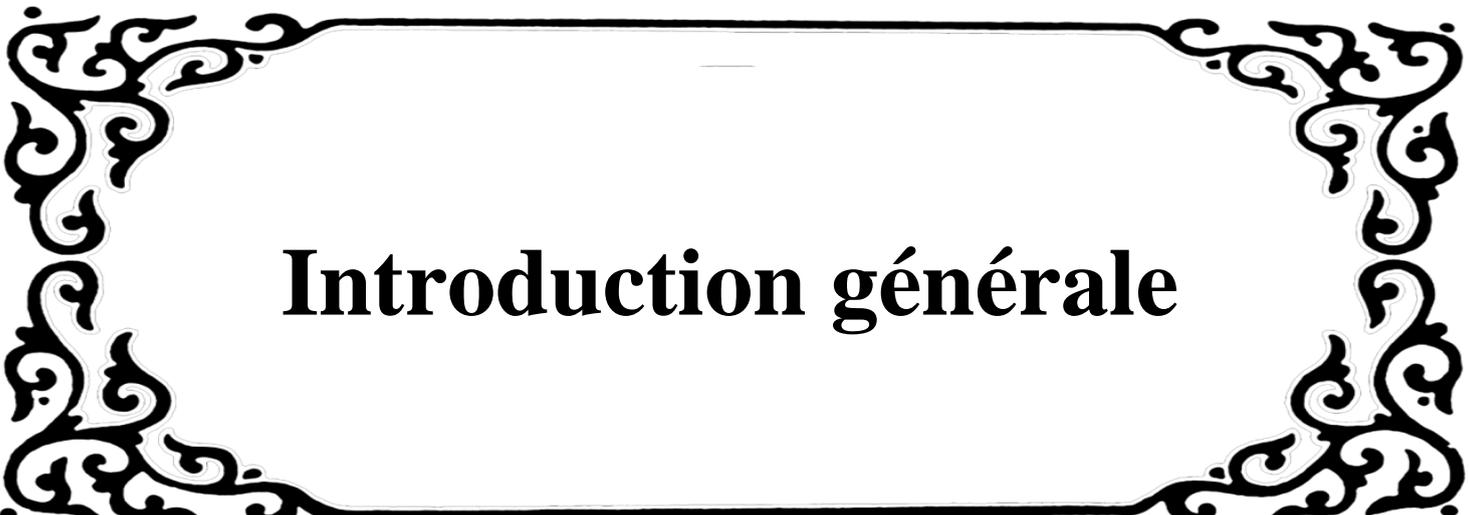
I. Introduction	5
I.1. Historique des énergies renouvelables	5
I.2. L'énergie renouvelable dans le monde	6
I.3. L'énergie renouvelable en Algérie	7
I.4. L'énergie solaire	8
I.5. L'histoire de l'énergie solaire	9
I.6. Rayonnement solaire	9
I.7. Gisement solaire	11
I.8. Type d'énergie solaire	11
I.8.1. L'énergie solaire thermique.....	12
I.8.1.a) Conversion thermique	13
I.8.1.b) Conversion thermique à basse température	13
I.8.1.c) Conversion thermique à haute température	15
I.8.2. L'énergie solaire photovoltaïque	17
I.8.2.a) Conversion photovoltaïque	18
I.8.2.b) Aspect électrique de la cellule	20
I.8.2.c) Différentes générations des cellules solaires PV	23
I.8.3. Energie thermodynamique	27
I.8.3.a) Principe de solaire thermodynamique	28
I.8.3.b) Conversion thermodynamique de l'énergie solaire	28
I.9. Potentiel des énergies renouvelables en Algérie	29
I.10. L'énergie solaire dans l'Algérie.....	31

I.11.	Potentiel solaire en Algérie.....	31
I.12.	Capacité de l'énergie solaire en Algérie	34
I.13.	Développement des énergies renouvelables en Algérie	35
I.14.	Politique algérienne sur les énergies renouvelables	36
I.14.1.	Programme national des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique	36
I.15.	Avantage et inconvénients de l'énergie solaire	38
I.16.	Conclusion.....	38
	Références bibliographiques	39

Chapitre II : Description d'une tour solaire (cheminée)

II.	Introduction	47
II.1.	Historique	48
II.2.	Effet de serre.....	48
II.3.	L'effet de convection naturelle.....	50
II.4.	Phénomène majeur (Le thermosiphon).....	50
II.5.	Définition d'une cheminée solaire.....	52
II.6.	Description.....	53
II.7.	Principaux éléments de la cheminée solaire	53
II.7.1.	Collecteur	53
II.7.2.	Cheminée.....	54
II.7.3.	Turbine	55
II.8.	Principe de fonctionnement d'une centrale solaire à cheminée.....	57
II.9.	Différentes technologies de la cheminée solaire	58
II.9.1.	Cheminée.....	58
II.9.2.	Collecteur	59
II.9.3.	Type de turbine.....	60
II.10.	Stockage d'énergie.....	60
II.10.1.	Différents types de méthodes de stockage	60
II.10.1.a)	Utilisation du sable comme source de chaleur.....	60
II.10.1.b)	Par chauffage de galets	61
II.10.1.c)	Par chauffage de l'eau.....	61
II.11.	Points forts et points faibles de la cheminée solaire	63
II.12.	Conclusion	63

Références bibliographiques	65
Chapitre III : Configuration d'une tour solaire (à concentration)	65
III.1. Introduction	69
III.2. Système de poursuite solaire pour les CSC	70
III.2.1. Centrale cylindro-parabolique	71
III.2.1.a) Principe de fonctionnement	71
III.2.2. Centrale à miroir de Fresnel	72
III.2.2.a) Principe de fonctionnement	72
III.2.3. Centrale parabole-Stirling	73
III.2.3.a) Principe de fonctionnement	75
III.2.4. Tour solaire	75
III.2.5. Description d'une centrale de tour solaire à concentration	76
III.2.5.a) Principe de fonctionnement d'une centrale à tour solaire	76
III.2.5.b) Constitution d'une centrale à tour solaire	79
III.3. Programme nationale de développement des centrales thermodynamiques solaire à concentration	93
III.4. Avantages et inconvénients d'une centrale de tour solaire concentration	95
III.5. Développement des systèmes CSC	95
III.6. Conclusion	96
Références bibliographiques	97
Conclusion générale	97



Introduction générale

L'électricité est sans aucun doute l'une des formes des énergies les plus utilisées aujourd'hui, depuis sa création au XVIIe siècle, elle a eu un impact significatif sur notre mode de vie, et elle est donc devenue l'une des sources des énergies les plus communes et cruciales dans notre vie quotidienne [1].

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est aussi l'une des plus facilement exploitables, elle permet aux utilisateurs de répondre à une partie de leurs besoins sans recourir à des intermédiaires [2].

L'énergie solaire est l'une des sources des énergies inépuisable les plus prometteuses. Plusieurs applications sont développées pour générer de l'énergie thermique ou électrique à partir du rayonnement solaire, la cheminée solaire est l'une de ces applications qui génère de l'énergie électrique à partir de l'énergie solaire en la convertissant en énergie cinétique interne, qui entraîne ensuite des turbines éoliennes avant d'être convertie en électricité à la fin [3].

En termes des techniques de récolte d'énergie solaire, la tour solaire est l'une des innovations les plus récentes. Les centrales solaires à tour font partie des méthodes de concentration solaire pour la production d'énergie, qui comprennent également des concentrateurs cylindro-paraboliques, des centrales paraboliques et des miroirs de Fresnel. Dans le domaine de la conversion de l'énergie solaire, il apparaît que la technologie d'une centrale solaire à tour est l'une des plus utilisées pour produire de l'électricité. Les rayons du soleil sont focalisés sur un récepteur solaire utilisant des héliostats, qui activent une turbine et génèrent de l'électricité [4].

Comme nous pouvons le comprendre à travers l'intitulé de notre projet « contribution à la configuration de tour solaire pour la production de l'électricité en Algérie », l'énergie solaire est au centre de notre étude. Le but de notre projet est d'apprendre comment produire de l'énergie électrique à partir des énergies renouvelables à l'aide d'une cheminée solaire et d'une centrale de tour solaire à concentration.

À ce propos, nous présentons ce travail en trois chapitres à savoir :

Le premier chapitre : Une présentation du cadre général de l'étude à travers une synthèse bibliographique détaillée sur l'énergie solaire est mise en évidence.

Le deuxième chapitre : Une Rétrospective sur un des moyens de domestication de l'énergie solaire à savoir la cheminée solaire, nous présentons des généralités sur la centrale à cheminée solaire et les organes principaux intervenant dans son fonctionnement.

Le troisième chapitre : Sera consacré à la présentation de l'état de l'art sur les technologies existantes des centrales solaires thermodynamiques pour définir et présenter les principales technologies de collecte et de concentration du rayonnement solaire. Il est fait essentiellement une présentation de tour solaire à concentration.

Le présent mémoire se termine par une conclusion générale et des références bibliographiques.



Chapitre I

Généralités sur les énergies solaires

I. Introduction

Le soleil est la source de toutes les formes des énergies sur terre, des combustibles fossiles traditionnels tels que les hydrocarbures ou sources des énergies renouvelables telles que le solaire, l'éolienne et la biomasse [5].

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, c'est aussi l'une des plus facilement exploitables, à l'instar de la majorité des énergies douces, et permet aux utilisateurs de répondre à certains de leurs besoins sans passer par des intermédiaires [6].

Ce chapitre examine d'abord les énergies renouvelables avant de passer à la généralité sur l'énergie solaire et leur potentiel énergétique en Algérie.

I.1. Historique des énergies renouvelables

L'énergie renouvelable est un terme relativement nouveau, ayant été utilisé pour la première fois en 1970, mais la totalité de l'énergie que les humains ont utilisée à travers l'histoire est vaste. La biomasse a été utilisée à diverses fins, notamment la production de chaleur et la fabrication des métaux. L'énergie thermique du soleil était utilisée pour sécher les aliments, les céréales et le foin.

De nombreux établissements humains ont été attribués à des sources géothermiques. L'énergie éolienne était utilisée par les civilisations égyptienne et minoenne pour la propulsion des navires, l'énergie hydraulique était utilisée en perse et dans l'empire romain il y a plus de deux millénaires.

L'Europe du moyen âge redécouvrit les techniques et les utilisations à grande échelle (moulins à vent, moulins à marée, moulins hydrauliques) pour moudre les céréales, pomper de l'eau en trainant des martins et sou fabriquer du papier par exemple et avec le progrès des machines thermiques, les puissances croissantes de mandées par les concentrations industrielles et les impératifs des productivités allaient rendre obsolètes ces générateurs mécaniques à faible puissance.

En raison des contraintes industrielles et de fabrication, ainsi que de la faible puissance de sortie, ces générateurs deviendront obsolètes. Or, quelques années avant la première crise pétrochimique, des études dans les pays développés ont conclu qu'une augmentation exponentielle de la consommation des énergies fossiles entraînerait des pénuries alimentaires

et des problèmes environnementaux irréversibles dus à la saturation des mécanismes de restauration naturelle [7].

Dans ce contexte, la recherche et le développement de convertisseurs capables de capter le potentiel énergétique issu directement ou indirectement de l'énergie solaire et géothermique ont été lancés ou réorientés. Pour cette raison, nous leur avons donné le nom des énergies renouvelables et les avons présentées comme une alternative à la domination hégémonique des énergies fossiles dans le bilan énergétique mondial [8].

I.2. L'énergie renouvelable dans le monde

Quand on pense énergie renouvelable, on pense à toute source d'énergie qui se régénère suffisamment vite pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom), ce qui signifie que son taux de déformation doit être supérieur à son taux d'utilisation [9-10]. A l'échelle humaine, les énergies renouvelables sont le résultat des phénomènes naturels tels que le soleil (énergie solaire, mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), et la terre (géothermie profonde...). En ce qui concerne les combustibles fossiles et nucléaires, cependant ce n'est pas le cas. [11-12].

Les sources des énergies renouvelables et autonomes sont une alternative réalisable aux combustibles fossiles à plusieurs niveaux :

- Ils sont soucieux de l'environnement (ils sont autosuffisants) et n'émettent ni gaz à effet de serre ni déchets toxiques comme leur nom l'indique.
- Ils permettent une production décentralisée adaptée aux besoins locaux.

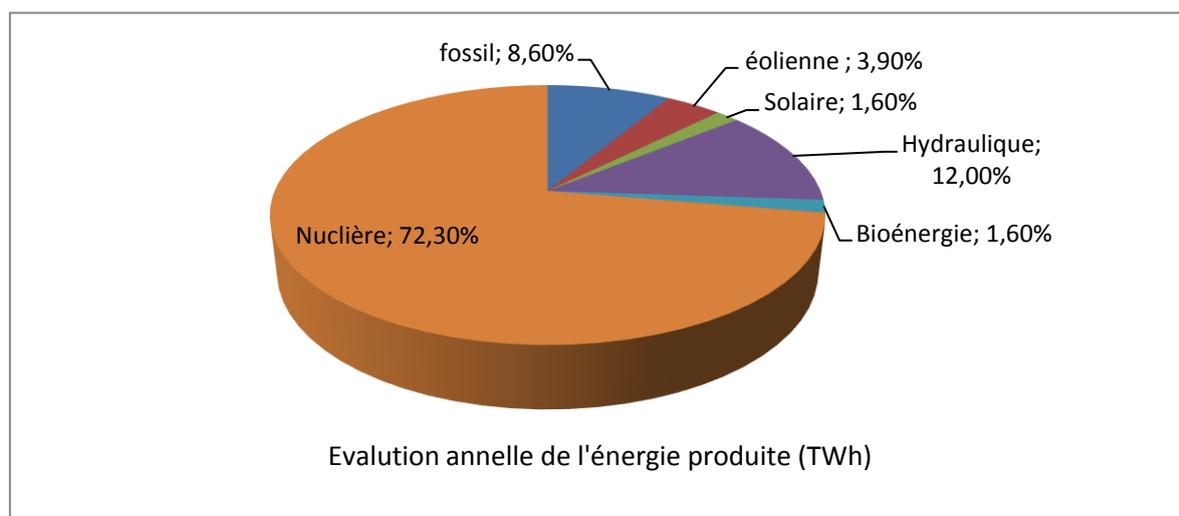


Figure (I.1) : Structure de production d'électricité d'origine renouvelable 2016 [13].

Nous aborderons les énergies renouvelables suivantes : énergie solaire thermique et photovoltaïque, éolien, biomasse, géothermie et énergie hydroélectrique [14].



Figure (I.2) : Les énergies renouvelables [14].

I.3. L'énergie renouvelable en Algérie

La stratégie algérienne dans ce domaine est de développer une véritable industrie des énergies renouvelables, ainsi qu'un programme de formation et de capitalisation des connaissances qui assurera le succès à long terme, notamment dans l'ingénierie et la gestion de projet. Pour les besoins nationaux en électricité, le plan ENR (énergies renouvelables) pourrait se traduire par la création des dizaines des milliers des emplois directs et indirects, les projets étant réalisés en deux temps [15].

Au cours de la première phase (de 2015 à 2020) : une capacité totale de 4010 MW a été atteinte grâce au solaire et à l'éolien, ainsi que 515 MW grâce à la biomasse, la cogénération et la géothermie.

Phase 2 (de 2021 à 2030) : L'implantation de grandes centrales électriques à énergie renouvelable dans les régions d'In Salah, d'Adrar, de Timimoune et de Béchar, ainsi que leur intégration dans le système énergétique national [16], sera permis par le développement de l'interconnexion électrique entre le nord et le Sahara (Adrar) [16].

Le tableau (I.1) présente l'uniformité du programme des énergies renouvelables à mettre en œuvre pour le marché national de 2015 à 2030, qui totalise 22 000 MW et se répartit dans les catégories suivantes :

Tableau (I.1) : Le programme des énergies renouvelables pendant la période 2015-2030 [6].

L'énergie	1^{er} phase 2015-2020	2^{ème} phase 2021-2030	Total 2015-2030
Photovoltaïque	3000 MW	10575 MW	13575 MW
Eolienne	1010 MW	4000 MW	5010 MW
CSC	-	2000 MW	2000 MW
Cogénération	150 MW	250 MW	400 MW
Biomasse	360 MW	640 MW	1000 MW
Géothermie	05 MW	10 MW	15 MW
Total	4525 MW	17475 MW	22000 MW

Selon ce tableau, les potentiels éolien et photovoltaïque fournissent plus d'énergie en Algérie, et lorsque ces deux potentiels sont comparés, le potentiel solaire surpasse le potentiel éolien [6].

I.4. L'énergie solaire

L'énergie solaire est dérivée de la fusion nucléaire des atomes d'hydrogène (ou plutôt noyaux des atomes) qui se produit dans le noyau du soleil. Selon la théorie corpusculaire, elle se propage sous forme de rayonnement électromagnétique ou photons dans tout le système solaire et l'univers. La terre infinie est éclairée par le soleil. Pendant la nuit, l'une des deux faces de la terre est dépourvue d'énergie solaire en raison de la rotation de la terre. La quantité d'énergie solaire reçue à un endroit donné sur le globe varie en fonction de l'heure de la journée, de la saison et de la latitude [16].

La majorité des sources des énergies que nous utilisons, telles que les combustibles fossiles, le carbone, le pétrole et le gaz naturel sont dérivées du rayonnement solaire, mais elles ne sont pas renouvelables à l'échelle humaine. C'est le rayonnement solaire qui alimente les cycles hydrologiques qui alimentent les rivières, les ruisseaux et les courants d'air, ainsi que les mers intérieures, c'est aussi le rayonnement solaire qui fournit l'énergie aux plantes pour la croissance photosynthétique.

En plus de ces sources des énergies solaires indirectes, l'énergie solaire directe peut être utilisée pour transformer la lumière du soleil en chaleur. Cependant, alors que le soleil est indéniablement une source d'énergie massive inexploitée à l'échelle humaine, son utilisation est contrainte par le fait qu'il est distribué de manière irrégulière, a une faible densité et un faible rendement de conversion [17].

I.5. L'histoire de l'énergie solaire

L'énergie solaire a récemment été utilisée comme source d'énergie. En réalité, cette forme d'énergie, comme celle dérivée de l'utilisation de la lumière ou du soleil, est bien plus ancienne. Des centaines des milliers d'années se sont écoulées depuis que diverses civilisations considéraient le soleil comme un véritable dieu. Archimède utilisa le soleil pour arrêter la flotte romaine en 212, avant que JC n'utilise des miroirs bronzés. Avec ces miroirs, il a pu maintenir la flamme à une distance de sécurité de la flotte. L'humanité connaît la puissance du soleil depuis l'aube des temps, il est fascinant de voir comment l'utilisation de l'énergie solaire a évolué [18]. La lumière du soleil est convertie pour la première fois en courant électrique en 1839. Antoine-César Becquerel est celui qui la découvre [19].

Quelques moteurs à miroir ont été construits au XIXe siècle. Bien que l'effet photovoltaïque du sélénium ait été découvert en 1877, il a fallu attendre 1955 pour que des chercheurs de Bell Telephone laboratories aux États-Unis produisent une cellule avec un rendement de conversion d'énergie inférieur à 6% (rapport entre l'énergie utilisée pendant fabrication et l'énergie que le système est capable de produire). Enfin, la naissance de la photopile solaire peut être annoncée. Cet effet était surtout utilisé dans le cadre des opérations intergalactiques, qui ne faisaient que commencer

Cependant, jusqu'à la crise pétrolière de 1973, les industriels étaient indifférents au potentiel de l'énergie solaire car ils exploitaient constamment le carbone, le pétrole et le développement de l'énergie nucléaire. Les années 1970 peuvent être considérées comme l'âge d'or de l'énergie solaire (photovoltaïque) [18].

I.6. Rayonnement solaire

Le rayonnement émis par le soleil est constitué des ondes électromagnétiques dont l'une est toujours au-dessus de la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. Du fait de la température de surface du soleil (environ 5800°K), ce rayonnement électromagnétique se situe dans le

domaine des longueurs des ondes de la lumière visible (entre 0,4 m et 0,75 m) ainsi que dans le domaine du proche infrarouge (au-delà de 0,75 m et jusqu'à 4 m) [20].

Suite à l'atténuation du rayonnement solaire par divers phénomènes atmosphériques, le rayonnement solaire sur une surface au sol se compose comme suit :

- Rayonnement direct : La conversion du rayonnement direct est un défi trigonométrique. Sur un plan horizontal, la différence entre rayonnement global et diffus est appelée rayonnement direct.
- Rayonnement diffus : Il résulte de l'absorption et de la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère, ainsi que de sa réflexion par les nuages et les aérosols.
- Rayonnement réfléchi ou albédo : Il s'agit de la lumière réfléchi du soleil ou lorsque le soleil est très réfléchissant (glace, neige, etc.).
- Rayonnement global : L'ensemble du rayonnement émis par le soleil est divisé en trois catégories (direct, diffus et réfléchi) [21].

La quantité totale de rayonnement solaire reçue sur une surface terrestre est représentée dans la figure ci-dessous.

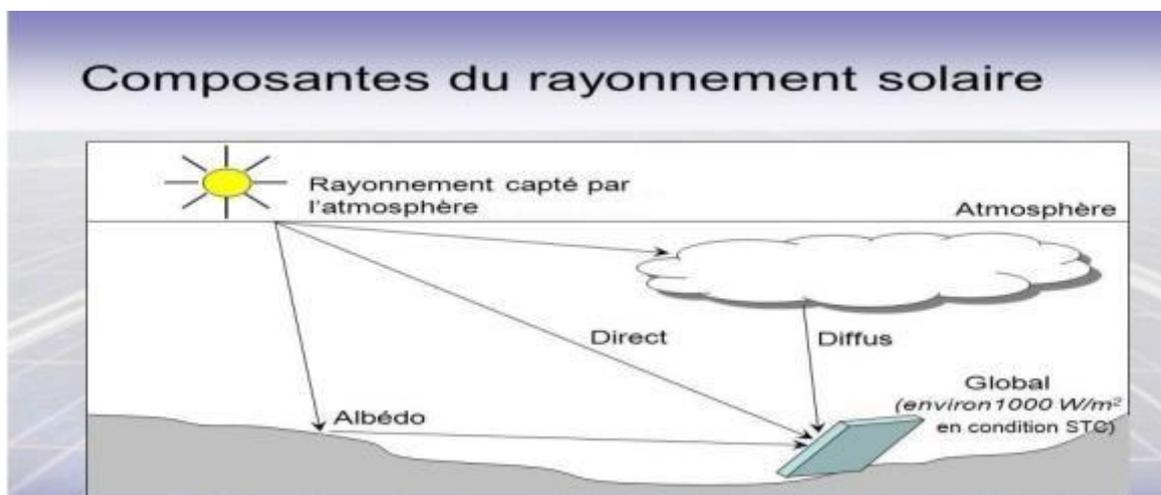


Figure (I.3) : Types de rayonnement solaire reçus au soleil [21].

La quantité de rayonnement solaire reçue sur un plan donné à un instant donné est appelée irradiation ou éclairement (noté par la lettre G). Elle se mesure en watts par mètre carré (W/m²). La quantité de rayonnement reçue par la surface d'un module photovoltaïque varie en fonction

de sa position. Le rayonnement solaire atteint son intensité maximale lorsque le plan du module photovoltaïque est perpendiculaire aux rayons [22].

I.7. Gisement solaire

Après tout, un gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire à un endroit donné sur une certaine période de temps, telle que mesurée par les stations météorologiques, et son évolution est difficile à prédire à l'aide des données globales sur le rayonnement solaire. Il permet de simuler le fonctionnement probable d'un système d'énergie solaire et par conséquent, d'effectuer un dimensionnement le plus précis possible, en tenant compte des demandes énergétiques à satisfaire. Comme le montre la figure (I.4) ci-dessous, les pays du sud de la Méditerranée, en particulier l'Algérie, ont des gisements solaires parmi les plus élevés au monde [23].

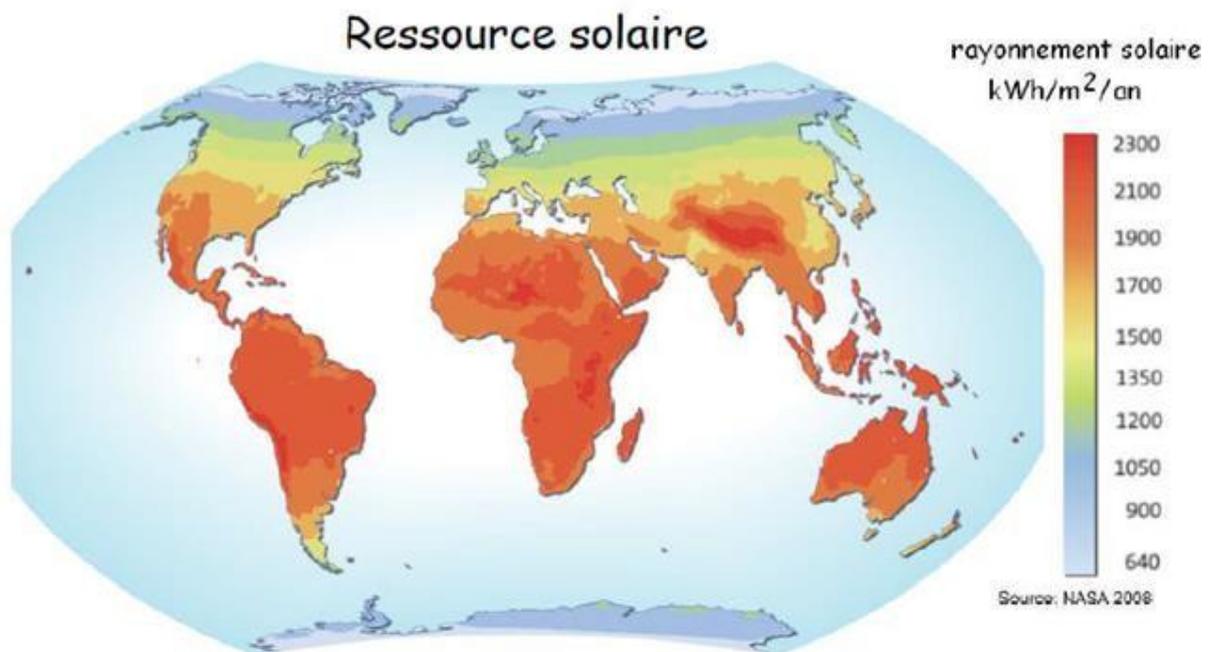


Figure (I.4) : Ensoleillement global annuel dans le monde KWh/m²/an [23].

I.8. Type d'énergie solaire

Les technologies de conversion de l'énergie solaire en chaleur (énergie thermique) ou en électricité se divisent en deux catégories. En fonction de vos besoins énergétiques, différentes filières d'extraction d'énergie solaire sont disponibles [24] :

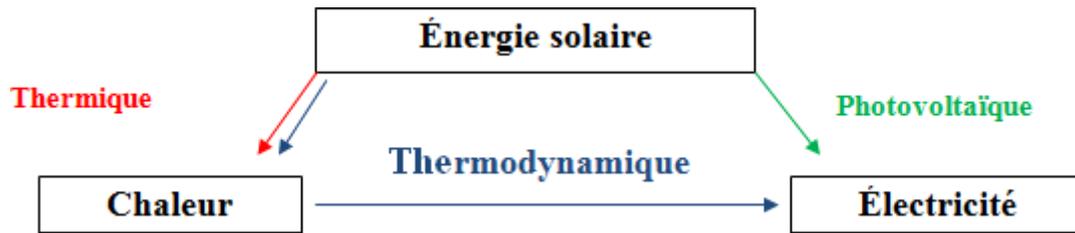


Figure (I.5) : Type d'énergie solaire [24].

I.8.1. L'énergie solaire thermique

Le terme "énergie solaire thermique" fait référence à la conversion instantanée de l'énergie du rayonnement solaire en énergie thermique. Cette transition peut être utilisée directement, comme dans le chauffage solaire de l'eau, ou indirectement, comme dans la production d'électricité solaire dans une centrale solaire thermodynamique. Contrairement au système photovoltaïque, qui produit de l'électricité à partir de l'énergie photonique, le système solaire thermique repose sur l'utilisation de la chaleur transmise par rayonnement. Grâce aux progrès technologiques, les techniques de capture directe d'une partie de l'énergie solaire se sont considérablement améliorées, rendant les systèmes solaires plus fiables, efficaces et rentables [25].

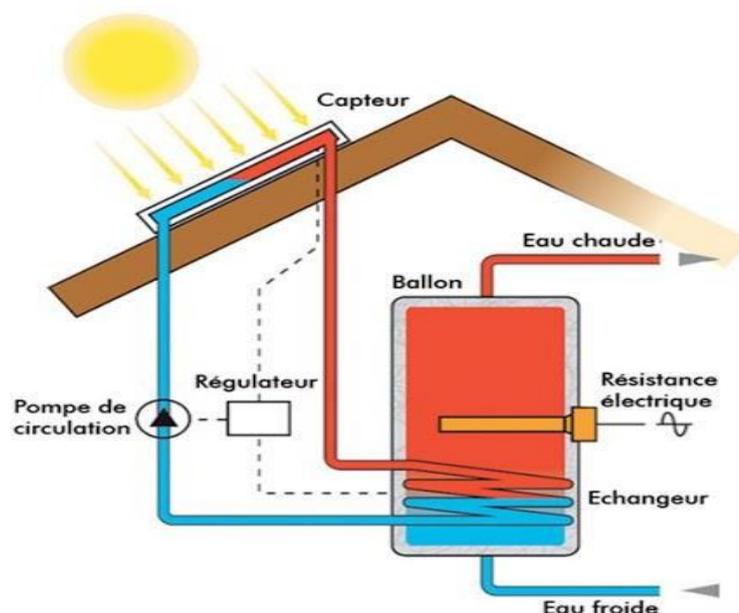


Figure (I.6) : Energie solaire thermique [26].

I.8.1.a) Conversion thermique**I.8.1.b) Conversion thermique à basse température****I.8.1.b.i) La serre**

Le rayonnement solaire, seule source d'énergie pouvant être transmise sur des grandes distances sous forme des ondes électromagnétiques, est absorbée (inégalement) par les objets qui y sont exposés et converti en chaleur. Lorsque des objets sont exposés au rayonnement solaire à travers une vitre, les fréquences infrarouges sont stoppées et « piégées » par la vitre c'est ce qu'on appelle « l'effet de serre » [27].

Les serres pour cultures florales ou maraîchères existent depuis longtemps et garantissent des récoltes précoces. L'effet de serre peut être favorisé par le réchauffement ruisselé des parois, qui peut être réalisé grâce à la géothermie à basse température ou à la valorisation des déchets industriels, tels que ceux produits par les centrales nucléaires [28].



