

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la**  
**Recherche Scientifique**



**Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Energies renouvelables

Spécialité : Energies renouvelables en mécanique

**Thème**

Simulation d'une centrale solaire cylindro-parabolique  
avec système de stockage thermique appliqué au climat  
d'El-Oued

Devant le jury composé de :

Présenté par :

Dr. ATIA Abdelmalek

Président

TOUIL Messaoud

Dr. BOUKHARI Ali

Examineur

ZAID Messaoud

M. KAROUA Housseyn

Encadreur

M. MAGDOUD Sofiane

Co-Encadreur

**2017-2018**

## Remerciements

*Au terme de cette étude, nous tenons à remercier le Bon Dieu qui nous a donné le courage et la volonté d'aller jusqu'au bout et de ramener ce présent travail à son ultime point.*

*Nous tenons tout d'abord à remercier M. MEGDOUD SOUFIAN et M KAROUA Housseyn nos encadreurs, qui nous a prêté une attention toute particulière et qui n'ont, en aucun moment, ménagé aucun effort et/ou savoir pour nous apporter de l'aide, la plus précieuse et nous faire découvrir les secrets de tout savoir.*

*Un remerciement particulier est adressé au Dr GHODBANE Mokhtar pour ses conseils, son assistance et ses orientations le long de préparation de ce travail.*

*Nous tenons à témoigner notre profonde reconnaissance et exprimer nos remerciements les plus sincères à nos familles, pour nous avoir soutenue dans la réalisation de ce modeste travail.*

*Nos remerciements vont également à tout le corps enseignant du département de génie mécanique, puisque c'est grâce à eux que nous n'avons eu aucune difficulté à combler nos lacunes théoriques et à satisfaire nos curiosités scientifiques.*

*Nous tenons à remercier les membres du jury pour leur honorable présence et pour leur contribution effective dans l'enrichissement de ce mémoire.*

*Nous tenons, enfin, à remercier tous ceux qui ont contribué et/ou collaboré de près ou de loin dans l'élaboration de cette étude.*

*Merci à tous.*

*Merci pour tout*

## Dédicace

*Nous dédions ce modeste travail à :*

*A nos parents.*

*Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de nous combler. Que dieu leur procure la bonne santé et longue vie.*

*A ceux que nous aimons beaucoup et qui nous ont soutenus tout au long de ce projet.*

*A tous nos amis,*

*Aux deux familles TOUIL et ZAID.*

*Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, nous vous disons merci.*

## Table des matières

<b>Remerciements</b> .....	<b>i</b>
<b>Dédicace</b> .....	<b>ii</b>
<i>Table des matières</i> .....	<b>iii</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>vi</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>viii</b>
<b>I. Introduction générale</b> .....	<b>9</b>
<b>II. Recherche bibliographique</b> .....	<b>11</b>
<i>II.1. Introduction</i> .....	<i>11</i>
<i>II.2. Rayonnement Solaire</i> .....	<i>12</i>
<i>II.3. Types des concentrateurs solaires</i> .....	<i>12</i>
II.3.1. Les centrales solaires à tour (Les héliostats) .....	13
II.3.2. Les centrales à miroirs paraboloides (Dish-Stirling) .....	14
II.3.3. Les concentrateurs linéaires de Fresnel (Linear Fresnel Reflector LFR) .....	15
II.3.4. Les concentrateurs solaires cylindro-paraboliques (PTCs) .....	17
a). Introduction .....	17
b). Etat de l'art .....	18
<i>II.4. Centrales solaires de type cylindro-paraboliques achevés en Algérie : Cas de la centrale hybride (Solar/Gas) de Hassi R'mel</i> .....	<i>21</i>
<i>II.5. Conclusion</i> .....	<i>22</i>
<b>III. Technologies de production d'électricité</b> .....	<b>23</b>
<i>III.1. Introduction</i> .....	<i>23</i>
<i>III.2. Technologies de production d'électricité</i> .....	<i>24</i>
III.2.1. Production d'électricité à base d'énergie fossile .....	27
a. Centrale électrique à base d'une turbine à gaz .....	27
b. Procédure de production d'électricité fossile .....	31
c. Types de configuration des turbines à gaz dans les centrales électriques .....	31
III.2.2. Production d'électricité à base d'énergie Nucléaire .....	33
III.2.3. Production d'électricité avec des énergies renouvelables .....	37
<i>III.3. Conclusion</i> .....	<i>45</i>

<b>IV. La centrale solaire cylindro-parabolique.....</b>	<b>46</b>
<i>IV.1. Introduction .....</i>	46
<i>IV.2. Schéma générale du centrale cylindro parabolique .....</i>	46
<i>IV.3. Les composants de la centrale solaire cylindro parabolique .....</i>	47
IV.3.1. Le champ solaire .....	47
a. <i>Les collecteurs et le champ optique .....</i>	48
b. <i>Les récepteurs .....</i>	48
c. <i>Fluide caloporteurs .....</i>	49
IV.3.2. Générateur Solaire de Vapeur .....	50
IV.3.3. Cycle de puissance .....	50
IV.3.4. Système de refroidissement .....	52
IV.3.5. Auxiliaires fossiles .....	52
<i>IV.4. Conclusion.....</i>	53
<b>V. Simulation, Résultats et Interprétations.....</b>	<b>54</b>
<i>V.1. Introduction .....</i>	54
<i>V.2. Les conditions climatiques.....</i>	54
<i>V.3. Description du logiciel SAM (SYSTEME ADVISOR MODEL).....</i>	58
<i>V.4. Simulation de la centrale électrique .....</i>	58
<i>V.5. Conclusion .....</i>	66
<b>VI. Conclusion générale.....</b>	<b>67</b>
<b>VII. Perspectives.....</b>	<b>67</b>
<b>Références.....</b>	<b>68</b>
<b>VIII. Annexes.....</b>	<b>71</b>

## **Abbreviation**

HTF : Heat Transfer Fluid

LFR : Linear Fresnel Reflector

PTC : Parabolic trough concentrator

PV : Photovoltaïques

SAM: Systeme Advisor Model

SPD : Solar Parabolic Dishes

SPT : Solar Power Tower

## Liste des figures

Figure II. 1 : Les composants d'une centrale solaire à tour pour la production d'électricité [22].	14
Figure II. 2 : Schéma représentant un système solaire à concentration de type Dish-Stirling [25].	14
Figure II. 3 : Miroir parabolique développé par l'Université nationale australienne [26].	14
Figure II. 4 : Schéma de principe et vue de centrales solaires à miroir de Fresnel [28].	16
Figure II. 5 : Premier prototype LFR de Francia	16
Figure II. 6 : Les dessins de Francia de la grande centrale solaire LFR envisagée intégrée dans un contexte urbain d'environ 1965 [29].	17
Figure II. 7 : Schéma d'un collecteur solaire cylindro- parabolique (PTC).	18
Figure II. 8 : Schéma de principe d'une centrale à concentrateur cylindro-paraboliques [34].	20
Figure II. 9 : Vue de la centrale hybride (Solar/Gas) de Hassi R'mel [14].	22
Figure III. 1 : Exemple de systèmes de surveillance des émissions continues pour l'environnement [17].	23
Figure III. 2 : La production d'électricité nette dans l'UE au cours de la période 2000-2010 (en MW) [35].	25
Figure III. 3 : Nouvelle capacité installée dans l'UE et capacité hors service en MW [36].	26
Figure III. 4 : Éléments d'une centrale électrique au Charbon [37].	27
Figure III. 5 : Types des centrales électriques conventionnelles à turbine à vapeurs	28
Figure III. 6 : schématisation d'une turbine générant de l'électricité.	28
Figure III. 7 : Types de générateurs de vapeur.	29
Figure III. 8 : Aéro de turbine à gaz [38].	30
Figure III. 9 : Boucle simple de production d'électricité à turbine à gaz.	32
Figure III. 10 : Boucle de cogénération d'énergie électrique à turbine à gaz.	33
Figure III. 11 : Types de production d'électricité mondiale pour la période 2004-2030 [9].	34
Figure III. 12 : Illustration du cycle de la production d'énergie nucléaire à un seul étage de changement thermique.	36
Figure III. 13 : Illustration du cycle de la production d'énergie nucléaire avec deux étages de changement thermique.	37
Figure III. 14 : Le cycle de la production d'électricité par l'exploitation de l'énergie du flux d'eau.	38
Figure III. 15 : Conception d'éoliennes (horizontales et verticales).	41
Figure III. 16 : Les techniques de la conversion de l'énergie solaire en chaleur et en énergie électrique.	42
Figure III. 17 : Installations électrique solaire à grande échelle.	43
Figure III. 18 : Installations électrique solaire à petite échelle.	44
Figure III. 19 : Petite installation électrique Photovoltaïque.	45
Figure IV. 1 : Principe de fonctionnement d'une centrale thermique solaire.	46
Figure IV. 2 : Concept d'intégration d'un système de stockage thermique dans une centrale solaire.	47
Figure IV. 3 : Centrale solaire Cylindro parabolique avec système de stockage et un auxiliaire fossile [39].	47
Figure IV. 4 : Collecteur cylindro parabolique.	48

<b>Figure IV. 5 : Un récepteur sous vides.</b>	<b>49</b>
<b>Figure IV. 6 : Cycle Rankine de base.</b>	<b>50</b>
<b>Figure IV. 7 : Diagramme T-S idéal et réel de Cycle de Rankine.</b>	<b>51</b>
<b>Figure IV. 8 : Cycle de Rankine simplifié avec l'ajout d'un système de refroidissement [39].</b>	<b>52</b>



## Liste des tableaux

<b>Tableau V. 1 : Caractéristiques géographiques et solaires du site étudié.</b> .....	<b>59</b>
<b>Tableau V. 2 : Caractéristiques de la centrale étudiée.</b> .....	<b>59</b>

## I. Introduction générale

La demande énergétique est en augmentation continue dans le monde surtout l'énergie électrique, où plus de 50 % de la production mondiale de l'électricité est fourni par les sources fossiles et nucléaires [1]. Mais les sources fossiles et nucléaires ont un impact négatif sur l'environnement. Ces sources d'énergies sont non renouvelables qui peuvent devenir obsolètes avec le temps. Pour ces raisons, les chercheurs scientifiques sont toujours en travail continu pour exploiter les énergies de la nature en tous genres et trouver une énergie alternative.

Parmi les sources les plus importantes d'énergie alternative, nous trouvons l'énergie solaire, où cette énergie est reconnue comme l'une des alternatives énergétiques les plus prometteuses qui mûrissent et devraient jouer un rôle majeur dans l'atténuation des émissions de CO<sub>2</sub> grâce à un remplacement progressif des systèmes actuels d'énergie fossile [2-8]. La recherche générale sur l'énergie solaire peut être classée en trois grands thèmes:

- Les cellules solaires photovoltaïques (PV) qui implique l'utilisation de dispositifs à semi-conducteurs [8-13];
- Les systèmes solaires thermiques qui concentrent et captent le rayonnement solaire destiné à être utilisé comme chaleur ou converti en énergie dans un cycle thermodynamique [8-13];
- La production de carburant par l'énergie solaire où des processus chimiques et photochimiques sont utilisés pour produire du carburant tel que l'hydrogène à partir de l'énergie solaire [8-13].

L'objectif principal de cette étude est de simuler une centrale solaire de production de l'énergie électrique. A cet effet, des concentrateurs solaires de type cylindro-parabolique ont été adoptés pour convertir l'énergie solaire en énergie thermique pour produire de la vapeur à haute température qui entraîne des turbines thermogéniques. Cette étude a été menée sous les conditions climatiques de la Wilaya d'El-oued, Algérie, qui se caractérise par la disponibilité de grandes terres et le taux de rayonnement solaire très élevé au cours de l'année.

Pour faciliter cette étude, nous avons adopté le plan de travail suivant:

- Une introduction générale :

- Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur les concentrateurs solaires cylindro-paraboliques (PTC);
- Le deuxième chapitre illustre les technologies de production d'électricité;
- Le troisième chapitre consacré à afficher, interpréter les résultats de la simulation ;
- Conclusion générale et perspectives.

## II. Recherche bibliographique

### II.1. Introduction

L'énergie solaire est la lumière et la chaleur émises par le soleil que les humains ont exploité à leur avantage depuis l'antiquité en utilisant une combinaison de technologies en constante évolution. Les technologies de l'énergie solaire comprennent l'utilisation de l'énergie solaire thermique pour le chauffage direct, les processus mécaniques de mouvement ou d'énergie électrique, la production d'énergie photovoltaïque utilisant des panneaux photovoltaïques, ainsi que les conceptions architecturales reposant sur l'énergie solaire. En résolvant certains des problèmes les plus pressants du monde aujourd'hui.

La plupart des sources d'énergies renouvelables sur la Terre sont attribuables au rayonnement solaire ainsi qu'aux sources d'énergie secondaires telles que le vent, l'énergie des vagues, l'hydroélectricité et la biomasse. Il est important de noter que seule une fraction de l'énergie solaire disponible dans nos vies a été utilisée. L'énergie solaire est convertie par des moteurs thermiques ou des convertisseurs photovoltaïques. Une fois que l'énergie solaire est convertie en énergie électrique, seule l'ingéniosité humaine contrôle ses utilisations. Les applications qui utilisent le chauffage de l'énergie solaire et les systèmes de refroidissement à travers des conceptions architecturales qui dépendent de l'exploitation de l'énergie solaire, l'eau potable par distillation et la désinfection, et l'exploitation de la lumière du jour, le chauffage de l'eau et de cuisson de l'énergie solaire, et des températures élevées dans les applications industrielles.

Comme tout le monde le sait, il existe de nombreuses procédés permettant de produire de la chaleur et/ou de l'électricité en utilisant directement l'énergie solaire. En ce qui concerne la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, il existe deux techniques pour cela.

- La conversion de l'énergie solaire reçue par les collecteurs solaires en énergie thermique, elle est transformée en énergie calorifique [8-13].
- La conversion électrique (système photovoltaïque), où l'énergie solaire collectée est transformée en électricité [8-13].

Dans ce chapitre, nous sommes intéressés à mener une étude approfondie sur les concentrateurs solaires de type cylindro-parabolique (PTC) afin de générer de l'électricité en utilisant l'énergie solaire, en s'appuyant sur des concentrateurs solaires de type cylindro-parabolique

dans la région d'El-Oued (Oued Souf), Algérie. Ces concentrateurs redirigent et concentrent en permanence les rayonnements solaires directs vers un absorbeur. L'énergie solaire concentrée sert à chauffer un fluide caloporteur circulant dans un tube horizontal où la température de travail peut atteindre 500°C. Dans cette étude, nous allons utiliser « The System Advisor Model (SAM) » comme un moyen de former le modèle de la station électrique.

## II.2. Rayonnement Solaire

Le soleil est une sphère avec une matière extrêmement chaude et gazeuse de diamètre  $1,39 \times 10^9$  (m). La température des régions intérieures centrales est de l'ordre de  $8 \times 10^6$  à  $40 \times 10^6$  (K), où la densité est estimée à 100 fois celle de l'eau. Les processus radiatifs et convectifs sont le résultat des états successifs d'émission, d'absorption et de radiation; la gamme de spectre de rayonnement dans le noyau du soleil est comprise entre la longueur d'onde des rayons X et celle des rayons gamma, avec une longueur d'onde de radiation qui augmente suivant la diminution de la température à de grandes distances.

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (Hauts Plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 (kWh) sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 (kW.h/m<sup>2</sup>/an) au Nord et 2265 (kW.h/m<sup>2</sup>/an) au sud du pays.

## II.3. Types des concentrateurs solaires

Les concentrateurs thermiques solaires sont des outils conçus pour collecter la chaleur en absorbant la lumière du soleil [3, 4, 8, 14-21]. Ils sont des dispositifs conçus pour convertir l'énergie thermique du soleil ou du rayonnement solaire en une énergie plus utilisable et plus stockable. Cette énergie se présente sous la forme de rayons électromagnétiques allant des longueurs d'onde entre l'infrarouge (long) et l'ultraviolet (court). La quantité d'énergie solaire atteignant la surface de la Terre à environ 1000 watts par mètre carré sous le ciel clair, en fonction des conditions météorologiques, de l'emplacement et de la direction de la surface.

A travers ces lignes, nous parlerons de l'énergie solaire concentrée. Les systèmes solaires à concentration utilisent des lentilles ou des miroirs pour concentrer une grande surface de

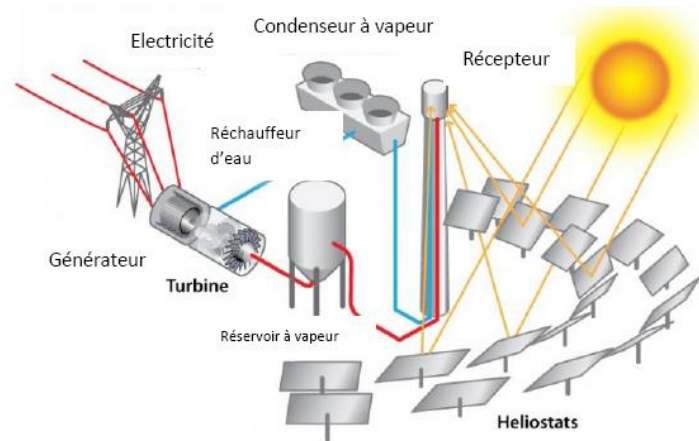
lumière solaire sur une petite surface. La lumière concentrée est ensuite transformée en chaleur sur un moteur thermique relié à un générateur pour produire de l'électricité. Ces champs solaires générateurs de l'électricité sont appelés les centrales solaires thermodynamiques à concentration.

Les centrales solaires thermodynamiques à concentration recouvrent l'ensemble des technologies qui visent à transformer le rayonnement solaire direct en chaleur à température très élevée selon le type de collecteur solaire utilisé, puis à convertir cette chaleur en énergie électrique, où les concentrateurs solaires sont fournis une quantité de chaleur considérable. Les concentrateurs solaires sont divisés en deux catégories : la 1<sup>ère</sup> est les concentrateurs ponctuels (les systèmes de concentration solaire par foyer) et la 2<sup>ème</sup> est les concentrateurs linéaires. Les concentrateurs solaires ponctuels sont les centrales solaire à tour « SPT » (les héliostats) et les centrales à miroirs paraboloides (Dish-Stirling), quant à les concentrateurs solaires linéaires sont les concentrateurs solaires cylindro-paraboliques (PTC) et les concentrateurs solaires linéaires de Fresnel (LFR). Nous rappelons que ces types de technologie sont appelés des systèmes solaires à concentration thermodynamique (solaire thermodynamique).

Les systèmes solaires à concentration thermodynamique solaires dépendent de l'utilisation de grand nombre de miroirs réfléchissants qui font orienter les rayons solaires directs vers un tube absorbeur ou vers un foyer ponctuel à travers lequel le fluide de travail passe. Ensuite, la chaleur est transférée du tube absorbeur ou du foyer au fluide caloporteur par convection. Pour obtenir cela, les miroirs réfléchissants doivent suivre le mouvement du soleil quotidiennement du lever au coucher pour sa capture et sa concentration dans le focus (linéaire ou ponctuel), est alors un échange de chaleur par convection se produit entre la paroi intérieure du foyer et le fluide qui se déplace à l'intérieur.

### **II.3.1. Les centrales solaires à tour (Les héliostats)**

Les centrales solaires à tour (Solar Power Tower SPT) sont composées des milliers de miroirs réfléchissants équipés d'un système de suivi du soleil en deux axes de rotation pour concentrer les rayons du soleil direct sur un récepteur central placé au sommet d'une tour au moyen d'un champ d'héliostats (miroirs géants).

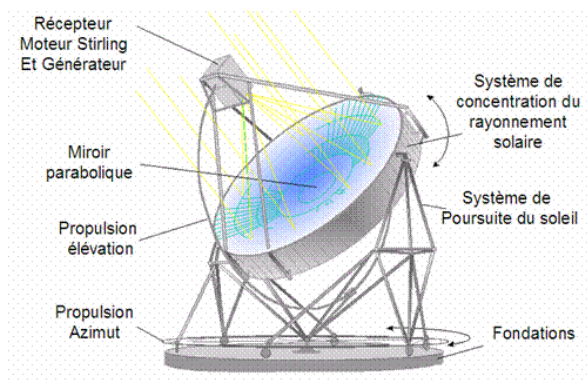


**Figure II. 1 :** Les composants d'une centrale solaire à tour pour la production d'électricité [22].

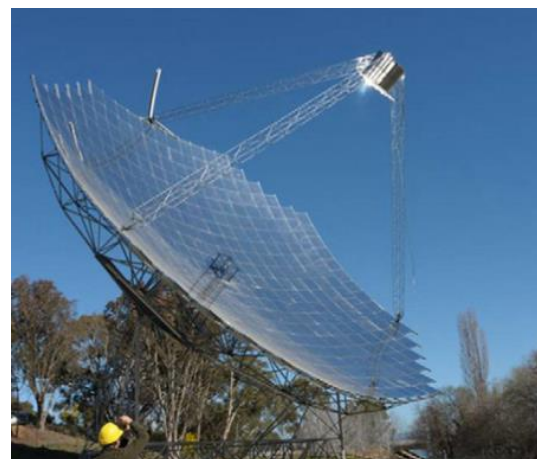
Ces centrales solaires (exemple : figure II.1) sont connues pour être l'un des plus prometteuses technologies pour la production d'électricité solaire dans la gamme de moyenne puissance [23, 24]. Ces systèmes ont déjà prouvé leur capacité à générer de l'électricité propre d'une taille de 20 MWe en Espagne, tandis qu'une usine de SPT de 100 MWe est en construction aux États-Unis [24].

### II.3.2. Les centrales à miroirs paraboloides (Dish-Stirling)

Les systèmes à miroirs paraboloides (Solar Parabolic Dishes « SPD » ou Dish-Stirling : figure II.2-3) sont de petites unités de conversion d'énergie solaire comparées à d'autres systèmes CSP (PTC, LFR et SPT). Les tailles de système typiques de SPD sont généralement comprises entre 5 (kW) et 25 (kWe).



**Figure II. 2 :** Schéma représentant un système solaire à concentration de type Dish-Stirling [25].



**Figure II. 3 :** Miroir parabolique développé par l'Université nationale australienne [26].

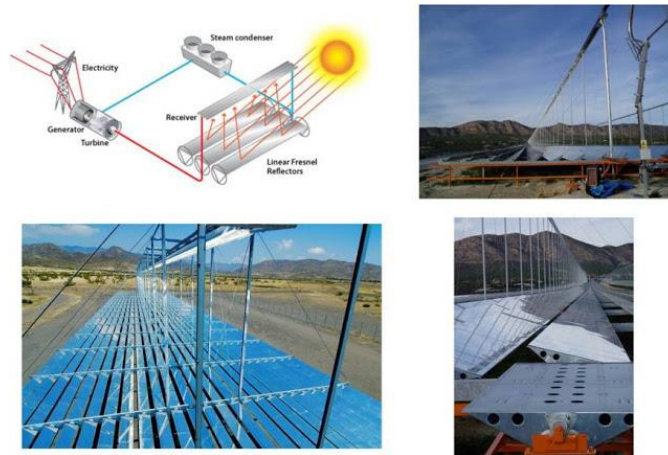
Cependant, il existe également des systèmes plus petits pour l'usage domestique. En général, les miroirs paraboloides sont équipés de moteurs Stirling en tant que moteurs thermiques. Cependant, des micro-turbines à gaz pourraient également être utilisées. En raison de la taille réduite des systèmes solaires miroirs paraboloides / moteurs, ils sont particulièrement adaptés aux applications décentralisées et hors réseau.

### **II.3.3. Les concentrateurs linéaires de Fresnel (Linear Fresnel Reflector LFR)**

On sait que le coût d'exploitation des énergies renouvelables est très élevé à l'heure actuelle, donc les coûts de production et l'efficacité du produit doivent être convenus afin d'avoir un appareil efficace avec un prix acceptable [6, 8, 16, 19, 27]. Pour les systèmes solaires thermodynamiques à concentration de type cylindro-paraboliques PTC, le coût de la conception du concentrateur solaire cylindro-parabolique est très élevé en raison, puisqu'elle repose sur la mise en forme du verre pour obtenir la forme parabolique du miroir réfléchissant, donc l'utilisation de miroirs réflecteurs plats réduira considérablement le coût de fabrication des concentrateurs solaires linéaires. Pour cette raison, une grande partie de la recherche scientifique a été orientée vers le développement du système solaire linéaire de Fresnel (LFR) figure II.4, et de nombreux pays comme l'Espagne et l'Allemagne ont largement exploité cette technologie de prix acceptable et de faible efficacité.

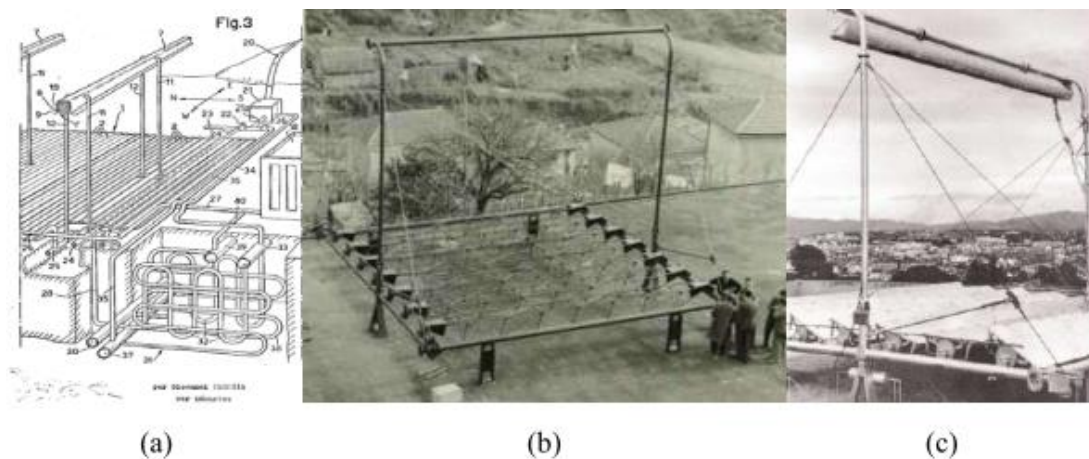
Le principe de fonctionnement d'un concentrateur linéaire de Fresnel réside dans ses miroirs plans (plats), où chacun de ces miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires directs vers un tube absorbeur [6, 8, 16, 19, 27]. Un fluide caloporteur est chauffé en circulant dans ce tube horizontal. Pour les centrales à moyenne puissance, l'énergie absorbée par le tube absorbant est transférée à un circuit d'eau, où la vapeur produite actionne une turbine qui produit de l'électricité. La plus grande centrale électrique de concentrateur linéaire de Fresnel jusqu'à présent, est l'usine de 30 (MWe) développée par NOVATEC SOLAR qui a été construite près de Murcia/Espagne.





**Figure II. 4 :** Schéma de principe et vue de centrales solaires à miroir de Fresnel [28].

La technologie porte le nom du scientifique français Augustin-Jean Fresnel, qui a inventé l'objectif de Fresnel au XVIII<sup>e</sup> siècle pour les phares. Son idée était de broyer une lentille convexe conventionnelle sur une lentille à plusieurs sections pour obtenir une lentille moins chère et plus légère, qui permet d'envoyer les rayons lumineux correctement dans une direction donnée [27, 29].

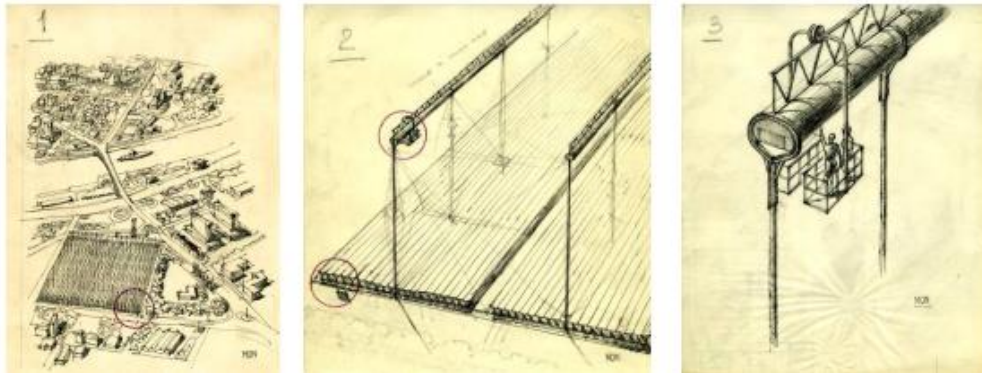


**Figure II. 5 :** Premier prototype LFR de Francia : a) Dessin du brevet LFR, brevet N° 18634. b) Bâtiment LFR en Italie, c) Tests LFR en France [29, 30].

L'idée principale du LFC a été inspirée de la lentille de Fresnel pour diviser un miroir parabolique en une série de miroirs réfléchissants pour concentrer les rayons collimatés sur un point focal ou une ligne, selon que les réflecteurs sont circulaires ou linéaires.

L'histoire du premier prototype LFR remonte à 1962 avant que Giovanni Francia ne dépose un brevet pour la technologie en 1963 en Italie. Le premier prototype LFR a été construit à Gênes et testé un an plus tard à la station solaire de Lacédémone-Marseille, France par

Francia et ses collègues (Figure II. 5). Cependant, l'histoire de la première étude à grande échelle de LFC remonte à la fin des années 60 quand Francia et ses collègues ont travaillé sur le projet de la ville solaire - Hypothèse pour une structure urbaine (Figure II. 6). Ce projet visait à utiliser l'énergie solaire pour la production d'électricité ainsi que le refroidissement et le chauffage des locaux pour une zone urbaine d'environ 100000 habitants [29, 30].



**Figure II. 6 :** *Les dessins de Francia de la grande centrale solaire LFR envisagée intégrée dans un contexte urbain d'environ 1965 [29].*

En bref, l'histoire de l'invention de cette technologie efficace, elle a été inventée par le physicien français Augustin Fresnel, la lentille de Fresnel a été conçue pour équiper le système optique des phares de signalisation marine. Le système est aujourd'hui repris à grande échelle pour concentrer le rayonnement solaire direct sur un tube horizontal en suivant la trajectoire du soleil par un et à deux axes de poursuite.

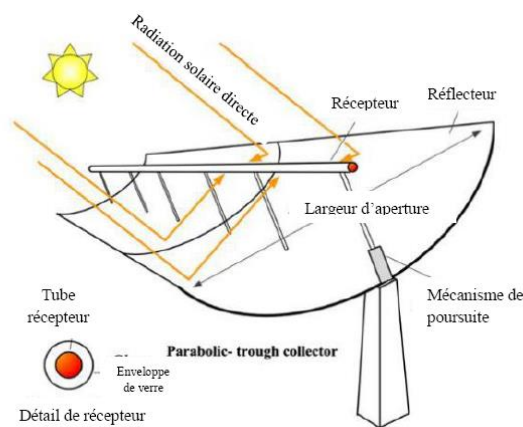
Généralement, les miroirs réfléchissants plats sont bien meilleur marché que les miroirs paraboliques, et les contraintes mécaniques imposées par la poussée du vent sont réduites grâce à la disposition plane des miroirs. En plus, le collecteur PTC est moins de prise au vent, puisque son infrastructure moins importante qu'une centrale à concentrateur solaire cylindro-paraboliques. Le seul inconvénient de cette technologie est son efficacité modeste, où la performance thermique est d'environ 30%.

### **II.3.4. Les concentrateurs solaires cylindro-paraboliques (PTCs)**

#### **a). Introduction**

Il y a deux types de concentrateurs solaires linéaires, le premier type est les concentrateurs cylindro-parabolique, où leurs rendement thermique a dépassé 60% mais il est une

technologie extrêmement coûteuse. Le deuxième type est le concentrateur linéaire de Fresnel [6, 8, 16, 19, 27].



**Figure II. 7 :** Schéma d'un collecteur solaire cylindro-parabolique (PTC) [22].

Les concentrateurs cylindro-paraboliques (Parabolic Trough Concentrator PTC, figure II.7) comprennent généralement un réflecteur parabolique et un récepteur à travers lequel circule un fluide caloporteur [15, 20, 21]. Le rayonnement solaire direct atteignant le PTC est réfléchi et focalisé sur la surface extérieure d'un tube absorbeur où l'énergie rayonnante est convertie en énergie thermique. Cette énergie thermique est ensuite amenée à la surface interne du tube absorbeur et transférée au fluide caloporteur par convection forcée. Ceci est considéré comme un problème de transfert de chaleur couplé avec des conditions géométriques complexes.

### b). Etat de l'art

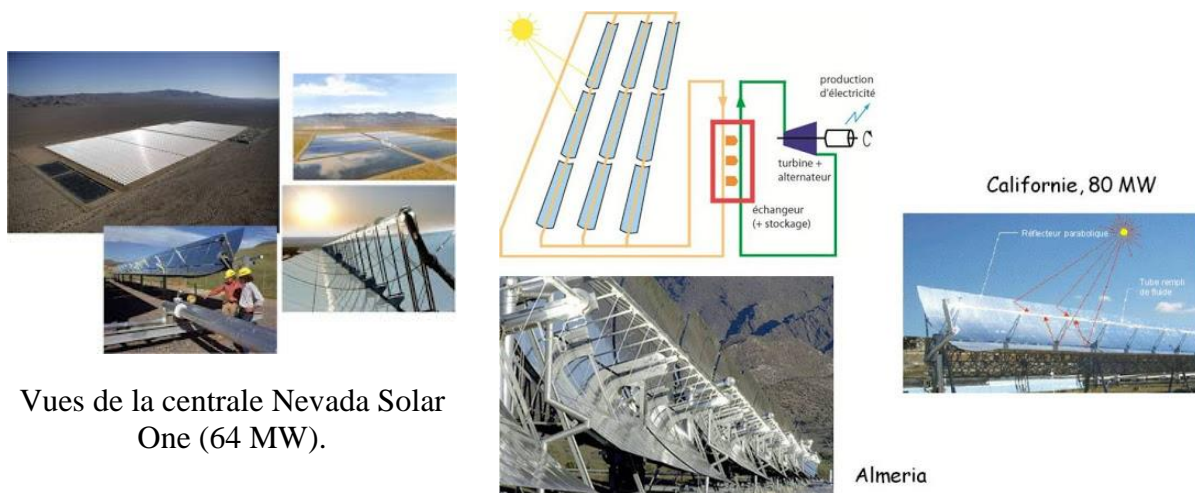
L'utilisation de collecteurs d'énergie solaire à concentration remonte à la fin du XIXe siècle. La technologie était à l'origine utilisée pour pomper de l'eau, bien que des applications plus inhabituelles comprenaient une presse à vapeur exposée à l'Exposition de 1902 à Paris. Selon US Department of Energy (2004), ce n'est qu'au milieu des années 1970 que le développement à grande échelle des concentrateurs cylindro-paraboliques a commencé aux États-Unis sous l'égide de l'Administration de recherche et de développement énergétiques (ERDA), plus tard le Département de l'énergie [31-33]. Cette évolution a été fortement influencée par des facteurs géopolitiques, tels que la crise pétrolière, et s'est concentrée sur la fourniture de chaleur industrielle plutôt que sur l'énergie électrique. Les applications typiques de la technologie de concentrateurs cylindro-paraboliques (PTCs) comprenaient le traitement du linge, le raffinage du pétrole et la production de vapeur pour la stérilisation des instruments médicaux.

Les concentrateurs solaires de type cylindro-parabolique sont de longues rangées parallèles de miroirs en verre incurvés concentrant l'énergie du soleil sur un tube absorbeur situé le long de sa ligne focale [15, 20, 21, 26, 31-33]. Donc, le concentrateur cylindro-parabolique est un capteur d'énergie solaire thermique conçu pour capturer le rayonnement solaire direct du soleil sur une grande surface et le concentrer sur une petite zone focale. La forme du concentrateur (PTC) doit être spécialement conçue pour que toute la lumière solaire réfléchi par la surface du capteur atteigne le même point focal, quelle que soit la partie du capteur que la lumière du soleil atteint en premier.

Les collecteurs solaires de cylindro-paraboliques sont fabriqués en pliant simplement une feuille de matériau réfléchissant ou fortement poli en une forme parabolique appelée parabole. Comme les ondes lumineuses solaires se déplacent essentiellement parallèlement les unes aux autres, ce type de collecteur solaire peut être dirigé directement vers le soleil tout en atteignant une sortie focale totale de toutes les parties du réflecteur en forme de cuvette [15, 20, 21, 26, 31-33].

Généralement, Ce type de concentrateurs suivent le soleil en tournant autour d'un axe nord-sud. Le fluide caloporteur (HTF) c'est une huile circule à travers les tubes absorbeurs. En fonctionnement normal, le fluide caloporteur chauffé laisse les collecteurs avec une température de sortie très élevée, puis pompé et passé à travers plusieurs échangeurs de chaleur où son énergie est transférée au fluide de travail de la centrale électrique, qui est de l'eau ou de la vapeur d'eau. La vapeur chauffée est utilisée à son tour pour entraîner un turbogénérateur pour produire de l'électricité [15, 20, 21, 26, 31-33].

L'un des éléments les plus importants à identifier dans les concentrés solaires est son efficacité optiques " $\eta_{opt}$ " et thermique " $\eta_{th}$ ". Le rendement thermique du concentrateur est le rapport entre la chaleur utile «  $q_{utile}$ , (W) » transmise au fluide caloporteur (liquide ou gaz) et la puissance «  $Q_s$ , (W) » de rayonnement solaire direct « DNI, ( $W/m^2$ ) » qui atteint la surface utile de collecteur (PTC). L'énergie calorifique de la chaleur utile peut être utilisée ultérieurement pour le chauffage (air, eau) ou aussi dans plusieurs procédés industriels (production d'électricité, climatisation solaire, agriculture, ...etc.).



Vues de la centrale Nevada Solar One (64 MW).

**Figure II. 8 :** Schéma de principe d'une centrale à concentrateur cylindro-paraboliques [34].

Les systèmes solaires thermiques jouent un rôle important dans la fourniture d'énergie non polluante pour les applications domestiques et industrielles. Comme ce mémoire examine la possibilité de produire de l'électricité à travers des concentrateurs solaires, nous allons énumérer quelques-unes des études que nous avons trouvées dans la littérature, où de nombreuses études scientifiques sont menées sur ce type de concentrateurs solaires.

Pour les centrales solaires mondiales à concentration (exemple : figure II.8), elles disposaient d'une puissance totale installée de 4815 MW en 2016, contre 354 MW en 2005. En 2017, l'Espagne représentait près de la moitié de la capacité mondiale, avec une puissance de 2300 MW, faisant de ce pays le leader mondial dans les domaines d'exploitation des centrales solaires thermodynamiques à concentration. Les États-Unis suivent avec une puissance de 1740 MW. L'intérêt est également notable en Afrique du Nord et au Moyen-Orient, ainsi qu'en Inde et en Chine. Le marché mondial a été dominé par les usines paraboliques, qui représentaient 90% des usines des concentrations solaires thermodynamique à un moment donné. Les plus grands projets des concentrateurs solaires thermodynamiques au monde sont l'installation d'énergie solaire de « IVANPAH » avec une puissance de 392 MW aux États-Unis qui utilise la technologie des tours d'énergie solaire, le projet « MOJAVE SOLAR » avec une puissance de 354 MW aux États-Unis utilisant des concentrateurs cylindro-paraboliques [15, 20, 21, 26, 31-33].

Ceci est un bref aperçu des concentrateurs solaires, en particulier de type concentrateur cylindro-parabolique, où nous avons discuté de la possibilité de développer un projet pour ce

type. Nous nous sommes concentrés dans ce chapitre sur des études faites sur la région d'El-Oued.

#### **II.4. Centrales solaires de type cylindro-paraboliques achevés en Algérie : Cas de la centrale hybride (Solar/Gas) de Hassi R'mel**

La première centrale hybride solaire-gaz (SPP1) en Algérie a été inaugurée le 14 Juillet 2011 (présentée sur la figure II.9), cette centrale est située à Hassi R'mel. On entend par là qu'elle fonctionne au gaz naturel et à l'énergie solaire. Elle produit 150 MW (puissance nette ISO) avec un apport solaire de 20% de la puissance nominale, soit 30 MW. Cette centrale est composée de deux parties, le champ solaire et le cycle combiné [1]:

- Le champ solaire est constitué de capteurs cylindro-paraboliques, répartis sur deux surfaces. Chaque surface contient 28 boucles de quatre modules, répartis en 2 rangées. Le module est formé de 12 segments comportant chacun plusieurs miroirs. La composante directe du rayonnement solaire incident est concentrée par les miroirs sur un récepteur situé au point focal de la parabole. Un fluide caloporteur HTF (Heat Transfer Fluid) circule à l'intérieur du récepteur. Le fluide chauffé, dont la température peut atteindre 393°C, passe à travers une série d'échangeurs de chaleur pour céder sa chaleur à l'eau et produire ainsi de la vapeur d'eau (générateur de vapeur solaire).
- Le cycle combiné est constitué de deux turbines à gaz (fonctionnant au gaz naturel) dont la puissance nominale unitaire est de 45 MW. La chaleur de combustion de ces turbines est récupérée dans deux chaudières horizontales à circulation naturelle. Ces dernières font fonctionner une turbine à vapeur d'une puissance nominale de 80,08 MW.



**Figure II. 9 :** *Vue de la centrale hybride (Solar/Gas) de Hassi R'mel [14].*

Il est à noter que le point fort de cette centrale hybride est l'ajout de la vapeur produite par le champ solaire à celle récupérée des turbines à gaz pour alimenter la turbine à vapeur. La puissance électrique produite par la centrale augmente en conséquence.

## **II.5. Conclusion**

Il existe de nombreux types de configurations de concentrateurs solaires, allant de cylindriques qui se concentrent sur une ligne (tube) ou circulaire qui se concentrent sur un point (tour de puissance). Comme cela a été déjà mentionné, le but principal de ces configurations est d'augmenter le flux de rayonnement sur le récepteur, et cet effet est obtenu grâce à la réflexion de la lumière provenant de multiples surfaces de miroirs anglés ou incurvés.

Enfin, la technologie de concentrateurs solaires de type cylindro-parabolique (PTC) est la plus répandue parmi les centrales thermiques solaires à grande échelle. Le potentiel de ce type de collecteurs à concentration est très élevé et peut fournir des températures de fluide de sortie allant jusqu'à 500 ° C. Le PTC est le collecteur à foyer linéaire, qui consiste en un miroir parabolique à courbure cylindrique, qui réfléchit la lumière du soleil sur un récepteur tubulaire positionné dans la ligne de mise au point de la parabole. Le récepteur tubulaire contient le fluide qui absorbe la chaleur et la transfère via la circulation à la chaudière ou à un autre dispositif pour produire de la vapeur qui entrainera une turbine à vapeur pour générer l'électricité.

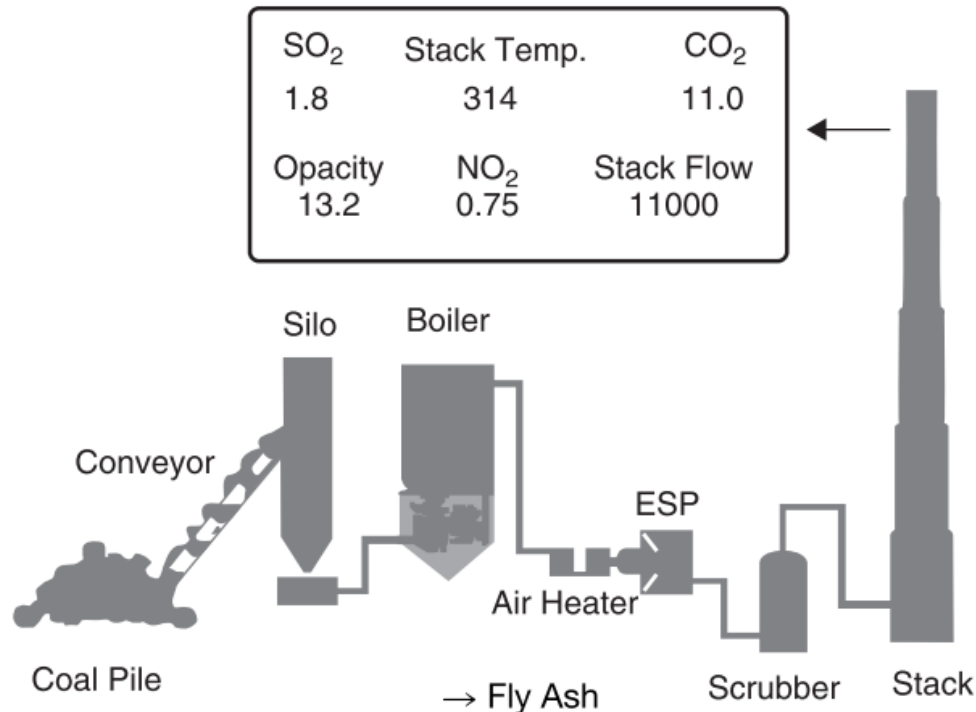
### III. Technologies de production d'électricité

#### III.1. Introduction

La croissance accélérée de l'utilisation de l'électricité a fait augmenter la production d'électricité dans le monde entier. Les sources d'approvisionnement en énergie de base sont:

- La production d'électricité thermique : les combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz;
- La production d'hydroélectricité : l'hydroélectricité des lacs et des rivières;
- La production d'électricité nucléaire : les matières de fission nucléaire;
- La production d'énergie verte à partir d'énergies renouvelables, de l'énergie solaire, de l'énergie éolienne, de la biomasse, de l'énergie géothermique, ... etc.

L'énergie renouvelable de substitution joue un rôle important dans le découragement de la continuité des grands services publics d'électricité, où les centrales à combustibles fossiles (charbon et pétrole) émettent de grandes quantités de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère voir figure III.1.



**Figure III. 1 :** Exemple de systèmes de surveillance des émissions continues pour l'environnement [17].



Le nuage de CO<sub>2</sub>, au fur et à mesure de sa croissance au fil des ans, agit comme un bouclier empêchant le rayonnement thermique de la terre et augmentant les températures globales de la terre. Cela a permis de limiter la quantité de CO<sub>2</sub> pouvant être rejetée dans l'air par une usine donnée à sa capacité.

Le monde entier porte actuellement son attention sur l'exploitation des sources d'énergie renouvelables, notamment l'énergie solaire. Et l'un des axes les plus importants de l'énergie solaire, on trouve l'axe de la production d'électricité des concentrateurs solaires.

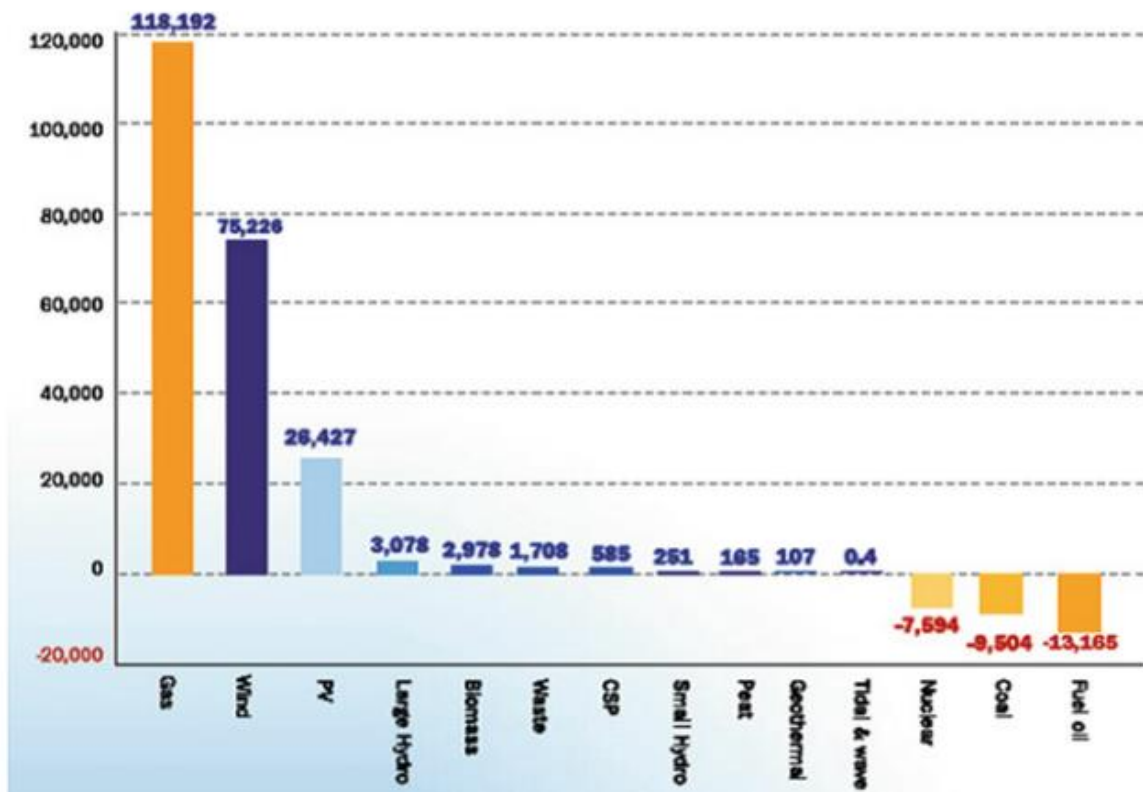
Les systèmes solaires à concentration (linéaires) offrent la possibilité de produire de l'électricité, où les températures pouvant aisément dépasser les 500 °C. Ces technologies offrent une véritable alternative à la consommation des ressources fossiles avec un faible impact environnemental et un fort potentiel de réduction des coûts ainsi que la possibilité de l'hybridation de ces installations. La puissance électrique produite par un système de conversion solaire dépend de l'intensité du flux lumineux selon la position du soleil qui varie le long de la journée.