Figure (I.7) : Les serres de la Perrine [29].

I.8.1.b.ii) Capteurs solaires plans

Les capteurs de panneaux solaires sont constitués d'un caisson en verre qui s'ouvre pour révéler un tuyau rempli d'eau (fluide caloporteur). L'intérieur est peint en noir pour capter le plus de lumière possible, le rendement d'un capteur bien construit dépasse 50%, permettant la fourniture d'eau chaude pour un ménage. La température dépasse rarement 80 degrés Celsius [27].

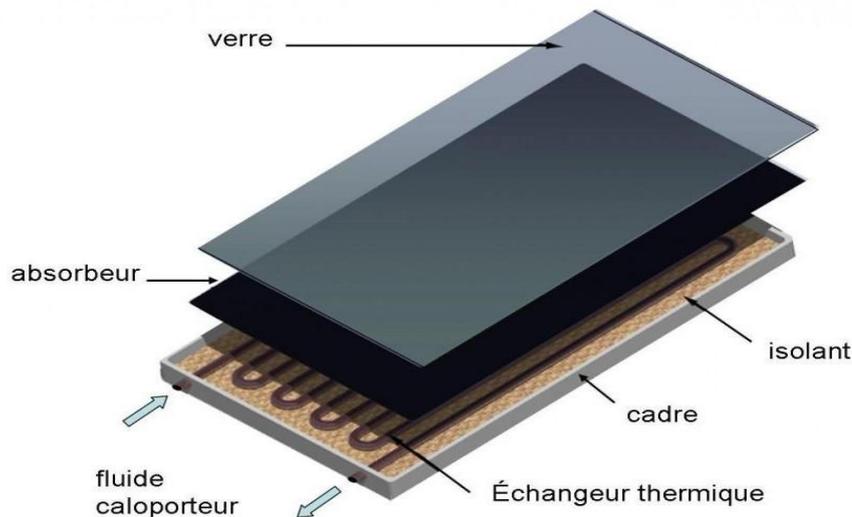


Figure (I.8) : Capteur solaire thermique plan [28].

La combinaison des capteurs solaires et d'un chauffe-eau électrique garantit que l'eau chaude est disponible quelles que soient les conditions météorologiques, les économies annuelles d'un tel chauffe-eau solaire peuvent être estimées à environ 50% du coût, le coût d'installation étant amorti sur quelques années.

Les capteurs à haute concentration permettent d'atteindre des températures allant jusqu'à 150 degrés Celsius, une surface réfléchissante de forme cylindrique concentre le rayonnement solaire sur un caloporteur. L'eau chauffée produite peut être utilisée directement pour le chauffage, l'irrigation et les piscines, ainsi qu'à des fins industrielles. Il peut également être transformé en poste de travail mécanique ou électrique traditionnel, mais avec un rendement moindre en raison de la température plus basse de l'alimentation en eau chaude [30].



Figure (I.9) : Capteur solaire thermique cylindro-parabolique [28].

I.8.1.b.iii) Maisons solaires

Le rayonnement solaire peut également être utilisé pour chauffer directement les maisons, Les maisons solaires ont été testées dans divers endroits, les meilleurs résultats provenant de ceux qui correspondent à la quantité maximale de lumière solaire par an. Le bâtiment doit être fermé au nord et ouvert au Sud, l'énergie doit être collectée à travers les murs, les panneaux solaires et éventuellement une serre et un système de chauffage dédié doit être prévu.

Les difficultés proviennent de l'irrégularité du rayonnement solaire, qui varie selon la latitude du lieu, la saison, l'heure de la journée et l'état de l'atmosphère. De plus, le soleil est rare la majeure partie de l'année, de l'automne au printemps. Il est donc primordial de stocker la chaleur de préférence sur une longue durée afin d'utiliser la chaleur captée et stockée durant l'été en hiver [31].



Figure (I.10) : Maison solaire [32].

I.8.1.c) Conversion thermique à haute température

I.8.1.c.i) Four solaire

Le principe utilisé est celui de la concentration de rayonnement, mais avec un facteur multiplicateur beaucoup plus élevé que dans le cas précédent. Le meilleur exemple est le panneau solaire Odeillo, construit en 1968 en Cerdagne pour succéder à celui de Lavoisier après les panneaux solaires Meudon et Montlouis (1949). Les rayons du soleil sont captés par un "champ" de 63 miroirs orientables de 45 m^2 chacun, qui sont ensuite réfléchis par un miroir parabolique composé de 9 500 miroirs élémentaires de 0,45 m de chaque côté, qui sont

maintenus en place par une contrainte mécanique Les faisceaux convergent ainsi obtenu a une puissance de 1 MW, soit 1000 fois la puissance reçue au niveau du sol.

Les matériaux exposés à ce rayonnement peuvent être transportés à des températures allant de 1 500 à 3 800 degrés Celsius. Les recherches portent sur les réactions à haute température, les propriétés mécaniques et électriques des matériaux et la production d'oxydes réfractaires de haute pureté [33].



Figure (I.11) : Four solaire d'Odeillo [33].

I.8.1.c.ii) Centrale thermique

La centrale thermique de Thémis, construite en 1976 à Targassonne dans les Pyrénées Orientales, a permis aux chercheurs d'étudier les enjeux de la conversion de l'énergie solaire. La concentration d'énergie a été obtenue en utilisant des miroirs orientables montés au sommet d'une chaudière au sommet d'une montagne. La puissance électrique était de 2,5 MW, avec un caloporteur des sels chauds à 450°C et un système de stockage critique. La fabrication de Thémis a cessé en 1986 (le rendement du kWh était alors de 10 F, contre 0,23 F pour le kWh nucléaire). Cependant, les stations sont toujours utilisées pour des expériences astrophysiques.

En Californie, huit centrales électriques au gaz d'une capacité combinée de 275 MW fournissent de l'électricité tout au long de la journée lorsque les climatiseurs sont fortement utilisés et sont relayés par des centrales électriques au gaz [33].



Figure (I.12) : La centrale thermique Thémis [33]

I.8.1.c.iii) Cheminée solaire

La cheminée solaire est un système de production d'énergie solaire qui utilise le rayonnement solaire pour augmenter l'énergie interne de l'air qui circule dans le système, convertissant l'énergie solaire en énergie chimique. L'énergie cinétique de l'air est ainsi convertie en électricité à l'aide des turbogénérateurs appropriés [34].



Figure (I.13) : Prototype de Manzanares en Espagne [35].

I.8.2. L'énergie solaire photovoltaïque

Lorsque des panneaux photovoltaïques sont utilisés une partie du rayonnement solaire est directement convertie en électricité. Ces panneaux solaires sont constitués principalement des cellules photovoltaïques en silicium. Le principe d'obtention de courant à partir des cellules

photovoltaïques est connu sous le nom d'effet photoélectrique, qui consiste en une seule émission des électrons par un matériau soumis à une traction lumineuse. Cette énergie électrique peut ensuite être stockée dans des batteries ou convertie pour être distribuée à travers un réseau électrique à l'aide d'un onduleur [36].



Figure (I.14) : Système photovoltaïque [37-38].

I.8.2.a) Conversion photovoltaïque

I.8.2.a.i) L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique qui se produit lorsque des matériaux spécifiques appelés semi-conducteurs sont exposés à la lumière et produisent de l'électricité, comme le montre la figure (I.15) et figure (I.16). L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique à l'aide de cellules à base de silicium. Le module solaire est composé des cellules qui sont connectées les unes aux autres afin de générer suffisamment d'énergie [39].

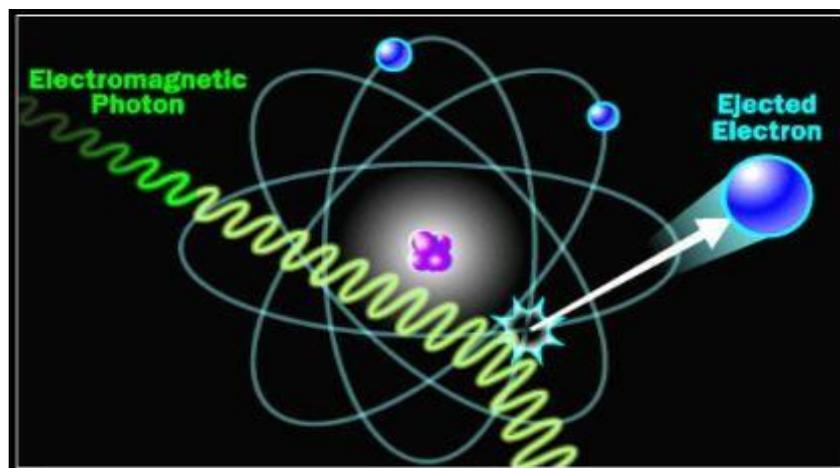


Figure (I.15) : Collision entre un photon et un atome [39].

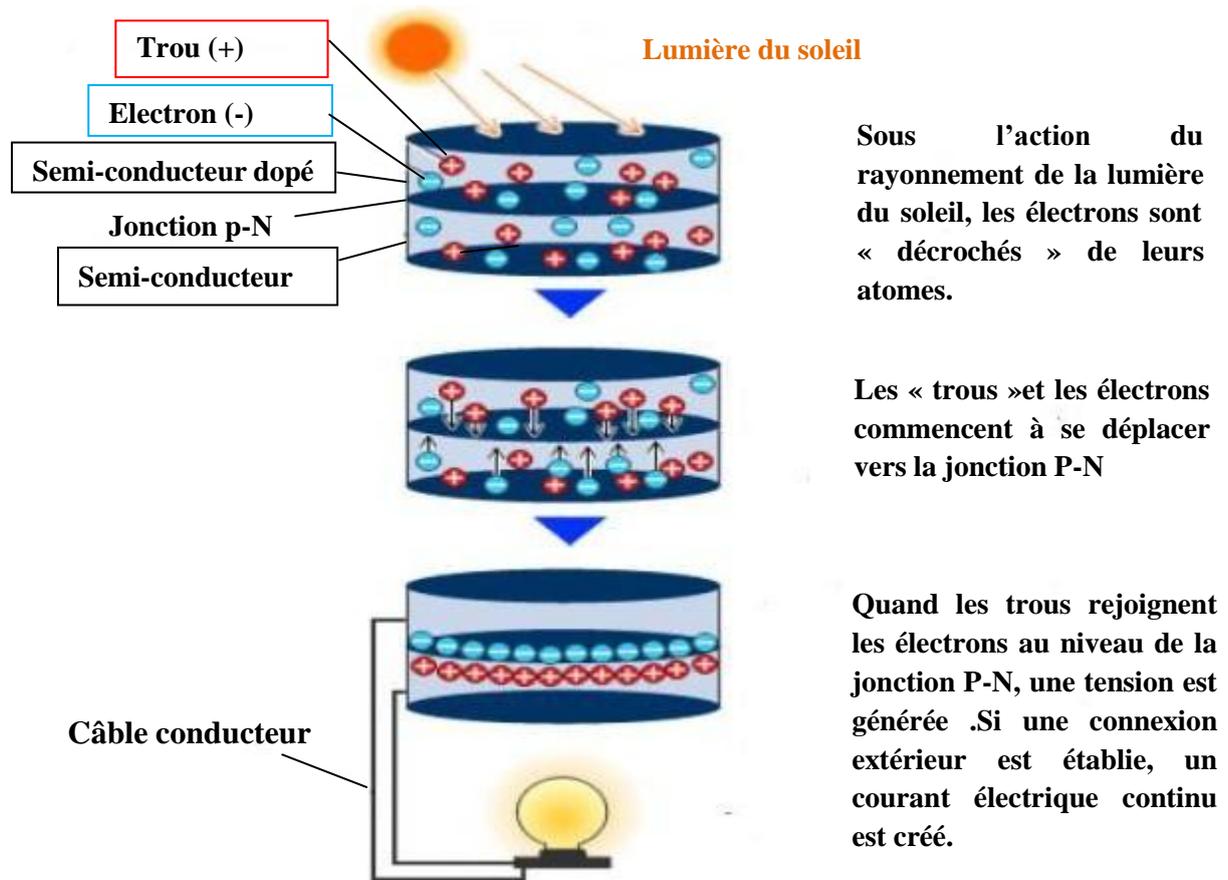


Figure (1.16) : Effet photovoltaïque [11].

I.8.2.a.ii) Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

La cellule PV est constituée de deux couches de silicium, l'une dopée P (pour au bore) et l'autre dopée N (pour phosphore), aboutissant à une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque des photons sont absorbés par un semi-conducteur leur énergie est transférée aux atomes de la jonction PN, provoquant l'émancipation et la production d'électrons (charges N) et de trous (charges P). En conséquence, il existe une différence de potentiel entre les deux couches.

Cette différence de potentiel peut être mesurée en examinant les connexions entre les signaux positifs et négatifs de la cellule. Il est également envisageable de récupérer les porteurs avec une charge continue. A courant nul, la tension maximale de la cellule est de l'ordre de 0,6 V, cette tension est appelée "tension en circuit ouvert" (V_{co}).

Lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées le courant maximum est produit, c'est ce qu'on appelle le courant de court-circuit (I_{cc}) et dépend fortement du niveau de clarté.

Le principe de fonctionnement est illustré à la figure (I.17) [11].

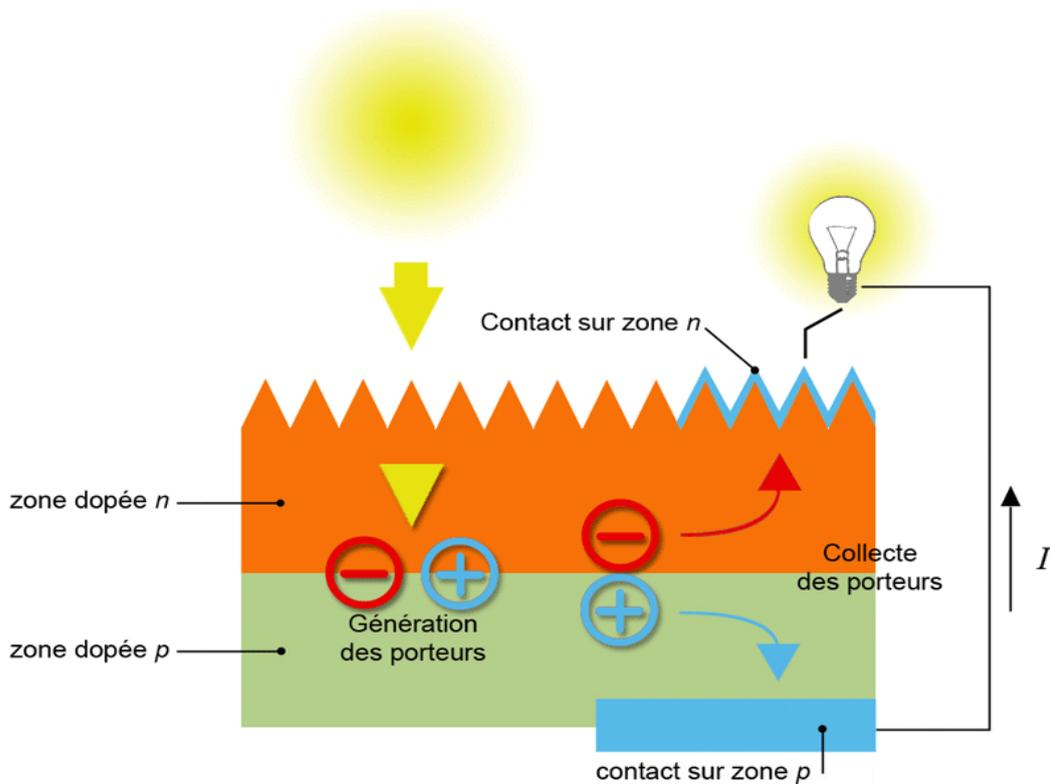


Figure (I.17) : Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [40].

I.8.2.b) Aspect électrique de la cellule

I.8.2.b.i) Influence de l'ensoleillement

Le nombre des paires des électrons créés diminue à mesure que l'ensoleillement diminue. Du fait que le courant du panneau solaire est égal à la somme des courants de photo diode à l'obscurité, le courant solaire I_{cc} diminue proportionnellement à la variation d'ensoleillement, ainsi qu'une très légère diminution de la tension V_{co} , d'où une diminution du point de la puissance solaire de sortie maximale du panneau P_{max} .

Les graphiques ci-dessous montrent les caractéristiques $P(V)$ et $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque pour une température constante ($T = 58,75^{\circ}\text{C}$) et un ensoleillement variable respectivement.

En termes de tension, la puissance maximale de la cellule (P_{max}) est à peu près proportionnelle à l'éclairement.

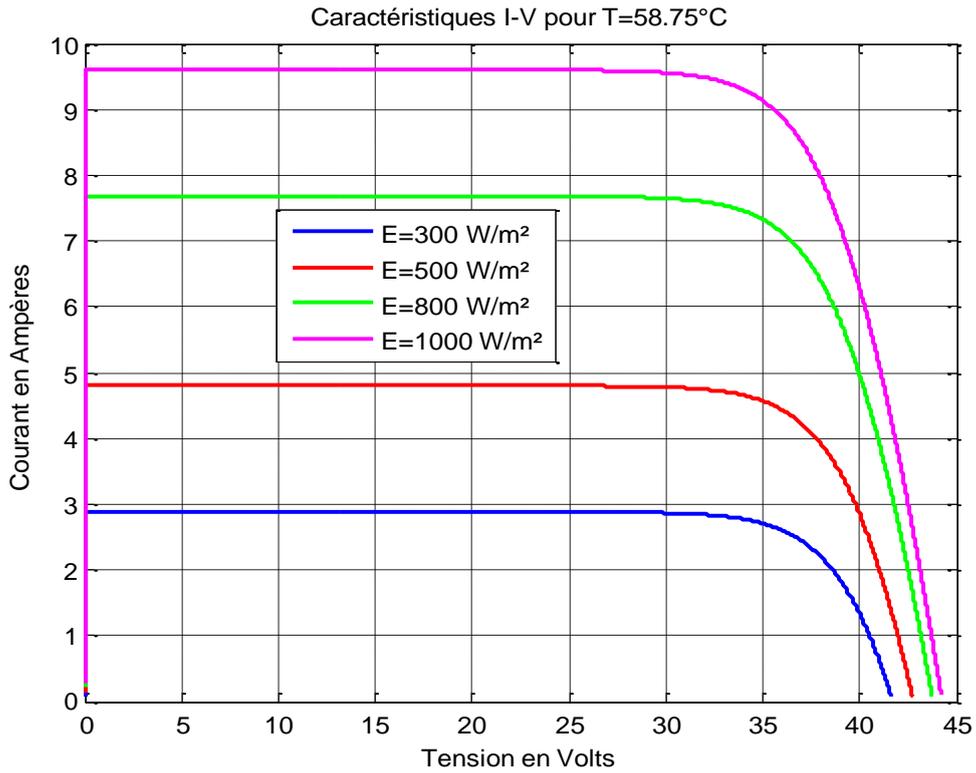


Figure (I.18) : Courbe I(V) d'un panneau à divers ensoleillements à T=58.75°C.

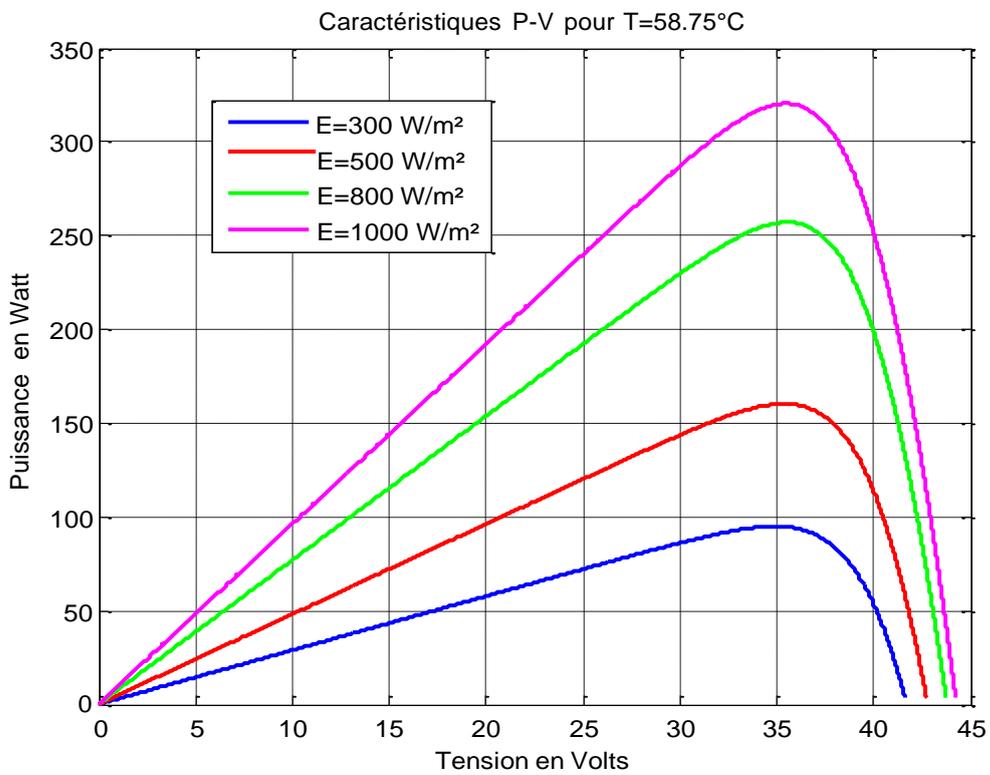


Figure (I.19) : Courbe P(V) d'un panneau à divers ensoleillements à T=58.75°C.

I.8.2.b.ii) Influence de la température sur les courbes I(V) et P(V)

Les figures (I.20) et (I.21) montrent les courbes I(V) et P(V) pour différentes températures de fonctionnement d'un module photovoltaïque à irradiation constante. Nous avons remarqué que la température a un effet inévitable sur la valeur du courant en circuit fermé. Cependant, lorsque la température augmente la tension en circuit ouvert diminue de manière significative. De ce fait, même avec peu d'éclairage le panneau peut maintenir une tension convenable et ainsi la puissance extractible est réduite. Lors du dimensionnement d'une installation l'écart de température sur le site sera pris en compte.

Il est essentiel de se rappeler que chaque degré au-dessus de 58,75 °C que la température de la cellule augmente, la puissance du panneau chute d'environ 0,5 %.

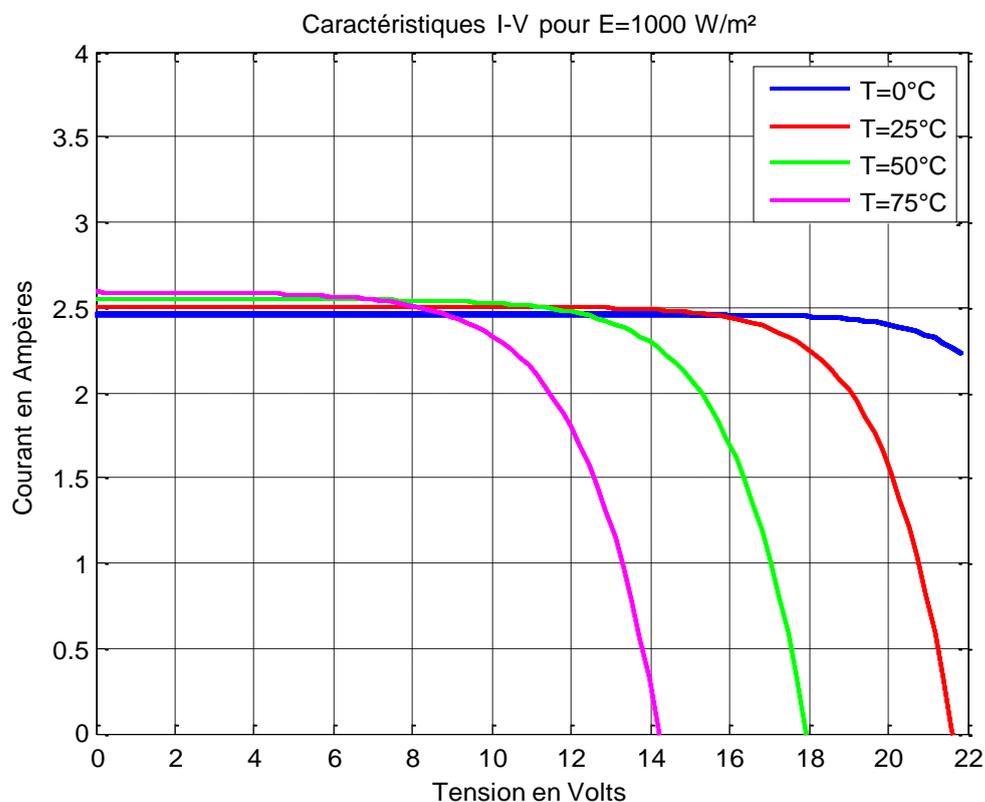


Figure (I.20) : Courbes I(V) d'un générateur PV pour différentes températures à $G=1000\text{W/m}^2$.

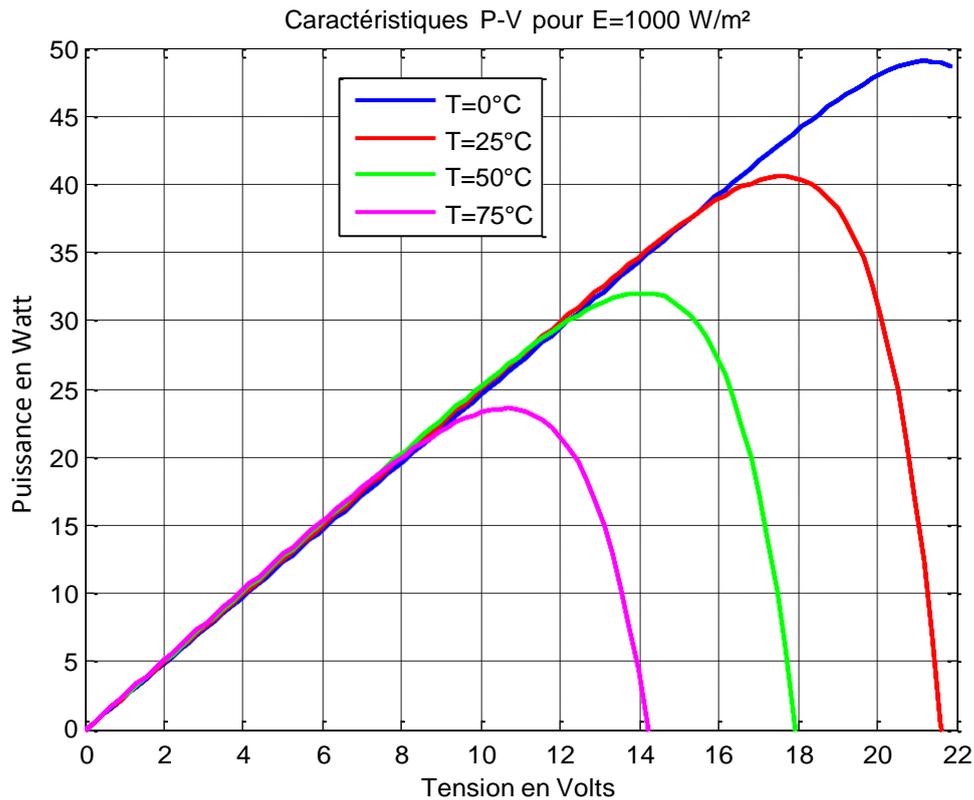


Figure (I.21) : Courbes P(V) d'un générateur PV pour différentes températures à $G=1000\text{W/m}^2$.

I.8.2.c) Différentes générations des cellules solaires PV

Les cellules solaires sont classées en trois générations. Actuellement, trois générations de recherche sont en cours en même temps.

I.8.2.c.i) Cellules de première génération

Ils sont basés sur une seule jonction PN et utilisent le silicium sous forme de cristal comme matériau semi-conducteur. Le silicium est chauffé puis refroidi pour créer un cristal, qui est ensuite coupé en petits morceaux (wafers) pour fabriquer la cellule photovoltaïque. Cette méthode de fabrication est extrêmement énergivore et par conséquent coûteuse. Elle a également besoin d'un silicium de haute pureté. On distingue les cellules de silicium monocristallines et de silicium poly cristallin [41].

I.8.2.c.ii) Cellules au silicium monocristallines

Les panneaux solaires les plus performants du marché sont les cellules monocristallines au silicium, qui ont un rendement compris entre 13% et 15%. Par conséquent, moins des cellules sont nécessaires pour fournir la puissance souhaitée, mais comme le silicium monocristallin est

aussi le plus cher, son seul avantage est de pouvoir utiliser une surface plus petite : environ $7 m^2$ est nécessaire pour obtenir 1kWc [41-42].



Figure (I.22) : Cellules monocristallines [43].

I.8.2.c.iii) Cellules au silicium poly-cristallines

Les modules qui utilisent des cellules poly-cristallines au silicium ont un rendement typique de 12% à 14%. Pour obtenir 1kWc, il vous faudra environ $8 m^2$ de cellules. Ces cellules sont plus faciles à réaliser et moins coûteuses à produire que celles réalisées avec de la monocristalline. Les formes irrégulières des cristaux qui apparaissent d'identifier les cellules poly-cristallines [41-42].



Figure (I.23) : Cellules poly-cristallin [43].

I.8.2.c.iv) Cellules de deuxième génération

La technologie photovoltaïque de deuxième génération est constituée des petits panneaux solaires. Dans ce cas, le semi-conducteur est vaporisé et directement appliqué sur un support (du verre par exemple). Cette génération comprend des matériaux tels que le silicium amorphe (aSi) et silicium cristallin (cSi), le CdTe (Tellurure de Cadmium) et le CIGS (Cuivre,

Indium, Gallium et Selenium). Parce qu'il utilise moins des matériaux semi-conducteurs et ne nécessite pas de transformation de wafer, ce type de fabrication de cellule est moins coûteux que la première génération. Elles présentent l'avantage d'avoir une faible densité et d'être moins sensibles aux hautes températures que les cellules monocristallines ou poly-cristallines. Leur rendement est en revanche faible compris entre 5% et 10%, soit environ 16 m^2 pour 1 kWc [42].

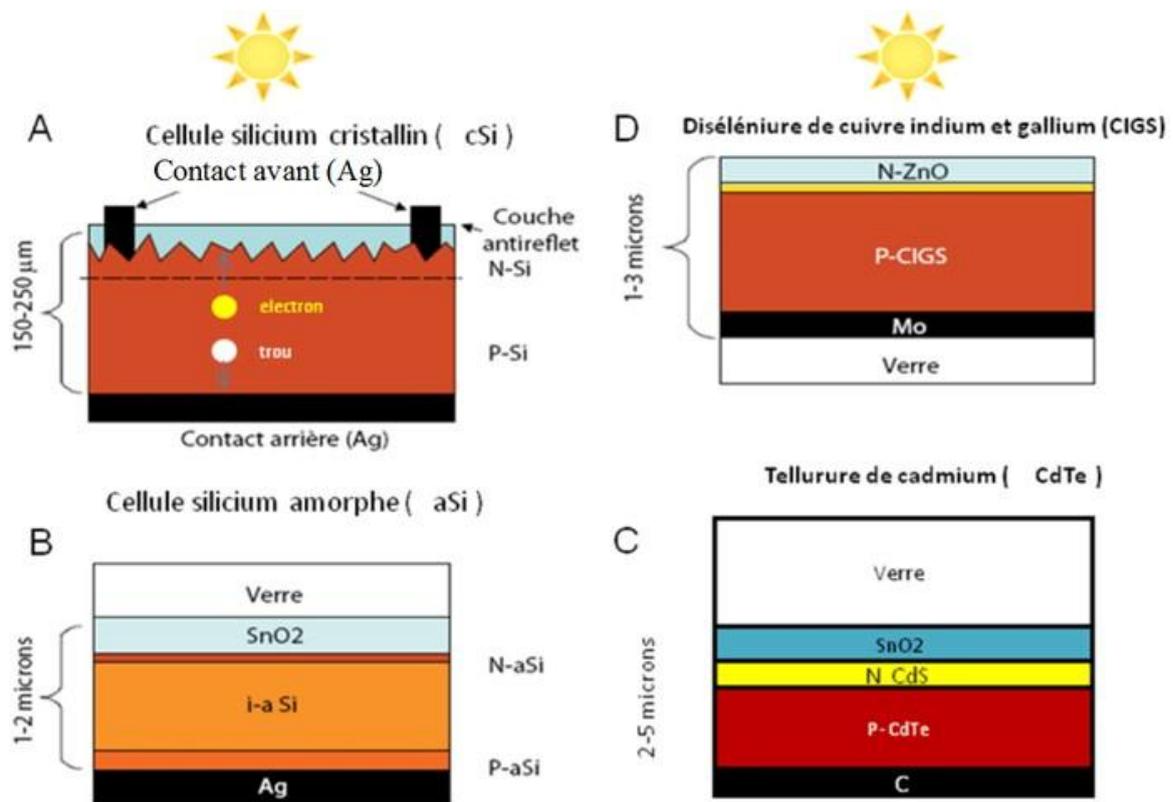


Figure (I.24) : Cellules de deuxième génération [44].

I.8.2.c.v) Cellules de troisième génération

Les cellules photovoltaïques organiques sont des cellules photovoltaïques comportant au moins une couche active constituée des molécules organiques. De manière générale, il existe deux types :

- Organiques photovoltaïques moléculaires ;
- Organiques photovoltaïques en polymères ;

Ces technologies, apparues dans les années 1990, ont été développées dans le but de réduire les coûts de production d'électricité. Les cellules photovoltaïques organiques bénéficient du faible coût des semi-conducteurs organiques ainsi que du potentiel de simplification du processus de fabrication. Ils offrent l'option d'une production continue (rouleau à rouleau), ce qui pourrait réduire considérablement le coût des retours des panneaux solaires.

En pratique, ces technologies ne sont aujourd'hui utilisées commercialement que dans le secteur de l'électronique grand public (chargeur de téléphone GSM / lecteur MP3), où la cellule et le produit associé ont à peu près la même durée de vie (2 ans). D'autres applications verront le jour dans les années à venir à mesure que l'espérance de vie s'améliorera et que les coûts de fabrication diminueront, la figure (I.25). Toujours en phase de recherche expérimentale, le rendement record du laboratoire est estimé entre 4% et 5%. Avant une éventuelle commercialisation, l'efficacité et l'encapsulation doivent être améliorées [43].



Figure (I.25) : Cellule DSC (Dye Sensitized Cell) coupe explicative [43].

I.8.2.c.vi) Cellules de quatrième génération (cellule multi jonction)

Des cellules à haut rendement ont été développées pour des applications spatiales. Dans l'illustration dans la figure (I.26), les cellules multi-jonction sont constituées de plusieurs petites couches minces.

Chaque type de semi-conducteur possède une longueur d'onde maximale au-delà de laquelle il est incapable de convertir les photons en énergie électrique. Par contre, en dessous de cette longueur d'onde, l'énergie excédentaire portée par le photon est perdue. Par conséquent, il est important de choisir des matériaux dont les longueurs sont aussi proches que possible les unes des autres, afin que la majorité du spectre solaire soit absorbée, ce qui entraîne une production maximale d'électricité à partir du flux solaire [45].

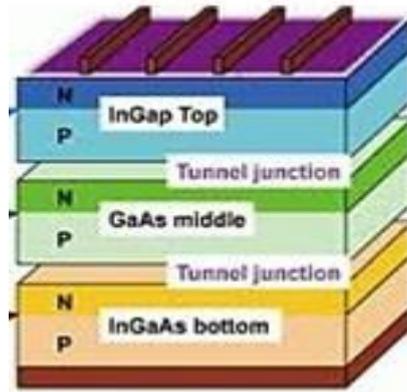


Figure (I.26) : cellule photovoltaïque multi-jonction [46].

I.8.3. Energie thermodynamique

La production d'électricité à partir du rayonnement solaire n'est pas un processus simple. L'idée de base est de fournir des températures utilisables pour les dispositifs thermodynamiques qui transfèrent l'énergie thermique à l'énergie mécanique puis à l'électricité. Le rayonnement est focalisé sur un seul point ou une seule ligne [47].

La thermodynamique utilise l'énergie solaire thermique pour produire de l'électricité, suivant les mêmes principes qu'une centrale électrique traditionnelle mais en utilisant des centrales héliothermiques [48-49].

Il existe quatre principaux types de centrales qui sont utilisées [48] :

- Centrales à capteurs cylindro-paraboliques.
- Centrales à capteurs paraboliques.
- Centrales à tour.
- Centrales de Fresnel.



Figure (I.27) : Centrales à tour [50].

I.8.3.a) Principe de solaire thermodynamique

Le stockage thermodynamique de l'énergie solaire est un mode de production d'électricité et de stockage de l'énergie thermique nécessaire à cette génération pendant plusieurs heures après le coucher du soleil dans les centrales solaires à concentration. L'idée est de focaliser la lumière du soleil à l'aide des miroirs pour chauffer un fluide à haute température (plusieurs centaines des degrés) et générer de la vapeur via un échange thermique, qui peut ensuite être utilisée pour générer de l'électricité via une turbine. Le fluide utilisé peut conserver sa chaleur pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, permettant de produire de l'électricité en début de soirée, lorsque la consommation est la plus élevée [51].

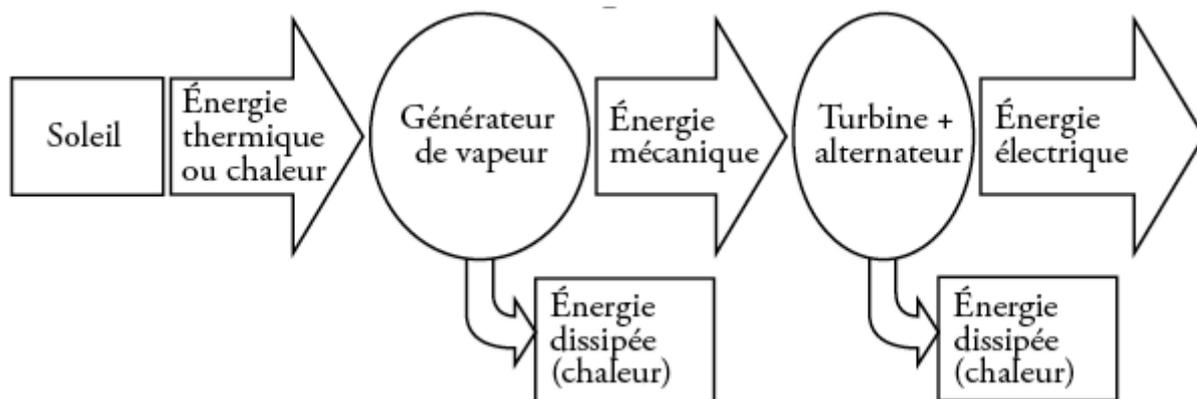


Figure (I.28) : Principe d'une centrale solaire thermodynamique [52].

I.8.3.b) Conversion thermodynamique de l'énergie solaire

Trois éléments clés du processus de conversion solaire/chaleur/électricité par thermodynamique sont identifiés [53].

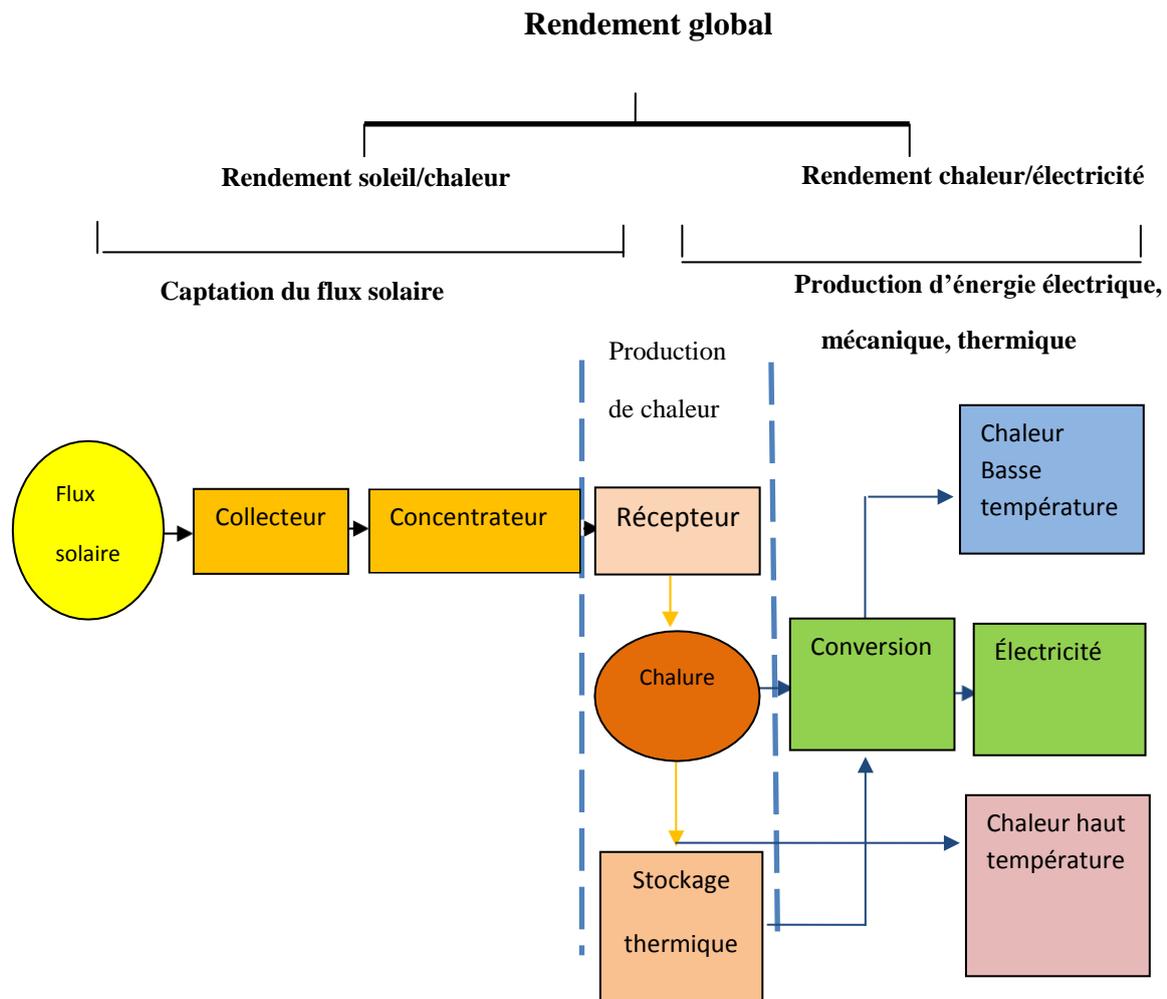


Figure (I.29) : Représente conversion thermodynamique de l'énergie solaire [53].

- 1- Récupérer et concentrer l'énergie solaire afin de chauffer le fluide caloporteur ;
- 2- La génération de chaleur (vapeur d'eau ou autre fluide, selon la température de la source chaude).
- 3- La conversion de la chaleur en électricité, qui fournit de la chaleur à une température plus basse.

I.9. Potentiel des énergies renouvelables en Algérie

L'objectif de la stratégie algérienne de développement des énergies renouvelables est d'atteindre une part de 5% du bilan électrique national d'ici fin 2017.

L'adoption des énergies renouvelables se traduira par :

- une plus grande utilisation du potentiel disponible ;

- une meilleure contribution à la réduction des émissions de CO_2 ;
- une réduction de la part des énergies fossiles dans le bilan énergétique national ;
- développement de l'industrie nationale ;
- La création d'emplois ;

La production d'électricité dans les pays d'Afrique du Nord repose essentiellement sur les énergies fossiles, selon la figure (I.30). L'Algérie a la plus faible quantité d'énergie renouvelable (hydraulique) dans sa chaîne de production d'électricité, les combustibles fossiles représentant plus de 99% de la production totale d'électricité. Le solde (0,7%) est issu des énergies renouvelables, qui sont essentiellement équivalentes à la production hydroélectrique.

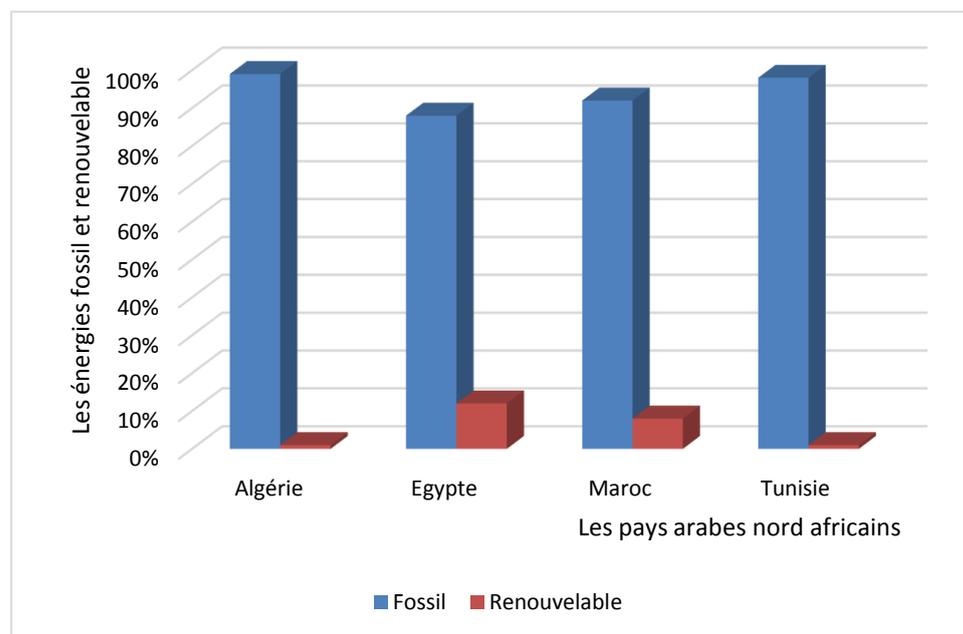


Figure (I.30) : Part des énergies fossiles et renouvelables dans la production d'électricité dans les pays arabes nord africains [51].

En raison de l'importance des ressources en combustibles fossiles du pays et de l'absence des politiques environnementales, le développement des énergies renouvelables a été considérablement ralenti. Selon le Ministère de l'Energie et des Mines, la capacité électrique du pays dépasse 8400 MW, dont 2,4 MW dédiés uniquement aux énergies renouvelables (année 2007). Compte tenu des risques à long terme que ces sources des énergies comportent, leur promotion est devenue l'une des principales priorités énergétiques et environnementales du pays. D'autre part, l'Algérie présente des avantages importants : Un potentiel énergétique

plusieurs projets (électrification des plusieurs villages, production d'eau chaude pour l'assainissement, etc.) ont été réalisés.

En matière d'énergie solaire thermique pour la production d'électricité, Hassi R'mel développe une centrale hybride solaire-gaz d'une capacité de 150 MW. L'installation des pompes éoliennes est l'un des rares projets réalisés dans l'industrie éolienne. En outre, une proposition de parc éolien de 10 MW à Adrar est à l'étude. La stratégie de développement des énergies renouvelables de l'Algérie vise à porter la part des énergies renouvelables dans la production nationale d'électricité à environ 5% d'ici 2015. Une source d'énergie renouvelable importante et une politique énergétique qui encourage une plus grande contribution des énergies renouvelables au bilan national [51].

I.10. L'énergie solaire dans l'Algérie

On n'a pas beaucoup entendu parler des avantages de l'énergie solaire en Algérie depuis longtemps, mais son utilisation est encore limitée car il n'y a pas assez des ressources débloquées pour faire émerger cette nouvelle industrie dans l'un des plus grands producteurs mondiaux de gaz et de pétrole. Les politiciens préoccupés par le changement climatique sont peu nombreux, voire inexistant. Un premier projet de construction est lancé depuis quelques mois déjà.

Il s'agit d'une centrale hybride photovoltaïque d'une capacité de 15 mégawatts (dont 35% proviennent des panneaux solaires) qui a été installée dans la petite ville de Hassi R'mel.

En 2008, l'OPEP (Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole) déclarait : « A très longue échéance, jusqu'en 2025, j'estimerai que 15% de l'électricité sera produite grâce à l'énergie solaire ».

Le développement de ces énergies permettra d'économiser du gaz pour l'exportation ou l'utilisation dans l'industrie pétrolière. Si c'est rentable, nous pourrions peut-être exporter de l'énergie solaire et de l'éthanol vers d'autres pays à long terme. Enfin, l'Algérie se rend compte qu'elle pourra peut-être exploiter le soleil comme source d'énergie renouvelable et inépuisable [54].

I.11. Potentiel solaire en Algérie

L'Algérie possède l'un des plus grands gisements solaires au monde, la durée annuelle d'ensoleillement sur la quasi-totalité du territoire dépasse 2000 heures et atteint 3900 heures

(hauts plateaux et Sahara). Dans la majorité du pays, l'énergie journalière reçue sur une surface horizontale de $1m^2$ est de l'ordre de 5 kWh, soit environ $1700 \text{ kWh}/m^2/\text{an}$ au nord et $2263 \text{ kWh}/m^2/\text{an}$ au sud. Plusieurs études sur le potentiel de l'énergie solaire en Algérie ont révélé un potentiel important pour l'utilisation de cette source d'énergie.

En effet, avec plus de deux millions de kilomètres carrés de terres, l'Algérie reçoit l'équivalent de 300 milliards de tep d'énergie solaire chaque année. Consciente de l'intérêt croissant pour l'énergie solaire et de ses implications, l'Algérie a intégré le développement de l'énergie solaire dans sa politique énergétique en adoptant un cadre juridique qui l'encourage, en planifiant des grands projets d'hybridation des centrales diesel, en lançant deux grands programmes d'électrification et en planifiant la construction d'une installation de fabrication de modules solaires [55].

Tableau (I.2) : potentiel solaire en Algérie [55].

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie en %	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement en heure/ans	2650		3500
Energie moyenne reçue en $\text{KWh}/m^2/\text{ans}$	1700	1900	2650

Cette abondance des énergies renouvelables offre à notre pays une longue période d'autosuffisance énergétique, le soleil jouant le rôle du lion. Les figures (I.31) et (I.32) illustrent cette quantité d'énergie en juillet, par rapport au cas le plus défavorable de décembre [54].

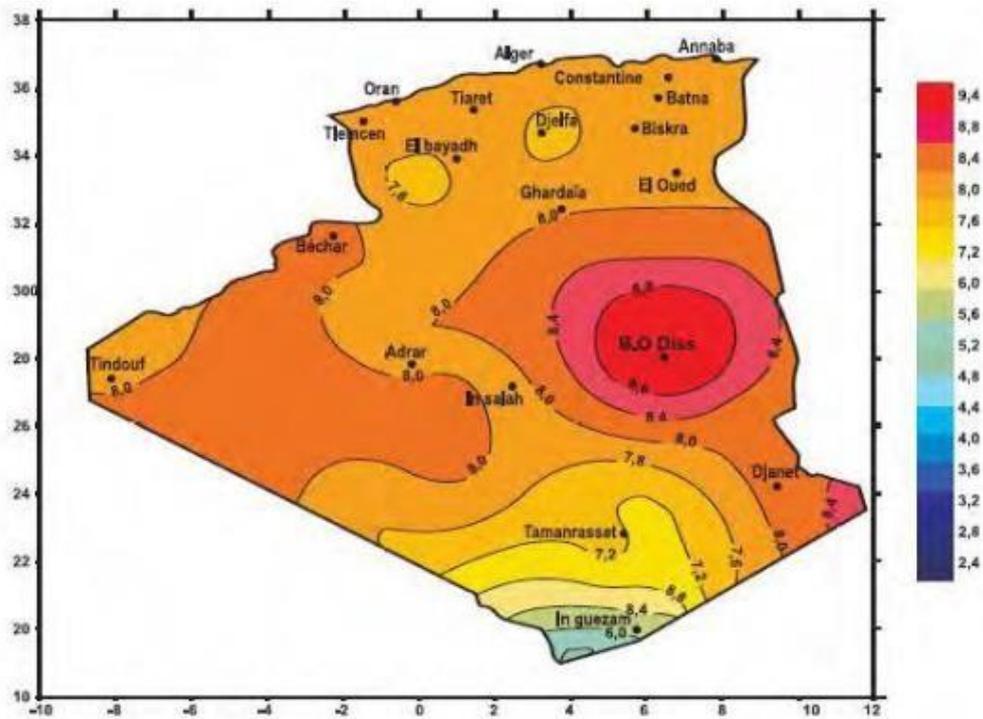


Figure (I.31) : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale au mois de juillet [55].

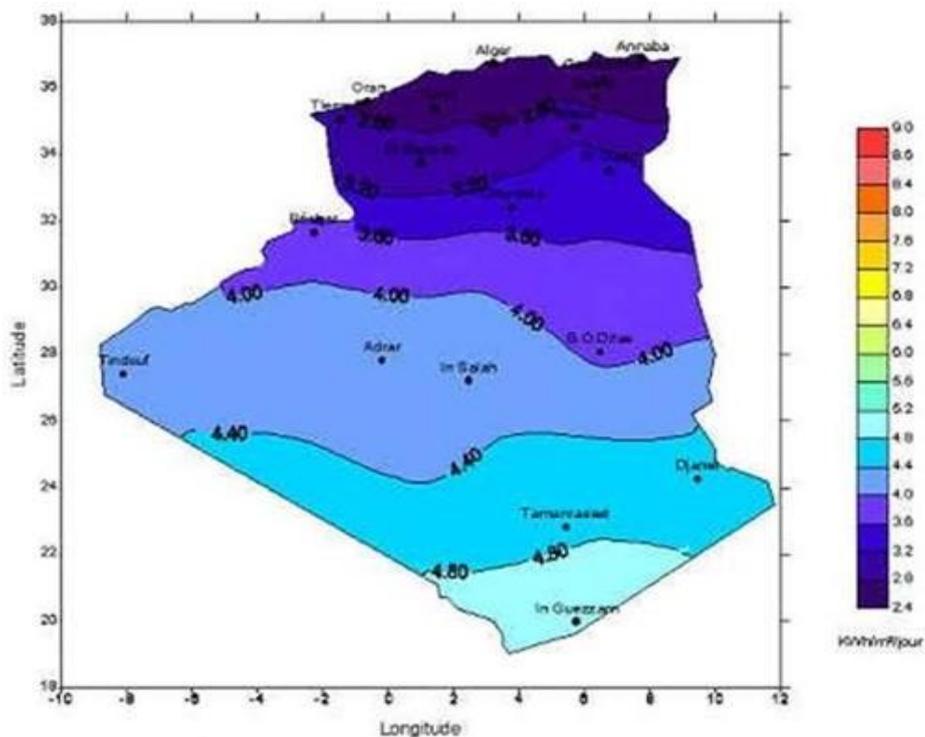


Figure (I.32) : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale au mois de décembre [55].

I.12. Capacité de l'énergie solaire en Algérie

L'Algérie a le potentiel solaire le plus élevé de tous les pays du bassin méditerranéen. Les éléments de preuve ont été fournis par l'Agence Spatiale Allemande (ASA), qui a procédé à une évaluation du satellite. Les résultats semblent sans équivoque. Le potentiel solaire thermique est estimé à 169, 440 térawatts heure/an (TWH/an), tandis que le potentiel solaire photovoltaïque est estimé à 13,9 TWH/an. Suite à ces investigations, l'Algérie a lancé un projet de construction d'une centrale solaire à Hassi R'mel d'une capacité de 150 MW/an, qui devrait être opérationnelle d'ici la fin de l'année. L'objectif est de produire 6 000 mégawatts d'énergie solaire d'ici 2015, soit 5% de la production mondiale d'électricité en 2010.

L'UDTS (Unité de développement de la technologie du silicium) et Sonnergy, une entité juridique basée en Allemagne qui travaille dans les domaines de l'énergie solaire et du développement durable, annoncent la construction conjointe d'une unité de production de silicium solaire de 5000 tonnes.

Les deux organisations ont signé un protocole d'accord afin de développer une entreprise collaborative en Algérie. Les allemands, qui possèdent environ 150 entreprises en Algérie, s'intéressent particulièrement aux énergies renouvelables, un grand nombre d'entreprises allemandes investissant dans le solaire et l'éolien. L'énergie solaire sera l'alternative en Algérie à partir de 2025. Pour préserver les réserves énergétiques actuelles de l'Algérie (pétrole et gaz naturel), le gouvernement a choisi de développer et d'exploiter des sources des énergies alternatives telles que le solaire, l'éolien et le nucléaire. La construction d'une centrale solaire de 15 mégawatts à Hassi R'mel a inauguré une nouvelle ère dans l'utilisation de l'énergie solaire. D'autres projets sont à l'étude : « A l'horizon 2025, dans une perspective de long terme, j'estime que l'énergie solaire générera 15% de l'électricité totale » [56].

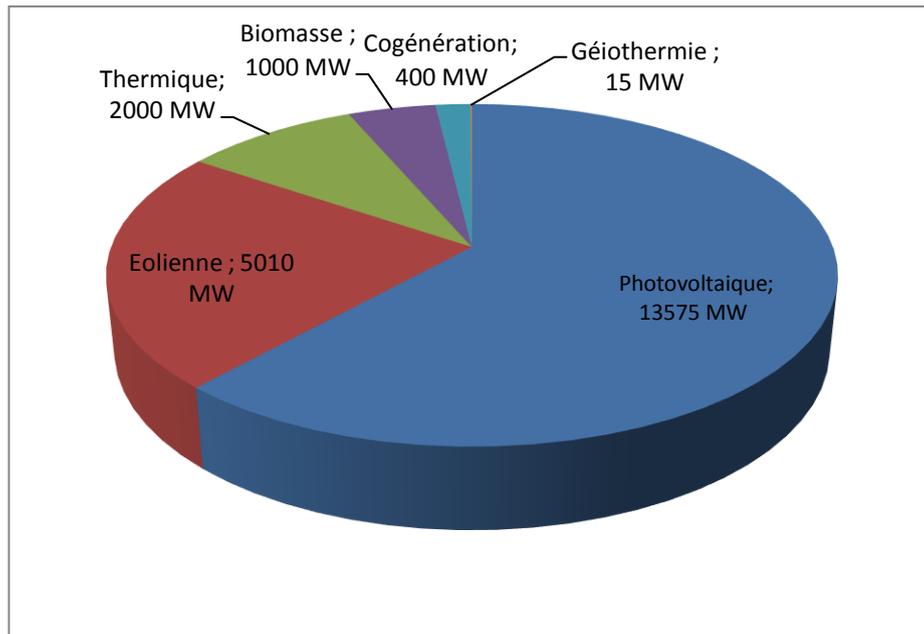


Figure (I.33) : programme algérien des énergies renouvelables 22 GW à L'horizon 2030 [56].

Le potentiel solaire de l'Algérie est considéré comme l'un des plus importants du Moyen-Orient et son utilisation pourrait contribuer à réduire la consommation de gaz et des produits pétrochimiques. L'énergie solaire et l'énergie éolienne sont techniquement réalisables. Nous avons déjà commencé à travailler dans le domaine de la production industrielle d'énergie solaire. Nous construisons actuellement une centrale électrique hybride solaire-gaz à Hassi R'mel d'une capacité de 150 mégawatts, a-t-il dit, notant que l'énergie solaire représente 35% de la capacité de la centrale. Le défi le plus important est de développer une technologie permettant de stocker l'énergie produite pendant la journée et de l'utiliser la nuit. À cet égard, le ministre estime que la question n'est pas urgente.

Une autre possibilité est l'option nucléaire. Selon la radio nationale, notre pays a déjà signé de nombreux accords avec divers pays (Argentine, Chine, France et États-Unis) et des pourparlers avec la Russie et l'Afrique du Sud sont actuellement en cours. Cependant, comme il l'a expliqué, l'énergie nucléaire pose un problème pour l'uranium [57].

I.13. Développement des énergies renouvelables en Algérie

Avec les nouveaux engagements de réduction des émissions de gaz à effet de serre et le recours aux énergies fossiles, la production d'électricité à partir des énergies renouvelables est devenue un choix incontournable, dominant et rentable. Dans la société d'aujourd'hui, les chercheurs et les chefs de l'industrie accordent une attention particulière à cette production.

Plusieurs études sur l'intégration des sources des énergies renouvelables dans le réseau électrique ont été menées. En Algérie, afin de soutenir la politique énergétique du gouvernement. Le parc national des énergies renouvelables compte désormais 24 centrales nucléaires d'une capacité totale de 354,3 mégawatts (MW) [58].

Ce parc d'énergie renouvelable comprend 23 centrales photovoltaïques (PV) d'une capacité totale de 344,1 MW, ainsi qu'une centrale à l'éthanol de 10,2 MW. Cependant, en termes d'objectifs précis, l'Algérie accuse encore un grand retard dans ce domaine. Le programme d'énergie renouvelable comprend le développement des centrales solaires photovoltaïques et thermiques, des parcs éoliens et des centrales hybrides.

- Jusqu'à 2020, une capacité totale d'environ 2 600 MW sera installée pour le marché national, avec une capacité d'exportation d'environ 2 000 MW.