Notre objectif principal dans ce chapitre est de faire une présentation des différentes méthodes de production d'électricité. Ensuite, nous donnerons des détails sur les composants de base d'une centrale solaire.

### **III.2. Technologies de production d'électricité**

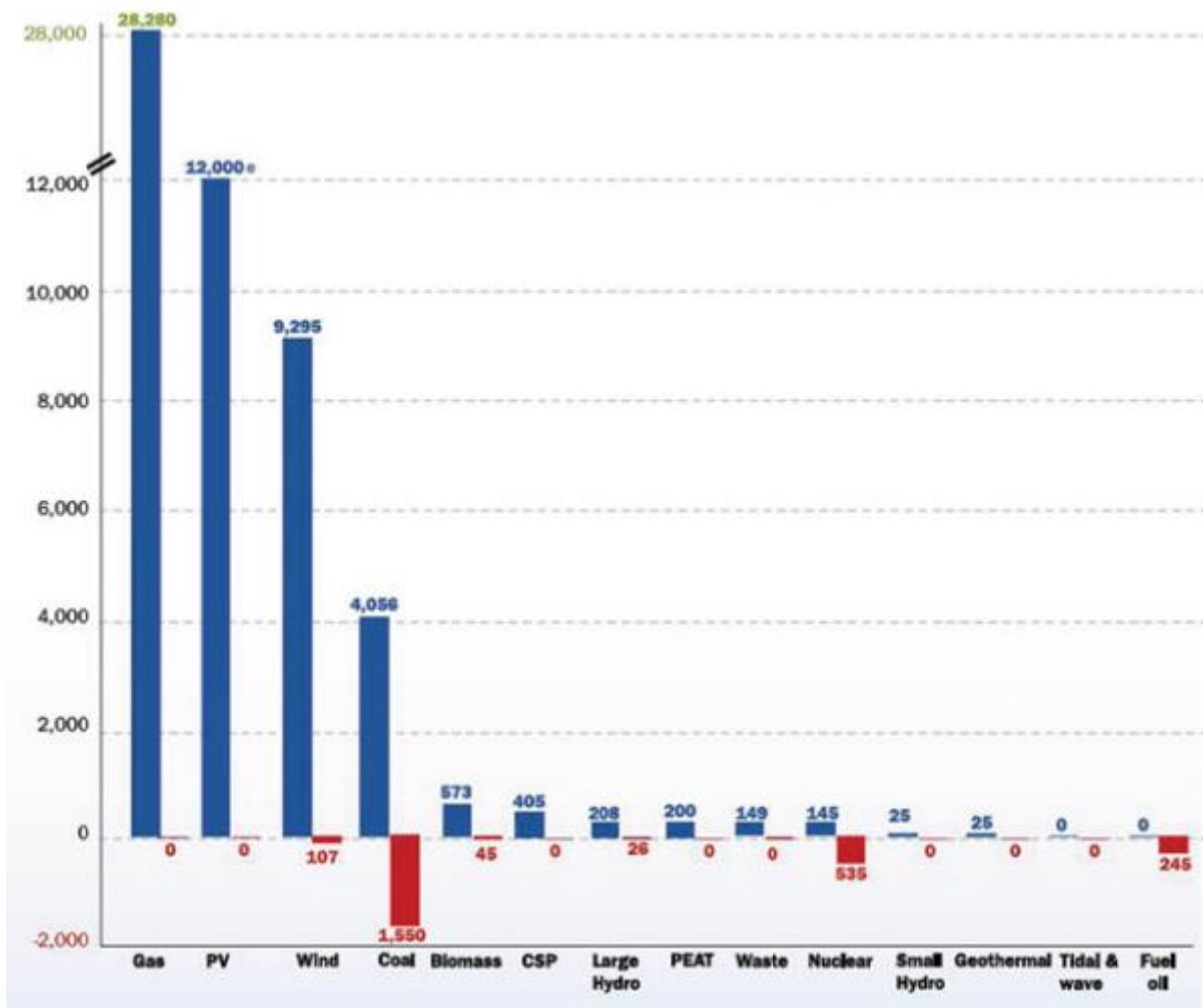
Plusieurs sources d'énergie peuvent être utilisées aujourd'hui pour la production d'électricité. Ceux-ci sont:

- Les combustibles fossiles, principalement le pétrole, le charbon et le gaz, ainsi que le pétrole et le gaz non conventionnels;
- Les énergies renouvelables, principalement l'hydroélectricité, l'énergie solaire, l'énergie éolienne, la biomasse, la géothermie et les vagues;
- L'énergie nucléaire.



**Figure III. 2 :** La production d'électricité nette dans l'UE au cours de la période 2000-2010 (en MW) [35].

À partir de la Figure III. 2, le gaz naturel est la principale source d'énergie dans le bouquet énergétique européen, suivi par le vent et le solaire photovoltaïque. Cependant, cette situation pourrait être différente dans les années à venir. En septembre 2010, la Commission européenne (CE) a publié ses nouveaux scénarios énergétiques de l'Union Européenne (UE) intitulés "Tendances énergétiques de l'UE à l'horizon 2030". La Commission s'attend à ce que 64% de la nouvelle puissance totale soit de l'énergie renouvelable; 17% de gaz naturel; 12% de charbon; 4% d'énergie nucléaire; et 3% d'huile. Dans le cas de l'énergie nucléaire, la situation future dans l'utilisation de ce type de source d'énergie pour la production d'électricité pourrait être totalement différente à la suite de l'accident nucléaire de Fukushima. On s'attend à ce que le pourcentage d'énergie nucléaire dans le bouquet énergétique européen soit inférieur aux prévisions [35].



**Figure III. 3 :** Nouvelle capacité installée dans l'UE et capacité hors service en MW (total 52 820 MW) [36].

Selon la Figure III. 3, on peut affirmer qu'en 2010, le gaz naturel était le seul type de source d'énergie conventionnelle à augmenter sa capacité installée de 28280 MW au niveau actuel. En revanche, le charbon et le pétrole ont respectivement réduit leur capacité installée de 1550 et 245 MW. Cette tendance devrait se poursuivre au cours des prochaines années [36].

Nous avons présenté ces résultats pour l'Europe, pour montrer que l'Algérie peut exploiter les énergies renouvelables, notamment les énergies solaires, car l'Algérie est riche en sources d'énergies renouvelables illimitées. Mais jusqu'à présent, l'Algérie dépend entièrement des sources fossiles [14,17], en particulier du gaz naturel, que nous aborderons à la fin de ce chapitre.

### III.2.1. Production d'électricité à base d'énergie fossile

La production d'électricité à base d'énergie fossile a parcouru un long chemin, des moteurs alternatifs à vapeur aux turbines à vapeur, des moteurs diesel aux turbines à gaz et de là aux centrales à cycle combiné (CCPPs). Les rendements thermiques par unité ont régulièrement augmenté. Les PPCCs devraient être les principaux générateurs pour le moment. Aujourd'hui, 60% de l'électricité mondiale provient de la production fossile. Les opérations de Méga-échelle en électricité fossile ont été attaquées sur de nombreux fronts.

#### a. Centrale électrique à base d'une turbine à gaz

Dans le cas de la production de fossiles, les combustibles les plus couramment utilisés sont le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Au cours de la dernière décennie, le gaz naturel a connu une croissance rapide. Viennent ensuite les énergies renouvelables, dont la croissance devrait être beaucoup plus rapide. Le nucléaire attire également l'attention et devrait connaître une croissance rapide.

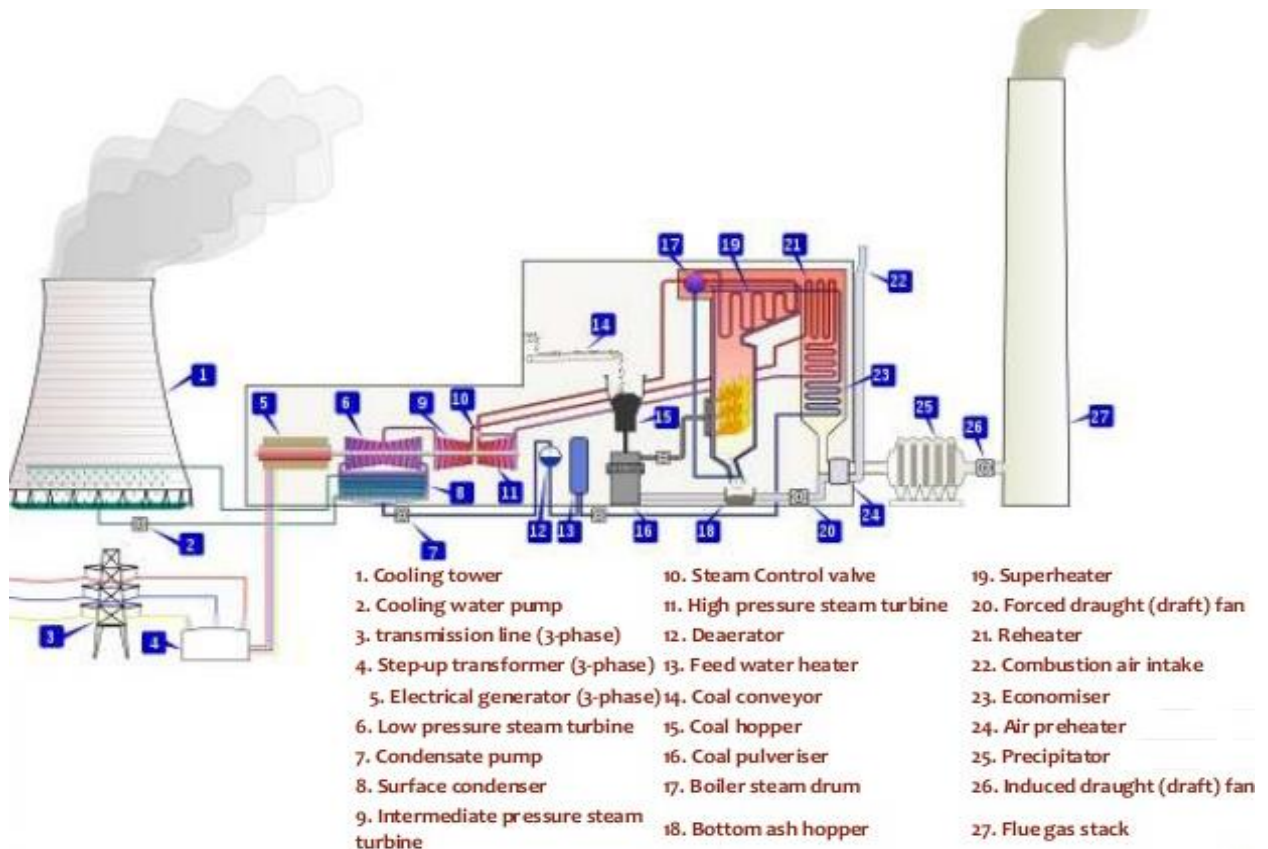
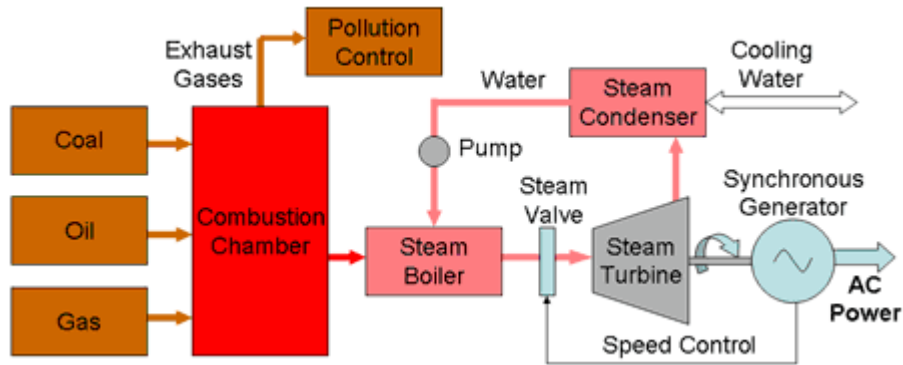


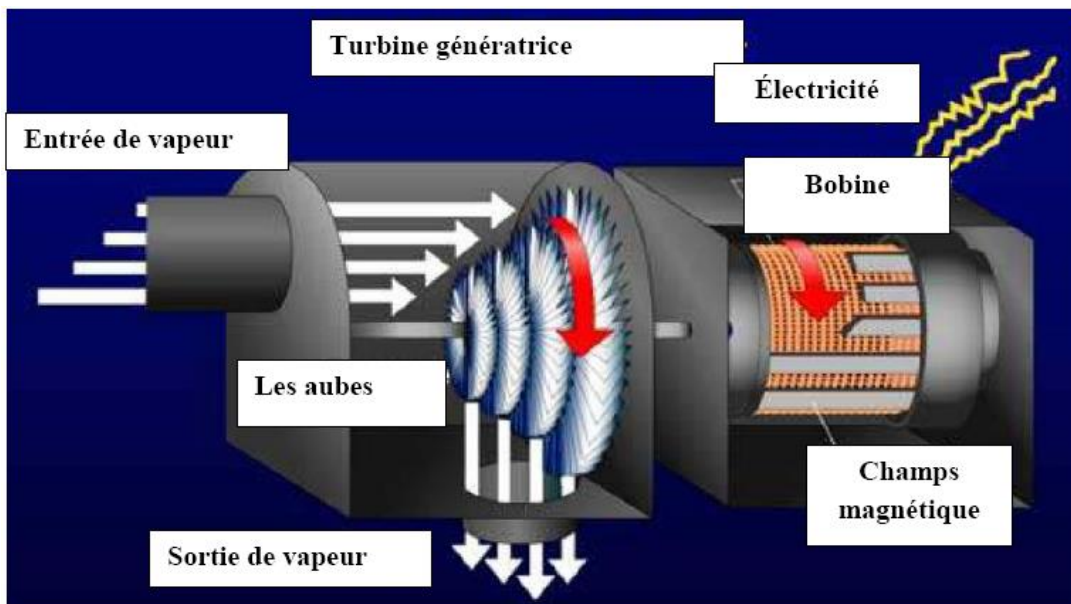
Figure III. 4 : Éléments d'une centrale électrique au Charbon [37].

Dans la Figure III. 4, nous avons donné un exemple sur la manière de produire de l'électricité en utilisant du charbon.



**Figure III. 5 :** *Types des centrales électriques conventionnelles à turbine à vapeurs [37]*

Ce cycle est similaire à toutes les sources fossiles (gaz, charbon, fioul), où les sources sont brûlées dans les brûleurs d'une chaudière (figure III.5). Le charbon est d'abord réduit en poudre, le fioul est chauffé pour le rendre liquide puis vaporisé en fines gouttelettes et le gaz naturel est injecté directement sans traitement préparatoire.

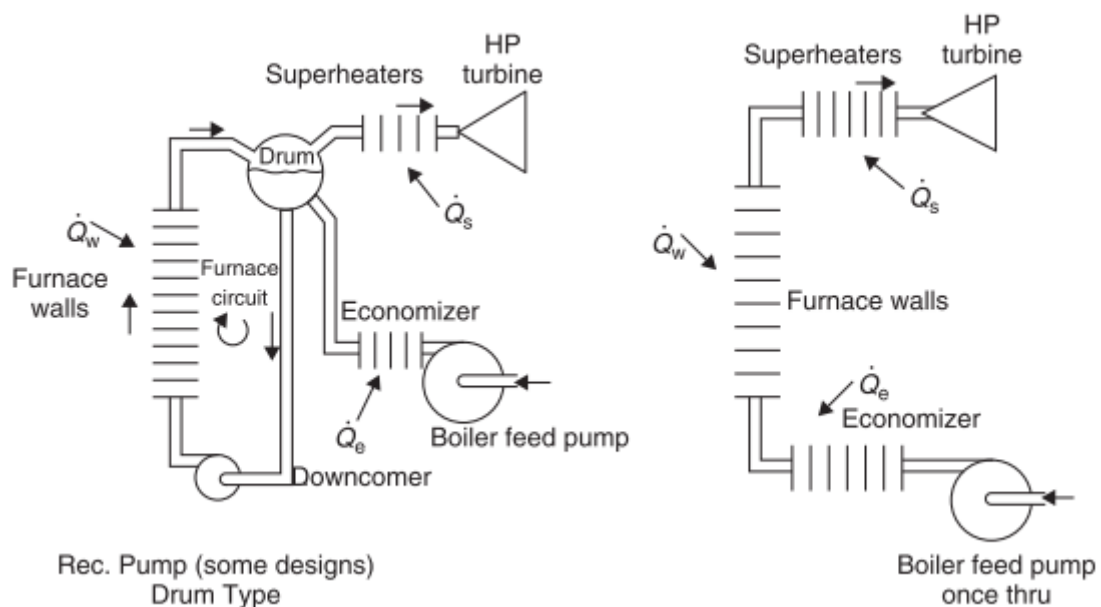


**Figure III. 6 :** *schématisation d'une turbine générant de l'électricité [37].*

La chaudière de génération est tapissée de tubes dans lesquels circule de l'eau froide. En brûlant, le combustible (gaz, charbon, fioul) dégage de la chaleur qui va chauffer cette eau.

L'eau se transforme en vapeur, envoyée sous pression vers les turbines (figure III.6). Il existe deux types de chaudières de génération :

- Les anciennes chaudières, qui ont une durée de vie assez longue et fonctionnent encore aujourd'hui, sont à tambour, dans lesquelles la chaleur est absorbée dans les parois du four et dans un tambour. La vapeur est de nouveau chauffée à l'extérieur dans l'ancien système par un surchauffeur. Il passe ensuite aux turbines à vapeur.
- Les nouvelles chaudières, le chauffage est assuré par un économiseur, des parois de four et un surchauffeur fonctionnant en tandem. Cela s'appelle un système "à passage unique" (figure III.7).



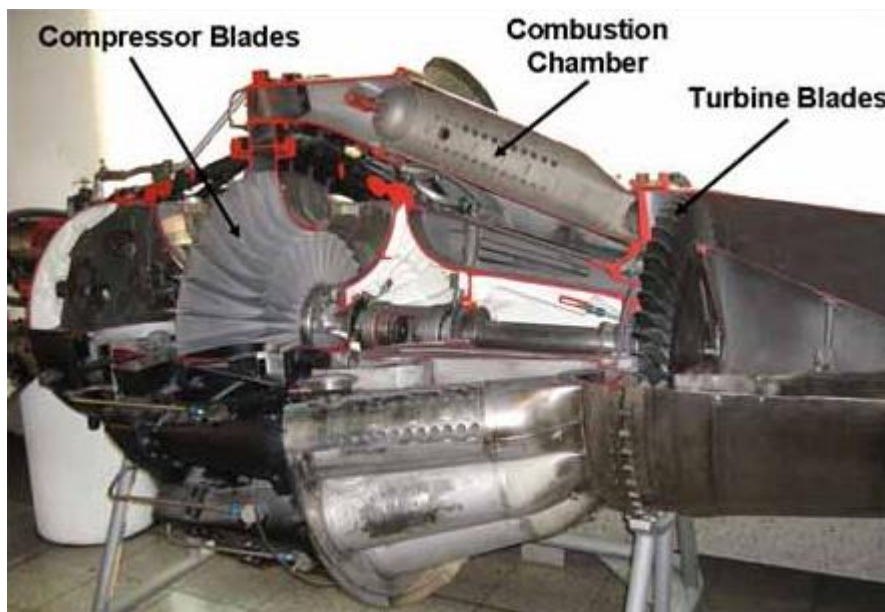
**Figure III. 7 :** Types de générateurs de vapeur [36].

Ensuite, la vapeur fait tourner une turbine qui entraîne à son tour un alternateur, c'est-à-dire les moteurs à turbine à gaz tirent leur énergie de la combustion du combustible dans une chambre de combustion et utilisent les gaz de combustion à écoulement rapide pour entraîner une turbine de la même manière que la vapeur haute pression entraîne une turbine à vapeur.

Le processus thermodynamique utilisé par la turbine à gaz est connu sous le nom de cycle de Brayton. Analogue au cycle Carnot dans lequel l'efficacité est maximisée en augmentant la différence de température du fluide de travail entre l'entrée et la sortie de la machine,

l'efficacité du cycle de Brayton est maximisée en augmentant la différence de pression à travers la machine. La turbine à gaz comprend trois composants principaux: un compresseur, une chambre de combustion et une turbine [14-37].

Le fluide de travail, l'air, est comprimé dans le compresseur (compression adiabatique - pas de gain ou de perte de chaleur), puis mélangé au carburant et brûlé par la chambre de combustion dans des conditions de pression constantes dans la chambre de combustion. Le gaz chaud résultant se dilate dans la turbine pour effectuer des travaux (expansion adiabatique). Une grande partie de l'énergie produite dans la turbine est utilisée pour faire fonctionner le compresseur et le reste est disponible pour faire fonctionner l'équipement auxiliaire et effectuer un travail utile. Le système est un système ouvert car l'air n'est pas réutilisé de sorte que la quatrième étape du cycle, le refroidissement du fluide de travail, est omise.



**Figure III. 8 :** *Aéro de turbine à gaz [38].*

Les turbines à gaz ont un rapport puissance / poids très élevé et sont plus légères et plus petites que les moteurs à combustion interne de même puissance. Bien qu'ils soient mécaniquement plus simples que les moteurs alternatifs, leurs caractéristiques de fonctionnement à grande vitesse et à haute température nécessitent des composants de haute précision et des matériaux exotiques les rendant plus coûteux à fabriquer (figure III.8).

### **b. Procédure de production d'électricité fossile**

Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif. Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à très haute et haute tension.

À la sortie de la turbine, la vapeur est à nouveau transformée en eau grâce à un condenseur dans lequel circule de l'eau froide en provenance de la mer ou d'un fleuve. L'eau ainsi obtenue est récupérée et re-circule dans la chaudière pour recommencer un autre cycle. L'eau utilisée pour le refroidissement est restituée à son milieu naturel ou renvoyée dans le condenseur. Les fumées de combustion sont dépoussiérées grâce à des filtres et sont évacuées par des cheminées.

De plus, dans les applications de production d'électricité, la turbine est utilisée pour entraîner une génératrice synchrone qui fournit la puissance électrique en fonction de la fréquence alternative du réseau électrique.

### **c. Types de configuration des turbines à gaz dans les centrales électriques**

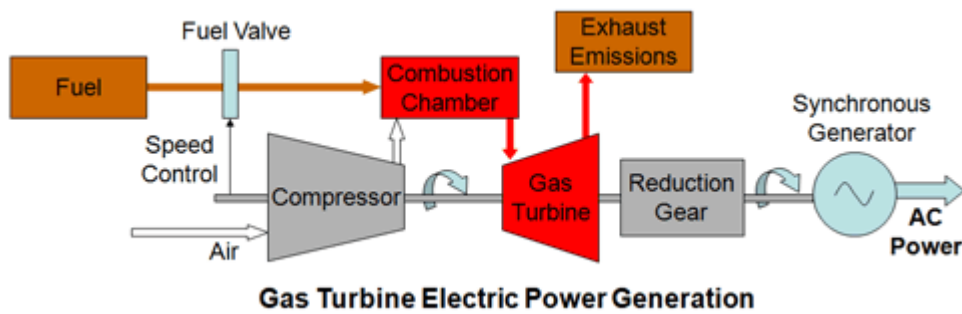
La turbine à gaz a connu une augmentation récente de popularité dans le secteur de la production d'électricité. Jusqu'à la fin des années 1960, les turbines à gaz étaient presque exclusivement réservées à l'industrie aéronautique. Dans les années 1970 et 1980, ils ont commencé à être favorisés en tant que groupes électrogènes de secours et de pointe en raison de leur facilité de démarrage rapide. C'est au cours des années 90 qu'ils se sont établis, de sorte qu'à la fin du vingtième siècle, la turbine à gaz était devenue l'un des moteurs les plus utilisés pour les nouvelles applications de production d'électricité [36].

On sait que pour optimiser son efficacité, la turbine à gaz doit fonctionner à une vitesse de rotation élevée (5000 à 6000 tours/min dans une plage de puissance de 10 à 40 MW) [36].

Généralement, les générateurs à turbine à gaz sont utilisés dans deux configurations de base. Elles sont :

- Systèmes simples composés d'une turbine à gaz entraînant un générateur électrique ;



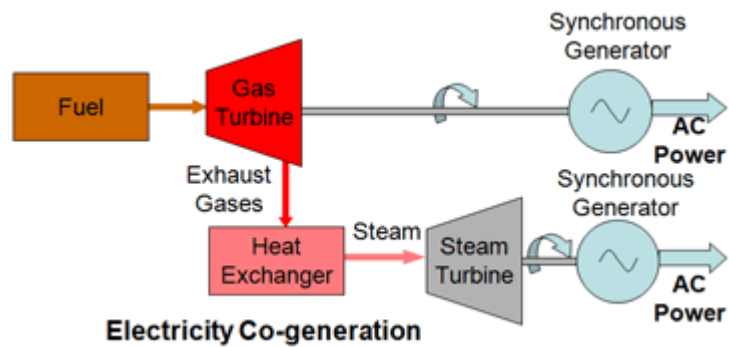


**Figure III. 9 :** Boucle simple de production d'électricité à turbine à gaz [40].

Pour minimiser la taille et le poids de la turbine pour une puissance de sortie donnée, il convient de maximiser la production par unité de débit d'air. Ceci est obtenu en maximisant le débit d'air à travers la turbine, qui à son tour dépend de la maximisation du rapport de pression entre l'entrée d'air et la sortie d'échappement. Dans les applications à cycle simple, l'augmentation du rapport de pression se traduit par des gains d'efficacité à une température de chauffe donnée, mais il existe une limite car l'augmentation du rapport de pression signifie que le compresseur consomme plus d'énergie [figure III.9].

Une turbine à gaz consomme des quantités considérables d'énergie uniquement pour entraîner son compresseur. Comme avec tous les moteurs thermiques cycliques, une température de fonctionnement maximale plus élevée dans la machine signifie une plus grande efficacité (loi de Carnot), mais cela signifie également que les gaz d'échappement chauds dépassent généralement les 1000 °C. Par conséquent, les rendements des turbines à cycle simple sont assez faibles. Pour les installations lourdes, les rendements de conception se situent entre 30% et 40%. (Les rendements des moteurs aéronautiques sont de l'ordre de 38% et 42%, tandis que les micro-turbines de faible puissance (<100 kW) n'atteignent que 18% à 22%) [36]. Bien que l'augmentation de la température de cuisson augmente la puissance de sortie à un rapport de pression donné, l'efficacité diminue également en raison de l'augmentation des pertes dues à l'air de refroidissement nécessaire pour maintenir les composants de la turbine à des températures de fonctionnement raisonnables.

- Systèmes à cycle combiné conçus pour une efficacité maximale dans laquelle les gaz d'échappement chauds de la turbine à gaz sont utilisés pour produire de la vapeur afin d'alimenter une turbine à vapeur, les deux turbines étant connectées à des générateurs d'électricité.



**Figure III. 10 :** Boucle de cogénération d'énergie électrique à turbine à gaz [14].

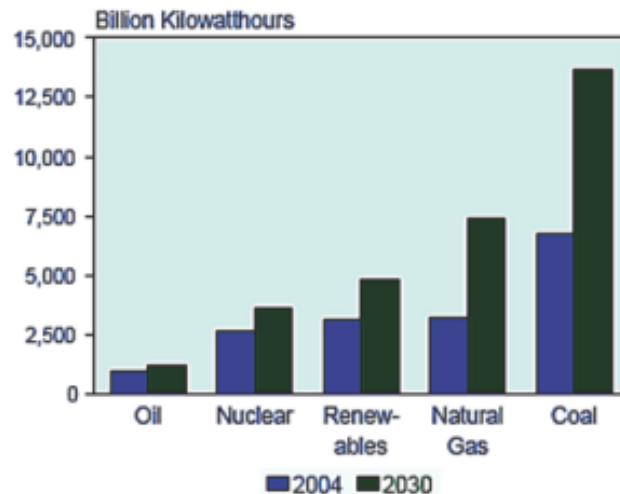
Il est toutefois possible de récupérer de l'énergie à partir de la chaleur perdue de systèmes à cycle simple en utilisant les gaz d'échappement dans un système hybride pour augmenter la vapeur afin de faire fonctionner un groupe électrogène à turbine à vapeur (figure III.10). Dans de tels cas, la température d'échappement peut être réduite à 140 °C, ce qui permet d'obtenir des rendements pouvant atteindre 60% dans les systèmes à cycle combiné [14]. Dans les applications à cycle combiné, les augmentations du rapport de pression ont un effet moins prononcé sur l'efficacité, car l'essentiel de l'amélioration provient de l'augmentation du rendement thermique de Carnot résultant de l'augmentation de la température de cuisson.

Enfin, l'efficacité du cycle simple est obtenue avec des rapports de pression élevés. L'efficacité du cycle combiné est obtenue avec des rapports de pression plus modestes et des températures de cuisson plus élevées.

### III.2.2. Production d'électricité à base d'énergie Nucléaire

L'énergie nucléaire est très développée dans toute la région européenne et plusieurs de ses États membres connaissent l'utilisation de l'énergie nucléaire pour la production d'électricité depuis les années soixante. Cependant, certains États membres de l'Union Européenne (UE) ont commencé à mettre en œuvre une politique énergétique interdisant ou annulant l'utilisation de l'énergie nucléaire à cette fin spécifique, après l'accident nucléaire survenu à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. L'Allemagne, la Suisse, le Danemark, l'Autriche et l'Italie, entre autres, ont renforcé leur politique énergétique en rejetant, dans certains cas, et en annulant dans d'autres, l'utilisation de l'énergie nucléaire pour la production d'électricité à l'avenir. Dans le cas spécifique de l'Allemagne, huit de ses réacteurs nucléaires en service en

2011 ont été fermés à la suite de l'accident nucléaire survenu à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. Le Royaume-Uni a fermé une unité. La France a déclaré son intention de réduire à 50% la participation de l'énergie nucléaire dans la production d'électricité dans le pays à l'avenir [1,9].



**Figure III. 11 :** *Types de production d'électricité mondiale pour la période 2004-2030 [9].*

Sans aucun doute, la sécurité énergétique, les prix du pétrole et les émissions de carbone peuvent influencer la mise en œuvre de cette politique énergétique au cours des prochaines années si ces pays ne peuvent accroître la participation des sources d'énergie renouvelables à la production d'électricité. La production d'électricité estimée à partir de l'énergie nucléaire est la quatrième de la production totale d'électricité d'ici 2040 (voir figure III.11), mais cette projection peut être changée de manière significative à l'avenir.

Depuis la crise pétrolière des années 70, plusieurs pays européens ont compris le besoin urgent d'utiliser l'énergie nucléaire pour produire de l'électricité autant que possible. La technologie nucléaire a été suffisamment utilisée dans les années 1960, 1970 et 1980 grâce à la construction de centaines de centrales nucléaires aux États-Unis, au Canada, en Europe et en Russie, entre autres. L'UE-28 possède le plus grand nombre de centrales nucléaires commerciales au monde: 184 unités sont en service dans 17 pays, fournissant environ 27% de l'électricité de l'UE et 60% de l'électricité à faible teneur en carbone [1,9]. Bien que l'énergie nucléaire soit une technologie éprouvée, certains États membres de l'UE sont confrontés à des incertitudes concernant l'acceptation par le public en raison de la perception des risques et

souvent par l'absence de solutions techniques disponibles pour l'élimination à long terme des déchets nucléaires. L'accident nucléaire survenu à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi au Japon en mars 2011 aggrave encore les problèmes d'acceptation publique dans certains États membres de l'UE. La possible augmentation des exigences de sécurité pourrait affecter la compétitivité des capacités existantes des États membres de l'UE utilisant désormais l'énergie nucléaire pour la production d'électricité à plus grande échelle.

Dans le même temps, l'UE espère également que l'utilisation de sources d'énergie renouvelables pour la production d'électricité continuera d'augmenter au cours des prochaines années pour atteindre 24% en 2030 et plus de 25% (pourrait atteindre 29% ou plus) en 2050 [1,9].

#### **a. L'utilisation de l'énergie nucléaire pour la production d'électricité**

La capacité installée des centrales nucléaires a changé en 2011 principalement à cause de la fermeture immédiate de 8,4 GW de capacités nucléaires allemandes à la suite de l'accident nucléaire de Fukushima Daiichi, qui a amené le gouvernement à adopter une Loi 2022 [1,9]. Dans tous les autres États membres de l'Union européenne utilisant l'énergie nucléaire, à l'exception de la France et du Royaume-Uni, la capacité installée a en fait légèrement augmenté (0,8 GW) entre 2010 et 2011, principalement en raison de la réactivation. Les centrales nucléaires représentent désormais 14% de la capacité totale installée dans l'UE [9]. Bien qu'un total de 1 GW de nouvelles centrales à combustibles fossiles ait été mis en service en 2011, leur part de la capacité totale installée - environ 52% - n'a pas changé en raison de l'ajout simultané de nouvelles capacités de production d'énergie renouvelable.

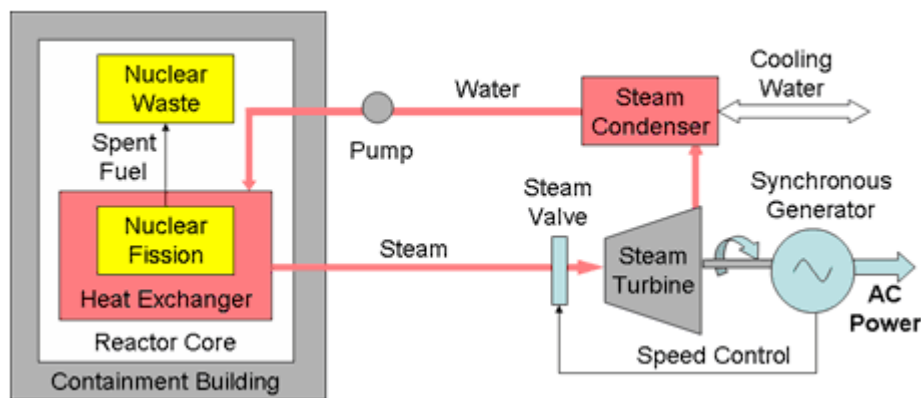
#### **b. Procédure de production d'électricité nucléaire**

Dans les réactions chimiques associées à la combustion, les atomes dans les molécules des matériaux actifs se réorganisent en de nouvelles molécules plus stables dans lesquelles ils sont plus étroitement liés et libèrent le surplus d'énergie sous forme de chaleur.

Dans les réactions nucléaires, ce sont les particules sous-atomiques dans le noyau atomique, les protons et les neutrons, qui se réorganisent pour former de nouveaux éléments ou isotopes avec des noyaux plus stables. Dans ce cas, l'énergie libérée par la réaction sous forme

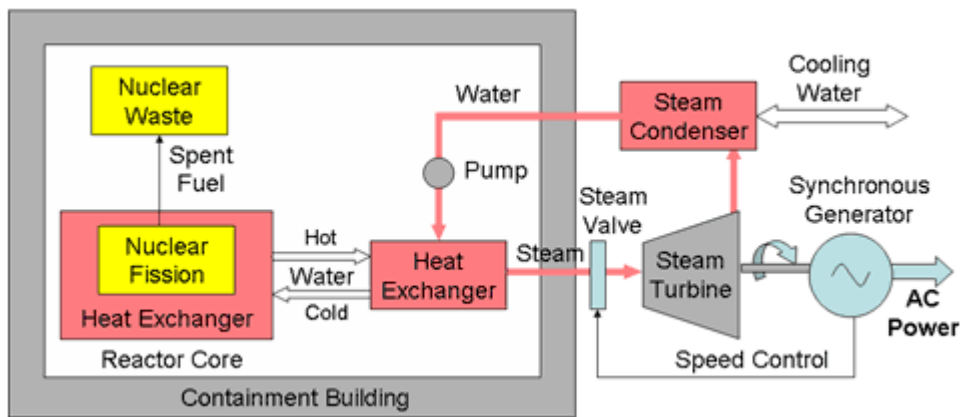
d'énergie cinétique (manifeste sous forme de chaleur) et d'énergie électromagnétique (rayonnement gamma) est des millions de fois supérieure.

La puissance que peut produire l'eau qui se transforme en vapeur est contrôlée et utilisée depuis des centaines d'années. Dans un réacteur nucléaire, cette réaction est provoquée par la chaleur générée par le processus de fission nucléaire. L'uranium enrichi dégage de l'énergie par la fission nucléaire. Dans une centrale nucléaire, cette énergie est contrôlée par un processus qui transforme la chaleur générée par la fission nucléaire en énergie électrique (voir figure III.12).



**Figure III. 12 :** *Illustration du cycle de la production d'énergie nucléaire à un seul étage de changement thermique [40].*

Dans le cœur du réacteur, l'uranium est organisé en faisceaux. Des pastilles d'uranium de même longueur et de même diamètre sont disposées en bâtonnets et ces baguettes sont rassemblées en faisceaux. Les faisceaux d'uranium sont placés dans un récipient et immergés dans de l'eau qui agit comme un liquide de refroidissement.



**Figure III. 13 :** *Illustration du cycle de la production d'énergie nucléaire avec deux étages de changement thermique [40].*

La chaleur des faisceaux d'uranium dans le cœur du réacteur doit être contrôlée pour éviter la surchauffe, ce qui pourrait provoquer la fusion du réacteur. Les barres de contrôle dans le faisceau d'uranium sont soulevées et abaissées pour contrôler la température du cœur selon les besoins. Les tiges peuvent également être abaissées complètement pour arrêter de créer de la chaleur et pour arrêter le réacteur en cas d'urgence ou pour changer le carburant.

Les réacteurs nucléaires fonctionnent à des températures étonnamment basses compte tenu de l'immense énergie libérée par la réaction nucléaire. La plupart fonctionnent bien en dessous de 850 °C, certains fonctionnent jusqu'à 1000 °C et la plage de température basse du fluide de travail thermique limite l'efficacité de Carnot de la centrale nucléaire [40].

### III.2.3. Production d'électricité avec des énergies renouvelables

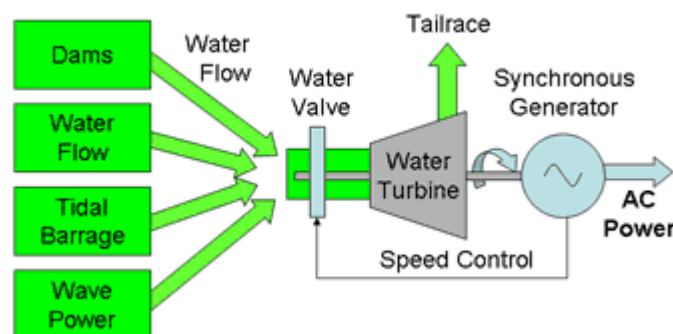
Les sources d'énergie renouvelables sont le terme utilisé pour décrire les sources d'énergie naturelles, continues, largement disponibles et sans danger pour l'environnement. Les sources d'énergie renouvelables sont constamment disponibles et ne s'épuisent pas car elles sont continuellement reconstituées par la nature mère soit au même rythme, soit plus rapidement qu'elles ne sont consommées ou épuisées. Un bon exemple de ceci serait le rayonnement solaire des soleils qui est si énorme qu'il ne peut jamais être épuisé, ce qui nous donne un apport abondant d'énergie solaire chaque jour. Parmi les autres « sources d'énergie renouvelables », on peut citer la chaleur du vent, de la pluie, des marées, de la biomasse et de

la géothermie, ou toute autre source d'énergie naturelle qui est constamment « renouvelée » ou régénérée par Mère Nature.

Il existe de nombreuses manières de produire de l'électricité en utilisant des énergies renouvelables. Parmi ces techniques, nous mentionnons:

#### a. Récolte des eaux naturelles

L'hydroélectricité est le processus de production d'électricité à partir de l'eau qui exploite la puissance des rivières et des courants. Mais nous pouvons également utiliser la puissance des masses d'eau fixes ou lentes pour générer de l'électricité en la stockant dans de grands barrages. L'énergie potentielle gravitationnelle stockée dans l'eau au-dessus de la paroi du barrage est libérée lorsqu'elle coule vers le bas à travers de grands tuyaux jusqu'au fond du barrage.



**Figure III. 14 :** Le cycle de la production d'électricité par l'exploitation de l'énergie du flux d'eau [10].

Au fur et à mesure que l'eau coule dans ces gros tuyaux, elle traverse des aubes de turbine à la base du barrage, ce qui entraîne la rotation des aubes de la turbine qui produit de l'électricité. En raison de la grande hauteur de l'eau au-dessus de la turbine, appelée « tête », elle atteindra les turbines à une vitesse et une pression élevées, ce qui signifie que nous pouvons en extraire une grande quantité d'électricité (figure III.14).

Aujourd'hui, l'hydroélectricité fournit 17,5% de l'électricité mondiale (99% en Norvège, 57% au Canada, 55% en Suisse, 40% en Suède et 7% aux États-Unis) [9]. En dehors de quelques pays en abondance, la capacité hydroélectrique est normalement appliquée à la demande de pointe, car elle est facilement arrêtée et mise en service. Ce n'est pas une option majeure pour

l'avenir dans les pays développés car la plupart des sites importants de ces pays susceptibles de tirer ainsi parti de la gravité sont déjà exploités ou ne sont pas disponibles pour d'autres raisons telles que des considérations environnementales. La croissance à l'horizon 2030 est attendue principalement en Chine et en Amérique latine.

En général, l'efficacité de la conversion d'une centrale hydroélectrique dépend principalement du type de turbine à eau utilisée et peut atteindre 95% pour les grandes installations [1.9]. Les petites usines avec des puissances de sortie inférieures à 5 MW peuvent avoir des rendements compris entre 80 et 85%. Il est toutefois difficile d'extraire de l'énergie à partir de faibles débits [10].

### **b. Production d'électricité par énergie éolienne**

Le soleil chauffe inégalement notre planète, ce qui rend l'air plus chaud autour de l'équateur car il absorbe plus d'énergie et plus froid près des pôles. L'air se dilate lorsqu'il se réchauffe et se contracte lorsqu'il est refroidi. Ces différences de température entraînent la circulation des courants de convection dans le monde entier, car si l'air plus dense des régions les plus froides se déplace vers les régions plus chaudes, si l'air est plus léger. Ce mouvement de l'air dans l'atmosphère de la terre d'un endroit plus chaud à un endroit plus froid est ce que nous appelons le « vent » et qui peut être faible ou fort selon l'énergie solaire qui frappe la terre à cette époque. En outre, puisque la masse terrestre de la Terre et ses océans absorbent et relâchent l'énergie solaire dans l'atmosphère à différents taux, il se produit un déplacement constant de l'air entre la surface terrestre et l'atmosphère, "l'énergie éolienne". La rotation de la Terre joue également un rôle majeur dans la production d'énergie éolienne. Donc, on peut alors définir le vent comme "air en mouvement", qui peut varier de zéro à des rafales élevées. En théorie, le monde dispose d'une énergie éolienne gratuite inépuisable, car chaque coin de la terre reçoit les effets du vent à un moment donné de la journée. En outre, en raison des variations annuelles, telles que l'hiver ou l'été, ou des zones géographiques, telles que des zones désertiques ou des chaînes de montagnes, certaines régions du monde reçoivent plus de vents que d'autres. Avec la pénurie de combustibles fossiles, l'énergie éolienne et l'énergie solaire sont en train de devenir une source d'énergie renouvelable importante.

L'énergie éolienne est donc une forme d'énergie solaire gratuite et renouvelable, due à la répartition inégale des températures dans différentes régions du monde, et les habitants



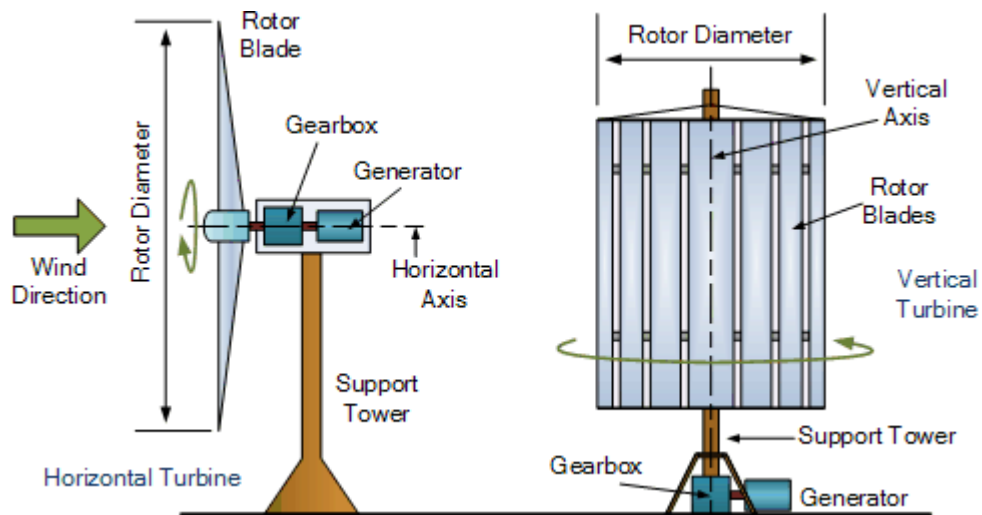
exploitent cette ressource éolienne gratuite depuis que les éoliennes et les voiliers ont été utilisés pour la première fois.

L'énergie cinétique contenue dans le vent peut être convertie en énergie mécanique et électrique par une éolienne. Un type moderne d'éolienne qui utilise l'énergie cinétique du vent pour produire une énergie électrique s'appelle une éolienne.

Les éoliennes qui sont utilisées aujourd'hui sont beaucoup plus susceptibles d'être un type d'éolienne qui fonctionne différemment et plus efficacement à partir d'un moulin à vent à voile conventionnel. Les éoliennes multiples, regroupées en grappes pour capturer simultanément de grandes quantités d'énergie éolienne et les convertir en énergie électrique alimentant ce réseau électrique, sont connues sous le nom de parcs éoliens. Ces parcs éoliens peuvent être situés sur des terres plates, au sommet des montagnes ou au large des côtes.

La technologie des éoliennes peut sembler simple, mais une éolienne moderne comporte de nombreuses pièces mécaniques. Le vent fait tourner les pales du rotor des turbines autour d'un moyeu central, qui fait tourner un arbre de boîte de vitesses à basse vitesse, qui fait tourner un générateur à une vitesse plus élevée et produit de l'électricité. Le générateur électrique convertit l'énergie cinétique des pales en énergie électrique lorsque des câbles électriques transportent cette énergie vers une sous-station électrique destinée à être distribuée au réseau électrique. Les éoliennes modernes ont un certain nombre de pales de rotor en forme de feuille d'air qui ressemblent à des hélices d'avion, contrairement aux éoliennes qui comportaient généralement plusieurs pales ou voiles plates. Une combinaison de la portance et de la traînée entraîne la rotation des aubes de la turbine dans le vent.

Il est bon d'avoir une nouvelle éolienne brillante au fond du jardin ou fixée sur un toit, mais si le vent ne souffle pas, l'éolienne ne tournera pas et ne produira pas de l'électricité. De même, si l'énergie éolienne est trop forte, l'éolienne peut tourner trop vite peut s'endommager ou surchauffer car elle produit trop de tension de sortie et / ou de courant électrique. Il est donc important, lors de l'implantation d'une éolienne dans un système d'énergie éolienne, de connaître à l'avance la quantité de vent disponible et la vitesse réelle du vent.



**Figure III. 15 :** Conception d'éoliennes (horizontales et verticales)[10].

Les systèmes connectés au réseau sont dimensionnés pour des vitesses de vent moyennes de 5,5 m/s à terre et de 6,5 m/s au large où la turbulence du vent est moindre et la vitesse du vent plus élevée (figure III.15). Alors que les centrales proches du littoral bénéficient de vitesses de vent plus élevées, leurs coûts de construction et d'entretien sont plus élevés.

Des générateurs d'éoliennes à grande échelle, avec des puissances allant jusqu'à 8 MWe ou plus, avec des diamètres de rotor jusqu'à 164 mètres, fonctionnent maintenant dans de nombreuses régions du monde, avec des conceptions encore plus grandes [10].