- Jusqu'à 2030, on estime que 22 000 MW de capacité d'énergie renouvelable seront installés, dont 12 000 MW dédiés à la satisfaction de la consommation nationale d'électricité et 10 000 MW à l'exportation [59].

I.14. Politique algérienne sur les énergies renouvelables

I.14.1. Programme National des Energies Renouvelables et de l'Efficacité

Energétique

La population algérienne n'a cessé de croître, augmentant de plus de 25% au cours des 50 dernières années pour atteindre 37,9 millions des personnes (en janvier 2013). Compte tenu de la consommation d'énergie, des émissions de gaz à effet de serre et des évolutions majeures des tendances économiques des dernières décennies, le gouvernement algérien a lancé une campagne de promotion des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique afin de se conformer au protocole de Kyoto. Ce programme a débuté en 2011 et a un coût total de 120 milliards de dollars. Ce programme repose sur une stratégie centrée sur le développement et l'expansion des sources des énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, la biomasse, la géothermie, l'énergie pétrochimique et l'énergie hydroélectrique, afin de diversifier les sources d'énergie et de se préparer à toute baisse imminente des prix du pétrole. L'Algérie ambitionne de devenir un acteur majeur de la production d'électricité à partir du solaire photovoltaïque et du solaire thermique, qui serviront des moteurs de développement économique à long terme et de promotion d'un nouveau modèle de croissance.

Pour cette raison, les énergies renouvelables sont au cœur des politiques énergétiques et économiques de l'Algérie, avec des projections indiquant que d'ici 2030 près de 40% de l'électricité produite pour la consommation domestique proviendra des sources renouvelables.

L'objectif de l'initiative est de construire jusqu'à 22 000 MW de capacité de production d'électricité renouvelable entre 2011 et 2030 dont 12 000 MW dédiés à la satisfaction de la demande intérieure et 10 000 MW destinés à l'exportation.

Les projets internes de production d'électricité à partir des sources des énergies renouvelables seront réalisés en trois étapes :

- 1- La première phase de 2011 à 2013, sera consacrée au développement des projets pilotes pour tester les différentes technologies disponibles ;
- 2- La deuxième phase (2014-2015), marquera le début de la mise en œuvre du programme ;
- 3- Le déploiement à grande échelle du programme sera au centre de la dernière phase qui se déroulera entre 2016 et 2020 ;

Le programme se décompose en plusieurs volets :

- 1-Installation d'une puissance totale de 110 MW d'ici fin 2013 ;
 - 2-Installation d'une capacité totale de 650 MW d'ici 2015 ;
 - 3-Installation d'une capacité totale de 2600 MW d'ici 2020, avec possibilité de consacrer 2000 MW à l'export ;
 - 4- D'ici 2030, une capacité supplémentaire d'environ 12 000 MW devrait être installée, avec la possibilité d'exporter jusqu'à 10 000 MW ;
 - 5- Au cours des années 2011-2013, des projets pilotes pour la construction de deux centrales solaires chacune d'une capacité de stockage d'environ 150 MW, seront lancés ;
- Ceux-ci viendront s'ajouter à la centrale électrique hybride de Hassi R'mel, qui aura une capacité totale de 150 MW et 25 MW d'énergie solaire ;
- 6- Entre 2016 et 2020, quatre centrales solaires thermiques d'une capacité totale d'environ 1200 MW seront construites. Le programme 2021-2030 prévoit la construction de 500 mégawatts de capacité chaque année jusqu'en 2023, puis 600 mégawatts par an jusqu'en 2030 ;

De plus, ce programme générera des dizaines des milliers d'emplois directs et indirects, ainsi qu'une nouvelle vision pour le développement d'une véritable industrie solaire, grâce à un programme de formation et de capitalisation qui permettra aux entreprises d'utiliser la technologie locale et de développer des nouvelles compétences, y compris dans les domaines de l'ingénierie et de la gestion des projets [60].

I.15. Avantage et inconvénients de l'énergie solaire

Le tableau au-dessus représente les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire :

Tableau (I.3) : Avantages et inconvénients de l'énergie solaire [61].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Une excellente source d'énergie renouvelable. • Une source d'énergie non polluante. • La lumière est gratuite. • durabilité. 	<ul style="list-style-type: none"> • Il n'y a pas de lumière la nuit. • Cela prend beaucoup de place. • Le positionnement peut avoir un impact sur la quantité d'énergie stockée dans les panneaux. • Panneau est fragile.

I.16. Conclusion

La production d'électricité en Algérie repose sur l'utilisation des énergies renouvelables comme l'énergie solaire, qui est inépuisable. L'énergie propre est très importante dans le monde, et elle sert de réservoir d'électricité pour répondre à la demande parce qu'elle est non polluante et facilement accessible. Nous avons passé en revue certains concepts liés au rayonnement solaire et à ses applications dans le secteur de l'énergie. Par la suite, nous avons discuté des nombreux types de production d'énergie solaire disponible dans la nature.

Selon nos recherches, la source d'énergie renouvelable la plus intéressante d'un point de vue énergétique en Algérie semble être l'énergie solaire. Cette énergie est largement disponible et a un énorme potentiel. Ce potentiel encourage son utilisation pour la production d'électricité, en particulier dans les zones isolées autour de l'Algérie.

Références bibliographiques

- [1] Daas Mohammed El Amine, « étude et simulation numérique des vibrations des poutres homogènes application aux cas des aubes longues d'une turbine à vapeur », mémoire master 2 en génie mécanique, université de Tebessa, faculté des sciences et technologie, 2012/2013.
- [2] Azzoune Zeyneb, Draa Amani, Zaiter Zahra, « optimisation technico-économique d'une centrale tour », mémoire master 2 en génie mécanique option énergétique, université Mohammed Seddik Ben Yahia - Jijel, faculté des sciences et de technologie, 2017/2018.
- [3] Ali Zahia, « étude de l'influence de la température sur la puissance de la cellule photovoltaïque », mémoire master 2 en physique option physique des matériaux, université Mohamed El Bachir Elibrahimi-Bordj Bou Arreridj, faculté des sciences et de la technologie, 2020-2021.
- [4] Kabdi Meymouna, Nili Tibra, « étude théorique de la contribution des cheminées solaires au confort thermique des bâtiments en zone saharienne », mémoire master 2 en physique option physique météorologique, université Kasdi Merbah Ouargla, faculté des mathématiques et science de la matière, 2020/2021.
- [5] Halouane Assia, « modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d'un module photovoltaïque », mémoire master 2 université Mohammed Bougera Boumerdes, 2016/2017.
- [6] Benabed Fatima, Dahmani Rokiya, « étude de l'effet des paramètres internes et externes sur les performances électriques des modules solaire en désert algérien - site d'Adrar », mémoire de master 2 en physique énergétique et énergies renouvelables, université Ahmed Draïa-Adrar, faculté des sciences et de la technologie, 2019/2020.
- [7] Badreddine Rihab, Cheriki Dalila, « amélioration de la caractéristique optique et électrique d'une cellule photovoltaïque à base de pérovskite » mémoire de master 2 en électronique option microélectronique, université Mohamed Boudiaf-Msila, faculté de technologie, 2020/2021.
- [8] S. Kazim, K. Nazeeruddin, Gr. atzel, S. Ahmad, perovskite as light harvester: a game changer in photovoltaics, 2014.
- [9] Olivier Gergaud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat en électrotechnique de l'école normale supérieure de Cachan, 2002.
- [10] <http://www.scribd.com>. Consulter 13 Mars 2022.

- [11] B .Flèche, D. Delagnes, « énergie solaire photovoltaïque », juin 2007, énergie solaire photovoltaïque.pdf, consulté janvier 2014.
- [12] baroud kendo li, « état de l'art et modélisation des microcentrales », magister en électrotechnique de l'université Mentouri de Constantine 2007.
- [13] article des sources d'énergies renouvelables 2016.
- [14] O. Gergaud, « modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau », thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan, France, Décembre 2002.
- [15] Yousfi Fatiha, « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque appliquée à un site saharien », mémoire master 2, université Ahmed Daria - Adrar, 2018.
- [16] Kajihara, Tetsumi Harakawa, « model of photovoltaic cell circuits under partialshading ». Mismatching - 21st Photovoltaic Specialists Conference, Atsushi 199.
- [17] Oukil Abdelhakim, Temtam Fouazi, « production de l'électricité à partir de la cheminée solaire», mémoire master 2 en génie mécanique option mécanique énergétique, université Bouira, département de génie mécanique, 2015/2016.
- [18] Abadi Tarek, Douyem Said, « utilisation de l'énergie solaire dans l'extraction des sucres à partir des dattes », mémoire de master 2 en énergies renouvelables spécialité énergies renouvelables en mécanique, université Echahid Hamma Lakhdar d'el-Oued, faculté de technologie, 2017-2018.
- [19] À ne pas confondre avec son petit-fils Antoine-Henri Becquerel qui a découvert lradioactivité en 1896.
- [20] José Miguel Navaro, « cellules organiques transparentes dans le visible », thèse de doctorat, université de Toulouse III, 2008.
- [21] Hocini Nassim, Tazamouchet Elyazid, « sur la maîtrise de l'insertion des ressources renouvelables aux réseaux électriques », mémoire de master 2 en électrotechnique, option énergie renouvelable, université Abderahmane Mira de Bejaia, faculté de technologie, 2015/2016.

[22] Z. Benjellouli, « contribution à la modélisation d'une cellule solaire » mémoire de magistère université de Bechar, Algérie 2009.

[23] <http://www.carte-algerie.com/carte-algerie.html> Consulter 15 Mars 2022.

[24] Foued Chabane, « modélisation des paramètres de la conversion thermique de l'énergie solaire », doctorat en sciences en génie mécanique option énergétique université Mohammed khider-Biskra, faculté des sciences et de la technologie.

[25] S. Bensaada, T. Bouziane, Transfert de chaleur, 16 février 2015.

[26] <http://lenergiereouvelable.com> Consulter 16 Mars 2022.

[27] Douirem Freiha, Haimoud Marwa, « étude numérique d'une cheminée solaire », mémoire de master 2 en énergies renouvelables spécialité énergies renouvelables en électrotechnique, université Ghardaïa, faculté des sciences et de la technologie, 2018/2019.

[28] Cheloufi Djassem, réalisation et expérimentation d'une cheminée solaire, mémoire de master Université Kasdi Merbah Ouargla, 2013/2014.

[29] www.serresdelaperrine.com. Consulter 20 Mars 2022.

[30] David Martin, étude d'un cycle de brayton-joule solaire à l'aide de la thermodynamique à vitesse finie, mémoire master 2, université de Lorraine, 2013.

[31] www.mode/transport.fr. Consulter 25 Mars 2022.

[32] A. Oubarra, conversion de l'énergie solaire, Maroc Bouznika.

[33] Rahui Sahar, Bousshine Lahbib, « étude du comportement mécanique de la structure de la cheminée solaire », école nationale supérieure d'électricité et de mécanique, université Hassan II, Casablanca, 2017.

[34] Mazari Abderrahmane, « Simulation numérique de l'effet du gradient de température sur l'écoulement d'air dans une cheminée solaire », mémoire de master 2 en physique option physique énergétique et énergies renouvelables, université Mohamed Boudiaf - Msila, faculté des sciences, 2017/2018.

[35] A. Sfeir, G. Guarracino, « Ingénierie des systèmes solaires », technique et documentation, Paris 1981.

- [36] E. Hau, « wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics », Springer, Germany (2006).
- [37] F. Lasnier, T.G. Angel, « photovoltaic engineering handbook », IOP Publishing Ltd, 1980, ISBN 0-85274-311-4.
- [38] <http://www.planete-energies.com/fr>. Consulter 27 Mars 2022.
- [39] Abdennebi Hamida, Oulad Naoui Hanane, conception et développement d'un programme.
- [40] A. Sambou, Modélisation des propriétés électriques et optiques des nanostructures de silicium sous formes de pyramides et pyramides inversées, Mémoire p 64.
- [41] Djamilia Rekioua, Ernest Matagne, « optimization of photovoltaic power systems: modelization, simulation and control », green energy and technology, springer, 2012.
- [42] Anne Labouret, Michel Viloz, « Energie solaire photovoltaïque », 2ème édition Dunod, le Moniteur, juin 2006.
- [43] le photovoltaïque fonctionnement et technologies, Bruxelles environnements, 2010.
- [44] <https://www.researchgate.net>. Consulter 27 Mars 2022.
- [45] Louzanza Brahim, Madi Salim Rekioua, « étude et caractérisation d'un panneau photovoltaïque type condor », mémoire master 2, université Abderrahmane Mira – Bejaia, 2015.
- [46] Enerzine, Archive, Cellule photovoltaïque nouveau record d'efficacité pour Sharp, Enerzine. [En ligne] 2011, [Citation : 9 mars 2020] <http://www.chimix.com>. Consulter 28 mars 2022.
- [47] Kadraoui Hicham, « étude comparative et rendement énergétique des différents degrés de concentration des convertisseurs thermodynamique de l'énergie solaire », mémoire magistère en matériaux et énergies renouvelables option photothermique, université Abou- Bakr Belkaid-Tlemcen, faculté des sciences, 2010 /2011.
- [48] J. Bonal, P. Rossetti, « Les énergies alternatives », Omniscience, 2007.
- [49] D. K. Edwards, « Capteurs solaires », Edition SCM. Paris, 1979.

- [50] <https://www.connaissancedesenergies.org> Consulter 29 Mars 2022.
- [51] Gaouas Mehdi Redha, ibn cherif Karim, « étude d'une chaîne de conversion de l'énergie solaire avec système de suiveur solaire », mémoire master en électrotechnique spécialité réseaux électriques, université Larbi Ben Mhidi - Oum El Bouaghi, faculté des sciences et des sciences appliquées, 2020/2021.
- [52] <https://www.researchgate.net> Consulter 30 Mars 2022.
- [53] feuille de route solaire thermodynamique » guide de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (A D E M E) version finale Juin 2010.
- [54] énergies alternatives, sous la direction de Jean Bonal et Pierre Rossetti, Omnisciences, 2007.
- [55] Kabouche Azouz, mémoire magistère, « architecture et efficacité énergétique des panneaux solaires cas d'étude : simulation sous trnsys16.1 d'un appartement d'une tour multifonctionnelle à Constantine », mémoire magistère en architecture bioclimatique université Mentouri, faculté des sciences de la terre, de géographie et l'aménagement du territoire, 2011/2012.
- [56] « Evolution du secteur de l'énergie et des mines 1962-2007 », ministère de l'énergie et des mines, Edition 2008.
- [57] Al Idrissi, el-annabi.com - mars 2009.
- [58] S. Makhoulfi, « Prévision de la ressource éolienne », centre de développement des énergies renouvelables Alger, Algérie.
- [59] Bourzami Arif, « contribution à l'étude de la stabilité des grands réseaux électriques dans un marché de l'électricité dérégulé en présence des sources d'énergie renouvelable par la logique floue », thèse doctorat en sciences, option machines électriques et leurs commandes, université Ferhat Abbas-Setif 1, faculté de technologie.
- [60] Mihoub Sofiane, « contribution à la modélisation et à l'optimisation des concentrateurs solaires motorisés appliqués aux systèmes thermosolaires », thèse doctorat en sciences spécialité énergies renouvelables, université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, faculté des sciences-département de physique, 2016/2017.

[61] Sahraoui Hamza, « modélisation et commande des convertisseurs dc-dc utilisés dans les systèmes photovoltaïques (théorie et expérimentation) », thèse doctorat en électrotechnique option commande des systèmes industriels et énergies renouvelables, université de Batna 2, faculté de technologie, 2015/2016.

Chapitre III

Description d'une tour solaire (Cheminée)

II. Introduction

La consommation mondiale d'énergie augmente régulièrement depuis plus d'un siècle. Cette énergie provient des combustibles fossiles et la température de la terre augmente à l'échelle mondiale à mesure que les émissions de dioxyde de carbone augmentent. Par conséquent, il est plus important que jamais de réduire les émissions de gaz à effet de serre pour ralentir le changement climatique.

Dans ce contexte, l'exploitation de l'énergie solaire concentrée dans les centrales solaire à cheminée est une possibilité prometteuse. Une cheminée solaire est un appareil qui convertit l'énergie solaire en énergie cinétique puis en énergie électrique [1].

Le rayonnement solaire peut être converti en des autres formes des énergies utiles aux activités humaines, telles que la chaleur et l'électricité, par divers processus. Pour capter directement une partie de l'énergie, des procédés ont été développés et améliorés. Nos recherches portent sur les procédés utilisés pour générer de l'électricité à partir du rayonnement solaire, en particulier les centrales solaires à cheminée. Les centrales solaires sont conçues pour produire des grandes quantités d'électricité à faible coût, sans utiliser des combustibles fossiles et avec moins d'émission de gaz à effet de serre possible. Plusieurs effets et forces naturels (effet de serre, effet cheminée, effet du vent, force de Coriolis) sont combinés dans ce concept.

Plusieurs études ont vérifié que le système fonctionne de manière autonome et permanente, quels que soient les niveaux d'ensoleillement ou les conditions de vent. C'est un concept bien établi qui surpasse tout ce qui a été conçu jusqu'à présent dans le domaine de la production d'électricité. Il est notamment plus efficace et plus économique que les appareils utilisant des éoliennes ou cellules photovoltaïques...etc.

L'idée de base est qu'un système à cheminée solaire en trois parties peut être utilisé pour produire de l'électricité : Un collecteur, un ensemble des turbines éoliennes et une cheminée. Son principal avantage est qu'il peut fonctionner en continu pendant la journée en utilisant le rayonnement solaire direct et diffusé et la chaleur de la croûte terrestre la nuit. Une cheminée peut générer de l'électricité à l'aide d'un rayonnement diffus même lorsque le ciel est nuageux [2].

II.1. Historique

- En 1903 le Colonel Isidoro Cabanyes propose un modèle de tour solaire dans la revue « l'énergie électrique ».
- En 1926, le physicien français Bernard Dubos proposa l'utilisation du vent vertical généré par des gros tuyaux installés sur les crêtes des montagnes pour produire de l'électricité.
- En 1931, Hans Günther d'Allemagne a écrit l'un des premières représentations d'une tour solaire.
- En 1975, l'ingénieur canadien Louis M. Michaud publie son projet de centrale tour dans le bulletin de la société américaine de météorologie. Il était également destiné à créer une ascendance atmosphérique tourbillonnaire, mais sur une tour cylindrique.
- En 1981, sous la direction de l'ingénieur Allemand Jörg Schlaich et avec des fonds du ministère allemand de la recherche et de la technologie, le premier prototype de cheminée solaire a été construit avec succès à Manzanares (une ville espagnole à 150 kilomètres de Madrid) [3].

II.2. Effet de serre

L'effet naturel de serre est un phénomène qui permet à la terre de maintenir une température confortable. Il aurait moins de 18 degrés s'il n'avait pas l'effet dentelé. Le soleil envoie ses rayons sur la terre, qui entrent alors dans l'atmosphère et réchauffent le sol et les océans. Ces derniers évoquent des images de chaleur dans l'air. Un composant retourne dans l'espace, tandis que l'autre reste dans l'atmosphère et retourne au sol grâce à l'effet de gaz dentelé. L'effet de serre anthropique (c'est-à-dire causé par l'homme) est contrasté avec l'effet de serre naturel, qui est nécessaire pour l'équilibre écologique sur terre. Cela est dû à un rejet à grande échelle de gaz à effet de serre, lié aux activités humaines, notamment industrielles, depuis la fin du XIXe siècle. En conséquence, la terre se réchauffe dangereusement, au détriment de la fonte des glaciers et du changement climatique exacerbé (tornades, inondations, canicules...) [4].



Figure (II.1) : Le principe du gaz à effet de serre [5].

Une plus grande opacité de l'atmosphère au rayonnement infrarouge et par conséquent, un rayonnement effectif vers l'espace à partir d'une altitude et d'une température plus basse est causée par une augmentation de la concentration de gaz avec un impact de serre. Il en résulte une force radiative, un déséquilibre qui ne peut être corrigé qu'en augmentant la température du système surface-troposphérique. C'est ce qu'on appelle l'effet de serre renforcé. Ce phénomène constitue une menace importante pour notre planète, étant donné que tous les modèles élaborés par les météorologues et d'autres experts prévoient que les températures mondiales augmenteront de 1,5 à 6 degrés Celsius d'ici la fin du siècle. Par ailleurs, des petits changements de température peuvent avoir des conséquences à grande échelle, que ce soit au niveau climatique (élévation du niveau de la mer, plus fortes différences climatiques, plus grande variabilité climatique...) ou au niveau de la biodiversité (diminution significative des glaciers alpins, migration ou extinction des espèces végétales ou animales, etc.). Ces changements entraîneront une augmentation des risques humains, y compris l'aridification de zones spécifiques, qui causeront des problèmes agricoles et alimentaires, une augmentation de l'intensité des événements et des risques météorologiques majeurs (inondations, coulées de boue, etc.), et la résurgence des maladies comme le paludisme [4].

II.3. L'effet de convection naturelle

La convection naturelle est un phénomène physique qui se produit lorsqu'un gradient (une différence de pression ou de température) provoque un mouvement dans le fluide. Les gradients peuvent être liés à différentes quantités d'intensité, telles que la température (convection thermique), la concentration de soluté (convection de soluté) ou la tension superficielle (convection thermo capillaire). La densité dépend de la température (de la concentration, si nécessaire) et les gradients de température ou de concentration créent des différences de densité dans le fluide, entraînant des changements latéraux dans la flottabilité d'Archimède, qui est à l'origine du mouvement. Certains mouvements dans l'océan sont appelés mouvements de convection [6].

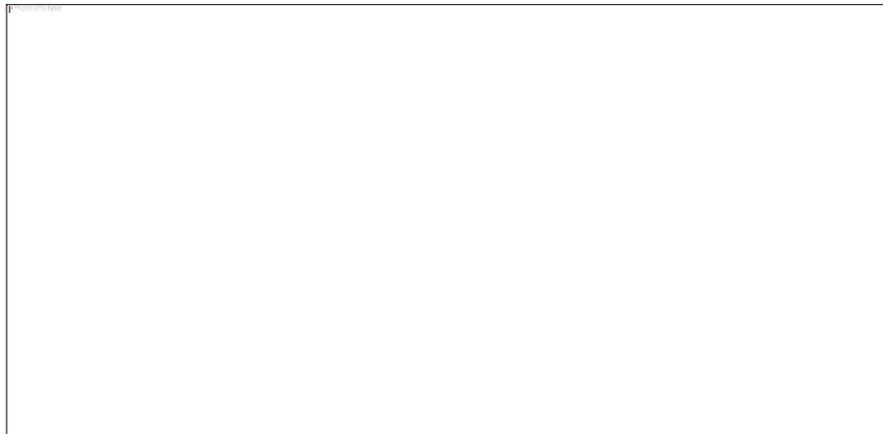


Figure (II.2) : Présentation de la convection dans une casserole [6].

II.4. Phénomène majeur (Le thermosiphon)

Le phénomène de thermosiphon est essentiel au fonctionnement de la cheminée solaire. Le système est basé sur le principe d'Archimède, caractérisé par le changement de masse et de volume. Étant donné que l'air chaud et l'air froid ont des densités différentes et que l'air chaud est plus léger que l'air froid, l'air chaud est forcé dans la cheminée. Affecté par l'air froid, le faisant monter [7].

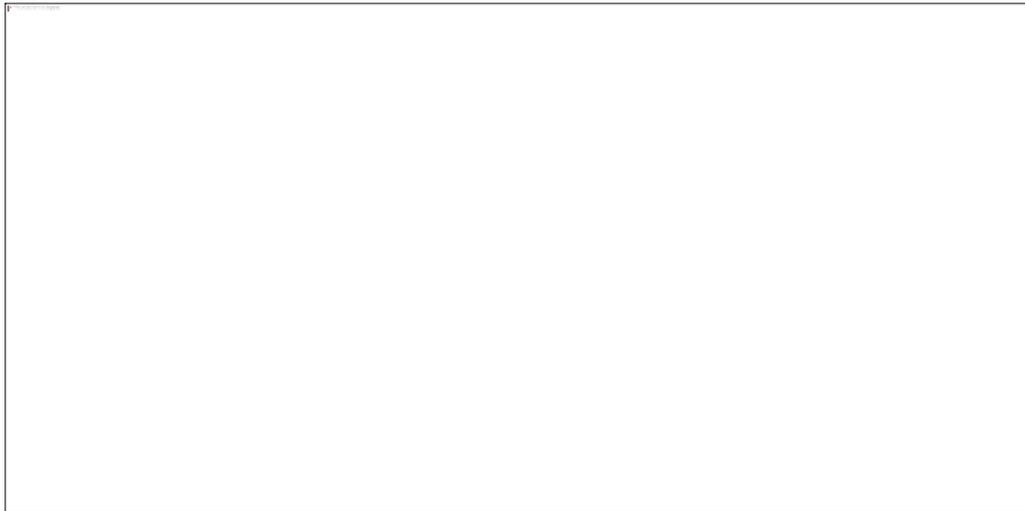


Figure (II.3) : Schéma illustrant la circulation de l'air [8].

Le thermosiphon est un système de pompe à fluide basé sur la détente et la pression d'Archimède. Il se compose d'une chambre de chauffage du fluide, d'une entrée basse et d'un tuyau vertical (cheminée) situé au sommet de la chambre. Le fluide chaud monte et sort de la pièce par le foyer, tandis que le fluide froid sortant du conduit inférieur aspire.

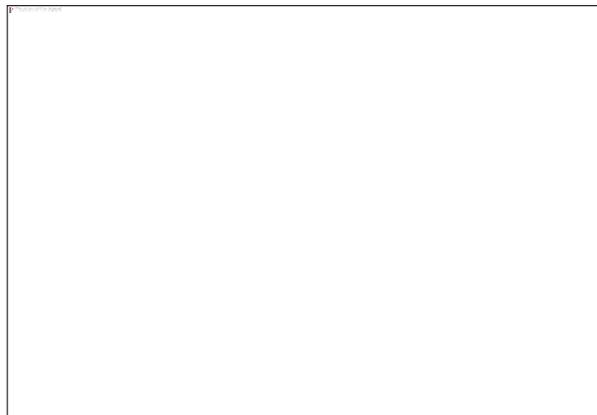


Figure (II.4) : Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'un thermosiphon [8].

La chambre de chauffe dans notre étude est la serre qui nous aide à réchauffer l'air froid entrant. Les ouvertures d'aération entre la base de la serre et le conduit vertical représentent l'entrée inférieure, tandis que le conduit lui-même représente la cheminée. Le principe du thermosiphon est utilisé dans les installations de chauffage solaire et de production d'énergie. Ce principe implique le transfert de chaleur par convection. Un fluide caloporteur est un fluide responsable du transfert de chaleur entre deux ou plusieurs sources de température. De plus, la convection naturelle est un phénomène mécanique fluide qui se produit lorsque la température de la région

change et que la région se déplace verticalement sous l'influence de la pression d'Archimède. Un changement de température affecte la densité du liquide qui change par rapport à la densité du liquide environnant.

Les mouvements conventionnels sont le nom de ces mouvements. Il faut remarquer que toutes ces explications théoriques sont spécifiques au fonctionnement de notre tour solaire. Par conséquent, le phénomène du thermosiphon est essentiel au bon fonctionnement de la cheminée solaire [8].

II.5. Définition d'une cheminée solaire

Une centrale solaire (CS) est une centrale solaire qui utilise le rayonnement solaire pour augmenter l'énergie interne de l'air circulant dans le système. Il est basé sur le concept d'exploitation de l'énergie mécanique de la convection naturelle de l'air chauffé par le soleil.

L'air est chauffé par le rayonnement solaire et dirigé vers le bas de la cheminée par des immenses serres appelées « collecteurs ». Cet air chaud est fourni en permanence par l'air ambiant de la serre est naturellement aspiré dans la cheminée. Les cheminées solaires sont équipées des tubes remplis d'eau noirs qui absorbent la chaleur tout au long de la journée et la restituent à la maison pendant la nuit, avec des brises régulières. L'énergie cinétique de l'air est ensuite stockée dans un système de turbine qui entraîne une génératrice [9].

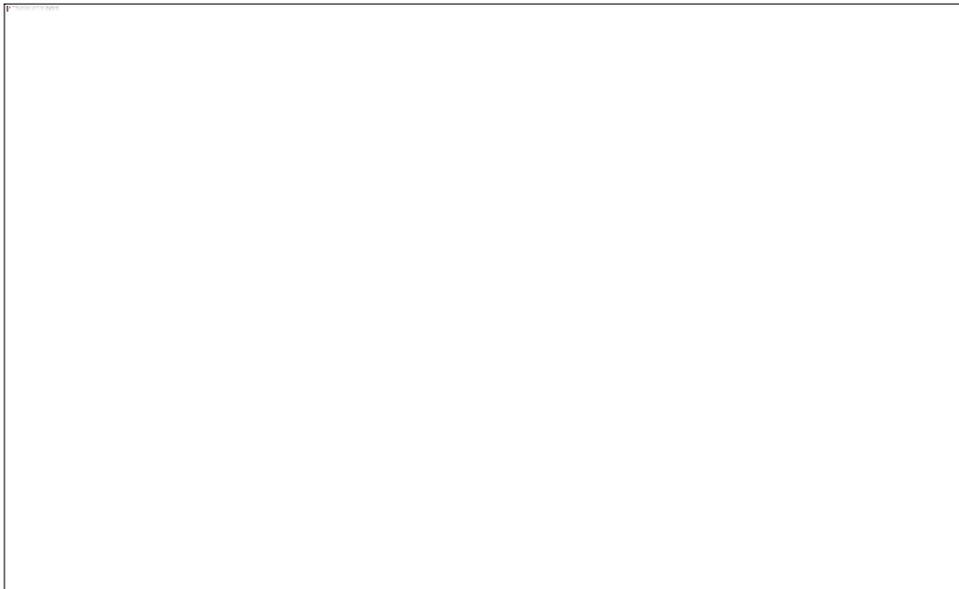


Figure (II.5) : Cheminée solaire [10].

II.6. Description

La cheminée solaire (CS) également connue sous le nom de tour solaire, cheminée thermique ou une cheminée provençale est une centrale solaire qui utilise la convection pour produire de l'électricité. L'énergie cinétique de l'air est alors stockée dans le système de turbine et de générateur. Cette simplicité présente des avantages considérables en termes de coût de construction, de coût de maintenance, de robustesse, de durée de vie et d'accessibilité dans les pays en développement [11].

La cheminée solaire est utilisée depuis des siècles, notamment par les Perses au Moyen et au Proche-Orient et par les Romains dans l'Europe ancienne [12].

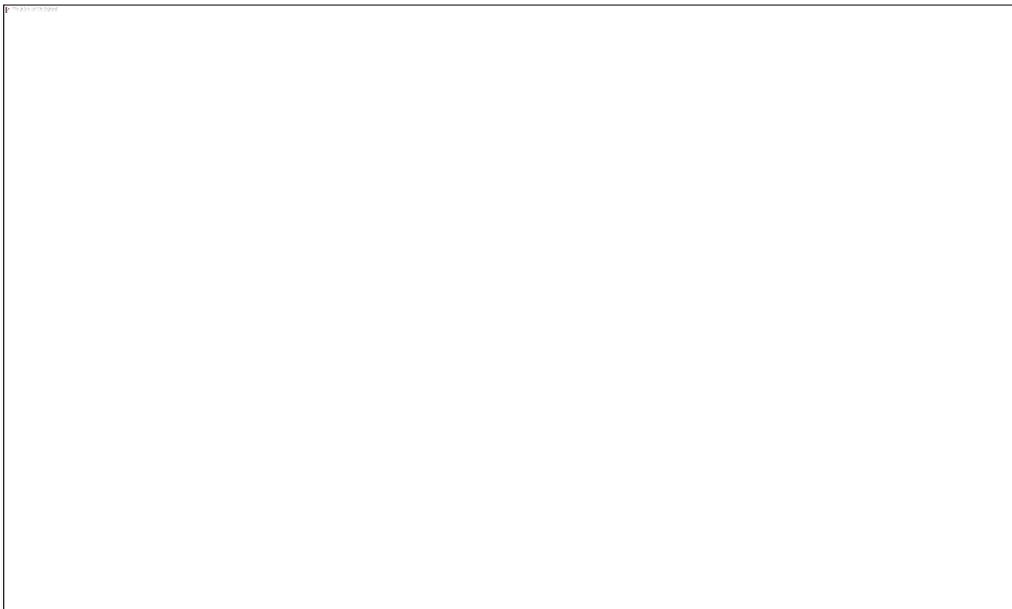


Figure (II.6) : Cheminée solaire [13].

II.7. Principaux éléments de la cheminée solaire

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

II.7.1. Collecteur

Le collecteur est la partie qui est employée pour produire l'air chaud par effet de serre. Un toit en vitre ou en film plastique et la terre naturelle en dessous forment un collecteur d'air. Le collecteur est ouvert à la périphérie pour permettre l'introduction de l'air frais. Le toit du collecteur (qui est supporté quelques mètres au-dessus de la terre) a pour but de rassembler les rayons solaires pour réchauffer la masse d'air à l'intérieur du collecteur. Donc placée une cheminée verticale avec un joint étanche entre sa base et le toit. La hauteur de toit

augmente au voisinage de la base de cheminée, afin que l'air soit détourné en mouvement vertical. Il est avantageux d'augmenter la capacité du toit de collecteur, en fournissant un double vitrage de la cheminée près [14].

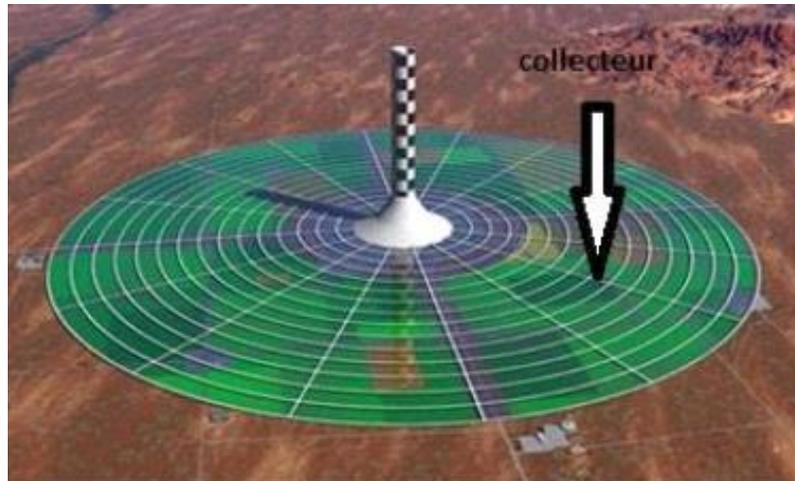


Figure (II.7) : Collecteur de cheminée solaire [8].

Le plus efficace semble être le collecteur en verre qui a un taux de conversion de la chaleur solaire allant jusqu'à 70%. L'augmentation annuelle typique en pourcentage est d'environ 50%. En outre, avec des soins et un entretien appropriés, sa durée de vie peut facilement être prolongée à 60 ans ou plus [8].

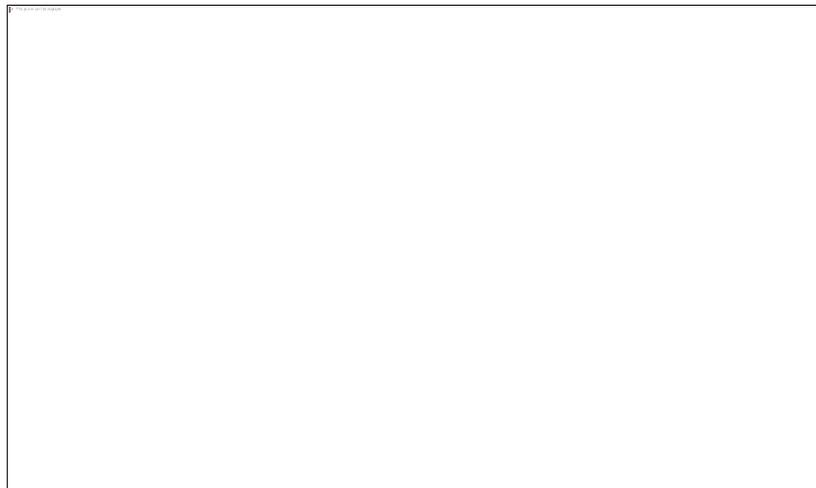
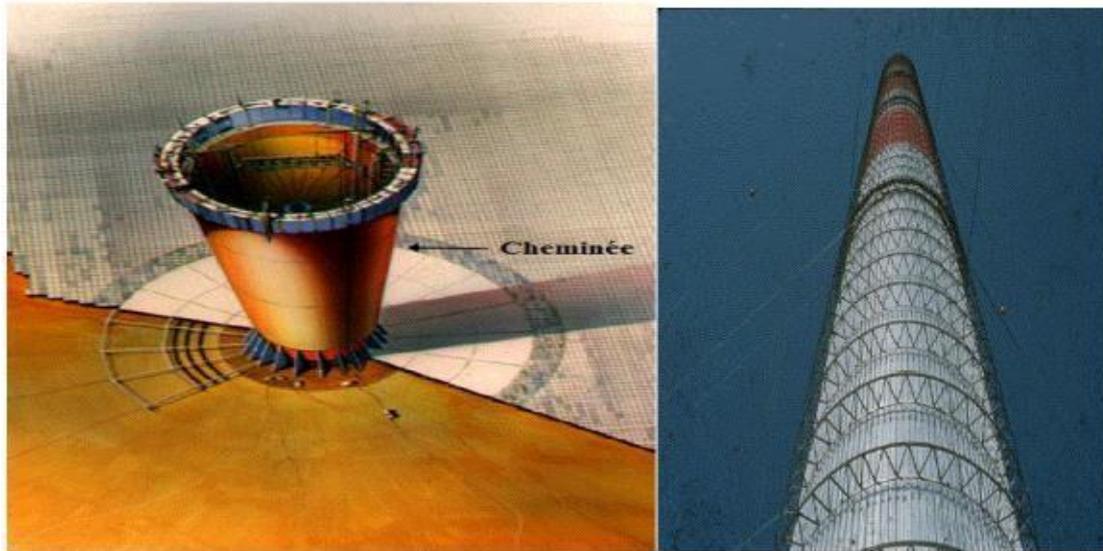


Figure (II.8) : Toit transparent de la serre [10].

II.7.2. Cheminée

Le moteur de base d'un appareil est le chemin lui-même. Il faut créer une différence de pression pour créer un flux d'air sous forme de vent. Afin d'atteindre un niveau de pression sous

la base, la hauteur des cheminées doit être augmentée. En conséquence, la pression d'air à la sortie de la cheminée est plus faible qu'à l'entrée, augmentant la vitesse verticale de montée de l'air chaud dans la cheminée. La base est fixée au sol avec des supports qui maintiennent l'entrée d'air à distance pour accélérer l'évaporation. Les cheminées sont généralement en béton armé [14].



Figure(II.9) : cheminée solaire [12].

Plus l'inclinaison est élevée, plus le tour solaire produit d'énergie. L'efficacité d'une cheminée dépend de la différence de température entre l'air intérieur et l'air extérieur au sommet de la cheminée. Par conséquent, le rendement est proportionnel au rapport entre la hauteur de la cheminée et la température extérieure.

Malgré le fait que l'efficacité est proportionnelle à la hauteur de l'escalier, il y a une limite pratique [8].

II.7.3. Turbine

Comme le montre la figure (II.10), des turbines sont utilisées pour convertir le flux d'air ascendant en énergie mécanique puis en énergie électrique [10].

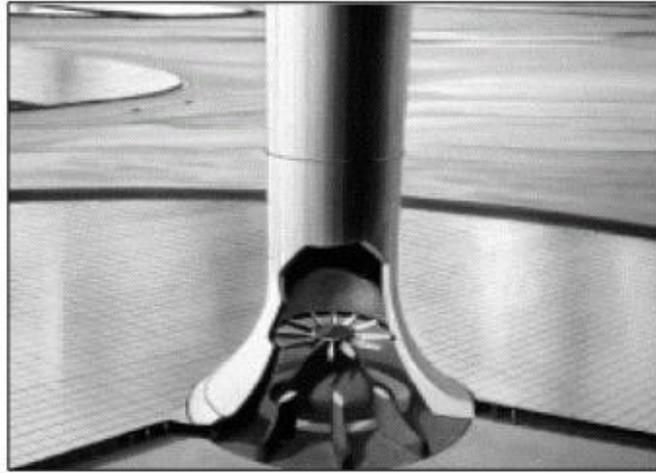


Figure (II.10) : La disposition d'une turbine dans une cheminée solaire [15].

La turbine est placée verticalement dans le collecteur, selon la figure (II.11.a) ou horizontalement dans la cheminée, selon la figure (II.11.b). Afin d'extraire le maximum d'énergie de l'air chaud, les pales de la turbine doivent couvrir toute la section de la cheminée. A cet effet, une grande turbine ou plusieurs petites turbines doivent être utilisées au fond de la cheminée [10].

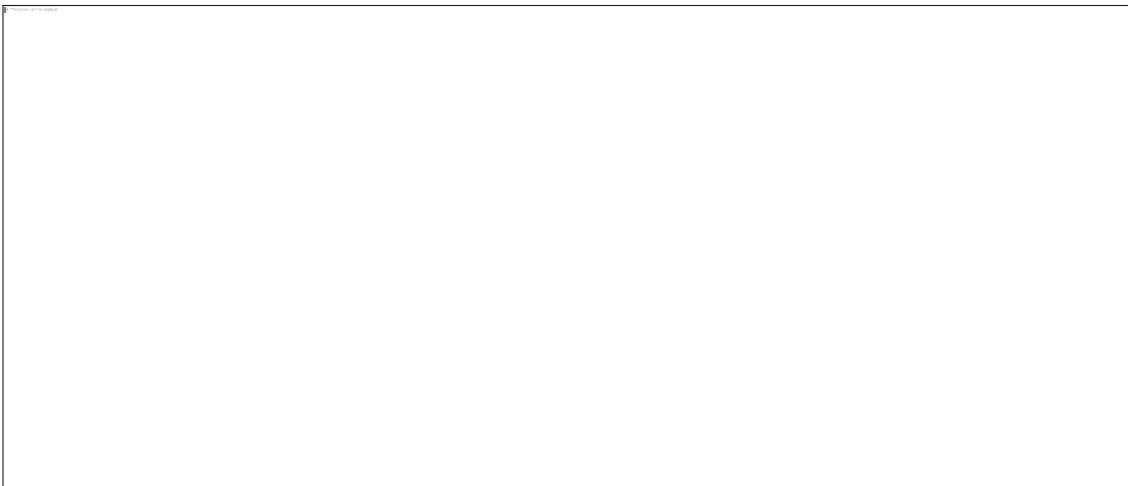


Figure (II.11) : (a) Turbines verticales, (b) Petites turbines horizontales [15].

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

Tableau (II.1) : Echanges entre les différents domaines [16].

Fonctions	Vitrage	Air	Sol	Paroi	Turbine
Composantes					
Collecteur	-Conduire l'air. -Conserver la chaleur dans le système. -Permettre l'entrée du flux solaire.	Porter l'énergie (cinétique et thermique).	-Capter rayonnement solaire. -Stocker la chaleur. -Transmettre la chaleur. -Conduire l'air		
Cheminée		Porter l'énergie (cinétique).		Conduire l'air.	
Turbine					Récupérer l'énergie

II.8. Principe de fonctionnement d'une centrale solaire à cheminée

Une centrale à cheminée alimentée à l'énergie solaire est composée de trois éléments : un collecteur solaire, une centrale à cheminée et une turbine, qui nous sont tous familiers. En 1931, leur système de production d'électricité a été décrit pour la première fois.

L'air est chauffé par les rayons solaires qui traversent la couverture transparente du collecteur (plastique ou verre), puis par un écoulement qui court la longueur d'une cheminée formée par le collecteur et la cheminée. Le collecteur solaire est constitué d'une couverture transparente et d'un trou dans le sol. Une cheminée verticale avec une ouverture de base est située au centre du collecteur, où l'air du collecteur sera recerclé. La connexion entre la couverture transparente et la base de la cheminée est hermétique. Son principe de fonctionnement est basé sur le fait que l'air chaud est plus léger que l'air froid, donc son élévation. L'air chaud est produit par un effet serre dans le collecteur, qui peut s'étendre horizontalement sur plusieurs dizaines des

mètres sur la surface du sol. La hauteur du collecteur sous le toit peut être augmentée dans le sens de la trajectoire pour maintenir l'air en mouvement verticalement avec peu de perte due au frottement, ou elle peut être diminuée pour réduire la section de passage du fluide. Par conséquent, le bilan massique demeure constant. En augmentant la vitesse du fluide à l'entrée du tunnel, la cheminée convertit la chaleur recueillie en énergie électrique (courant de convection) et en énergie potentielle (chute de pression dans la turbine). En conséquence, la différence de densité de l'air causée par une augmentation de la température dans le collecteur agit comme une force énergisante. Le mouvement de l'air permet aux turbines situées près de l'embouchure d'une ligne de transport de produire d'électricité à l'aide des génératrices qui leur sont connectées. Parce que le soleil a la capacité d'absorber et de libérer de la chaleur tout au long de la journée en fonction de la différence de température entre le soleil et l'air, ainsi que les coefficients d'échange thermique, la centrale à cheminée peut fonctionner pendant des longues périodes de temps [2].

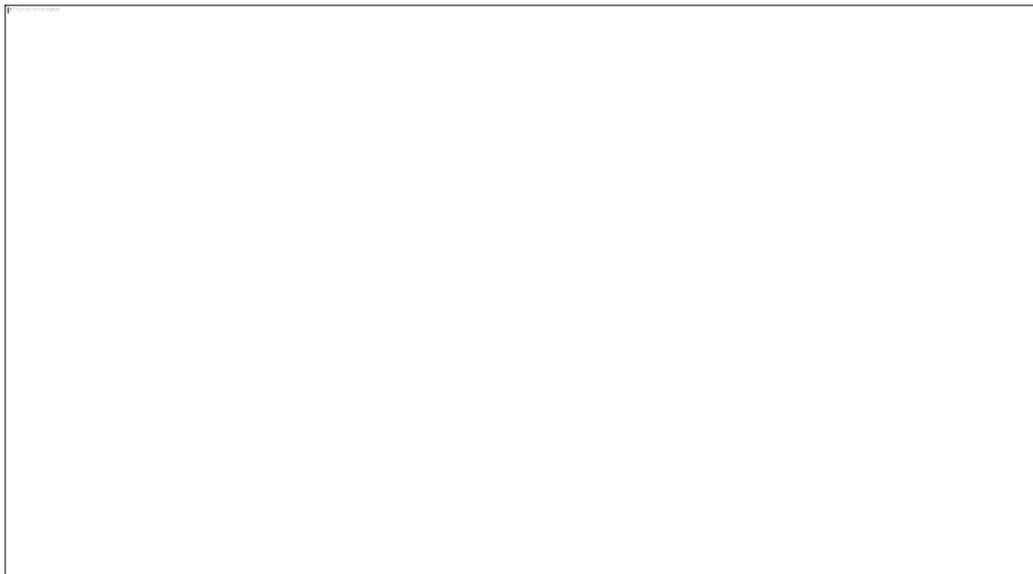


Figure (II.12) : Cheminée solaire [17].

II.9. Différentes technologies de la cheminée solaire

II.9.1. Cheminée

- Classique (A).
- Supportée par le relief (B).
- Intégrée en falaise, creusée (C1) ou appuyée (C2).

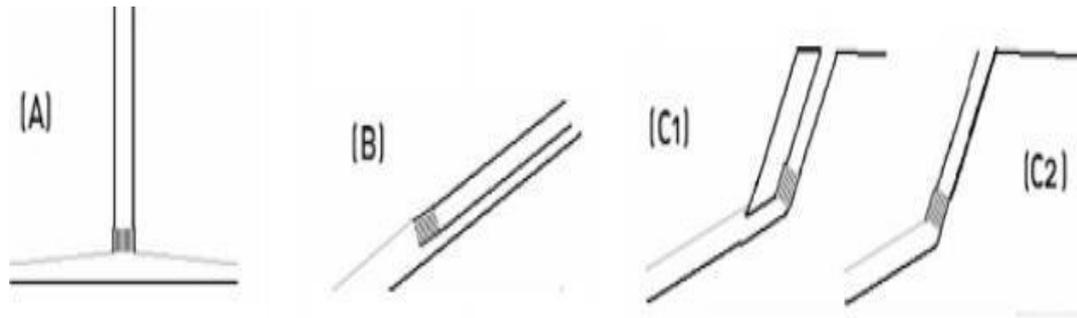


Figure (I.7) : Les différentes technologies de la cheminée [18].

Le tableau ci-dessus résume les différentes technologies pour la cheminée :

Tableau (II.2) : Technologies pour la cheminée [3].

	Avantages	Inconvénients
Cheminée classique	-Réalisable partout	-Impact visuel sur l'environnement -Contraintes de la structure
Cheminée appuyée	-Soutenue par la falaise	-Dégradation paysagère -Sites d'accueil limités
Cheminée creusée	-Soutenue par la falaise -Pas d'impact visuel	-Sites d'accueil limités
Conduit sur relief	-Simplicité de mise en œuvre	-Impact visuel sur l'environnement -Sites d'accueil limités

II.9.2. Collecteur

Il existe actuellement deux types de technologie :

1- Les collecteurs "durs" sont faits des plaques de plastique qui sont maintenues en place par une structure métallique ;

2- Collecteurs gonflables : Un Plastique souple qui peut être gonflé dans l'air ;

Le tableau ci-dessus résume les différentes technologies pour le collecteur :

Tableau (II.3) : Technologies pour le collecteur [18].

	Avantages	Inconvénients
Collecteurs en dur	Résistance	Démontage difficile
Collecteurs souples	Stockage intégré « Posée » sur le sol	Faible résistance aux effets extérieurs

II.9.3. Type de turbine

- Turbine unique à axe vertical.
- Turbines multiples à axe vertical.
- Turbines multiples à axe horizontal.
- Turbine à rotor unique.
- Turbine contre rotative.
- Turbine avec stator.
- Turbine sans stator [19].

II.10. Stockage d'énergie

La cheminée solaire fonctionne en présence du rayonnement solaire, ce qui signifie qu'il peut être utilisé tout au long de la journée. Le manque de rayonnement dans la nuit fera arrêter la cheminée, c'est pour cela nous utilisons le rayonnement du jour pour maintenir la cheminée en marche toute la nuit en utilisant la méthode de stockage d'énergie [14].

II.10.1. Différents types de méthodes de stockage

Il existe plusieurs méthodes pour stocker l'énergie pendant la nuit, et les suivantes sont celles qui sont actuellement utilisées :

II.10.1.a) Utilisation du sable comme source de chaleur

Le sable chauffe et absorbe la chaleur du soleil, le flux d'air chaud transmis à la cheminée assure la production d'électricité en faisant tourner la turbine à l'intérieur de la tour [19].

Le sable est chauffé par le soleil pendant la journée et de l'énergie est stockée, puis la chaleur est libérée pendant la nuit et continue à faire fonctionner la turbine. Le tour de force de cette installation est qu'une porte à air a été ajoutée afin d'intégrer l'énergie éolienne dans le réseau électrique, ce qui permet au système de fonctionner en hiver même quand il y a un minimum de soleil. De cette façon, le système peut fonctionner 24 heures, 365 jours d'une année [8].

II.10.1.b) Par chauffage de galets

Nous pouvons installer des galets avec une grande capacité de stockage de chaleur sous le toit pour maximiser l'efficacité de cette sortie nocturne.

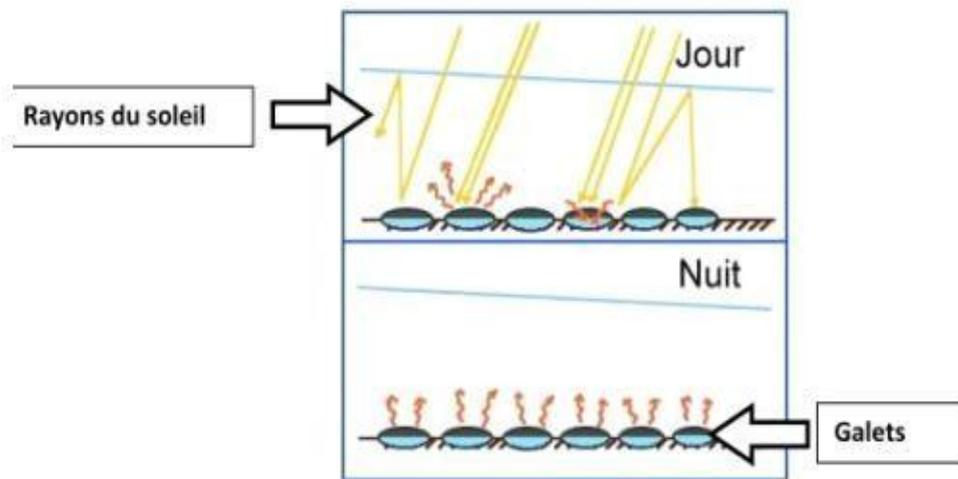


Figure (II.13) : Principe du stockage de chaleur le jour sous la serre utilisant des galets [8].

Parce que ces galets sont constamment exposés aux rayons du soleil tout au long de la journée, ils absorbent la chaleur et la renvoient au corps la nuit [8].

II.10.1.c) Par chauffage de l'eau

Ainsi, les collecteurs produisent de l'air chaud à travers la cheminée, des réservoirs noirs sont placés sous la cheminée pour fournir de l'électricité toute la nuit, comme le montre la figure (II.14).

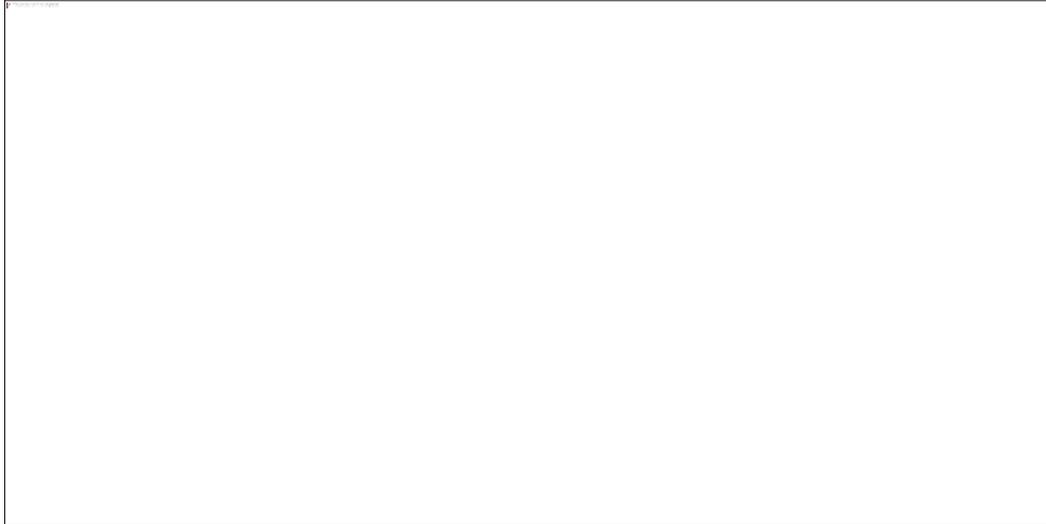


Figure (II.14) : Principe du stockage de la chaleur dans le collecteur par des tubes remplis d'eau [20].

La chaleur est stockée dans les poches d'eau pendant la journée et libérée dans l'air la nuit. Ces tubes ne sont remplis qu'une seule fois, et il n'y a pas besoin de plus d'eau parce que les tubes sont hermétiquement fermés après le remplissage. Le volume d'eau dans les tubes est calculé pour correspondre à une hauteur d'eau de 5 à 20 cm, en fonction de la puissance de production nocturne souhaitée, avec l'énergie stockée pour la nuit réduisant la production de jour. Un ajustement de la production peut être effectué pendant les heures de pointe, lorsque l'électricité est 3 à 10 fois plus chère que pendant les heures creuses, améliorant ainsi la rentabilité [7].

II.11. Points forts et points faibles de la cheminée solaire

Le tableau ci-dessus représente les points forts et faibles de la cheminée solaire [18].

Tableau (II.4) : Points forts et les points faibles de la cheminée solaire.

Points forts	Points faibles
<ul style="list-style-type: none"> • Les centrales à cheminée solaire utilisent le rayonnement solaire pour produire de l'électricité. • Sous l'influence d'un collecteur solaire, la terre agit comme un système naturel de stockage d'énergie. Cela indique qu'elle continue à générer de l'énergie tout au long de la nuit. • Les centrales solaires à cheminée n'ont pas besoin d'eau de refroidissement. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les cheminées solaires nécessitent une surface d'installation importante pour produire une puissance acceptable. • La production n'est pas constante pendant la journée et pendant l'année, donc on parle d'une production moyenne. • construction de la cheminée demande des quantités énormes de matériels.

II.12. Conclusion

La technologie de la cheminée solaire permet l'utilisation de l'énergie solaire. Les investissements initiaux sont importants, mais prévus, et permettent la production d'électricité propre et renouvelable. Les visites solaires sont extrêmement importantes pour l'avenir parce que nos ressources sont limitées. Pour bien fonctionner, un cheminée solaire doit être construit dans une zone bien éclairée et comportant un grand nombre des zones occupées. La cheminée solaire est un générateur d'énergie naturelle qui utilise le rayonnement solaire pour augmenter l'énergie interne de l'air qui circule dans le système, permettant de convertir le gain du capteur solaire en écoulement cinétique qui peut ensuite être converti en électricité à l'aide de la turbine appropriée.

Dans ce chapitre nous avons donné une brève description sur la production d'électricité à partir d'une cheminée solaire, nos études étant centrées sur l'utilisation de énergie solaire thermique

et le principe de fonctionnement d'une centrale solaire à cheminée et nous avons également présenté les projets nationaux.

Références bibliographiques

- [1] Bahache Hadjer, « simulation numérique de la convection naturelle dans une cheminée solaire », mémoire master 2 en physique option énergie solaire, université Mohamed Boudiaf - M'sila, faculté des sciences, 2016/2017.
- [2] Lahcene Abdelkader, « investigation numérique et expérimentale du phénomène de transfert thermique dans une cheminée solaire », thèse doctorat en sciences, université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, faculté de technologie - département de génie mécanique, 2020/2021.
- [3] W. Haaf, K. Friedrich, al. solar chimneys: part i: principle and construction of the pilot plant in manzanares, International Journal of Solar Energy, 2, No. 1, p: 3–20, (1984).
- [4] Belkache Idir, « Simulation et optimisation des échangeurs thermiques dans une tour solaire », mémoire master 2 en énergétique option énergies renouvelables, université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, faculté de génie de la construction, 2017/2018.
- [5] Kabouche Azouz, mémoire magistère, « architecture et efficacité énergétique des panneaux solaires cas d'étude : simulation sous trnsys16.1 d'un appartement d'une tour multifonctionnelle à Constantine », mémoire magistère en architecture bioclimatique université Mentouri, faculté des sciences de la terre, de géographie et l'aménagement du territoire, 2011/2012.
- [6] <https://fr.convection.thermique.org>, consulter 01 Avril 2022.
- [7] Ulian Ricard, B. Lasmarrigues, Lelaidier Mathias, « cheminée tour solaire », université de pau et des pays de l'Adour, 2010/2011.
- [8] Oukil Abdelhakim, Temtam Fouazi, « production de l'électricité à partir cheminée solaire », mémoire master 2 en génie mécanique, option mécanique énergétique, université Bouira, département de génie mécanique, 2015/2016.
- [9] H. Günther, « in hundert jahren-die künftige energy versorgung der welt (in hundred years - future energy supply of the world) » kosmos, franckh'sche verlags handlung, Stuttgart, 1931.
- [10] Cheloufi Djassem, « Réalisation et expérimentation d'une cheminée solaire », mémoire master 2 en génie mécanique option énergétique, université Kasdi Merbah Ouargla, faculté des sciences et de la technologie et sciences de la matière, 2013/2014.
- [11] Ramanat sandratana, Barison James « production d'électricité par une cheminée solaire » mémoire du diplôme d'études approfondies de physique option énergétique université D'Antananarivo 2012.

[12] Bouanani Mohammed, Djelaili Abdelbaki, « performance en été de la cheminée solaire sur toit incliné par la ventilation naturelle », mémoire de master 2 en génie mécanique, option génie thermique et énergies renouvelables, université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, faculté de technologie 2011/2012.

[13] Pablo González, Guillermo Gómez, Ole Geisen : « les tours solaire, deux approches pour utiliser l'énergie du soleil », ENSTA Paris Tech, 5 .1.2011.

[14] Jörg Schlich, « The solarchimney: electricity from the sun », édition Axel Menges, novembre 2004.

[15] <http://pratclif.com>, consulter 02 Avril 2022.

[16] Padki Sherif, A, Solarchimney for medium-to large scale power generation, Proceedings of the Manila International Symposium on the Développement and Management of Energy Resources, Manila, (1989).

[17] Abdellah-El-Hadj Amine, modélisation de l'écoulement dans une cheminée solaire, mémoire, école nationale polytechnique, 2007/2008.