De grandes pales de rotor sont nécessaires pour intercepter le flux d'air maximal, mais elles entraînent des vitesses de pointe très élevées. Les vitesses de pointe doivent toutefois être limitées, principalement en raison des niveaux de bruit inacceptables, ce qui entraîne des vitesses de rotation très basses pouvant atteindre 10 à 20 tr/min pour les grandes éoliennes. La vitesse de fonctionnement du générateur est cependant beaucoup plus élevée, typiquement 1200 tr / min, déterminée par le nombre de ses paires de pôles magnétiques et la fréquence de l'alimentation électrique du réseau. Par conséquent, une boîte de vitesses doit être utilisée pour augmenter la vitesse de rotation de l'arbre afin d'entraîner le générateur à la vitesse synchrone fixe correspondant à la fréquence du réseau.

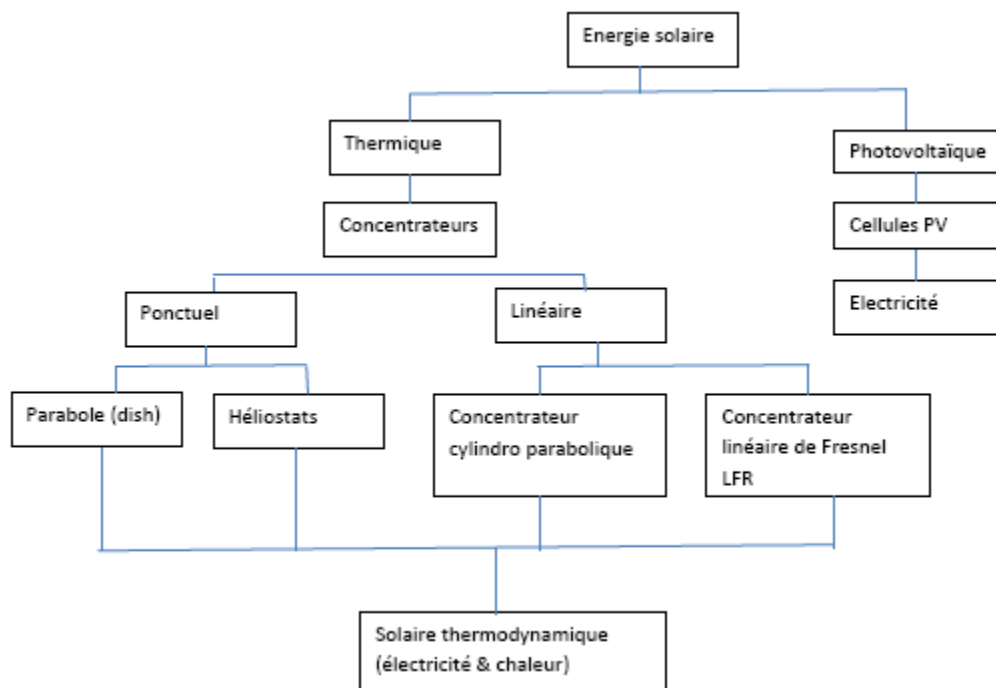
Le générateur synchrone est un générateur dont la fréquence de sortie électrique est synchronisée sur la vitesse de son arbre. Il n'est pas nécessairement synchronisé avec la

fréquence du réseau, bien que cela soit généralement un objectif et des contrôles externes supplémentaires nécessaires pour y parvenir.

### c. Production d'électricité à partir de sources solaires

L'énergie solaire est une énergie libre que nous recevons du soleil sous deux formes: la lumière et la chaleur. Il existe deux manières de convertir ces formes en énergie utilisable. La première consiste à utiliser l'énergie photonique des soleils pour générer un courant électrique, appelé processus photovoltaïque, que nous examinons par la suite. La deuxième consiste à exploiter l'énergie thermique du soleil en utilisant des collecteurs solaires thermiques pour produire de l'eau chaude solaire, du chauffage solaire et solaire, ... etc (voir figure III.16).

Il est important de comprendre que l'énergie thermique solaire n'est pas la même chose que l'énergie solaire ou l'énergie solaire photovoltaïque, car le photovoltaïque convertit la lumière solaire directement en électricité. Cependant, l'énergie solaire thermique peut être utilisée pour concentrer les rayons du soleil, créant ainsi de la chaleur qui est ensuite utilisée pour produire de la vapeur, ce qui transforme en générateur en électricité.

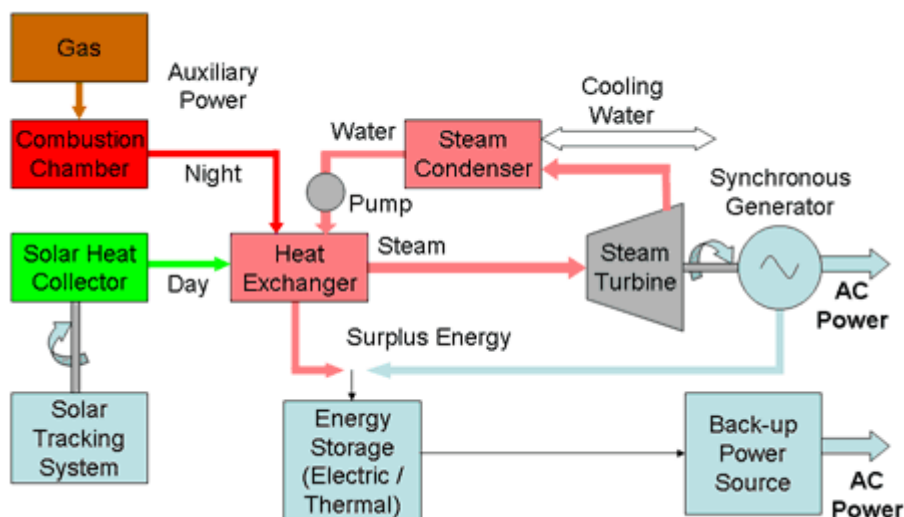


**Figure III. 16 :** Les techniques de la conversion de l'énergie solaire en chaleur et en énergie électrique.

La production d'électricité dans une centrale solaire thermique se déroule en deux étapes. D'abord, l'énergie thermique du soleil est captée par des concentrateurs solaires linéaires ou ponctuels, et utilisée pour chauffer un fluide de travail qui est ensuite utilisé dans une seconde étape de transformation d'énergie pour générer de l'électricité. Il est bien de noter que l'énergie thermique provient du rayonnement solaire et non de l'air dont la température sera généralement très inférieure à la température du fluide de travail. La température de fonctionnement réelle atteinte par le fluide de travail dépendra de la vitesse à laquelle l'énergie thermique est extraite par le fluide de travail et délivrée au système de production d'électricité [5-7].

### ➤ Production d'électricité par les systèmes solaires à concentration

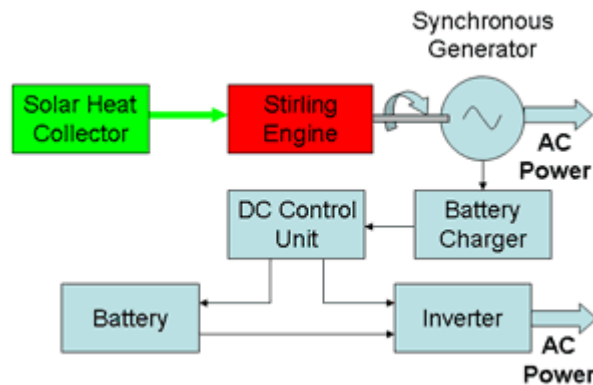
Généralement, les systèmes solaires thermiques à concentration (Ponctuels et linéaires) utilisent des miroirs et des lentilles pour concentrer une grande partie de l'énergie solaire naturellement disponible sur une petite surface (Voir le titre : Types des concentrateurs solaires dans le chapitre I). Le faisceau de lumière concentré peut être utilisé pour générer de l'énergie électrique une fois convertie en chaleur grâce à une utilisation efficace du cycle thermodynamique.



**Figure III. 17 :** Installations électrique solaire à grande échelle [40].

Une centrale solaire thermique possède généralement un système de miroirs pour concentrer la lumière solaire sur un absorbeur, l'énergie absorbée étant alors utilisée pour alimenter un

moteur thermique qui entraîne à son tour un générateur rotatif. Dans les systèmes à grande échelle, le moteur thermique est généralement une turbine entraînée par de la vapeur ou un autre fluide de travail en phase vapeur [figure III.17]. Dans les systèmes à petite échelle, le moteur thermique peut être un moteur Stirling.



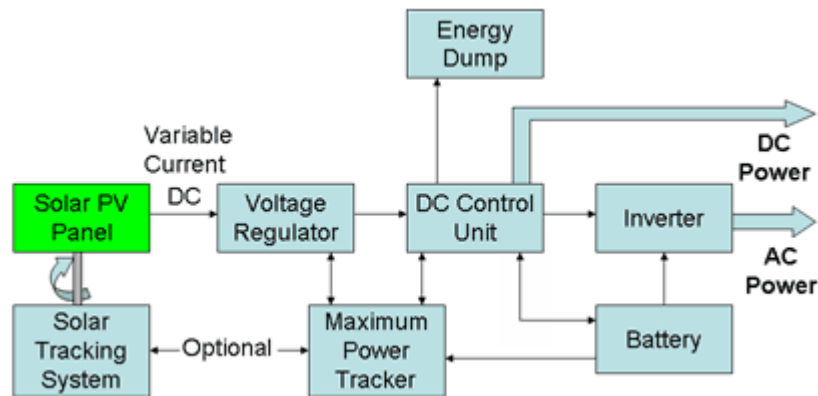
**Figure III. 18 :** Installations électrique solaire à petite échelle [40].

Pour le moteur Stirling, le concentrateur solaire est constitué de nombreux petits miroirs en verre agencés en forme de parabole (figure III.18). Les miroirs réfléchissent la lumière du soleil sur une unité de conversion de puissance qui est montée au-dessus du plat au centre de la focale.

L'unité de conversion de puissance comprend un récepteur solaire qui absorbe l'énergie solaire et la transfère au moteur solaire. Le moteur convertit alors cette énergie en chaleur. Le récepteur thermique comprend des tubes pour le fluide de transfert, généralement de l'hydrogène ou de l'hélium, qui transfère de la chaleur à un générateur pour produire de l'électricité. Les systèmes de parabole/moteur solaires utilisent des collecteurs automatiques à deux axes pour suivre le soleil.

### ➤ Production d'électricité par les systèmes Photovoltaïques

En outre, la technologie photovoltaïque (PV) est également utilisée dans de nombreux domaines tels que les applications photovoltaïques intégrées aux bâtiments, les transports, les télécommunications, les routes solaires et les installations électriques rurales, etc [12].



**Figure III. 19 :** *Petite installation électrique Photovoltaïque [10].*

Les cellules solaires sont généralement vendues dans des modules constitués d'un certain nombre de cellules disposées en série et/ou en parallèle pour fournir des tensions et des puissances nominales pratiques ou couramment utilisées.

Plusieurs centrales photovoltaïques connectées au réseau à grande échelle ont été construites dans le monde entier, la plupart ayant une capacité de 300 kW à 500 kW, mais certaines atteignant même 300 MW ou plus. Jusqu'à présent, le déploiement d'installations à grande échelle s'est limité à des installations expérimentales en raison du coût élevé des panneaux solaires. Avec une efficacité typique de l'ordre de 15%, une centrale de 500 kW nécessitera environ 20000 mètres carrés de panneaux photovoltaïques d'environ un dollar par watt, ainsi que des onduleurs à grande échelle capables de gérer la totalité de la puissance du système [10-9-40].

### III.3. Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons abordé diverses techniques de production d'électricité dans le monde. Ce qui nous intéresse, c'est la production d'électricité par voie solaire à concentration de type cylindro-parabolique (PTC). C'est ce que nous verrons en détail dans le prochain chapitre de ce mémoire.

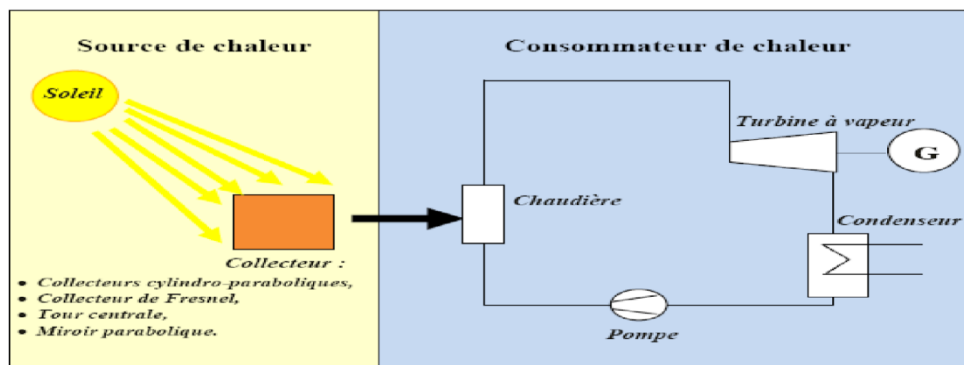
## IV. La centrale solaire cylindro-parabolique

### IV.1. Introduction

L'utilisation industrielle des concentrateurs solaires est destinée généralement à la production d'électricité à grande échelle. Dans ce chapitre, nous présentons les principes fondamentaux de la technologie des centrales solaires thermiques de type cylindro parabolique pour la production d'électricité. Les différentes composantes d'une centrale typique seront d'écrites ainsi que leurs performances.

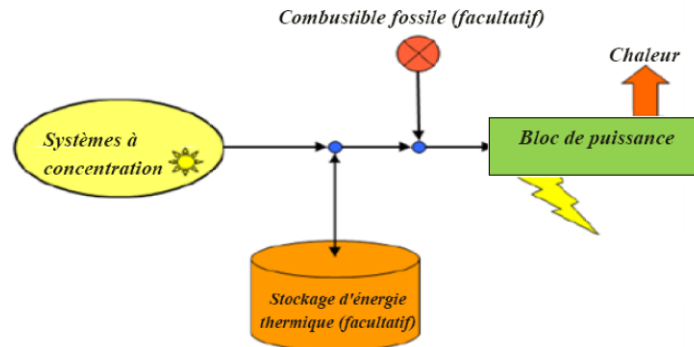
### IV.2. Schéma générale du centrale cylindro parabolique

Les systèmes Central solaire cylindro-parabolic à l'échelle industrielles sont à la fois plus complexes et plus flexibles que d'autres systèmes d'énergie renouvelable dans lesquels l'énergie est produite, utilisée et stockée (voir schéma de principe figure IV.1) . Une centrale thermique solaire se compose généralement d'un champ solaire et d'un bloc de puissance. Le bloc de puissance est une installation thermique de production d'électricité qui fonctionne selon des cycles thermodynamiques conventionnels, turbines à gaz, turbine à vapeur, cycle combiné, moteur Stirling, ...etc.



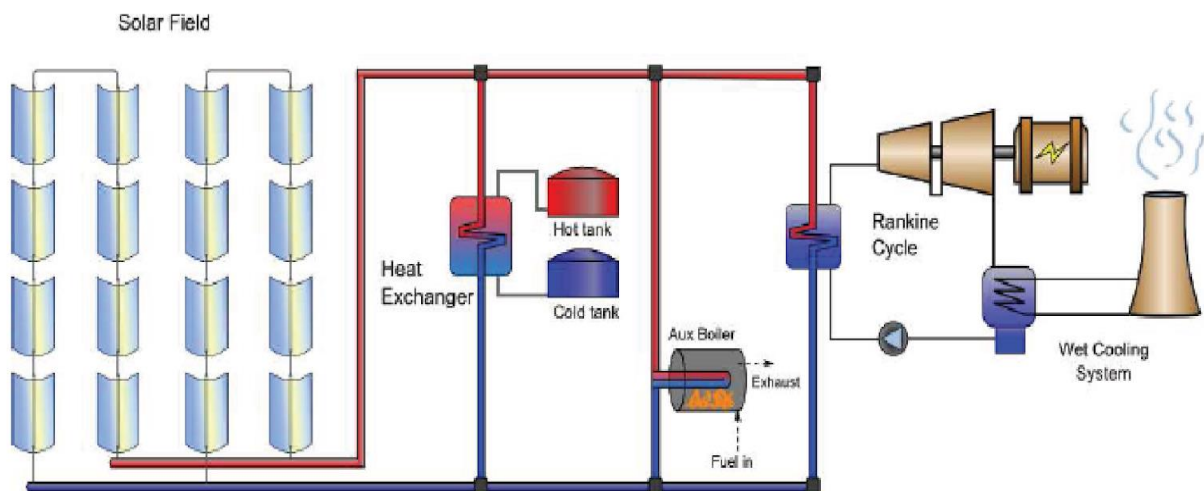
**Figure IV. 1** : Principe de fonctionnement d'une centrale thermique solaire [14].

L'évolution des technologies a permis l'intégration d'un système de stockage, qui peut être construit de telle façon de restituer l'énergie thermique stockée pendant le jour sans aucune perte significative. Optionnellement, l'ajout d'un auxiliaire fossile aidera à assurer un fonctionnement en période d'intermittence (ciel nuageux) voir figure IV.2.



**Figure IV. 2 :** Concept d'intégration d'un système de stockage thermique dans une centrale solaire [17].

D'une façon explicite, le schéma du central solaire objet de notre étude est indiqué dans la figure IV3 ci-après.



**Figure IV. 3 :** Centrale solaire cylindro parabolique avec système de stockage et un auxiliaire fossile [39].

### IV.3. Les composants de la centrale solaire cylindro parabolique

#### IV.3.1. Le champ solaire

Le champ solaire est la partie de la centrale qui capte et recueille la chaleur. Il consiste en une ou plusieurs boucles d'assemblages des collecteurs solaire (SCA « Solar Collectors Assemblies»), chaque boucle étant disposée en parallèle. Un collecteur commun fournit à chaque boucle un débit égal de fluide caloporteur (HTF), et un second collecteur collecte le HTF chaud pour le renvoyer soit directement au cycle de puissance pour la production

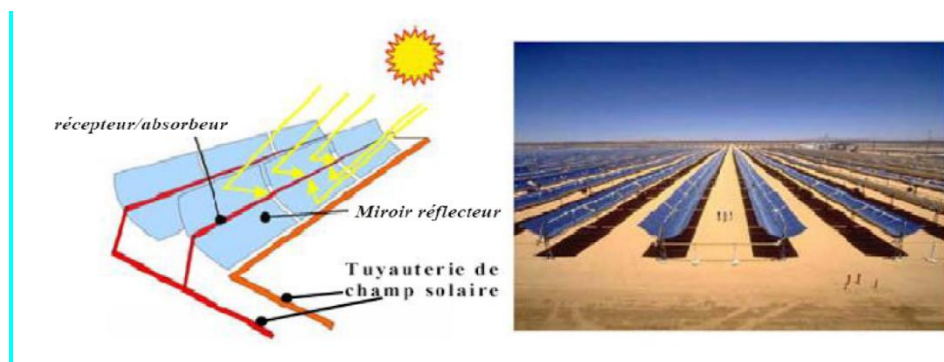


d'énergie ou au système de stockage d'énergie thermique pour une utilisation ultérieure. Pour minimiser la perte en pression de pompage, le champ est généralement divisé en plusieurs sections, chaque section avec son propre jeu d'en-tête (39).

#### a. Les collecteurs et le champ optique

Le collecteur est défini comme la partie du champ solaire qui reflète l'irradiation du récepteur. Cet équipement est distinct du composant récepteur qui consiste en une enveloppe en verre sous vide et un tube récepteur. Les calculs optiques pour le modèle de collecteur s'étendent au point de déterminer l'amplitude de flux solaire qui est incident sur le récepteur. Dans la figure IV.4 un exemple d'un capteur cylindro parabolique.

Les collecteurs cylindro-paraboliques représentent la technologie la plus mature et ils sont présents dans la plus grande partie des projets en cours. Le rendement moyen annuel de la conversion solaire-électricité peut atteindre 15%.



**Figure IV. 4 :** Collecteur cylindro parabolique [14].

#### b. Les récepteurs

Le récepteur est un dispositif permettant de réceptionner un rayonnement pour le convertir en chaleur exploitable. Il est évident que le captage solaire en vue d'alimenter un moteur thermique nécessite, pour être efficace le choix de matériaux résistants à hautes températures tel que métaux et céramiques. L'enveloppe de l'absorbeur doit être conçue de manière à maximiser l'absorption thermique du rayonnement, tout en limitant les pertes thermiques.

Le captage thermique en soi est réalisé par un fluide (air, eau, huile...) circulant dans une cavité de l'absorbeur. La convection est forcée en général, le choix de ce fluide et son débit déterminent le rendement du captage [17].



**Figure IV. 5 :** Un récepteur sous vides [17].

La performance du récepteur ne peut pas être modélisée avec précision en utilisant des relations explicites simples. Le récepteur est modélisé comme un flux d'énergie uni-dimension. Seul le gradient de température dans la direction radiale est supposé significatif- le transfert de chaleur axiale et circonférentiel est négligé [17].

### c. **Fluide caloporteurs**

On distingue différents types utilisés [14,17]:

- Sels fondus : Mélanges binaires ou ternaires de nitrate ( ou nitrite ) de sodium/ potassium qui permettent un stockage intermédiaire si la température de sortie du fluide caloporteur se situe au-dessus de 350°C.
- Huile thermiques (huile synthétique) : fluide caloporteur utilisé dans les capteurs cylindro-parabolique ( 400°C ).
- Fluides organiques : à basse température d'évaporation ( butane, propane,...), utilisés dans les cycles à basse températures .
- Eau et vapeur d'eau : utilisées soit comme fluide thermodynamique soit comme fluide caloporteur et thermodynamique (génération directe de vapeur) .
- Gaz (Hydrogène, Hélium) : entraîne un moteur thermique placé au foyer d'une coupole parabolique.

- Air : utilisé soit comme caloporteur, soit comme fluide thermodynamique dans une turbine à gaz, le récepteur remplaçant la combustion comme source chaude.

### IV.3.2. Générateur Solaire de Vapeur

Le générateur Solaire de Vapeur (GSV) est un assemblage d'un économiseur, d'un évaporateur avec un ballon et d'une surchauffeur.

La puissance nette délivrée par la centrale est proportionnelle au débit massique de la vapeur détendue dans la turbine. Le débit massique de la vapeur générée dans le GSV est proportionnel au débit massique de l'huile synthétique qui circule dans le champ solaire. L'huile thermique entre dans le GSV avec une température constante, 393°C, et sort avec une température constante, 293°C. Le débit massique du fluide thermique varie suivant l'intensité du rayonnement solaire reçue dans le champ solaire, en d'autres termes, en fonction du temps pendant la journée et des conditions climatiques [17, 39].

### IV.3.3. Cycle de puissance

Généralement les unités de production d'électricité, à partir du vapeur, sont basées sur le cycle de Rankine. Le cycle de Rankine idéal de base est illustré à la Figure (IV.6), et la Figure (IV.7). Cette dernière montre le diagramme température-entropie (T-S) pour la vapeur en tant que fluide de travail.

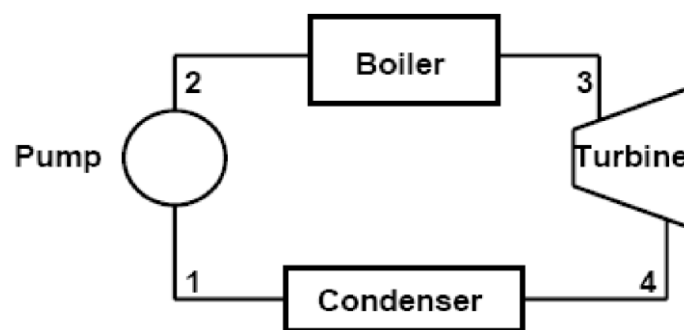
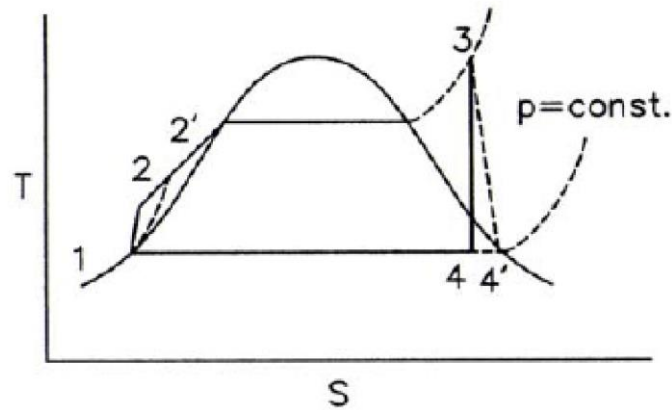


Figure IV. 6 : Cycle Rankine de base [17].



**Figure IV. 7 :** Diagramme T-S idéal et réel de Cycle de Rankine [17].

Le cycle de Rankine idéal comprend les processus suivants [17] :

- 1-2** Le liquide saturé provenant du condenseur à l'état 1 est pompé dans la chaudière à l'état 2 isentropiquement ;
- Le liquide est chauffé dans la chaudière à pression constante. La température du liquide monte jusqu'à ce qu'il devienne un liquide saturé.
- 2-3** Une addition supplémentaire de chaleur vaporise le liquide à température constante jusqu'à ce que tout le liquide se transforme en vapeur saturée. Toute chaleur supplémentaire surchauffe le fluide de travail à l'état 3 ;
- 3-4** La vapeur se dilate isentropiquement à travers une turbine jusqu'à l'état 4 ;
- 4-1** La vapeur sortant de la turbine est condensée à pression constante jusqu'à ce qu'elle revienne à l'état 1 comme un liquide saturé.

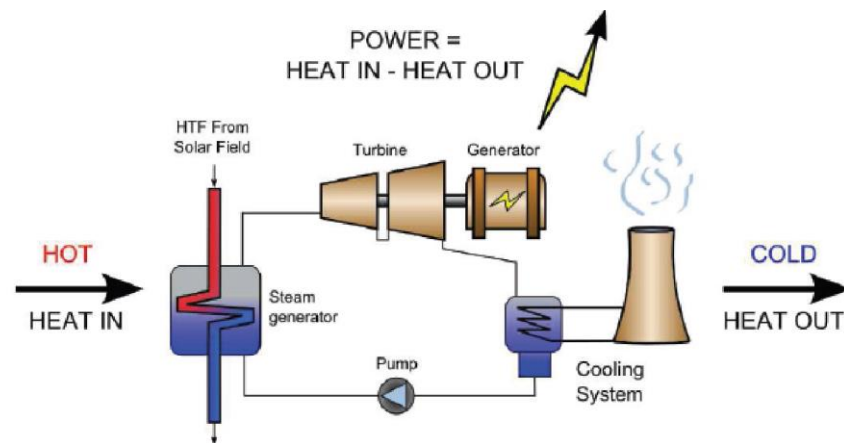
Cependant, le pompage et le processus d'expansion à la turbine dans un cycle de Rankine réel ne sont pas idéals. Les processus réels sont 1-2' et 3-4', respectivement, comme indiqué dans la figure (IV.7).

Le choix de fluide de travail dans un cycle solaire de Rankine se fait en fonction des températures du système de collecte solaire. En raison de sa température critique et de sa pression de 374 ° C et 218 atm respectivement, la vapeur (eau) est le plus souvent utilisée avec le cycle de Rankine. D'autant, il est praticable dans des systèmes fonctionnant à haute température, tels que ceux produits par des systèmes de capteurs paraboliques '. Son

volume augmente d'environ 1600 fois si l'eau est convertie en vapeur [20]. Cette expansion stocke l'énergie et produit la force pour faire fonctionner une turbine à vapeur. La vapeur d'eau a plusieurs avantages importants : qu'elle est non toxique, respectueuse de l'environnement, peu coûteuse et facilement disponible.

#### IV.3.4. Système de refroidissement

Il existe principalement deux technologies de refroidissement de la vapeur après détente de la turbine, refroidissement à sec (air) ou bien refroidissement humide (à l'eau) voir figure IV.8. Il existe aussi une autre alternative qui est l'hybridation de deux technologies avec un système combiné avec refroidissement à air et eau. Le choix de ce système doit porter une attention particulière car le rendement thermodynamique et la consommation d'eau de la centrale dépendra énormément de la performance de ce système [39].



**Figure IV. 8 :** Cycle de Rankine simplifié avec l'ajout d'un système de refroidissement [39].

#### IV.3.5. Auxiliaires fossiles

Un système de chauffage auxiliaire à combustible fossile est inclus dans certains systèmes pour fournir de l'énergie thermique pendant les périodes d'absence ou perturbation de l'énergie solaire ou lorsque le stockage ne peut pas satisfaire pleinement la charge requise [39].

#### **IV.4. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons expliqué et présenté les différentes composantes d'une centrale solaire hybride qui est adapté à notre cas d'étude. Nous allons intégrer le système de refroidissement humide. La figure IV.3 présente la centrale objet de notre cas d'étude.

## **V. Simulation, Résultats et Interprétations**

### **V.1. Introduction**

Les systèmes d'énergie solaire sont maintenant largement utilisés pour diverses applications industrielles et domestiques, en particulier pour la production d'électricité, où un système solaire est basé sur un concentrateur solaire (ponctuel ou linéaire) conçu pour collecter l'énergie du soleil et le convertir en énergie électrique ou thermique. L'énergie thermique dégagée par le fluide caloporteur (Heat Transfer Fluid HTF) ou le fluide de travail est ensuite transformée en une forme d'énergie utilisable, telle que l'électricité, à l'aide de turbines et de générateurs.

Ce chapitre est consacré à la simulation du projet de centrale solaire. Cette simulation se fera en utilisant le logiciel SAM (System Advisor Model). Nous notons dans ce paragraphe que ce projet peut s'appliquer à n'importe quel endroit de notre pays si la zone et le fonds sont disponibles. Comme on le sait dans notre pays, l'Algérie dépend de la production d'électricité au gaz, car l'énergie fossile est abondante. Mais cette source d'énergie est polluante pour l'environnement. En outre, nous constatons que de nombreux pays s'orientent vers l'utilisation de centrales thermiques solaires pour la production d'électricité, ce qui implique la poursuite de cette perspective à l'avenir avec l'Algérie, car il possède une grande richesse solaire dans toutes les régions.

L'objectif de ce chapitre est de déterminer la configuration et les rendements optimaux d'une centrale solaire (CSP) pour la production d'électricité à El-Oued (la taille du champ solaire, l'heure de pleine charge, la fraction de remplissage, le rendement global) d'une puissance de 150 MW, tout en tenant compte de l'influence de différents paramètres tels que : les paramètres de site, le système de stockage (l'heure de pleine charge), le système de remplissage fossile (la fraction de combustible de remplissage). Ensuite, les résultats obtenus sont présentés et interprétés.

### **V.2. Les conditions climatiques**

La Wilaya d'El-Oued est située au Sud-Est de l'Algérie, elle a une superficie de 44586,80 km<sup>2</sup>. Elle demeure une des collectivités administratives les plus étendues du pays. La longueur de sa frontière avec la Tunisie est d'environ 300 km. Elle est couverte par le grand Erg Oriental sur les deux tiers de son territoire. La figure V.1 présente la carte d'eloued.

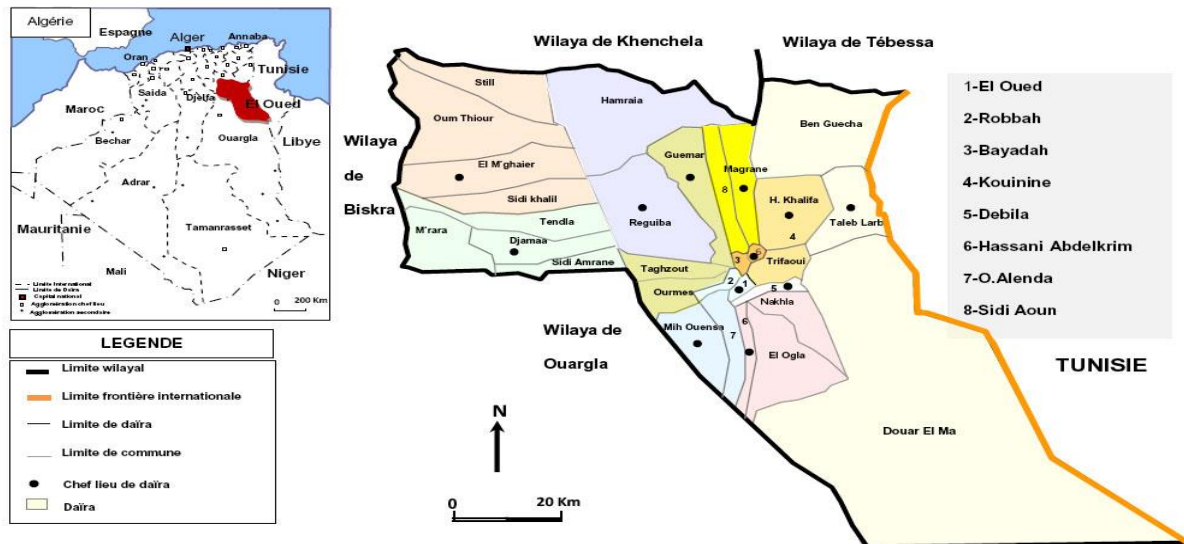


Figure V. 1: Carte de la Wilaya d’El-Oued [38].

La figure (V.2) illustre la variation des températures moyennes quotidiennes (maximales et minimales) pour l'année 2018. A partir de cette figure, il est clair que la période la plus chaude commence du 6 Juin au 13 Septembre, avec une température quotidienne moyenne maximale supérieure à 35 °C. Le jour le plus chaud de l'année est le 05 Août, avec une température moyenne maximale de 40 °C et une température minimale de 27 °C [38].

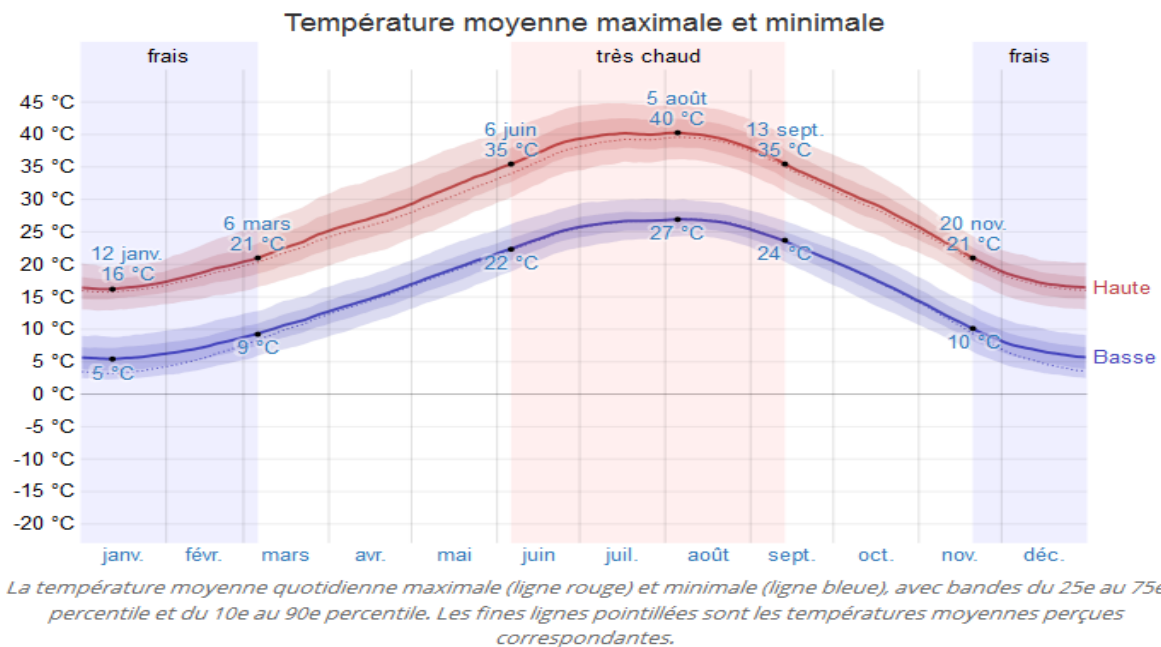
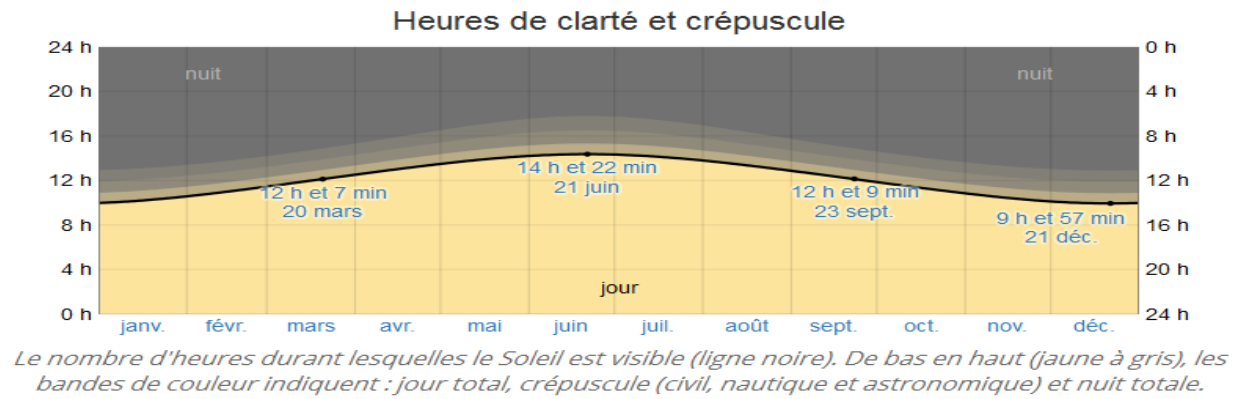


Figure V. 2: Les températures moyennes quotidiennes (maximales et minimales) pour l'année 2018 [38].



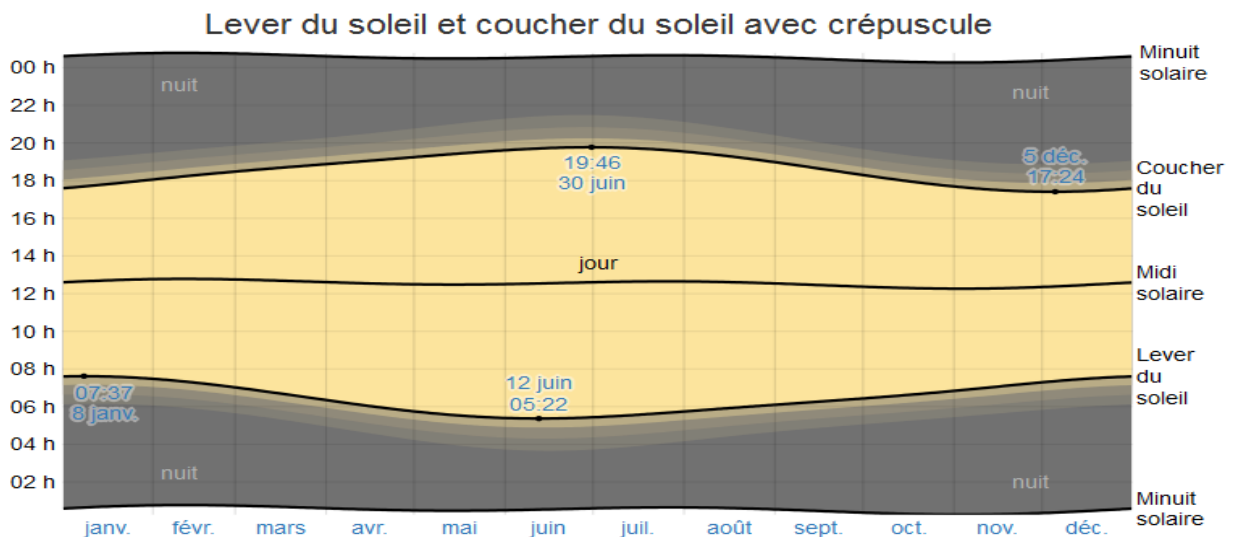
Par contre, le jour le plus froid de l'année est le 12 Janvier, avec une température moyenne minimale égale à 5 °C et une température maximale égale à 16 °C [38].

La figure (V.3) montre la variation de la durée d'ensoleillement à la région d'el-oued pour l'année 2018.



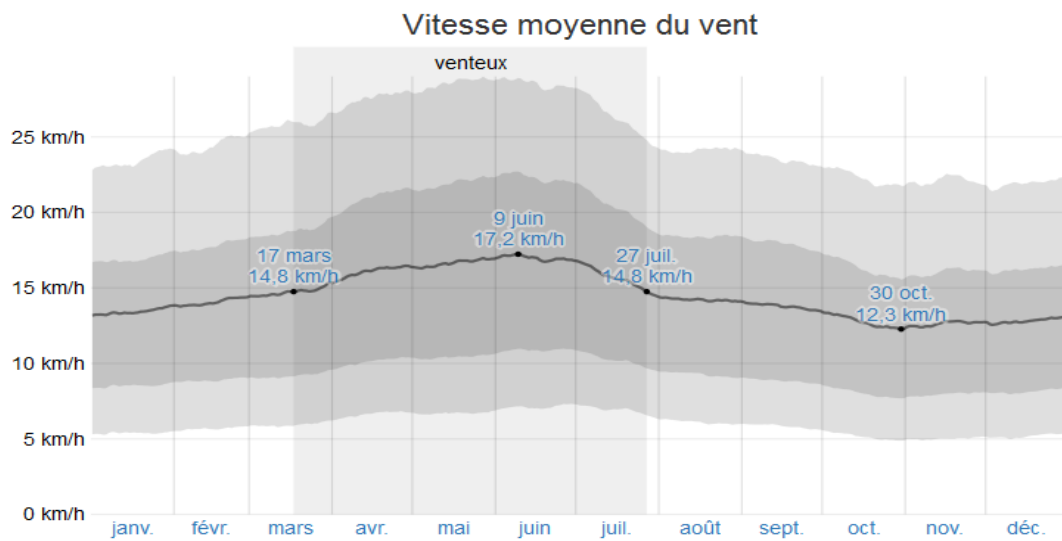
**Figure V. 3:** Durée d'ensoleillement moyenne mensuelle pour l'année 2018 [38].

La figure (V.4) illustre l'horaire d'ensoleillement journalier pour l'année 2018. La longueur du jour à El-Oued varie considérablement au cours de l'année. En 2018, le jour le plus court est le 21 Décembre, avec 9 heures et 57 minutes de jour, où le jour le plus long est le 21 Juin, avec 14 heures et 22 minutes de jour [38].



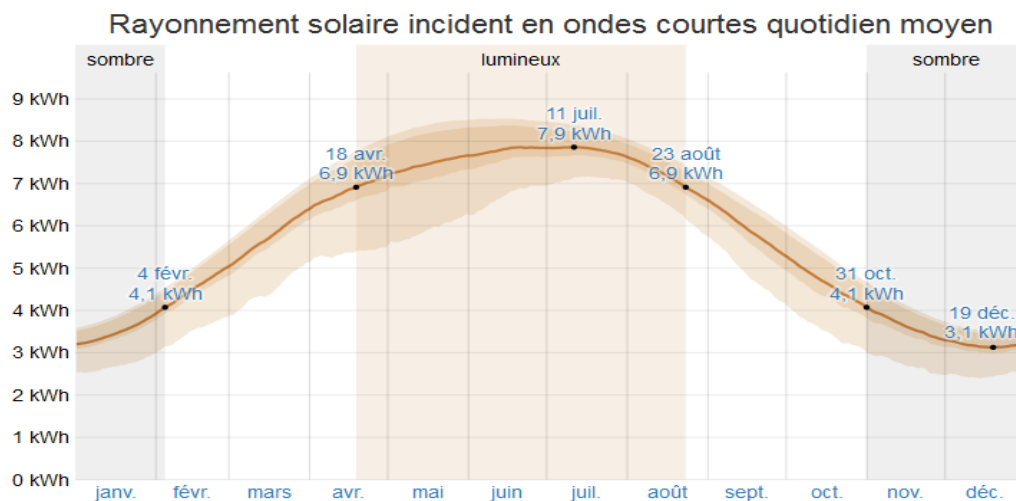
**Figure V. 4:** Horaire d'ensoleillement journalier pour l'année 2018 [38].

La figure (V.5) montre la variation de la vitesse moyenne du vent à la région d'el oued pour l'année 2018.



**Figure V. 5:** *Vitesse moyenne du vent pour l'année 2018 [38].*

A partir de la figure (V.6), on peut citer que la période allant du 18 Avril au 23 Août enregistre un rayonnement solaire par mètre carré supérieur à 6,9 kWh, où il atteignant sa valeur maximale de l'année le 11 Juillet 2018, avec une moyenne de 7,9 kWh/m<sup>2</sup>. Par contre, la valeur minimale du rayonnement est enregistrée le 19 Décembre 2018 avec une moyenne de 3,1 kWh/m<sup>2</sup> [38].



**Figure V. 6:** *Le rayonnement solaire incident quotidien atteignant le sol par m<sup>2</sup> pour l'année 2018 [38].*

### **V.3. Description du logiciel SAM (SYSTEME ADVISOR MODEL)**

Le logiciel SAM (System Advisor Model) est une plateforme conçue pour faciliter la prise de décision pour les industriels et les personnes impliquées dans les énergies renouvelables, des chefs de projet et des ingénieurs, aux concepteurs de programmes d'incitation, aux développeurs technologiques et aux chercheurs.

Le SAM a été développé en 2006 par le Laboratoire National d'Énergies Renouvelables (NREL), en collaboration avec Sandia National Laboratories et en partenariat avec le Programme des technologies énergétiques solaires du Département Américain de l'énergie.

Le SAM établit des prévisions de performance pour les systèmes solaires photovoltaïques raccordés au réseau, les champs solaires à concentration, les parcs d'énergie éolienne, la biomasse et les systèmes géothermiques. Ses modèles de cash-flow sont appropriés pour les projets d'énergie distribuée qui achètent et vendent de l'électricité au prix de détail, et pour les projets de production d'électricité qui vendent de l'électricité à un prix négocié par un contrat d'achat d'électricité. Le modèle de calcul du coût de production d'électricité en fonction des informations que nous fournissons sur l'emplacement du projet, les coûts d'installation et d'exploitation, le type de financement, les crédits d'impôt et les incitations applicables, et les spécifications du système. Le SAM a été développé pour calculer également la valeur de l'énergie économisée d'un système de chauffage solaire de l'eau domestique [39].

Le SAM est un logiciel disponible en téléchargement gratuit sur le site de NREL [39]. La version actuelle de SAM est la version 2017.9.5 Révision 4, publiée en Mars 2018. L'équipe de développement de SAM publie généralement une nouvelle version chaque année, apportant des améliorations aux fonctionnalités existantes et ajoutant de nouvelles capacités de modélisation du système d'alimentation [39].

### **V.4. Simulation de la centrale électrique**

Pour résumer et mieux illustrer la forme générale de la station étudiée, nous décrivons la description générale de la station dans les tableaux V.1 et V.2. Les résultats que nous visions sont spécifiques à chaque jour du mois de Janvier, à savoir que nous allons afficher uniquement les résultats du mois de Janvier.

La région d'El-Oued se caractérise par un climat désertique chaud et sec en été, froid en hiver et venteux pendant la plupart des saisons, en particulier au printemps. Les résultats obtenus

dans cette étude varient en fonction des conditions météorologiques de la zone étudiée pendant toute l'année. Cela se reflète clairement dans notre présentation des résultats obtenus. La zone d'El-Oued a un climat solaire, ce qui est très encourageant pour exploiter cette richesse dans de nombreux domaines, dont le plus important est la production d'électricité. En concentrant les rayons du soleil, où les rayons du soleil réchauffent des fluides tels que l'huile, l'eau ou le sel fondu, et l'utilisent pour produire de l'électricité.

**Tableau V. 1 :** *Caractéristiques géographiques et solaires du site étudié.*

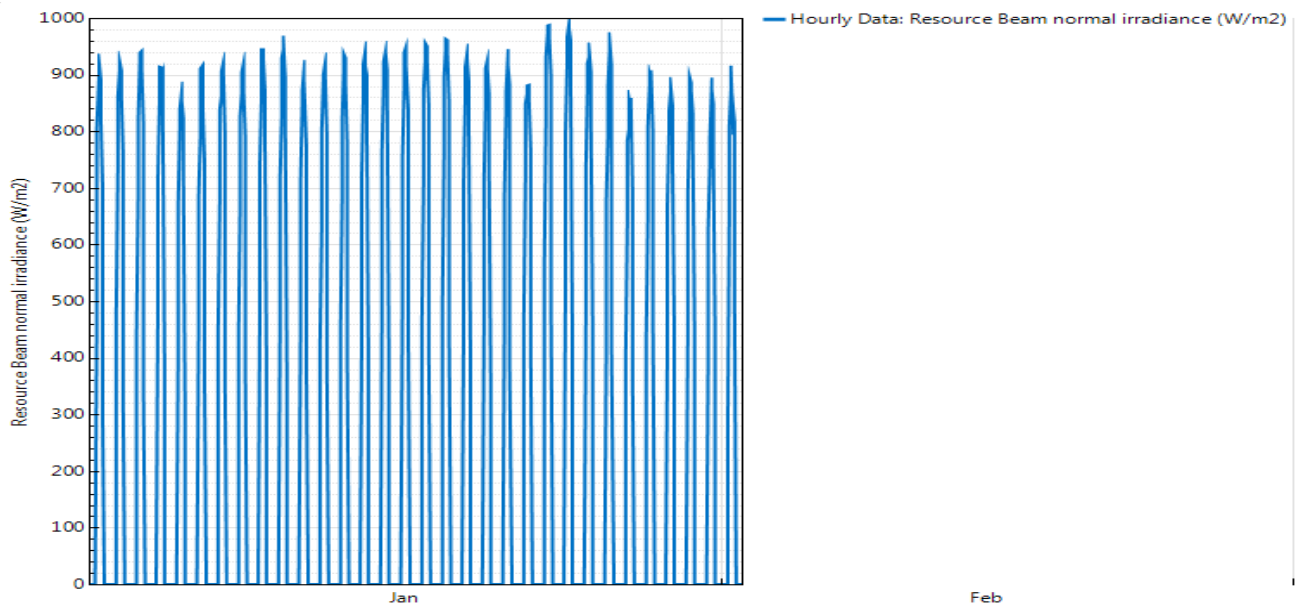
Elévation	longitude	latitude	Zone horaire	Rayonnement Global horizontal	Rayonnement direct normal	Diffus horizontal
62 m	6,783 °E	33,5 °N	GMT+1	5,72 kWh/m <sup>2</sup> /J	6,84 kWh/m <sup>2</sup> /J	1,54 kWh/m <sup>2</sup> /J

Notre étude suppose une boucle de puissance nette de 150 MWe. Les caractéristiques de la centrale électrique étudiée sont résumées dans le tableau (V.2).