[18] Mazari Abderrahmane, « simulation numérique de l'effet du gradient de température sur l'écoulement d'air dans une cheminée solaire », mémoire de master 2 en physique option physique énergétique et énergies renouvelables, université Mohamed Boudiaf - M'sila, faculté des sciences, 2017/2018.

[19] <http://www.tour-solaire.fr>, consulter 05 Avril 2022.

[20] Afrique Expansion (revue internationale des affaires et des partenariats nord - sud) l'énergie solaire concentrée la chance énergétique des pays du sud, septembre 2010.

Chapitre III Configuration
d'une tour solaire
(à concentration)

III. Introduction

Des nombreux pays peuvent bénéficier de l'utilisation des énergies renouvelables pour atteindre leurs objectifs en matière de sécurité énergétique, fiable et abordable, ainsi que pour améliorer l'accès à l'électricité et promouvoir le développement. L'utilisation des systèmes de concentration solaire dans le développement des centrales thermo-solaires est l'une des meilleures méthodes pour convertir ces énergies en courant électrique. Les centrales solaires sont des technologies de pointe, bien développées et prometteuses qui offrent des importants avantages énergétiques et environnementaux [1].

Les technologies de concentrateur solaire sont l'une des sources des énergies renouvelables qui peuvent aider à résoudre les problèmes actuels et futurs d'électricité en utilisant la chaleur solaire, qui est illimitée et disponible sur une base quotidienne. En outre, il est capable de stocker l'énergie solaire tout au long de la journée pour une utilisation ultérieure la nuit, ce qui en fait l'une des technologies des énergies renouvelables les plus rentables et compétitives [2].

Dans ce chapitre, nous examinerons les systèmes solaires concentrés qui visent à transformer l'énergie solaire en chaleur à haute température, puis en énergie mécanique et enfin en électricité via un cycle thermodynamique. Ce chapitre contient des descriptions générales et un résumé des technologies du CSC. Nous avons discuté comment utiliser la chaleur du soleil pour générer de la vapeur qui est utilisée pour alimenter les générateurs conventionnels, ainsi qu'un bref aperçu sur le système à tour solaire et leur configuration.

III.1. La technologie CSC

Ils utilisent donc la chaleur du soleil, qui n'a pas des contraintes et est une source constante d'énergie, les technologies des concentrateurs solaires sont l'une des technologies qui peuvent aider à résoudre les problèmes actuels et futurs d'électricité. En outre, il peut stocker de l'énergie solaire toute la journée pour une utilisation nocturne, ce qui en fait l'une des technologies des énergies renouvelables les plus rentables par rapport aux centrales à combustibles fossiles.

Les technologies CSC n'utilisent que la lumière directe du soleil qui a été concentrée de nombreuses fois pour obtenir des densités des énergies plus élevées dans le domaine des systèmes de concentration thermique solaire et donc des températures plus élevées lorsque l'énergie solaire est absorbée par la surface du matériau. La chaleur est ensuite utilisée pour

alimenter un cycle de puissance traditionnel, comme une turbine à vapeur ou un moteur Stirling qui entraîne une génératrice.

Un collecteur solaire, un récepteur solaire et un système de conversion d'énergie sont les trois principaux sous-systèmes. Les centrales solaires thermodynamiques à concentration (CSC) utilisent divers miroirs pour concentrer la lumière solaire sur un récepteur et la convertir en chaleur. La chaleur peut alors être utilisée pour produire de la vapeur et entraîner une turbine pour produire de l'électricité, ou elle peut être utilisée comme chaleur industrielle.

Les systèmes CSC peuvent également intégrer des systèmes de stockage d'énergie thermique pour produire de l'électricité pendant les périodes nuageuses ou même plusieurs heures après le coucher du soleil.

Pour l'instant, il existe des systèmes CSC qui peuvent être classés par la façon dont ils focalisent les rayons du soleil et la technologie utilisée pour recevoir l'énergie solaire, c'est-à-dire le collecteur et le récepteur. Ces systèmes CSC sont classés comme concentrateurs de ligne, collecteurs cylindro-paraboliques et collecteurs linéaires de Fresnel ou en tant que concentrateurs ponctuels, récepteurs paraboliques et récepteurs à tour [2].

III.2. Système de poursuite solaire pour les CSC

Les centrales thermodynamiques solaires, qui couvrent des milliers des mètres carrés, ont un grand nombre des miroirs visant à concentrer l'énergie rayonnante dans un fluide caloporteur. Ce fluide sera ensuite chauffé à une température élevée.

L'énergie thermique transmise par le fluide est ensuite convertie en :

- production d'électricité, en fonction du mode de concentration du rayonnement solaire ;
- Production de vapeur pour les procédés industriels ;
- Apport solaire pour les installations qui utilisent la biomasse ou les combustibles fossiles pour la combustion ;

Ce système de surveillance génère deux types de concentration :

Concentration linéaire : Cette technologie utilise des longs tubes comme récepteurs le long d'une ligne focale pour transformer l'énergie rayonnante en énergie thermique portée par un caloporteur. Les capteurs cylindro-paraboliques et Fresnel fonctionnent sur ce principe, et ce sont les seules capteurs qui suivent le soleil sur un seul axe.

Concentration ponctuelle (par foyer) : Loin des tubes cette concentration s'effectue sur un récepteur central. Cette technologie nécessite une surveillance sur deux axes : l'azimut et l'élévation et les capteurs paraboliques et les centrales à tour qui utilisent ce principe [3].

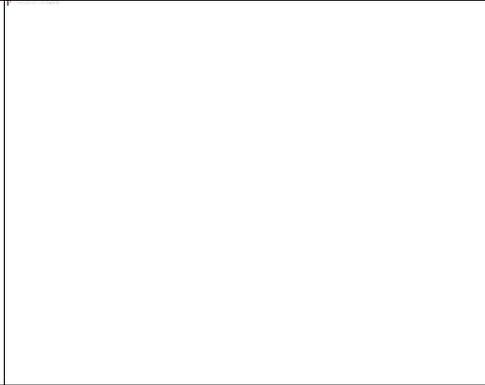
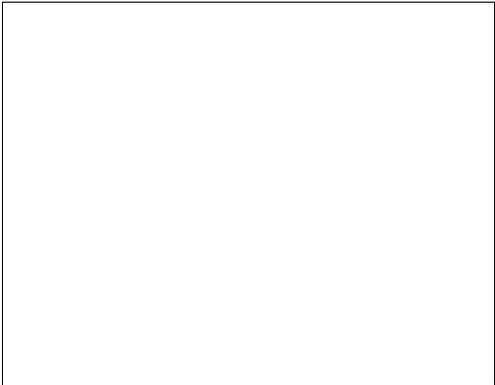
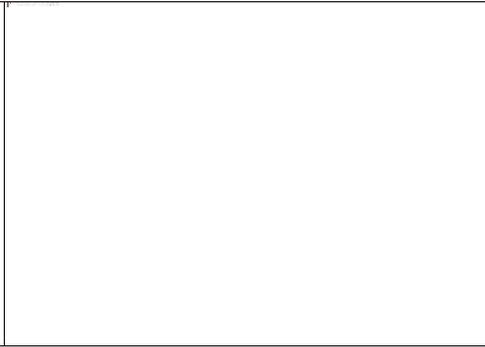
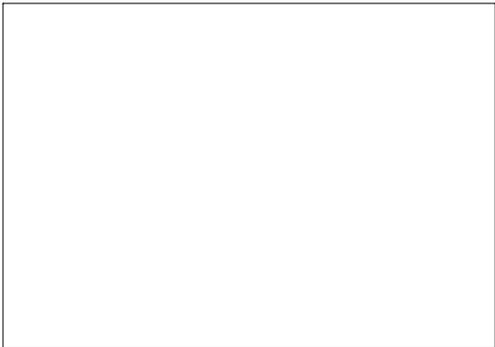
	Concentrateur linéaire	Concentration ponctuel
Récepteur fixe		
	Miroir de Fresnel	Tour solaire
Récepteur mobile		
	Cylindro parabolique	Parabolique (Stirling)

Figure (III.1) : Les centrales à concentration [4].

III.2.1. Centrale cylindro-parabolique

La technologie de ces capteurs est actuellement la plus éprouvée de toutes les approches de concentration solaire. Depuis les années 1980, il a été testé et commercialisé dans un certain nombre de pays [5].

III.2.1.a) Principe de fonctionnement

Cette forme centrale est composée des longs miroirs hémicylindriques qui sont alignés en parallèle et qui tournent autour d'un seul axe horizontal.

Au cœur de cette configuration se trouve un tube de verre horizontal avec un tuyau métallique qui fait circuler un fluide caloporteur (huile synthétique).

Ce fluide est chauffé à environ 400 degrés Celsius. Cette énergie est transférée dans un circuit d'eau, qui produit de la vapeur qui actionne une turbine qui en retour actionne un générateur pour produire de l'électricité [5].

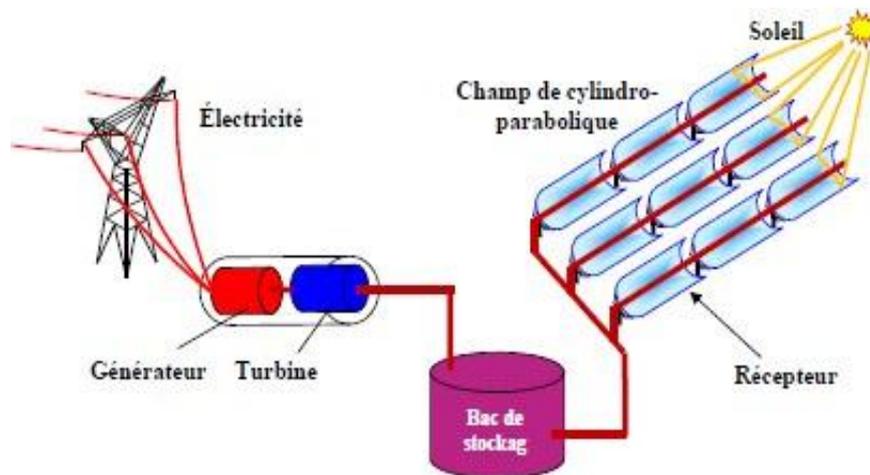


Figure (III.2) : Schéma d'une installation de centrale solaire cylindro-parabolique [2].

III.2.2. Centrale à miroir de Fresnel

Ce sont des capteurs à récepteurs linéaires qui ne diffèrent pas des collecteurs cylindro-paraboliques. Ils réfléchissent le rayonnement solaire afin de le concentrer dans un récepteur [6].

III.2.2.a) Principe de fonctionnement

Ces collecteurs sont construits des différentes façons. Il s'agit d'une série des longs miroirs parfaitement alignés qui pivotent indépendamment les uns des autres alors que le soleil se déplace dans le ciel. Le rayonnement capté est concentré sur un seul tube ou un groupe des tubes à linéaires fixes. En conséquence, le fluide caloporteur est chauffé à environ 500 degrés Celsius et utilisé dans un circuit d'eau pour produire de la vapeur, qui entraîne une turbine et finalement un générateur [6].

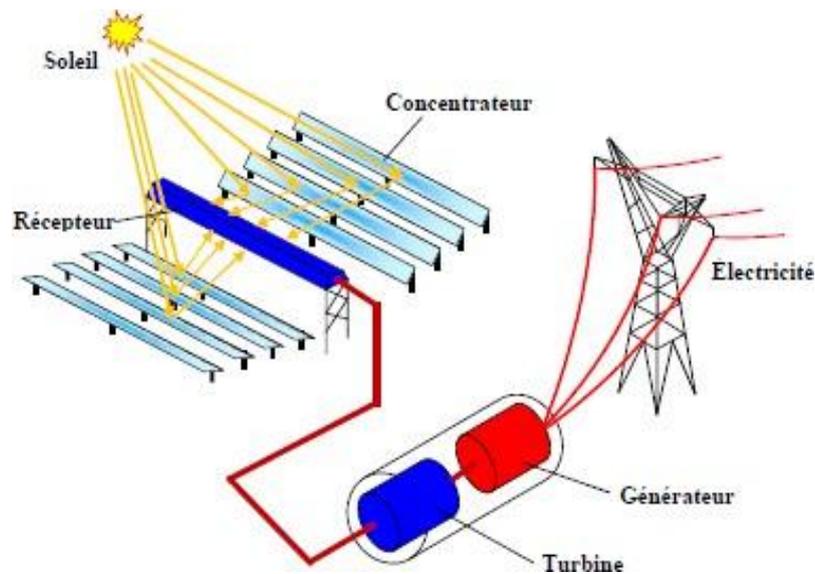


Figure (III.3) : Schéma de principe du système réflecteur linéaire de Fresnel [2].

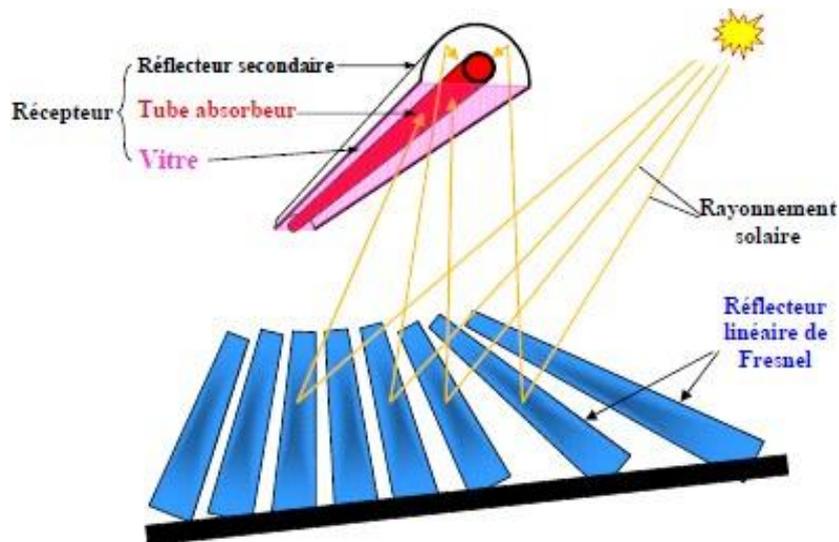


Figure (III.4) : Présentation schématique d'un récepteur à réflecteur linéaire de Fresnel [2].

III.2.3. Centrale parabole-Stirling

Le système parabole-Stirling est l'une des plus anciennes technologies solaires. En comparaison avec d'autres technologies CSC, un système parabolique-Stirling produit des quantités relativement faibles d'électricité, généralement entre 3 et 25 kW [7].

Une centrale parabolique Stirling est composée d'un concentrateur parabolique, d'un récepteur solaire et d'un moteur Stirling. La taille relative de la parabole pour un moteur électrique de 20

kW est d'environ 100 m^2 . Dans le cas de la parabole-Stirling, aucune solution de stockage n'est actuellement disponible [8].

Les capteurs paraboliques suivent le soleil sur deux axes afin de concentrer le rayonnement solaire à l'entrée de la parabole réfléchissante. Le capteur parabole-Stirling a atteint un rapport de concentration typique peut théoriquement être produit à des températures de 1500°C et plus, grâce à son système de suivi (toujours face au soleil). En comparaison avec d'autres technologies CSC, les capteurs paraboliques ont montré des rendements solaires-électriques plus élevés (jusqu'à 30%) [9-10].

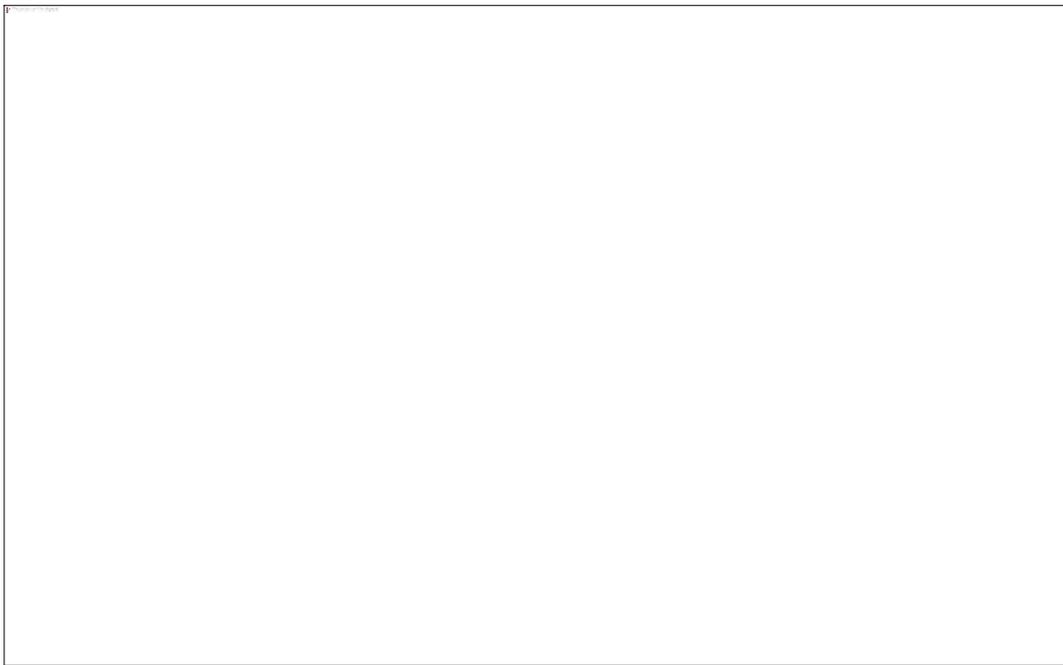


Figure (III.5) : Schéma de principe du système récepteur parabolique [2].

Le système parabolique-Stirling est composé des trois composants principaux, comme le montre la figure (III.6) : un système de suivi solaire, un miroir parabolique et un moteur Stirling.

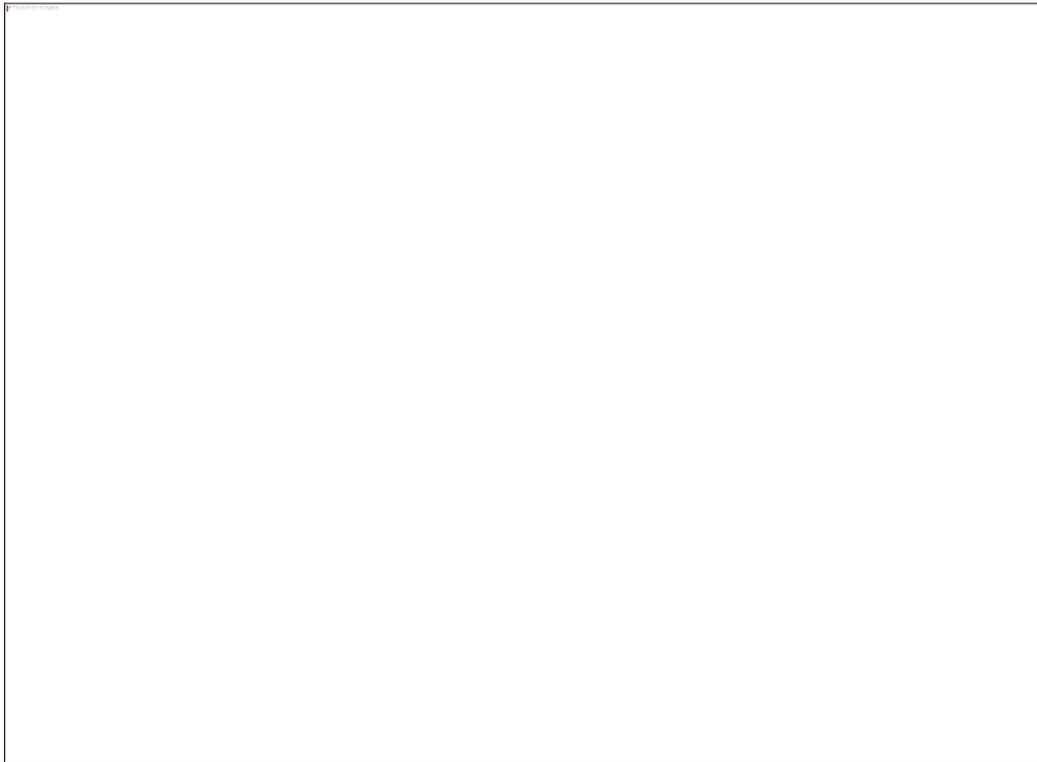


Figure (III.6) : Description de système parabole-Stirling [2].

III.2.3.a) Principe de fonctionnement

Le système Parabole-Stirling utilise le principe de la concentration des rayonnements solaires par miroir réfléchissant. Le miroir parabolique concentre les rayonnements solaires sur le récepteur solaire du moteur Stirling placé sur le point focal. Le gaz du moteur est ainsi chauffé et entraîne le fonctionnement du moteur selon le cycle de Carnot. L'énergie mécanique est alors transformée en énergie électrique par le biais du générateur électrique [11].

III.2.4. Tour solaire

Un héliostat est un dispositif qui utilise une série des pointeurs solaires à double axe pour diriger la lumière du soleil vers un grand absorbeur dans un circuit. Actuellement, la seule application pour un héliostat est la production d'énergie dans un système appelé "centrale à tour". Une centrale à tour peut avoir une collection des grands miroirs qui suivent le mouvement du soleil. Les rayons du soleil sont focalisés par les miroirs sur le récepteur en haut du grand tour. Un ordinateur maintient les miroirs alignés de sorte que les rayons réfléchis du soleil visent toujours le récepteur, qui peut atteindre des températures de plus de 1000 degrés Celsius. Pour la production d'électricité, on utilise de la vapeur à haute pression [12].



Figure (III.7) : Central à tour [13].

III.2.5. Description d'une centrale de tour solaire à concentration

La technologie la plus récente décrite est la tour solaire, qui sera expliquée en détail dans ce travail. Un central à tour est composé de quatre éléments essentiels : Un champ héliostatique (qui recueille et concentre le rayonnement solaire), un tour, un récepteur solaire et un bloc de conversion thermoélectrique [14], comme le montre le figure (III.8). Ces centrales électriques utilisent des héliostats, qui suivent le soleil en utilisant deux axes de rotation et concentrent la lumière du soleil sur un récepteur au sommet d'une tour [15].

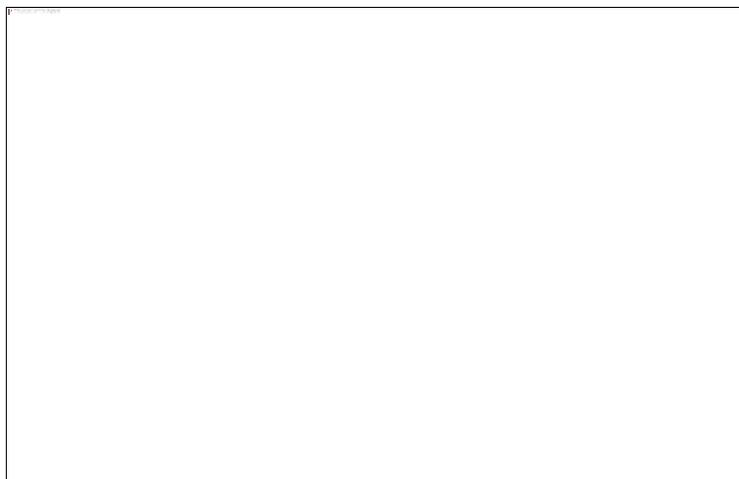


Figure (III.8) : Centrale à tour [16].

III.2.5.a) Principe de fonctionnement d'une centrale à tour solaire

Il s'agit de la technologie la plus souple à l'utilisation. Elle est divisée en deux blocs :

Bloc solaire qui comprend une succession des miroirs plans nommé héliostat en formant un champ qui est centralisé par une tour. Ces héliostats sont d'une orientation indépendante les uns des autres.

Ils poursuivent le rayonnement solaire sur deux axes, afin de capter le rayonnement solaire et le réfléchir ainsi vers un récepteur situé au sommet d'une tour dans le but de convertir l'énergie solaire en chaleur.

Bloc puissance, il utilise un système à conversion thermoélectrique Il est constitué d'un système d'eau sous forme de chaudière qui fait produire de la vapeur sèche. Cette vapeur actionne une turbine qui entraîne un générateur pour avoir à la fin de l'électricité [17].

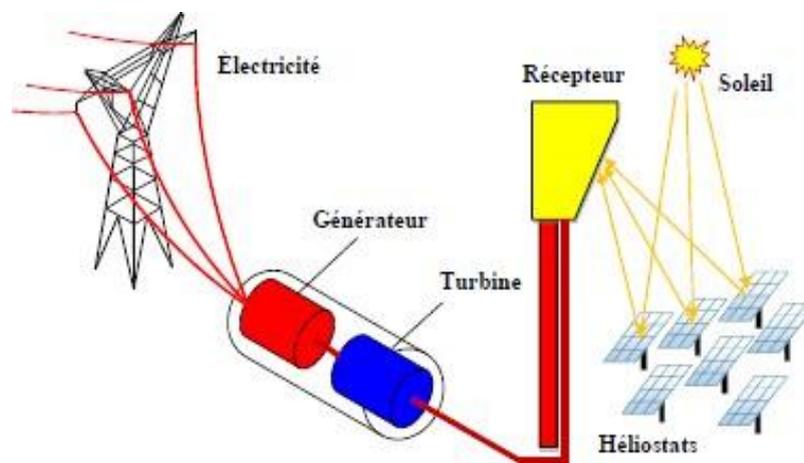


Figure (III.9) : Schéma de principe du système récepteur à tour solaire [2].

Ces deux blocs regroupent des sous-systèmes. Chaque système est lié entre eux, en insistant sur la nécessité de chaque composant. Ils sont généralement classés comme suit [18] :

- Un champ solaire est un système de collecte d'énergie constitué d'une série des héliostats qui suivent le soleil dans deux directions.
- Le récepteur : Situé en haut d'une tour, il absorbe l'énergie solaire concentrée par les héliostats. Ce récepteur prend la forme d'un caloporteur fluide qui transfère la chaleur à un bloc conventionnel.
- Échangeur de chaleur : Dans cette partie, le fluide caloporteur transfère son énergie thermique à un fluide de travail, ce qui produit de la vapeur sèche.

- Système de stockage thermique : il assure la production en cas de catastrophes naturelles ou même pendant la nuit.
- Système d'appoint : Ce système est vu dans les centrales hybrides. Lorsque l'énergie solaire est rare, son rôle est d'assurer la production. Dans ce cas, un système de stockage thermique n'est plus nécessaire.
- Bloc de puissance : C'est là que se trouve le générateur de vapeur, la turbine et l'alternateur, ainsi qu'un système de refroidissement.
- Le système de contrôle.

Le schéma ci-dessous résume les deux blocs mentionnés précédemment.

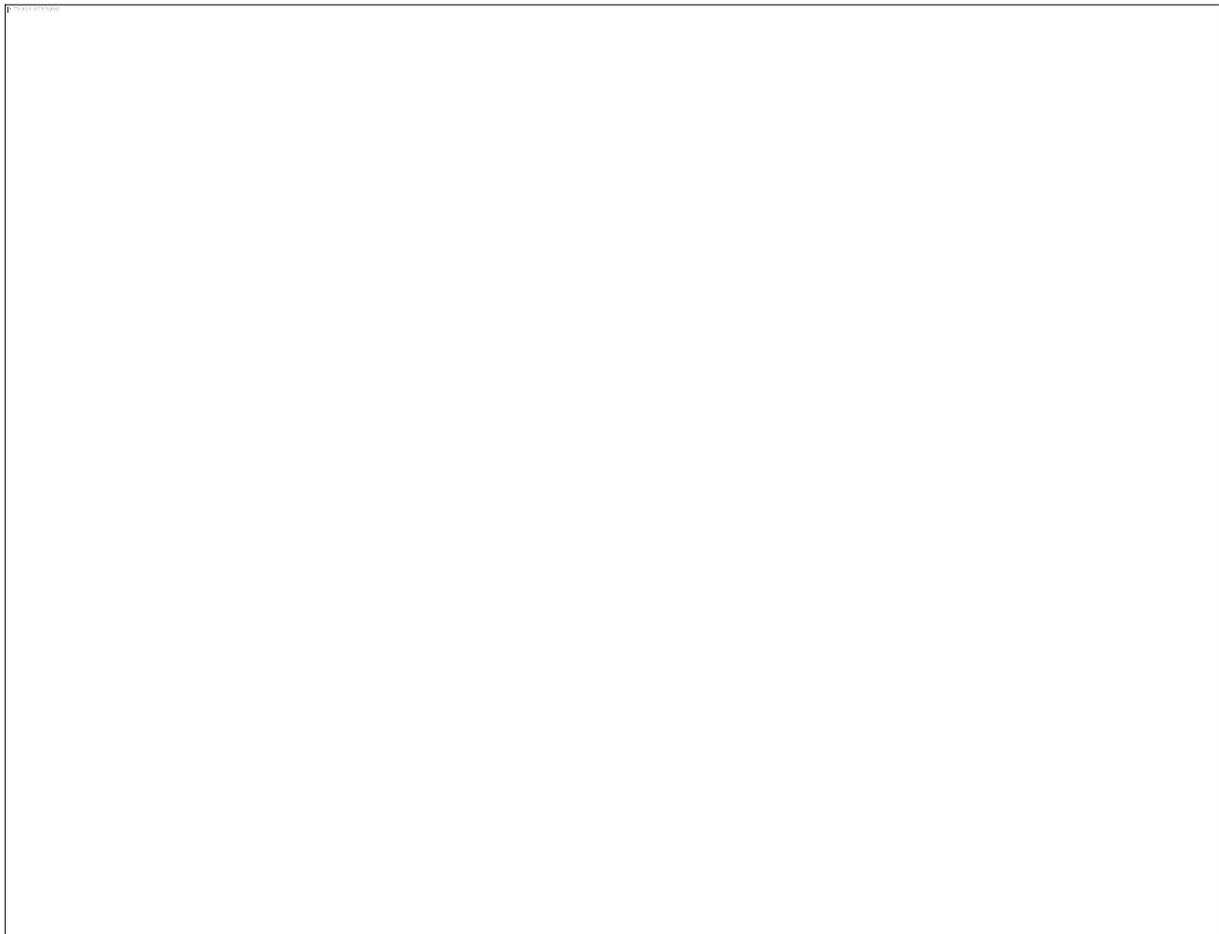


Figure (III.10) : Schéma explicatif d'une installation d'une centrale à tour [18].

III.2.5.b) Constitution d'une centrale à tour solaire

L'efficacité du récepteur solaire dépend fortement de l'efficacité solaire de champ qui à son tour est liée à la conception d'héliostat, l'emplacement du champ, les systèmes de poursuivre et de contrôle [19].