**Tableau V. 2 :** *Caractéristiques de la centrale étudiée.*

Item	Valeur	Unité
Emplacement	El-Oued, Algérie	/
Puissance nette	150	MWe
Multiple solaire	2	/
Surface d'ouverture de champ	1225160	m <sup>2</sup>
Collecteurs par boucle	545	/
Surface pour une boucle	281	m <sup>2</sup>
Nombre de boucle	393	/
Température d'entrée du champ	391	°C
Température de sortie du champ	950	°C
Irradiation de conception	100	W/m <sup>2</sup>
La longueur d'une boucle	5,75	m
La largeur d'une boucle	2,11	m
La distance focale		m
Le fluide caloporteur (HTF)	Hitec Solar Salt	

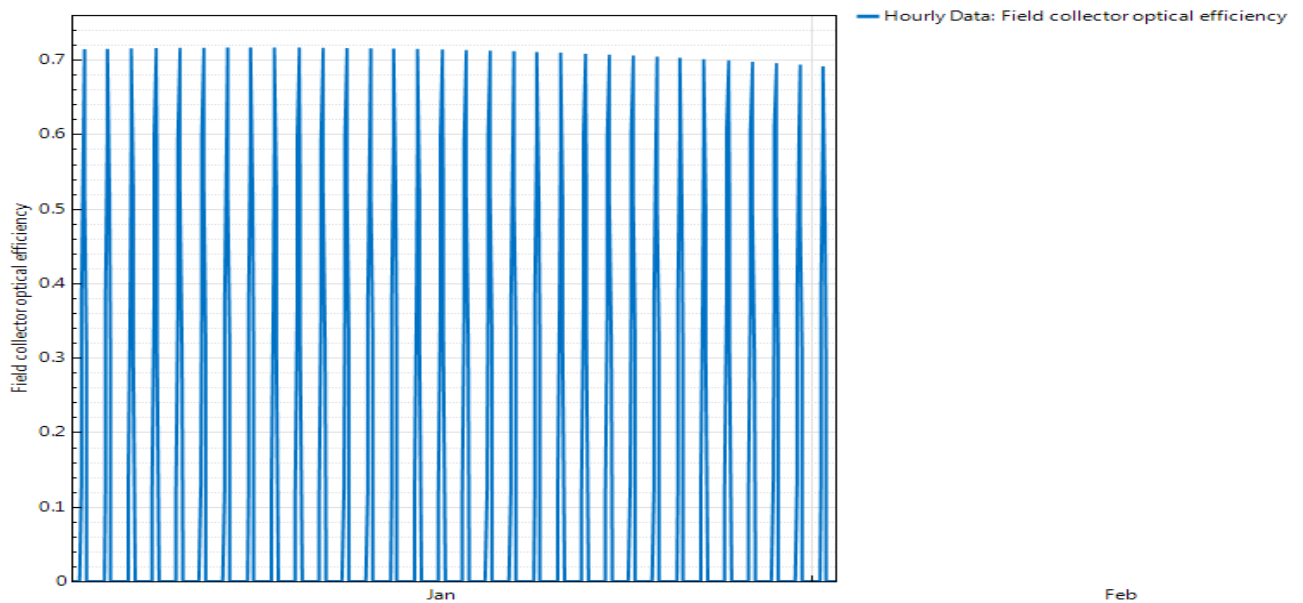
Le rayonnement solaire direct (DNI) est la quantité de rayonnement solaire reçue par unité de surface toujours perpendiculaire aux rayons venant en ligne droite à partir de la direction du soleil à sa position actuelle dans le ciel. Généralement, nous pouvons maximiser la quantité du rayonnement solaire direct reçue annuellement par une surface en la maintenant normale au rayonnement entrant. Cette quantité présente un intérêt particulier pour la concentration des installations solaires thermiques et des installations qui suivent la position du soleil. La figure (V.7) illustre la variation du rayonnement solaire direct pendant une année dans la région d'Oued Souf.



**Figure V. 7:** La variation des rayonnements solaires directs en  $W/m^2$ .

De par sa situation géographique, la région d'El-Oued possède un potentiel solaire très important, où elle dispose d'un des gisements solaires très prévenant. D'après la figure (V.7), nous constatons que le rayonnement direct est toujours supérieur à  $650 W/m^2$ , alors que durant la plupart de l'année varie entre  $700$  et  $800 W/m^2$ .

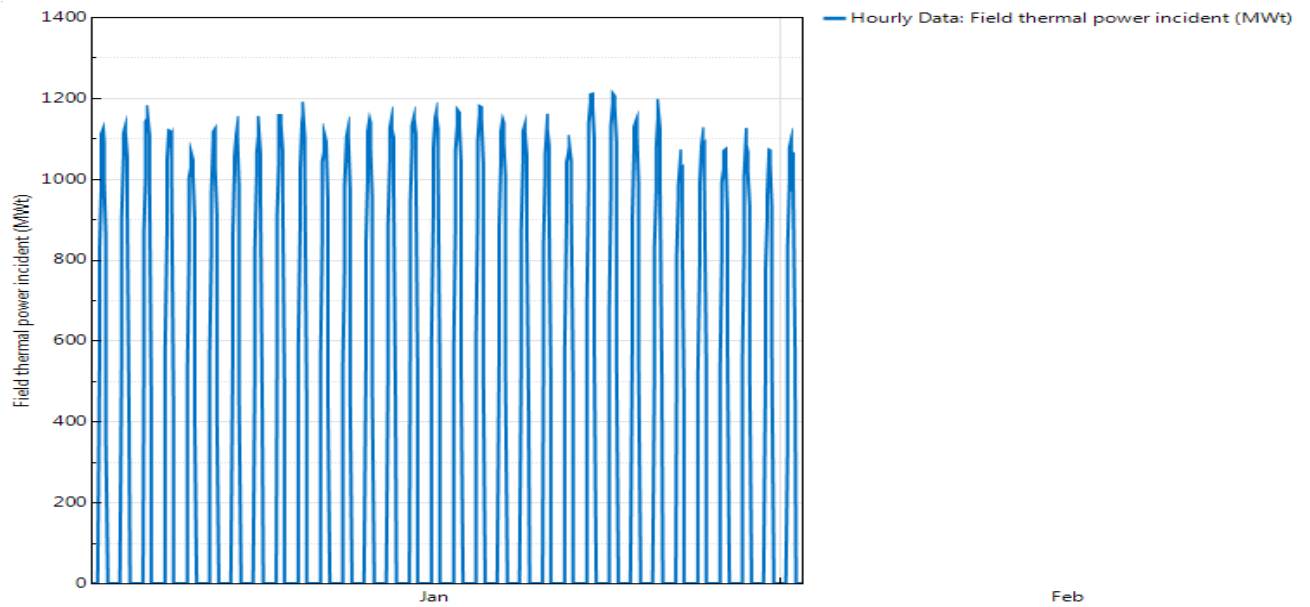
La figure (V.8) montre la courbe de variation du rendement optique du champ de collecteurs cylindro-parabolique.



**Figure V. 8:** La variation du rendement optique du champ solaire PTC.

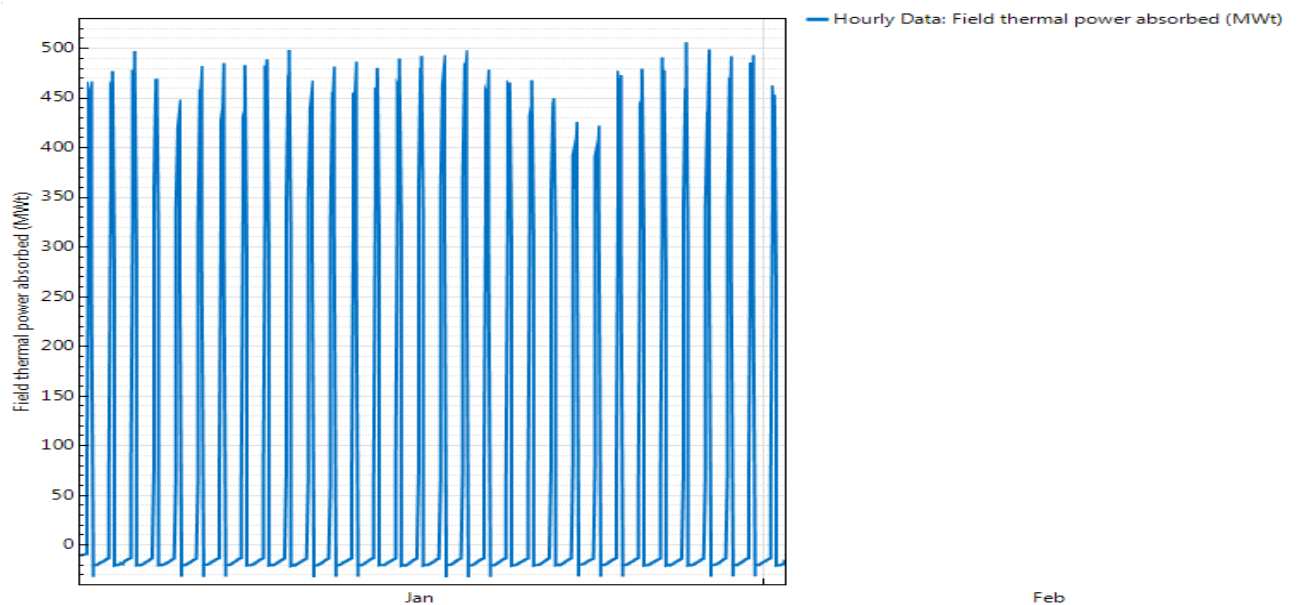
A travers la figure (V.8), nous notons que le rendement optique du champ solaire varie de 64 à 76 % Selon l'évolution des conditions météorologiques de mois en mois. Ce facteur a un effet direct sur la quantité de chaleur obtenue du soleil, Plus le rendement optique est élevé, plus le rendement thermique est élevé et vice versa.

Dans la figure suivante (figure V.9), nous montrons la variation de la quantité d'énergie thermique qui atteint le champ solaire. Mais cette énergie n'est pas entièrement absorbée par le fluide caloporteur (HTF), il y a toujours des pertes de chaleur à prendre en compte, ces pertes sont illustrées à la figure (V.11). La figure (V.10) montre le changement d'énergie réel qui atteint le fluide caloporteur.



**Figure V. 9:** La variation de l'énergie thermique totale reçue par le champ solaire PTC.

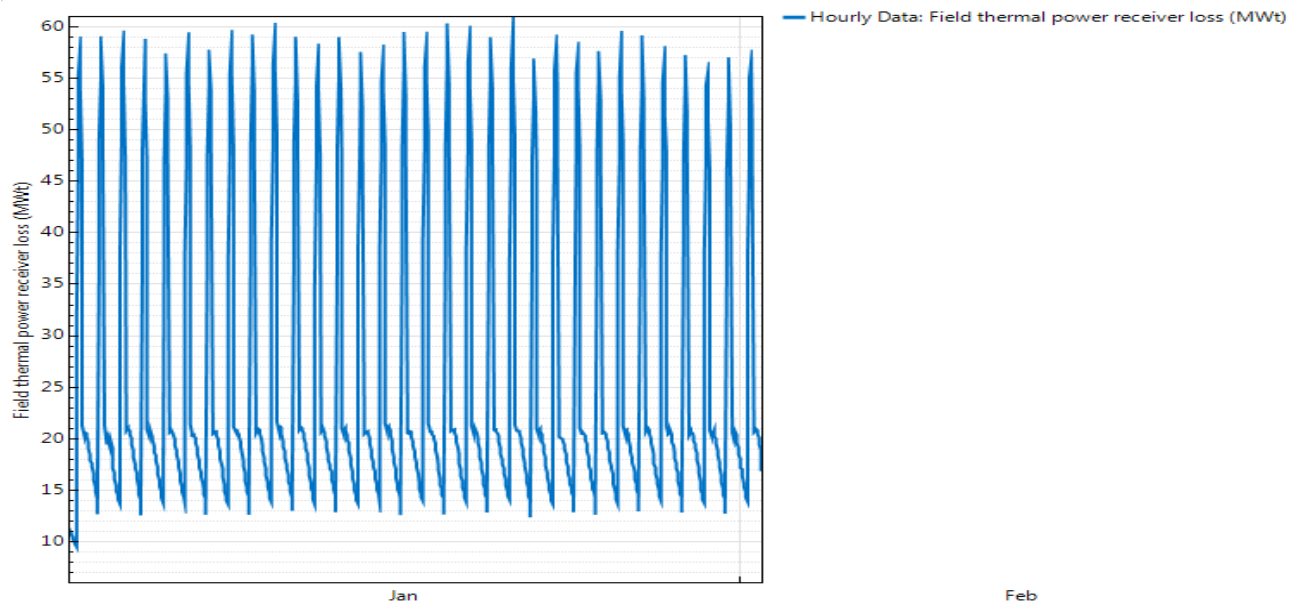
Comme on le sait, l'énergie thermique va servir à augmenter la température d'un fluide caloporteur qui pourra être utilisé pour produire de l'électricité. D'après la figure ci-dessus, on peut dire que dans la plupart des cas l'énergie thermique total reçue par le champ solaire est toujours supérieur à 800 MWt. Ce changement est généralement influencé par les conditions météorologiques de l'endroit où l'étude a été menée.



**Figure V. 10:** La variation de l'énergie thermique totale absorbée par le fluide caloporteur.

Pendant toute l'année, nous notons que la quantité de chaleur absorbée par le fluide caloporteur est environ de 500 (MWt). Cela semble être très clair dans la figure (V.10).

Le tube absorbeur est l'élément principal dans la construction d'un concentrateur cylindro-parabolique (PTC), où nous trouvons que le coût de ce tube est très élevé. Les pertes par convection et radiation à l'extérieur sont très importantes, afin de réduire ces pertes thermiques, une enveloppe en verre recouvre le tube absorbeur, ce qui permet la formation d'un vide entre les deux tube (espace annulaire), cette technique permettra d'éliminer les pertes thermiques par convection entre le tube absorbeur et l'enveloppe du verre.



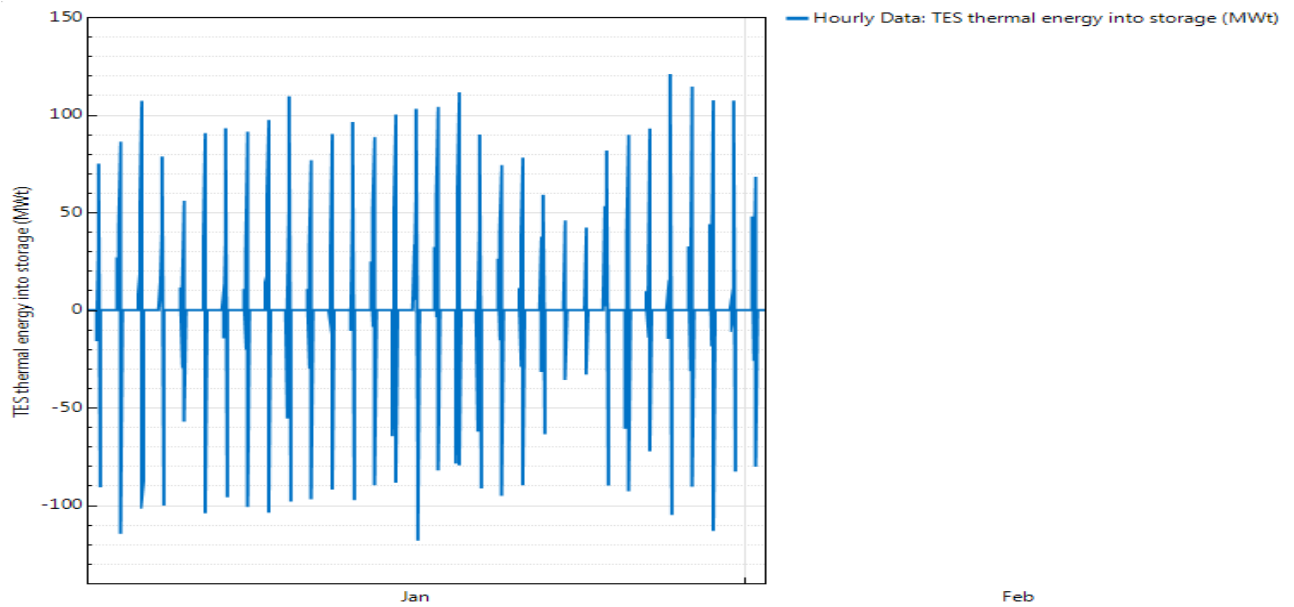
**Figure V. 11:** La variation de l'énergie thermique totale perdue par le tube absorbeur.

En plus, les pertes thermiques de chaleur peuvent être diminuées en réduisant l'émissivité du tube absorbeur à l'aide des surfaces sélectives. Ces surfaces sont de couleur foncée afin d'absorber le maximum de rayonnement solaire direct en émettant très peu d'infrarouges.

En ce qui concerne les pertes thermiques de notre centrale, il passe de 13 à 54 MWt en fonction du changement climatique, ceci est évident dans la figure (V.11).

Généralement, il y a deux techniques de convertir l'énergie solaire pour l'exploitation directe : en chaleur (énergie thermique) ou en électricité selon les besoins. Pour une consommation d'énergie optimale, nous devons utiliser un système de stockage pour utiliser l'énergie de manière appropriée, selon les besoins. La figure (V.12) illustre la variation de l'énergie thermique pour le stockage.

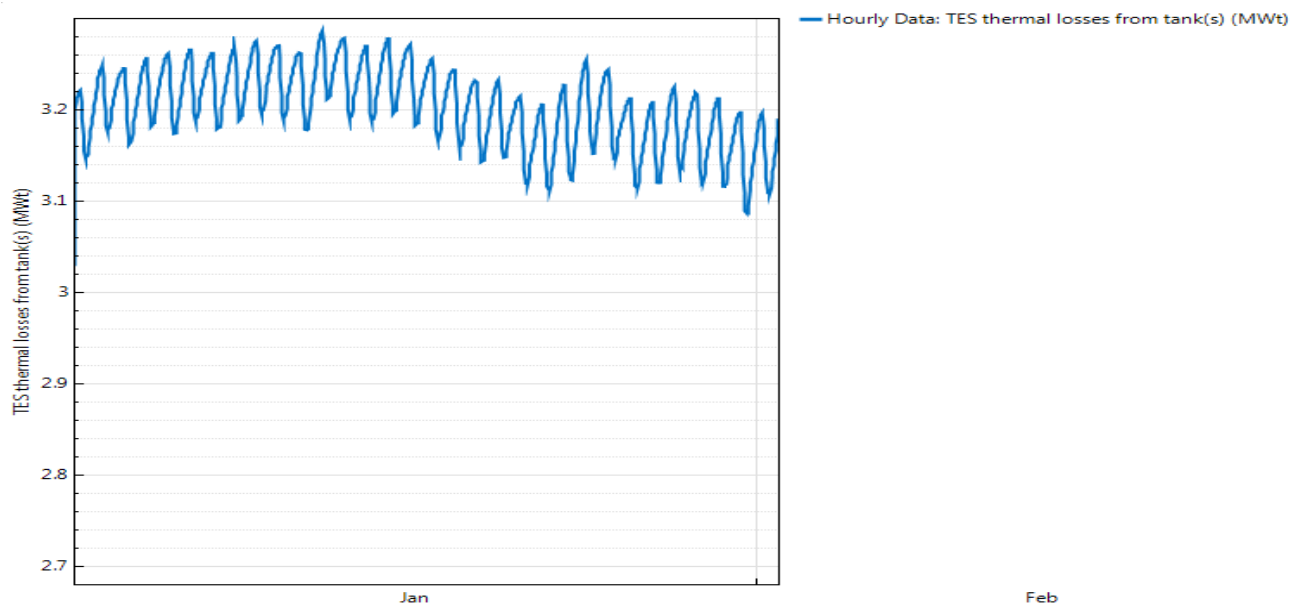




**Figure V. 12:** La variation de l'énergie thermique pour le stockage.

D'après la figure (V.12), le système de stockage reçoit une énergie qui peut monter jusqu'à 75 MWt et restitue une quantité d'énergie qui oscille entre 50 et 65 MWt.

La figure (V.13) représente la variation de l'énergie thermique destinée à être utilisée et provenant du réservoir de stockage thermique.

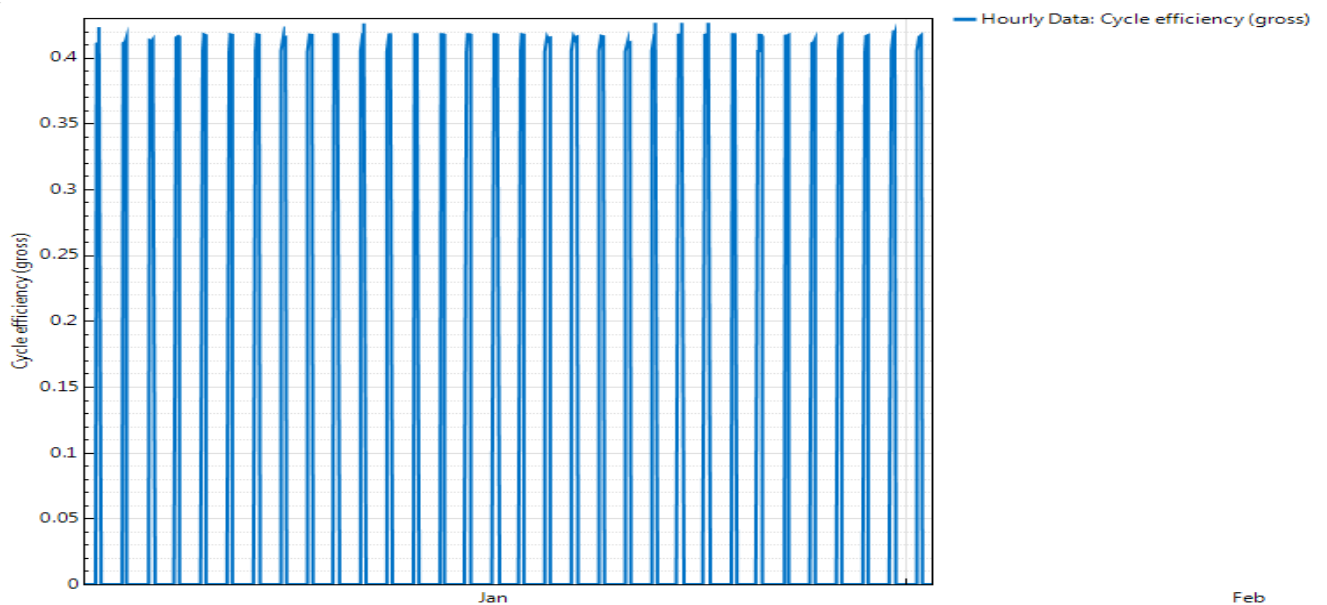


**Figure V. 13:** La variation de la perte d'énergie thermique au niveau du réservoir de stockage thermique.

La perte d'énergie dans le réservoir de stockage est importante pendant la période hivernale que dans la période estivale. Elle est de l'ordre 1,44 dans du premier cas et de 1,35 dans le deuxième cas.