Le champ solaire est constitué d'un grand nombre des héliostats. Un simple héliostat est composé d'un ensemble des miroirs, d'un système de suivi, d'un moteur et des fondations, ainsi que d'un système de contrôle qui suit le soleil pour refléter les rayons du soleil sur un réflecteur fixe, La figure (III.11) illustre la notion fondamentale d'un héliostat.

L'efficacité du champ héliostatique est déterminée par son efficacité optique. Les principaux facteurs qui déterminent l'efficacité de l'héliostat sont l'effet cosinus, l'effet d'ombrage, l'effet de blocage, la réflectivité des miroirs, l'atténuation atmosphérique et le débordement de récepteur [20-21].

Il est bien connu que le secteur de l'héliostat est responsable de 40% de toutes les pertes énergétiques mondiales. Il est donc essentiel d'optimiser sa conception afin de réduire les coûts financiers et d'améliorer l'efficacité globale de la centrale [22].

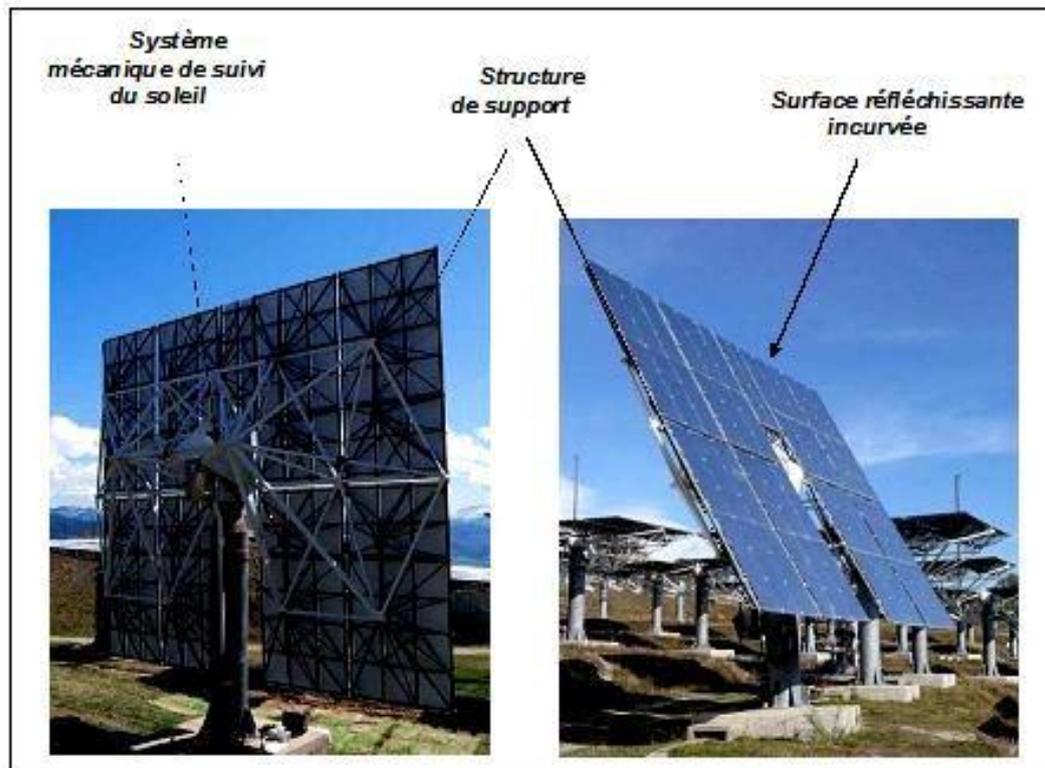
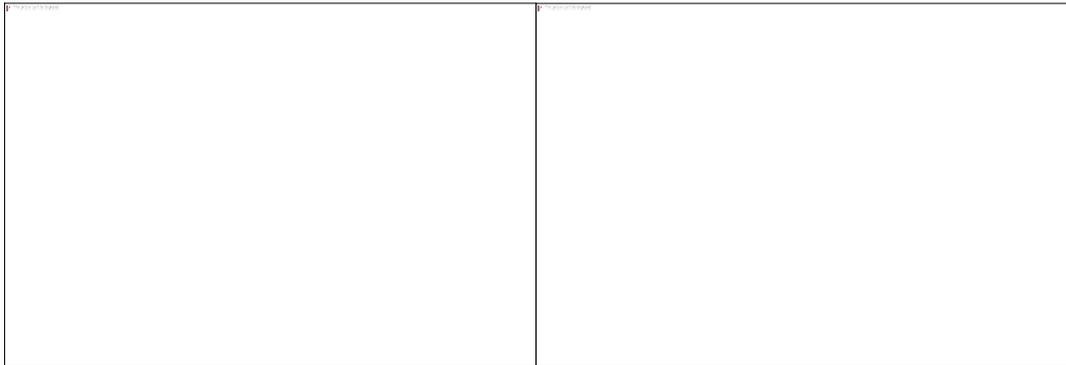


Figure (III.11) : Composants d'un héliostat [23].

III.2.5.b.i) Différentes configurations de champ d'héliostat

Pour réduire les pertes d'ombrage, de blocage et de coloration, il est nécessaire d'optimiser la configuration de la conception d'un héliostat. Il est essentiel de tenir compte de la nature du récepteur solaire, de la latitude du site, de la taille des héliostats, de la concentration et du niveau de puissance incident souhaité. Il y a deux configurations possibles pour le champ héliostatique, selon la figure (III.12) illustre un champ hémisphérique et un champ circulaire [24].



Champ hémisphérique de la centrale « PS10/PS20 »
« PS10/PS20 »

(b) Champ circulaire de la centrale«
« Gemasolar »

Figure (III.12) : Configurations de champ d'héliostats [2].

Autre configuration possible, c'est le champ d'héliostat avec une seconde réflexion en haut de tour, cela fonctionne à refléter le rayonnement solaire des miroirs moulus à un autre ensemble des miroirs appelés les miroirs secondaires au-dessus de la tour. Ces miroirs dirigent le rayonnement vers un récepteur concave à la base de la tour qui chauffe un fluide pour produire de la vapeur. Les miroirs au sol tous ont le système de poursuite de double axe. Dans de tels concentrateurs le récepteur est mis au sol [24].

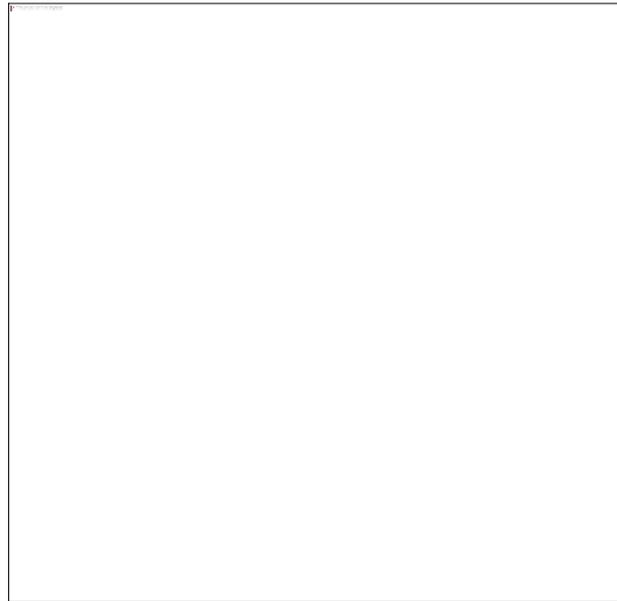


Figure (III.13) : Le concentrateur solaire avec une seconde réflexion en haut de tour dans la ville de Masdar, Abu Dhabi [2].

III.2.5.b.ii) Tour

La structure de visite, en métal ou en béton, est utilisée pour placer le récepteur à la hauteur optimale en fonction de la latitude du site et de la taille du champ solaire. La hauteur de la visite est déterminée par la taille du champ des héliostats et doit respecter deux critères clés [14] :

- Excellente résistance au vent ;
- Un ombrage minimum sur le champ des héliostats ;

Ces dernières années, l'utilisation des nouveaux modèles des héliostats multi-tours, selon la figure (III.14), a permis de réduire les pertes optiques en densifiant le champ solaire. En fait, parce que les héliostats sont plus proches du récepteur, une concentration solaire plus élevée est atteinte, selon la figure (III.14) [25].

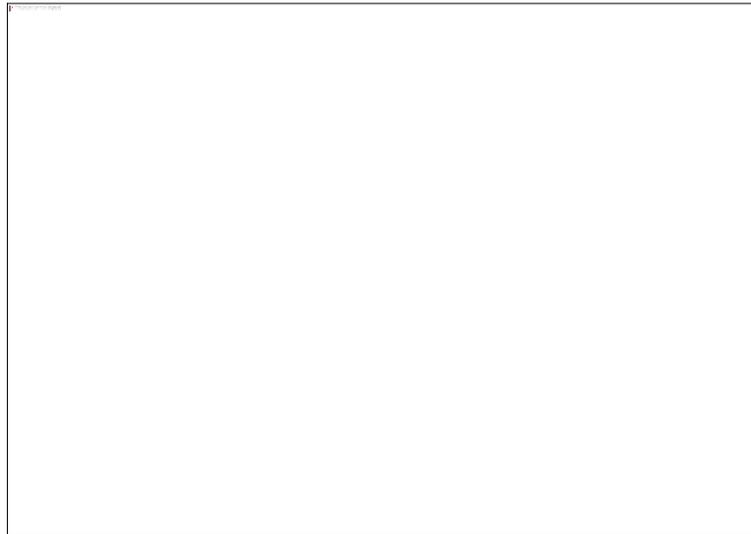
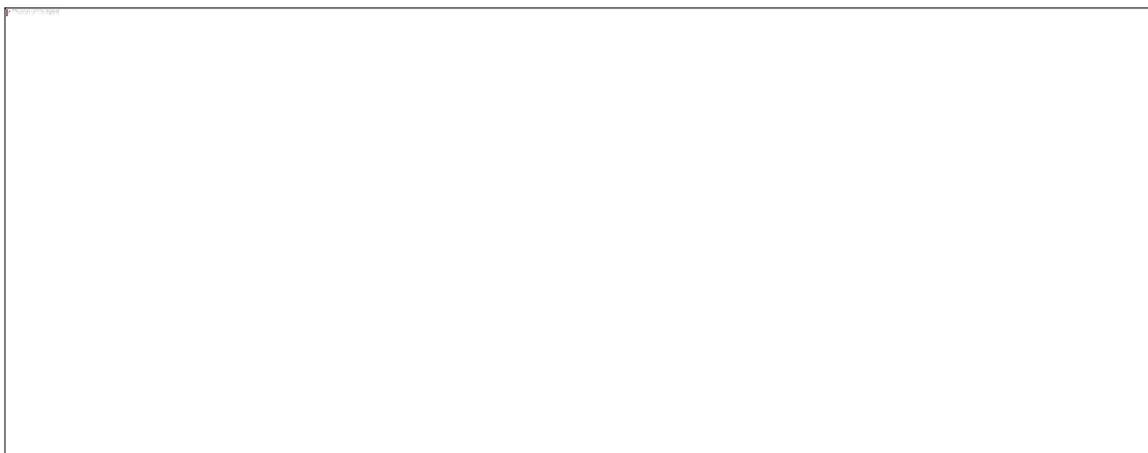


Figure (III.14) : Schéma d'un champ multi-tours [25].

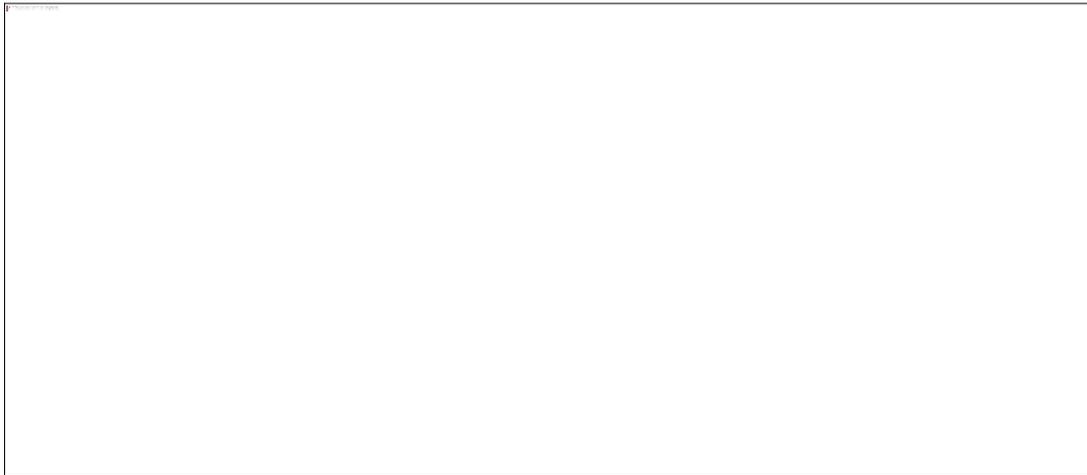
III.2.5.b.iii) Récepteur

Le récepteur solaire est un échangeur de chaleur dans une centrale solaire, où le rayonnement solaire est absorbé et converti en énergie thermique qui peut être utilisé dans les systèmes de conversion de puissance. Il existe différents critères de classification pour les récepteurs d'énergie solaire en fonction des géométries et des matériaux absorbants utilisés pour transférer de l'énergie à un fluide caloporteur [19].

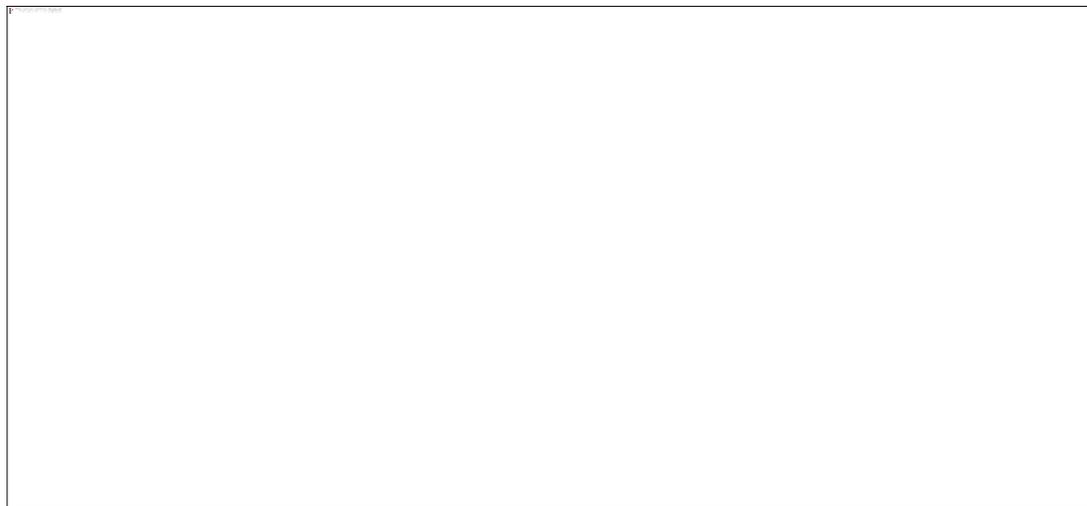
Dans ce contexte, les récepteurs sont divisés en trois groupes : Les volumétriques, les cavitaires et les récepteurs des particules, qui sont tous largement utilisés dans le système récepteur central. La figure (III.15) illustre les trois récepteurs [2].



(a) récepteur volumétrique



(b) récepteur à cavité



(c) récepteur de particule

Figure (III.15) : Les récepteurs solaires [2].

Selon le fluide caloporteur utilisé on distingue trois technologies :

III.2.5.b.iii.1) Récepteur à sels fondus

Un autre des avantages de ces visites solaires est la possibilité de combiner un système de concentration d'énergie solaire avec un système de stockage de la chaleur. Les sels fondus (principalement des nitrates de sodium et de potassium) sont un liquide de stockage rentable qui peut résister aux températures d'un cycle de Rankine [26].

Les avantages des sels fondus comprennent son faible coût et capacité à combiner une bonne transmission de la chaleur (coefficient d'échange thermique allant de $5000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ à 8000

$W/m^2.K$), une température de fonctionnement élevée, la commodité de stockage et de performance. Le principe de fonctionnement d'une telle centrale est illustré à la figure (III.16) [27].



Figure (III.16) : Principe d'une centrale à tour à caloporteur sels fondus [2].

À partir du moment où les sels sont chauffés dans le réservoir supérieur, ils sont stockés dans un réservoir inférieur. Les températures élevées dans le réacteur permettent la création de vapeur surchauffée dans le groupe vapeur, qui est ensuite stockée dans un récepteur froid où la température est maintenue au-dessus de la température de solidification des sels grâce à des résistances électriques. Selon leur composition, les sels se solidifient entre 120 et 240 degrés Celsius (60% de $NaNO_3$ et 40% de KNO_3). Malgré les problèmes de corrosion, et donc le risque d'incendie, qui ont été découverts dans la première génération de ce type de centrale, les récepteurs ont connu des nouveaux développements au cours des dernières années. Ces alliances ont permis d'éliminer les problèmes de corrosion dans la gamme de température considérée [27].

Tableau (III.1) : Principales caractéristiques des sels fondus binaires (60% de $NaNO_3$ et 40% de KNO_3) [27].

Température minimale conseillée	260°C
Température maximale conseillée	560°C
Densité moyenne	1870kg/m ³
Capacité calorifique	1600Kj/Kg. K
Conductivité thermique moyenne	0.52W/m. K
Capacité calorifique volumique	250KWh _{th} /m ³
Coût	0.50US\$/Kg
	3.7US\$/KWh _{th}

Les problèmes majeurs de la technologie sels fondus, sont les effets de corrosion et de solidification des sels, ce qui implique un coût financier plus élevé. Les réductions des coûts pourraient être obtenues par l'utilisation d'une installation à grande capacité de production (50 MWe) et des héliostats à grande échelle [28].

III.2.5.b.iii.2) Récepteur eau-vapeur

Contrairement à la croyance populaire, le fluide caloporteur eau vapeur peut être utilisé directement dans le cycle thermodynamique de la turbine, selon la figure (III.17) (cycle de Rankine). Cela élimine la nécessité d'une deuxième phase d'échange thermique, réduisant les coûts d'investissement tout en augmentant quelque peu la rentabilité globale. En comparaison avec des autres technologies (capteurs de ligne Fresnel et capteurs cylindro-paraboliques), c'est maintenant la méthode préférée. Le principal avantage de cette technologie est qu'elle a d'excellente caractéristique de transfert de chaleur de l'eau vaporisée saturée, lui permettant de fonctionner à des concentrations solaires élevées. Cependant, en raison des différences des emplacements de transfert thermique entre les phases liquides et vapeurs, le mode de transition de la centrale peut entraîner une augmentation de la température au récepteur. Ces gradients thermiques élevés produisent des contraintes thermomécaniques élevées, entraînant des déformations, des fumées dans les parois du tube. De plus, il est préférable de maintenir la chaleur au niveau du récepteur ce qui entraîne une vapeur saturée, mais pas surchauffée. En fait, le coefficient d'échange thermique de la vapeur chauffée, ou vapeur sèche, est assez faible. Malgré le fait que ce choix entraîne des températures plus basses et donc des rendements de

conversion thermodynamique plus faibles, il a l'avantage majeur de prolonger la vie du récepteur. Dans cette veine, Abengoa a choisi de construire les premières centrales à vapeur de caloporteur à Séville, en Espagne : PS10 (11 MWe) et PS20 (21 MWe) (20 MWe). La centrale électrique PS10, en service depuis 2006, a permis aux chercheurs de confirmer les bonnes performances de la technologie tout en réduisant ses coûts de fabrication (3500 €/kWe). Les températures sont abaissées pour assurer une bonne transmission thermique à l'eau à tous les endroits du récepteur. Un tampon de stockage permet à la centrale de fonctionner à pleine capacité pendant 30 minutes, assurant un fonctionnement correct tout au long d'une transition nuageuse [27].

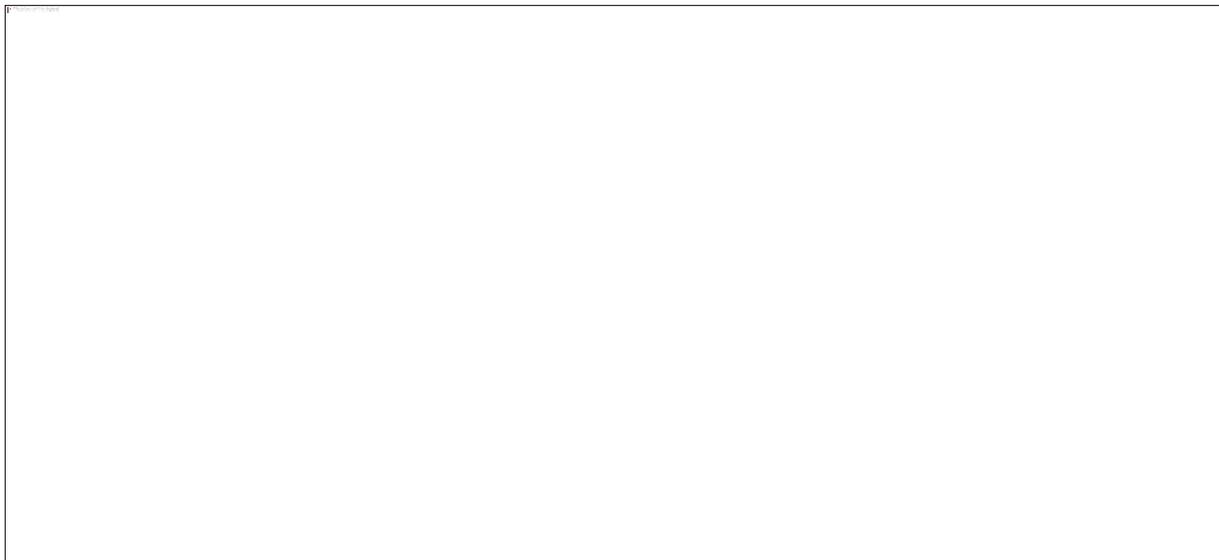


Figure (III.17) : Principe d'une centrale à tour à caloporteur eau-vapeur [2].

III.2.5.b.iii.3) Récepteur à air (Air à pression atmosphérique)

Le principal avantage de l'air est qu'il n'a pas des restrictions de température. En outre, il est non toxique et bien sûr complètement libre. Cependant, en raison de sa faible densité et de sa conductivité thermique, c'est un fluide de transfert très pauvre. Par conséquent, la recherche s'est concentrée sur la mise au point des absorbeurs volumétriques qui aspirent et réchauffent l'air à des températures de 700°C ou 800°C, selon le type d'absorbant. En l'absence de collecteur solaire, l'air chauffé est stocké dans un régénérateur ou transféré dans un cycle de vapeur pour alimenter le groupe de création figure (III.18).

Le stockage utilise un régénérateur qui contient des céramiques poreuses chauffées par l'air qui sort du récepteur. Lors de l'étape de déstockage, l'air est simplement pompé après avoir traversé le générateur de vapeur pour récupérer la chaleur de la céramique [27].



Figure (III.18) : Principe d'une centrale à tour à caloporteur air atmosphérique [2].

III.2.5.b.iv) Bloc de puissance

La combinaison d'une turbine à vapeur et d'un alternateur permet une conversion thermoélectrique de l'énergie solaire. Cette transition s'effectue de manière traditionnelle. Le fluide caloporteur chauffé traverse une série des échangeurs et transfère son énergie à l'eau pour produire de la vapeur. La vapeur se rend vers la turbine, qui la dilate, et la turbine entraîne un alternateur, qui convertit l'énergie mécanique en électricité [17].

III.2.5.b.iv.1) Turbines à vapeur

La turbine vapeur est un moteur thermique à combustion externe qui fonctionne sur le cycle thermodynamique Rankine. Ce cycle se distingue par une transition d'état qui affecte le fluide moteur, qui est souvent de la vapeur d'eau. Par conséquent, le principe est le même que pour un vaporisateur à piston.

L'énergie du fluide qui est définie par sa vitesse et son enthalpie, est partiellement convertie en énergie mécanique et utilisée pour faire fonctionner un alternateur, une pompe ou tout autre réceptacle mécanique rotatif. La turbine est divisée en deux sections : une section haute pression et une section basse pression, avec un échangeur de chaleur entre les deux. La vapeur extraite du plancher haute pression de la turbine est envoyée aux préchauffeurs à condensation, selon la figure (III.19) [29].

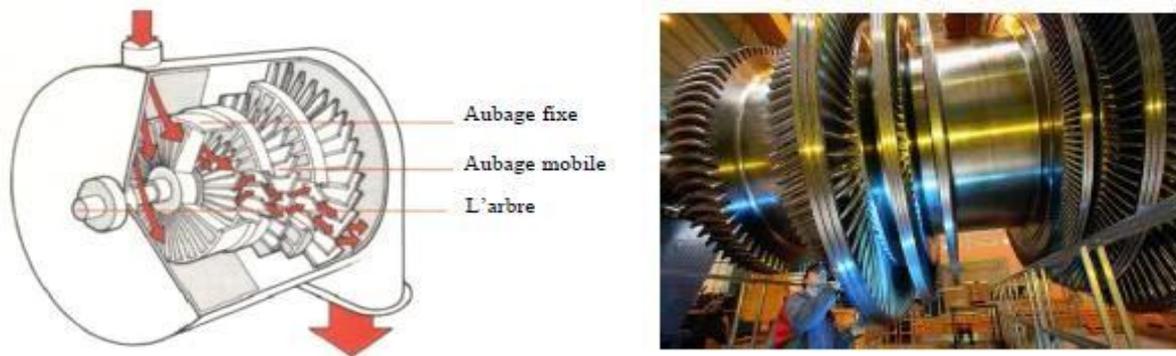


Figure (III.19) : Schéma de turbine à vapeur (Parsons) [30].

III.2.5.b.iv.2) Générateur de vapeur

Un générateur de vapeur est un dispositif qui vous permet de transférer l'énergie thermique d'un fluide chaud à un autre fluide froid à travers un séparateur. Cette dernière étape vise à préserver les propriétés physiques et économiques de chaque fluide. Il est composé de :

- Un préchauffeur : un échangeur de chaleur avec un tube et une calandre dont le but principal est de fournir de l'eau chaude à l'état liquide saturé.
- Un évaporateur : est un échangeur de chaleur qui convertit l'eau liquide à l'état gazeux (vapeur d'eau saturée) à une température et une pression constantes tout en récupérant la chaleur d'un autre fluide.
- Un surchauffeur : Est un échangeur de chaleur qui augmente la température de la vapeur entrante tout en fonctionnant à diverses pressions [29].

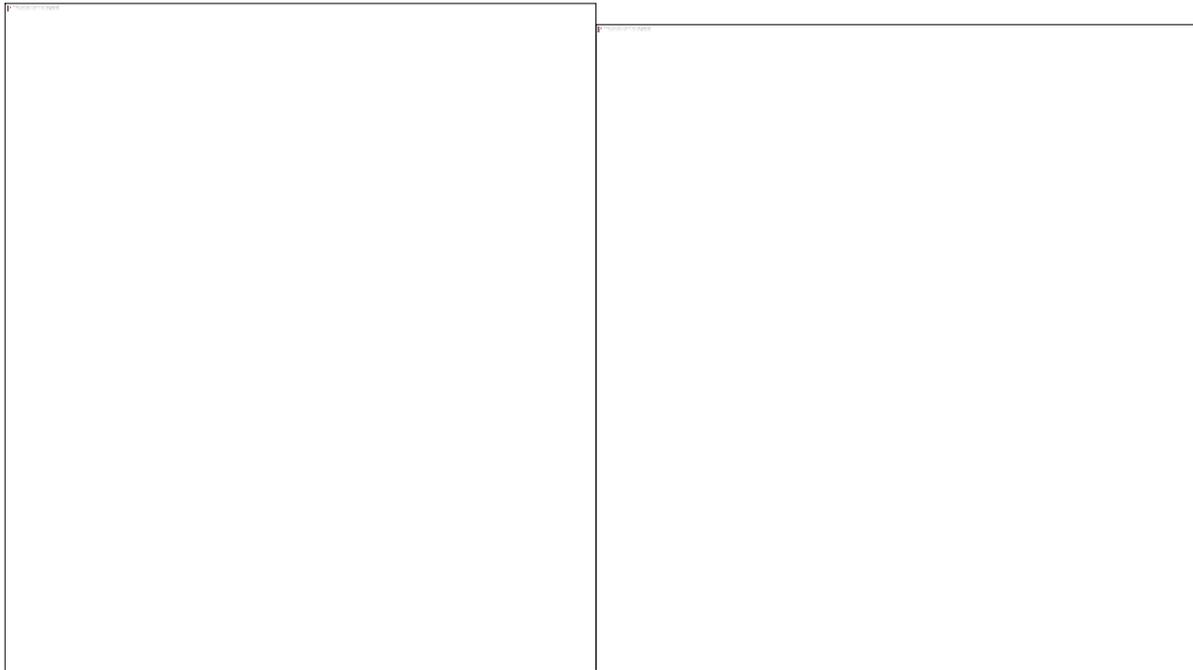


Figure (III.20) : Générateur de vapeur [31].

III.2.5.b.iv.3) Condenseur

Le condenseur est un échangeur d'évaporation thermique à deux phases. Il permet la conversion des vapeurs surchauffées en liquides réfrigérés. La chaleur générée par la transition de la vapeur au liquide est éliminée par un liquide de refroidissement (eau) [29].

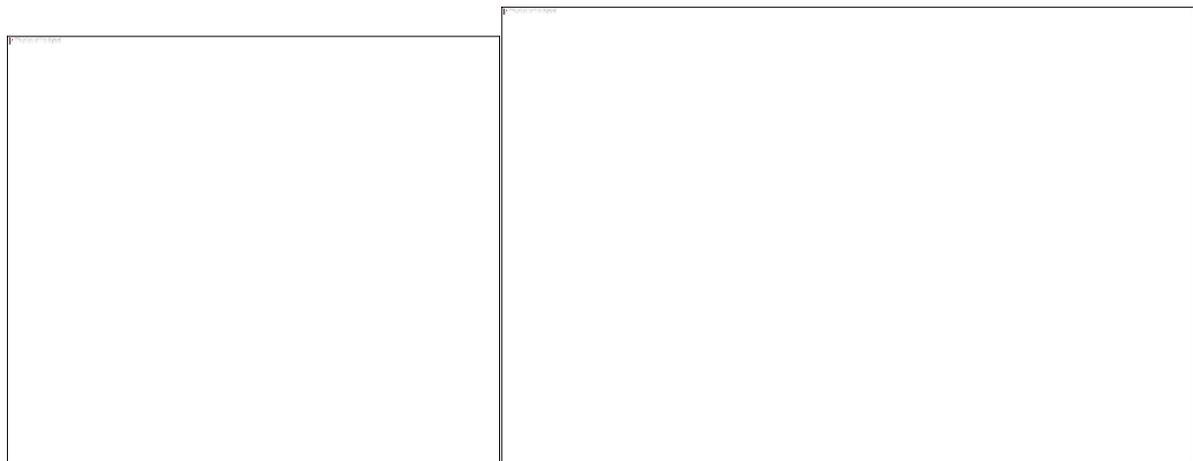


Figure (III.21) : Condenseur [32].

III.2.5.b.iv.4) Réchauffeur

Un réchauffeur est essentiellement un surchauffage qui chauffe la vapeur qui provient du l'étage haute pression d'une turbine. La vapeur réchauffée est ensuite envoyée au l'étage de

basse pression de la turbine. Réchauffer la vapeur entre les turbines haute pression et basse pression peut augmenter l'efficacité électrique du cycle de centrale de plus de 40%. La conception du réchauffeur est très similaire à la conception du la surchauffeur est parce que les deux fonctionnent à haute température [29].



Figure (III.22) : Réchauffeur [33].

III.2.5.b.iv.5) Pompe

Une pompe est un dispositif qui permet à un fluide de circuler dans le circuit primaire d'une installation à une pression nominale tout en augmentant la pression. Il y a des nombreuses pompes pour le tour [29] :

- Pompe à sels fondus froids à forte pression.
- Pompe de désurchauffe sels fondus froids.
- Pompe de circulation de sels fondus chauds.
- pompe de fusion et vidange de sels fondus froids.

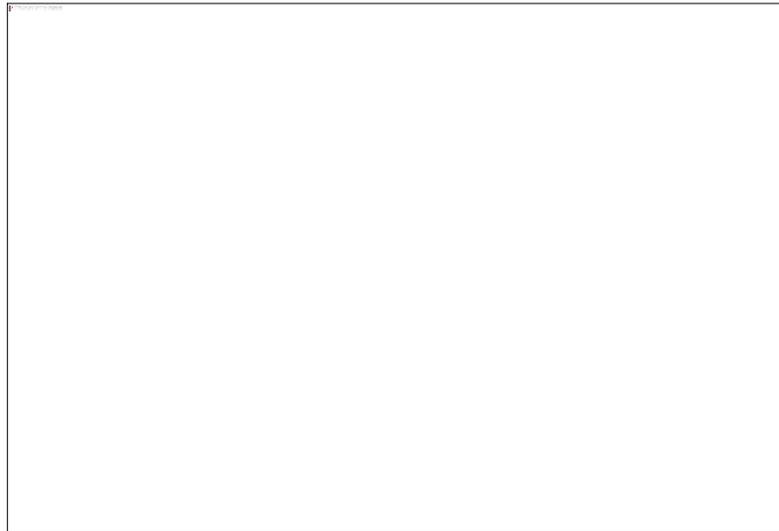


Figure (III.23) : Pompe [34].

III.2.5.b.iv.6) Alternateur

Production grâce à sa bobine. L'alternateur fonctionne sur un principe physique qui existe depuis longtemps. Une bobine de cuivre est encerclée par un intérêt. Lorsque la turbine marche elle active l'alternateur, ce qui la fait tourner. La bobine tourne sur un axe et génère un courant électrique.

Celui-ci est composé de deux composants principaux : le rotor et le stator.

➤ Type de rotor : Un rotor souvent appelé inducteur est la partie rotative d'un alternateur.

Il existe deux types des rotors :

- Le rotor avec pôles lisses ;

- Le rotor à pôle saillants ;

➤ Le stator aussi appelé induit, c'est la partie fixe de l'alternateur. Il est composé des plusieurs enroulements répartis dans les encoches du circuit du stator magnétique [35].

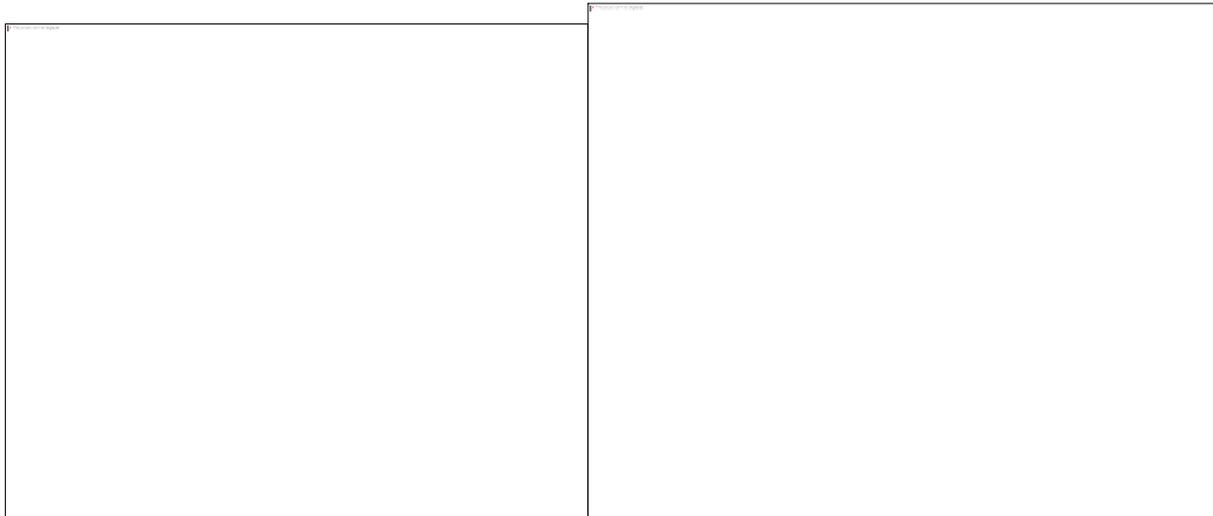


Figure (III.24) : Schéma d'un alternateur [36].

III.2.5.b.iv.7) Transformateur

Le transformateur principal ou de puissance est le composant central du réseau et des systèmes de distribution. Il adapte la tension de sortie de l'alternateur à la tension du réseau (20 kV / 400 kV) et établit la connexion électrique entre ces deux éléments. Il comprend un boîtier, un noyau électromagnétique, un système de refroidissement et des traversées de connexion, selon la figure (III.25) [37].

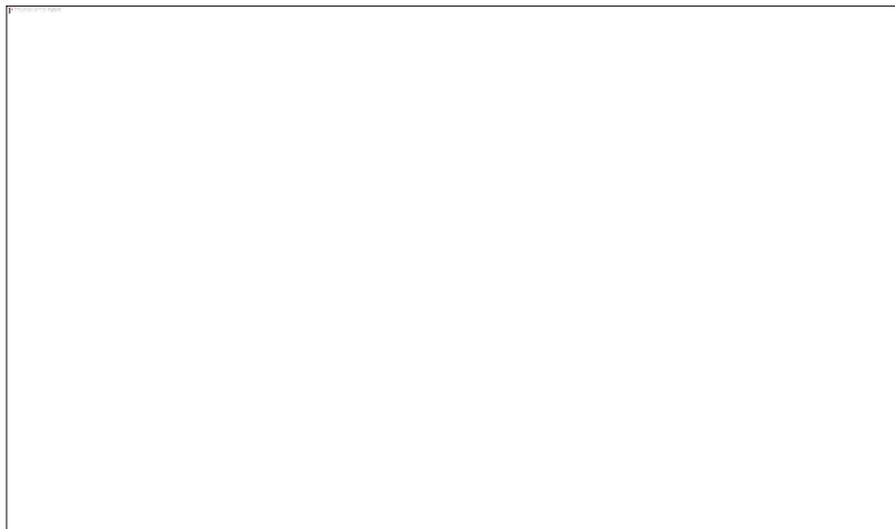


Figure (III.25) : Transformateur principal élévateur [37].

III.3. Programme nationale de développement des centrales thermodynamiques solaire à concentration

Au cours des années 2011-2013, deux projets pilotes des centrales thermiques à concentration d'une capacité totale d'environ 150 MW chacune seraient lancés. Ces projets s'ajouteront à la centrale hybride Hassi R'mel qui a été achevée en 2011 et d'une capacité de 150 MW, dont 25 MW d'énergie solaire. Au cours de la période 2016-2020, quatre centrales solaires thermiques d'une capacité combinée d'environ 1200 MW devraient entrer en service. La phase 2021-2030 prévoit l'installation de 500 MW par an jusqu'en 2023, puis de 600 MW par an jusqu'en 2030 [23].

Tableau (III.2) : Les futurs projets des centrales thermodynamiques à concentration en Algérie [23].

N	Projet	Capacité MW	Technologie	Situation
01	Naama	70	Cylindro parabolique	Annoncé
02	Meghaier	70	Cylindro parabolique	Annoncé
03	Hassi'rmel	70	Cylindro parabolique	Annoncé
04	Algerie projet boughuzoule	07	Tour solaire	En développement
05	El oued	150	Tour solaire	Annoncé
06	Beni Abbas	150	Tour solaire	Annoncé



Figure (III.26) : Première mini tour solaire à concentration en Algérie, Ghardaïa [16].

L'étude a également produit une feuille de route pour un scénario dans lequel les sources des énergies renouvelables répondent à plus de 80% des besoins en électricité de l'Algérie d'ici 2050. La figure (III.27.a) montre que d'ici 2050, les centrales électriques CSC représenteront la majorité de la production d'énergie renouvelable.

Ce scénario prévoit une capacité totale de 30 GW et une production annuelle de 166 TWh, l'électricité étant livrée par les centrales CSC à moins de 8 €cent/kWh [21].

La figure de l'étude (III.27.b) illustre l'étude d'un scénario pour la production continue d'électricité à haute tension du CSC au Moyen-Orient et en Afrique du Nord à l'Europe [38-39].

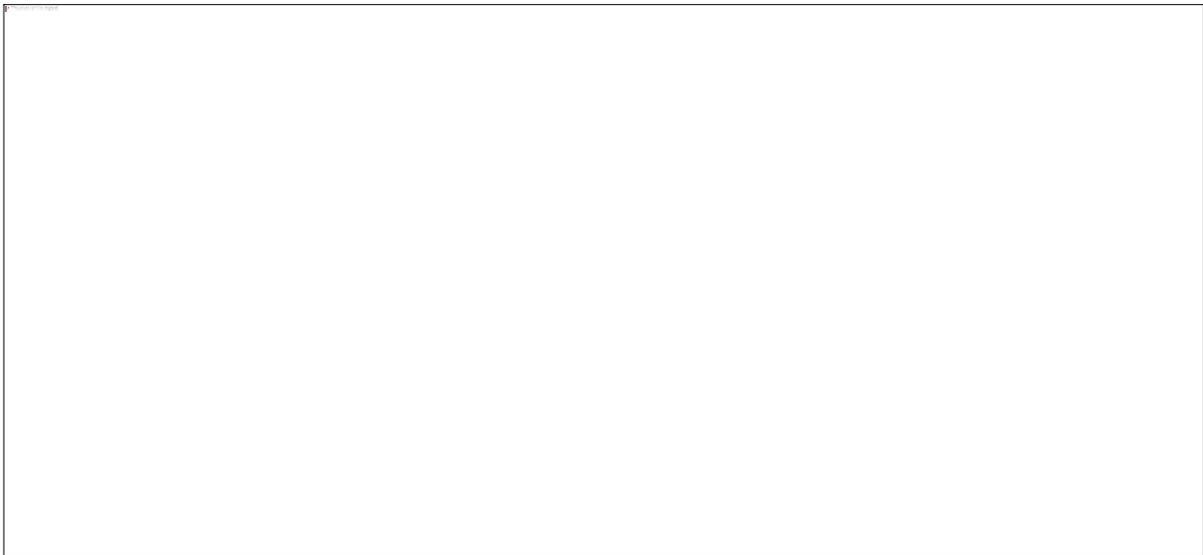


Figure (III.27) : (a) À gauche : scénario de fourniture en électricité pour l'Algérie, (b) À Droite : grille d'acheminement intégrant différents types d'ER [38-39].

III.4. Avantages et inconvénients d'une centrale de tour solaire concentration

Le tableau (III.3) représente les avantages et les inconvénients d'une centrale à tour solaire :

Tableau (III.3) : Avantages et les inconvénients.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Rendement solaire-électrique élevé, températures de cycle élevées. • Hybridation simple avec le gaz naturel. • Composants solaires modulaires (héliostats) avec le potentiel de production en série [23]. • le facteur de concentration est essentiel, assurant non seulement un haut niveau d'efficacité, mais aussi la capacité d'atteindre des températures allant jusqu'à 1000 °C [40]. 	<ul style="list-style-type: none"> • Structure avec des coûts d'exploitation élevés. • Les héliostats ont besoin d'un système de surveillance solaire. • Conditions de l'eau de nettoyage. • Généralement utilisé dans la production d'électricité à grande échelle [23].

III.5. Développement des systèmes CSC

L'évolution des systèmes CSC peut être divisée en trois étapes. À la fin des années 70 et au début des années 80, l'espoir est apparu avec l'avènement des systèmes CSC en tant que technologie potentielle pour faire face à la dépendance énergétique, principalement en raison des crises pétrolières de 1973 et 1979. Au cours de cette période, plusieurs études scientifiques ont été menées sur diverses méthodes de production d'électricité à partir du rayonnement solaire. La première moitié de cette période, les recherches ont porté sur les centrales tournantes, les concentrateurs cylindro parabolique et les concentrés paraboliques (Stirling). La plateforme solaire d'Almeria qui a ouvert en 1981, a été conçue pour évaluer une variété de systèmes CSC, mais elle était initialement concentrée sur la centrale à tour. L'efficacité de conversion solaire obtenue par Vanguard Dish Stirling en 1984 (Washom, 1984) et la construction du système de production d'énergie solaire dans les années 1980, qui a abouti à une installation de 354 MW utilisant la technologie cylindro parabolique, sont encore en usage

aujourd'hui pour la plupart. Le développement des réflecteurs linéaires de Fresnel a été lent par rapport à d'autres technologies.

L'amélioration des capteurs plats et des systèmes composites a été publiée au milieu des années 70, mais aucun ouvrage bien connu n'a été publié avant la seconde moitié des années 80, lorsque les prix du pétrole étaient à leur plus bas. À la suite des crises énergétiques, l'intérêt pour la technologie CSC a diminué, entraînant la construction d'aucun prototype de LFR ou de centrale électrique commerciale à l'heure actuelle, avec des chercheurs moins actifs dans le domaine. Le réchauffement de la planète, ou le changement climatique tel qu'il est maintenant connu est devenu un problème majeur à la fin des années 1990, avec le Protocole de Kyoto (1997) servant de modèle de son importance. En conséquence, l'Espagne a joué un rôle clé dans le développement des CSC, grâce aux décrets royaux RD 436/2004 et RD 661/2007, qui ont établi des prix d'achat extrêmement élevés pour promouvoir ces technologies. Ces prix étaient suffisamment élevés pour rendre la technologie des concentrateurs à cylindres paraboliques avec des lubrifiants synthétiques comme fluide caloporteur économiquement viable, et aucune restriction sur la puissance installée totale n'a été fixée. Au cours de la seconde moitié des années 2000, un grand nombre des centrales solaires identiques ont été planifiées et installées. La recherche, le développement et l'innovation ne sont pas aussi importants que le renforcement des capacités afin de réduire les coûts des matériaux établis par les entreprises [41].

III.6. Conclusion

Pour résumer ce dont nous avons discuté dans ce chapitre, la technologie CSC est le plus rentable tant sur le plan technique que commercial. Cette technologie est considérée comme mature, et elle est capable de fournir l'énergie calorifique nécessaire à un faible coût et avec un risque minimal, que ce soit en tant que système économique autonome ou hybride. Les candidats prometteurs joueront un rôle essentiel dans l'approvisionnement énergétique futur. Il convient de noter que, en raison de leurs coûts d'investissement élevés, ces technologies sont encore hors de portée de la grande majorité des pays. Par conséquent, il est essentiel d'envisager des nouvelles technologies qui pourraient réduire considérablement les coûts d'investissement, ce qui permettrait l'adoption généralisée de ce type de technologie dans tous les pays. L'Algérie présente un certain nombre d'opportunités pour les technologies CSC, elle abrite non seulement l'une des plus grandes réserves de gaz au monde, mais aussi une vaste gamme des ressources énergétiques renouvelables, y compris l'énergie solaire. L'Algérie voit des possibilités idéales de combiner le gaz naturel avec l'énergie solaire en incorporant l'énergie solaire concentrée dans les cycles du gaz naturel, comme la centrale solaire Hassi R'mel.

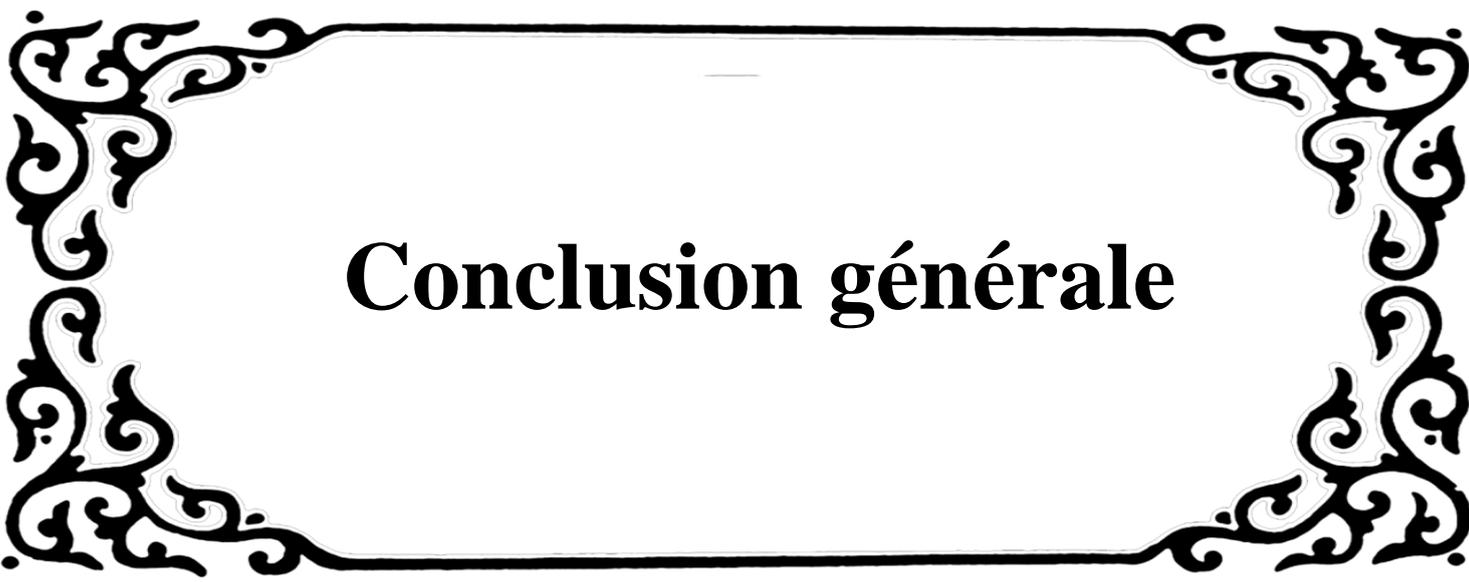
Références bibliographiques

- [1] Mihoub Sofiane, « Contribution à la modélisation et à l'optimisation des concentrateurs solaires motorisés appliqués aux systèmes thermosolaires », mémoire master 2 en énergies renouvelables, université Abou-Bekr Belkaid - Tlemcen, faculté des sciences énergies renouvelables, 2016/2017.
- [2] Achour Lazhar, « méthodes d'analyse de système de production : application à la stratégie de la production d'énergie dans les centrales hybrides d'électricité », commande des systèmes industrielles et énergies renouvelables option stratégies et gestion des ressources primaires pour la production de l'énergie électrique, université Batna 2, faculté de technologie, 2017/2018.
- [3] Olivier Farges, Conception optimale de centrales solaires concentration : application aux centrales à tour et aux installations « beam down », génie des procédés, école des mines d'Albi-Carmaux, 2014.
- [4] <https://books.openedition.org>, consulter 08 Avril 2022
- [5] Quoilin Sylvain « les centrales solaires à concentration », université de liège, 2007.
- [6] Insa Rouen, concentrateurs solaires et réalisation d'un mini concentrateur solaire, institut nationale des sciences appliquées.
- [7] M. Abbas, et al, « Dish Stirling technology: à 100 MW solar power plant using hydrogen for Algeria », international journal of hydrogen energy, p :36, 2011.
- [8] P. Garcia, « outils d'évaluation technico-économique et d'aide à la conception des centrales solaires thermodynamiques du futur », université de perpignan, p : 35 , 2007.
- [9] B. Kongtragool, S. Wongwises, « a review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines », renewable and sustainable energy reviews, p:131-154, 2013.
- [10] Cao, G. and R. Orrùs, « Current environmental issues and challenges », le schéma de principe du concept de centrale parabolique (Parabole Stirling).
- [11] M. Günther, M. Joemann, and S. Csambor. "advanced csp teaching materials, in parabolic trough technology". In Deutsches Zentrum fuer Luft-und Raumfahrt Mena Teaching Materials Implementation Workshop, 2011.

- [12] Kabouche Azouz, mémoire magistère, « architecture et efficacité énergétique des panneaux solaires cas d'étude : simulation sous trnsys16.1 d'un appartement d'une tour multifonctionnelle à Constantine », mémoire magistère en architecture bioclimatique université Mentouri, faculté des sciences de la terre, de géographie et l'aménagement du territoire, 2011/2012.
- [13] B. Brahim, A. Bouketir, « étude expérimentale et simulation d'un concentrateur solaire parabolique Dish-Stirling », thèse de master en physique énergétique, université Mohammed Bougara Boumerdes, 2017.
- [14] G. Radosevich, C. Skinrood, "the power production operation of solar one: the 10 mew solar thermal central receiver pilot plant", journal of solar energy engineering, transactions of the ASME vol 111, pp 144–151. 1989.
- [15] J.Pacheco, R. Gilbert, "overview of recent results of the solar two test and evaluations program", renewable and advanced energy systems for the 21st Century RAES'99, April, Maui, Hawaii, ASME, pp.RAES99–7731. 1999.
- [16] Maida Rym, « Développement d'une carte électronique à base d'Arduino avec interface de communication pour la commande d'un héliostat », mémoire master 2 en automatique spécialité automatique et système, université de Ghardaïa faculté des sciences et technologies, 2018/2019.
- [17] Bennessar Khadidja, Bahi Kheira, « étude expérimentale de poursuite solaire d'un héliostat. », mémoire master 2 en électrotechnique spécialité énergie et environnement, centre de dépècement des renouvelable – CDER, 2019/2020.
- [18] F. Berrah, conception et simulation d'une centrale à tour sur sites Algériens, thèse de Master, en énergies renouvelables, université des sciences et de la technologie Houari Boumedienne, 2013.
- [19] O. Behar, A. Khellaf, K. Mohammedi, "a review of studies on central receiver solar thermal power plants". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, p : 23.
- [20] E. Zarza, M. Romero-Alvarez, "concentrating solar thermal power", Energy Conversion. 2007, CRC Press. p. 19-1-19-98.
- [21] F. Collado, J. Guallar, "a review of optimized design layouts for solar power tower plants with campo code", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, p : 20, 142-154.

- [22] D. Goswami, et al., "Principles of solar engineering". 2000, Philadelphia, PA : Taylor & Francis.
- [23] Imad Eddine Meriche, « Simulation et Modélisation d'Installation de Type Solaire thermodynamique Hybride », thèse doctorat en Génie thermique et énergétique, université des Frères Mentouri – Constantine, faculté des sciences de la technologie, 2016/2017.
- [24] F. Collado, J. Guallar, "design of solar tower plants heliostat by heliostat: the blocking factor". SolarPACES, Berlin, Germany, 2009, p : 1, 6-13.
- [24] A. Mokri, Aal Ali, M. Emziane, "solar energy in the united arab emirates: a review". renewable and sustainable energy reviews, 2013, p: 23, 340-375.
- [25] P. Schramek, "mills multi-tower solar array", Solar Energy vol75 (3), pp. 249- 260. 2003.
- [26] H.Hasuike, Y. Yoshizawa, et al. "study on design molten salt solar receivers for beam-down solar concentrator", May 2006.
- [27] Laissaoui Mohammed, « Etude et optimisation de l'hybridation solaire des installations des turbines à gaz et turbines à vapeur utilisés pour le dessalement d'eau », thèse doctorat en spécialité génie mécanique option énergétique, université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, faculté des sciences et de la technologie, 2017/2018
- [28] Robert Pitz-Pall and Jürgen Dersch, "Ecostar: european concentrated solar thermal road-mapping", SES6-CT-2003-502578. 2004.
- [29] Azzoune Zeyneb, Draa Amani, Zaiter Zahra, « optimisation technico-économique d'une centrale tour », mémoire master 2 en en génie mécanique option énergétique, université Mohammed Seddik Ben Yahia –Jijel, faculté des sciences et de technologie, 2017/2018.
- [30] Zoghلامي Raouf, « étude numérique du vrillage des aubes d'une turbine à vapeur axiale », mémoire master génie mécanique option conception et fabrication assisté par ordinateur, université de Tébessa faculté des sciences et technologie
- [31] <https://www.irsn.fr> consulter 08 Avril 2022.
- [32] www.energieplus-lesite.be consulter 08 Avril 2022.
- [33] <https://www.directindustry.frl> consulter 08 Avril 2022.

- [34] <https://www.labonnepompe.com> consulter 08 Avril 2022.
- [35] Manuel utilisation et entretien.alternateur LSA 47, Iorov Somer, 2011.
- [36] B. Baouali, A. Chibane, Alternateur, centrale de Cap-Djinet. Boumerdes, 2017. Mémoire de master.
- [37] J. Lamaachi, « notice de fonctionnement générale, Centrale à cycle combiné de Terga 3 x 400 MW », Document Alstom, France, 01/09/2009.
- [38] Supersberger, Nikolaus, et al. "Algeria—a future supplier of electricity from renewable chapitre 1, développement de technologies de concentration d'énergie solaire 36 Energies for Europe?" Wuppertal Institute and Centre de Recherche en Economie Appliquée pour le Développement (CREAD) (2010).
- [39] Trieb Franz, et al. "Characterisation of solar electricity import corridors from MENA to Europe." (2009).
- [40] Meriche Islem, Chemoul Adem, « Analyse 4e (Energetique- Tlemcen Exergetiqueeconomique- Environnementale) d'une centrale thermique a vapeur », mémoire master 2 en génie mécanique option énergétique, université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel, faculté des Sciences et de la technologie, 2019/2020
- [41] Chekkaf Omar, Guenineche Nabil, « optimisation d'une installation solaire », mémoire master 2 en génie mécanique option génie thermique et énergies renouvelables, université Aboubekr Belkaid, faculté de technologie, 2013-201



Conclusion générale

L'énergie solaire est la source de toutes les formes actuelles de production d'énergie sur la planète. L'homme convertit l'énergie solaire en une variété d'autres formes des énergies, y compris l'énergie chimique (les aliments que nous mangeons), l'énergie cinétique, l'énergie thermique, l'énergie électrique et l'énergie de la biomasse.

Par extension, le terme "énergie solaire" est fréquemment utilisé pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique produite à partir de la source d'énergie primaire (le rayonnement solaire). À l'heure actuelle, il existe trois principales façons d'utiliser l'énergie solaire :

- L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement la lumière du soleil en électricité ;
- L'énergie solaire thermique convertit directement la lumière du soleil en chaleur ;
- L'énergie solaire thermodynamique est une technologie qui permet d'utiliser les rayons du soleil pour générer de la chaleur puis en électricité ;

L'utilisation de l'énergie solaire produite par le rayonnement solaire qui est une ressource renouvelable et non polluante, continue de croître dans le monde d'aujourd'hui. L'une des principaux facteurs qui empêche l'utilisation généralisée de cette énergie est sa variabilité, qui dépend des facteurs météorologiques et se traduit par une production intermittente.

Parmi les stratégies très intéressantes pour la production d'énergie électrique renouvelable aujourd'hui est la cheminée solaire. Ce processus utilisant diverses réactions physiques connues et exploitées par l'homme depuis plusieurs décennies (Effet thermosiphon, convection naturelle, effet de serre) pour sa fabrication. De plus, la production est continue jour et nuit, par conséquent, une seule cheminée pourrait générer suffisamment d'électricité pour alimenter près de 200 000 foyers. Cependant, ces avantages occultent les principales contraintes qui empêchent le développement mondial d'un projet de cheminée solaire.

La centrale solaire thermique à tour est l'une des technologies les plus attrayantes pour produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire thermique. Les investissements initiaux sont importants, mais prévisibles, et ils permettent la production d'électricité propre et renouvelable. Les tours solaires à concentration sont extrêmement cruciales pour l'avenir parce que nos ressources sont limitées.

La cheminée solaire et le tour solaire à concentration doit être construite dans une zone bien éclairée et disposant d'un grand nombre des zones vides afin de fonctionner correctement. En

conséquence, le désert algérien est l'un des endroits les plus remarquables de la planète, avec un ensoleillement maximal toute l'année et sa surface vaste et vide. Les caractéristiques climatiques du Sahara Algérien (l'intensité du rayonnement reçu ainsi que de la durée de l'ensoleillement qui peut dépasser dix heures par jour pendant plusieurs mois) offrent d'excellentes conditions pour obtenir des bons rendements sur une trajectoire solaire. L'Algérie pourrait être en mesure de capter suffisamment d'énergie solaire pour répondre à ses besoins énergétiques, y compris le développement à long terme. Il peut aussi servir de modèle à d'autres pays.

À cet égard, notre pays a lancé son programme national de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique afin de se conformer au protocole de Kyoto, établissant un cadre d'action et un cadre réglementaire pour renforcer les capacités institutionnelles à l'appui du développement des énergies renouvelables dans le Sud. Dans le but de s'établir comme un acteur majeur dans la production d'électricité et d'éliminer les barrières à la technologie des énergies renouvelables afin d'aider à réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Les énergies renouvelables sont au cœur des politiques énergétiques et économiques de l'Algérie, avec des projections indiquant que d'ici 2030, près de 40% de l'électricité produite pour la consommation domestique proviendra des sources renouvelables. L'objectif de l'initiative est de construire jusqu'à 22 000 MW de capacité de production d'électricité renouvelable entre 2011 et 2030, dont 12 000 MW dédiés à la satisfaction de la demande intérieure et 10 000 MW destinés à l'exportation.

Compte tenu de l'importance de ce sujet à l'avenir, nous espérons que nos recherches serviront de base à des travaux plus détaillés et mèneront à la construction d'un prototype au Sahara algérien.