Comme on le sait dans le transfert de chaleur à l'intérieur des échangeurs de chaleur, l'énergie utile interceptée par le fluide caloporteur est fonction direct de l'écart de températures entre la sortie et l'entrée du fluide, et donc un faible écart conduit à une diminution de l'énergie utile et par conséquent la performance instantanée du concentrateur solaire. En plus, l'augmentation de l'écart de températures entre celle du fluide à l'entrée et celle de l'ambiance abaisse la performance du concentrateur cylindro-parabolique.

La figure (V.14) illustre la variation de la performance totale de la centrale électrique. La performance totale de la centrale électrique est de l'ordre 43%. Cette valeur de la performance est très prestigieuse.

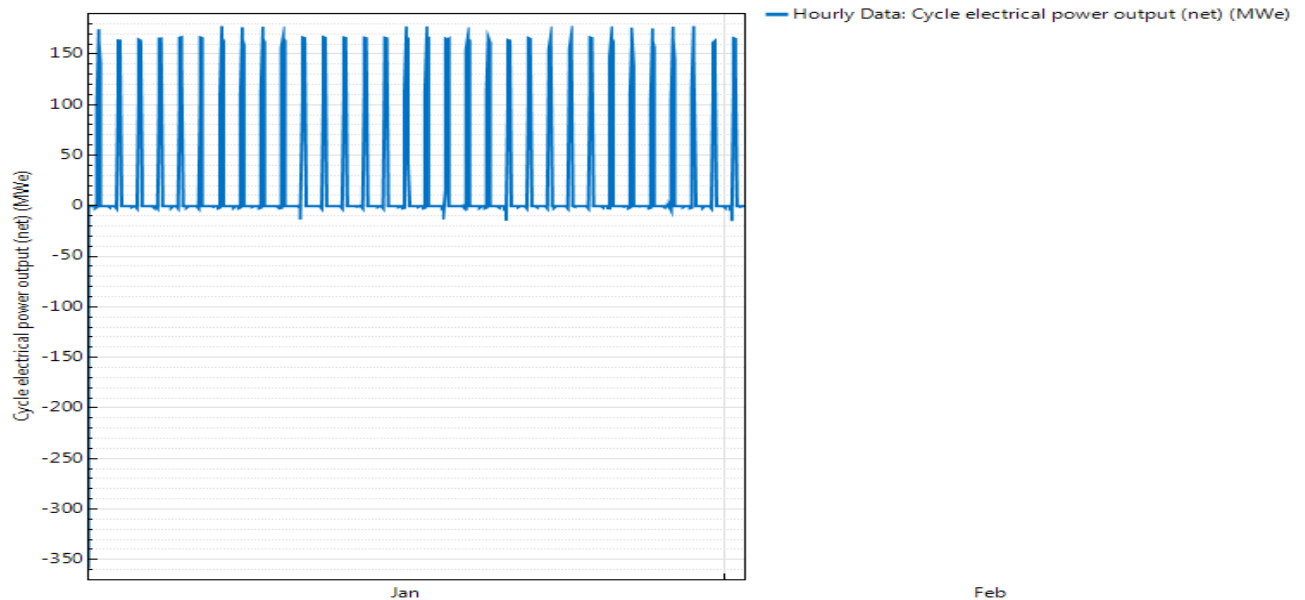


**Figure V. 14:** La variation de la performance totale de la centrale électrique.

Les centrales électriques d'origine solaire avec un système de stockage thermique permettent de laisser la centrale continuer à fonctionner même en l'absence d'énergie solaire (nuit, turbidité, etc.), et avec la possibilité de produire de l'électricité sur demande.

On suppose que la taille de champs solaire sera grande, car il doit être conçu pour la production de l'électricité à l'échelle de MW. La figure (V.15) montre que la production nette d'électricité est directement proportionnelle à le rayonnement solaire direct (DNI). La

quantité d'électricité nette générée par ce modèle de central peut atteindre 170 MWe. Cette quantité d'électricité est considérée comme très élevée. L'endroit où l'étude a été menée est un lieu offrant de nombreux avantages pour la production d'électricité d'origine solaire.



**Figure V. 15:** La variation de la quantité d'électricité nette générée par la centrale solaire.

## V.5. Conclusion

L'utilisation du SAM a permis de modéliser une centrale solaire pour générer d'électricité à partir d'un concentrateur cylindro-parabolique adapté au climat de la région d'El-Oued. Ce qui nous a permis d'avoir une idée claire sur la performance optique du champ solaire qui est de l'ordre de 65% avec la réception d'une quantité d'énergie de l'ordre de 800 MWt, où le fluide caloporteur absorbe une quantité d'énergie d'environ 500 MWt, avec des pertes thermiques qui varient de 13 à 53 MWt au niveau du tube absorbeur. En plus, le système de stockage reçoit une énergie qui peut aller jusqu'à 70 MWt et restitue une quantité d'énergie qui oscille entre 50 et 65 MWt. Cette simulation, confirme l'évidence que la perte d'énergie dans le système de stockage est importante pendant la période hivernale que dans la période estivale. En fin, le rendement du central est de l'ordre 43% au point de plein charge, qui un rendement intéressant avec une énergie nette générée qui est de l'ordre 170 MWe.

## **VI. Conclusion générale**

Cette étude nous a permis de simuler une centrale électrique basée sur l'énergie solaire. Nous avons commencé par une étude bibliographique sur les technologies de d'utilisation l'énergie solaire avec une attention particulière portée sur la génération d'électricité à partir des concentrateurs solaires cylindro-paraboliques (PTC). Ensuite, nous avons examiné les différentes technologies disponibles dans le domaine de génération d'électricité de différentes ressources que ce soit fossile ou bien renouvelables. L'utilisation de logiciel SAM nous a beaucoup facilité la simulation du fonctionnement d'une centrale électrique basée sur les concentrateurs solaires de type cylindro-parabolique adapté aux conditions climatiques de la région d'El-Oued. Le rendement global obtenu est de l'ordre de 43% ce qui est encourageant et nous montre que cette technologie mérite d'être exploitée dans cette région, où cette centrale électrique peut produire environ 170 MWe.

## **VII. Perspectives**

A partir des résultats obtenus dans cette étude, nous pouvons conclure que l'exploitation de l'énergie solaire dans la région d'El-Oued pour produire de l'électricité par la technologie de concentration solaire linéaire de tube cylindro-parabolique est faisable et encourageant. Néanmoins, cette étude mérite d'être complétée par une étude économique.

## Références

- [1] A. Sieminski, "Annual Energy Outlook 2017, January 5, 2017. Web page: <https://www.eia.gov>," Johns Hopkins School of Advanced International Studies. Washington, D.C.
- [2] R. Abbas, M. J. Montes, M. Piera, and J. M. Martinez-Val, 2011, "Solar radiation concentration features in Linear Fresnel Reflector arrays," *Energy Conversion and Management*, vol. 54, no. 1, pp. 133-144, doi: 10.1016/j.enconman.2011.10.010.
- [3] M. Li, "investigation of Evacuated Tube Heated by Solar Trough Concentrating System," *Energy Conversion and Management*, vol. 47, pp. 3591–3601, 2006.
- [4] P. Bendt, M. Gaul, and A. Rabl, 1980, "Determining The Optical Quality of Focusing Collectors without Laser Ray Tracing," *J. Sol. Energy Eng*, vol. 102, no. 2, pp. 128-133, <http://dx.doi.org/10.1115/1.3266130>.
- [5] Bonnet, M. Alphilippe, and P. Stouffs, 2003, "Conversion thermodynamique de l'énergie solaire dans des installations de faible ou de moyenne puissance: Réflexion sur choix du meilleurs degré de concentration," pp. 73-80, *Revue d'énergie renouvelable: 11 ème journée internationales de thermique*,
- [6] C. Choudhury and H. K. Sehgal, 1986, "A Fresnel Strip Reflector-Concentrator For Tubular Solar-Energy Collectors," vol. 23, pp. 143-154, *Applied Energy*.
- [7] J. Facao and A. C. Oliveira, "Numerical simulation of a trapezoidal cavity receiver for a linear Fresnel solar collector concentrator," *Renewable Energy*, doi: 10.1016/j.renene.2010.06.003 vol. 36, no. 1, pp. 90-96, 2011/1// 2011.
- [8] L. S. Panna, R. M. Sarvia, and J. L. Bhagoria, "Thermal performance of linear Fresnel reflecting solar concentrator with trapezoidal cavity absorbers," *Applied Energy*, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.08.019 vol. 87, no. 2, pp. 541-550, 2010/2// 2010.
- [9] Energy Information Administration "World electricity generation by fuel for the period 2004–2030", 2007, Web site: [www.eia.doe.gov](http://www.eia.doe.gov), 01 Juillet 2018.
- [10] J. Khan and M. H. Arsalan, 2016, "Solar power technologies for sustainable electricity generation – A review" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 414–425 <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.135>.
- [11] E. Lüpfert, U. Herrmann, H. Price, E. Zarza, R. Kistner, and P. Edition Eyrolles, October 6-8, 2004 "Towards standard performance analysis for parabolic trough collector fields " *12th International Symposium Solar Power and Chemical Energy Systems*, Oaxaca Mexico.: Instituto de Investigaciones Electricas.
- [12] T. M. Razykov *et al.*, 2011, "Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects" *Solar Energy*, vol. 85, pp. 1580–1608, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.002>,
- [13] F. Trieb, O. Langnib, and K. Helmut, 1997, "Solar electricity generation-a comparative view of technologies, costs and environmental impact " *Solar Energy*, vol. 59, no. 1-3, pp. 89-99.
- [14] N. El-Gharbi, 2011, "La centrale hybride de Hassi R'mel," Bulletin des énergies renouvelables, CDER2011, vol. 11.

- [15] H. Gaul and A. Rabl, 1980, "Incidence-Angle Modifier and Average Optical Efficiency of Parabolic Trough Collectors," *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 102, no. 1, pp. 16-21, <http://dx.doi.org/10.1115/1.3266115>.
- [16] N. E. Gharbi, H. Derbal, S. Bouaichaoui, and N. Said, 2011, "A comparative study between parabolic trough collector and linear Fresnel reflector technologies," *Energy Procedia*, vol. 6, pp. 565–572. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.065>.
- [17] **K. D. Le et al.**, May 1995 "Potential impacts of clean air regulations on system operations," *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 647–656.
- [18] S. A. Murtuza, H. V. Byregowda, M. M. Ali, and M. Imran, 2017, "Experimental and simulation studies of parabolic trough collector design for obtaining solar energy " *Resource-Efficient Technologies*, vol. 3, pp. 414–421.
- [19] B. S. Negi, S. S. Mathur, and T. C. Kandpal, 1989, "Optical and thermal performance evaluation of linear Fresnel reflector solar concentrator," *Solar & Wind Technology*, vol. 6, no. 5, pp. 589-593.
- [20] T. A. Stuetzle, 2002, "Automatic control of the 30 MWe SEGS VI parabolic trough plant " Master of science, Mechanical engineering, University of Wisconsin-Madison.
- [21] J. Wang, X. Bi, and X. W, 2016, "Performance simulation comparison for parabolic trough solar collectors in China," *International Journal of Photoenergy*, vol. 2016, Article ID 9260943, pp. 1-16, <http://dx.doi.org/10.1155/2016/9260943>.
- [22] Energy Efficiency et Renewable Energy (EERE). *Concentrating Solar Power Tower Plant Illustration, 2018*, Web Page: <https://www.energy.gov/>, 01 Aout 2018
- [23] Sargent and Lundy, Octobre 2003, "Assessment of parabolic trough and power tower solar technology cost and performance forecasts" report of LLC Consulting Group, Chicago, Illinois National Renewable Energy Laboratory.
- [24] F. J. Collado and J. Guallar, "A review of optimized design layouts for solar power tower plants with campo code," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, pp. 142–154, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.076>, 2013.
- [25] ROMAN Guillo, "*Les centrales à capteurs paraboliques*, Web page: [https://www.ecosources.info/dossiers/Centrale\\_solaire\\_capteur\\_parabolique](https://www.ecosources.info/dossiers/Centrale_solaire_capteur_parabolique) 15 Aout 2018
- [26] L. Li and S. Dubowsky, 2011, "A new design approach for solar concentrating parabolic dish based on optimized flexible petals," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 46, pp. 1536–1548, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.04.012>.
- [27] M. Smith. (2013). *Les centrales solaires à miroir de Fresnel*, site Web, Last edited on 2013-01-16.
- [28] Tomas Fasquel, 2017, "Modélisation et caractérisation expérimentale d'une boucle solaire cylindro-parabolique intégrant un stockage de type thermocline" <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01697915/document>, 15 aout 2018.
- [29] C. Silvi, 2009, "The pioneering work on linear Fresnel reflector concentrators (lfcs) in italy " presented at the 15th SolarPACES Conference, 15. – 18. September 2009, Berlin, Germany.

- [30] G. Zhu, T. Wendelin, M. J. Wagner, and C. Kutscher, 2014, "History, current state, and future of linear Fresnel concentrating solar collectors," *Solar Energy*, vol. 103, pp. 639–652, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.05.021>.
- [31] A. I. Al-Rubaian and A.-f. Hamad, 2004, "Performance of single Axis tracking solar parabolic trough in Riyadh Saudi Arabia," in *World renewable energy congress VIII*.
- [32] N. Janotte, E. Lüpfert, K. Pottler, and M. Schmitz, 11-14 Octobre 2016, "Full parabolic trough qualification from prototype to demonstration loop," in *22nd SolarPACES 2016: International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, vol. 1850, no. 1, (page. 1-8). <https://doi.org/10.1063/1.4984334>: American Institute of Physics.
- [33] S. A. Kalogirou, C. C. Neocleous, and C. N. Schizas, 1996, "A comparative study of methods for estimating intercept factor of parabolic trough collectors," in *Proceedings of the Engineering Applications of Neural Networks (EANN'96) Conference*, pp. 5-8, "<http://ktisis.cut.ac.cy/handle/10488/820>", London, UK,
- [34] European Union, 2012, "EU Energy Policy to 2050." Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012, ISBN 978-92-79-21798-2, doi:10.2833/10759, <https://ec.europa.eu/energy>, 20 Aout 2018.
- [35] A. Rabl, 1985, "Optical analysis and optimization of parabolic reflectors," in *Active Solar Collectors and Their Applications*: OXFORD UNIVERSITY PRESS, New York, pp. 196-211.
- [36] S. Thakur, 2017, "Thermal power plant report," Mechanical Engineering, CHANDIGARH UNIVERSITY.
- [37] Roman Gaillo, 2016, "<https://www.mpoweruk.com>," G. T. A. Engine., Ed., ed, 20 aout 2018.
- [38] Ali Tigour, 2016, "*Conditions Climatiques à El-Oued*". Web page: <https://fr.weatherspark.com>, 21 septembre 2018.
- [39] "*National Renewable Energy Laboratory (NREL)*" [www.nrel.gov](http://www.nrel.gov), 15 juillet 2018.
- [40] L. Luo and M. Feidt, 1992, "Thermodynamics of adsorption cycles: A theoretical study," *Heat Transfer Engineering*, vol. 13, no. 4, pp. 19-31.

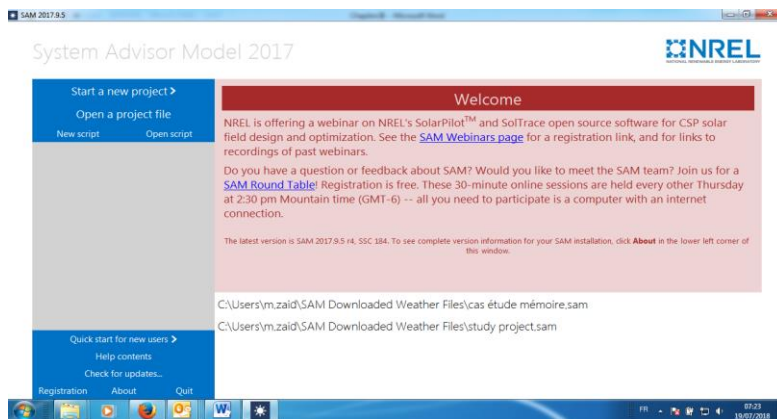
## VIII. Annexes

### I. Etapes de la simulation

Pour réaliser la simulation il est impérativement de suivre les étapes suivantes :

- Etape 01

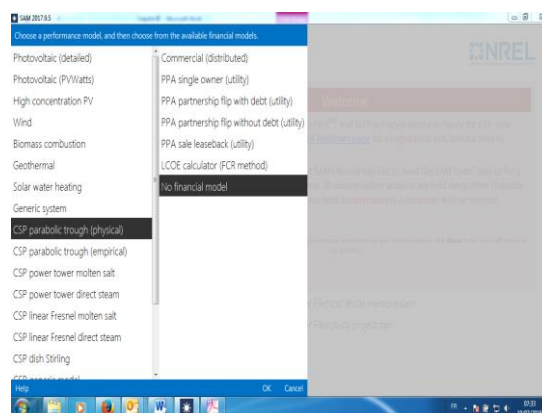
Exécuter le software SAM, la fenêtre suivante s'ouvre et choisir « **start a new project** »



**Figure VIII.1 :** Fenêtre d'exécution du logiciel SAM.

- Etape 02 :

Ensuite choisir, le model de performance. SAM possède plusieurs modèles de simulation selon le type de la technologie des énergies renouvelables à étudier. Dans notre cas, nous avons choisi le model « PTC parabolic through Concentrator (physical) » Centrale solaire Cylindro parabolique (physique) sans prendre en considération l'aspect financier.



**Figure VIII.2 :** Fenêtre de choix du modèle de performance dans le SAM.

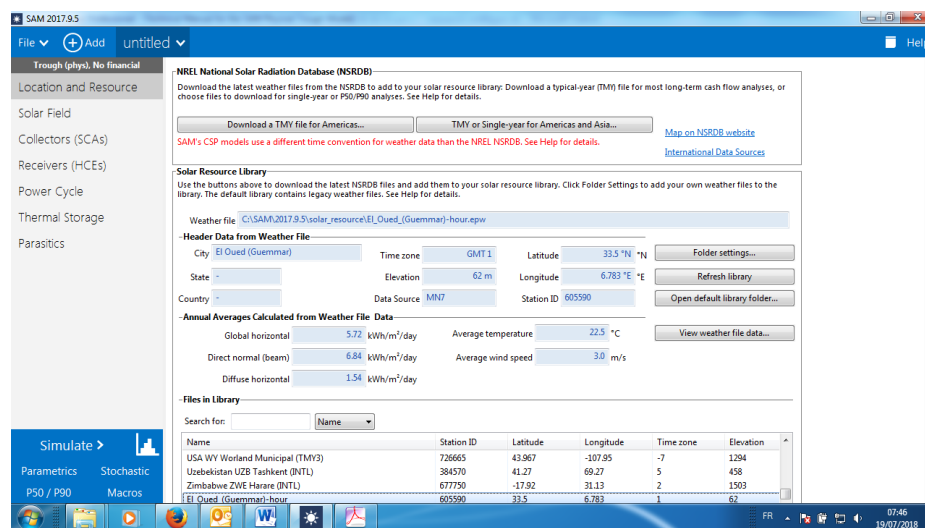


- **Etape 03 :**

Ensuite, nous avons introduit les données la localisation de la wilaya d'eloued et les informations de la source de données qui est la station météorologique de Guemmar portant l'identification 605590.

**Tableau VIII.1 :** *Données de localisation de la wilaya d'el oued.*

Elévation	longitude	latitude	Zone horaire	Rayonnement Global horizontal	Rayonnement direct normal	Diffus horizontal
62m	6.783 °E	33.5°N	GMT1	5.72KWH/m2/J	6.84KWH/m2/J	1.54KWH/m2/J



**Figure VIII.3 :** *Fenêtre d'introduction des données du lieu d'implantation et la source solaire.*

- **Etape 04 :**

L'étape suivante est l'introduction des données du champ solaire.

Le Champ solaire est divisé en deux parties et chaque partie à son tour est répartie en deux sections.

Tableau VIII.2 : Les paramètres du champ solaire.

Partie du champ/sections	Espace entre les lignes	L'angle d'orientation	Efficacité de la pompe HTF	Température antigel	Irradiation de design
02/02	15 m	10 °C	85%	150 °C	950 W/m2

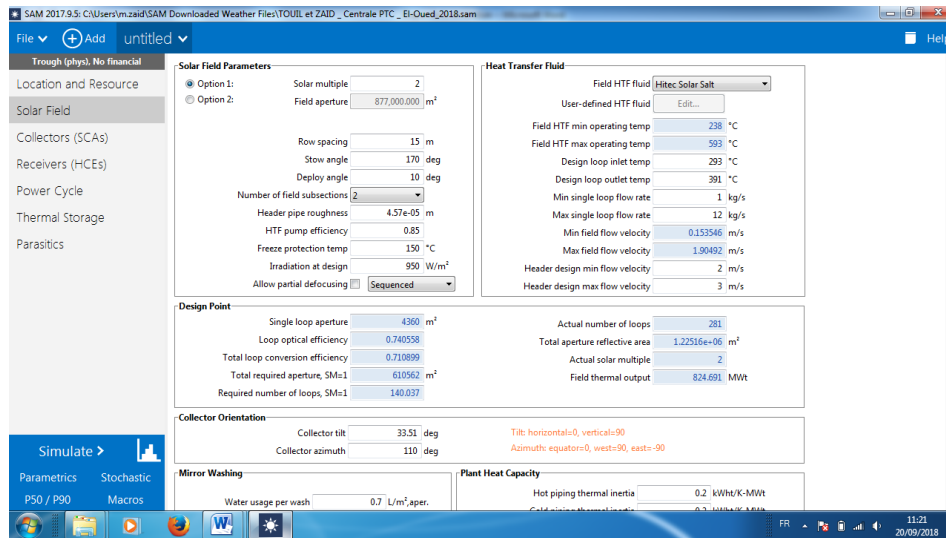


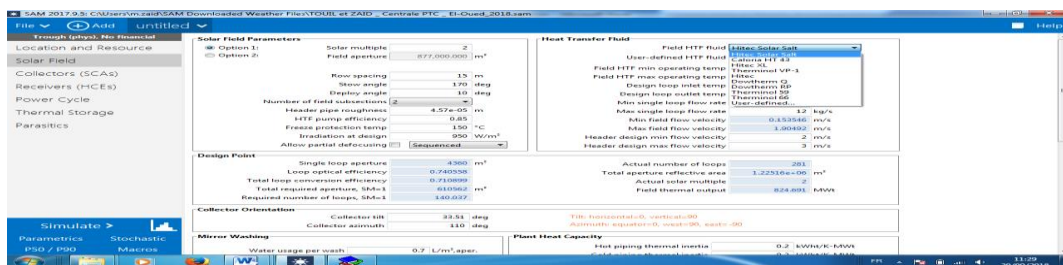
Figure VIII.4 : Fenêtre d'introduction des données du champ solaire.

Dans la même fenêtre, on doit choisir le fluide de stockage, nous avons choisi le Hitec Solar Salt.

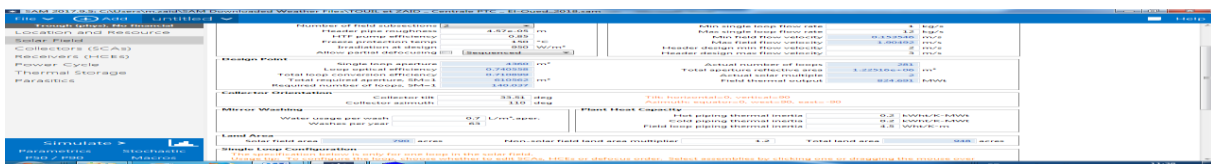
**Tableau VIII.3 : les paramètres de fonctionnement de fluide de travail dans le stockage.**

Caractéristique	Hitec Solar salt
La température opérationnelle minimum °C	238
La température °C opérationnelle maximum	593
Température de désigne d'entrée loop °C	293
Température de désigne sortie dans la loop °C	500
Débit minimum d'entrée dans la loop kg/s	1
Débit maximum d'entrée dans la loop kg/s	12
La vitesse minimum au champ m/s	0.153546
La vitesse maximum au champ m/s	1.90492
La vitesse de désigne minimum du collecteur m/s	2
La vitesse de désigne maximum du collecteur m/s	3

Dans la même fenêtre indiquée dans la figure X.4, on trouve le point de désigne du champ solaire

**Figure VIII.5 : Paramètres de point de désigne.**

Les paramètres de lavages des miroirs et la capacité thermique du champ sont introduits dans la même fenêtre comme indiqué dans la figure ci-dessous.

**Figure VIII.6 : Données pour le lavage des miroirs.**

Chaque nœud comporte 08 ensembles de collecteurs comme indiqué dans la figure ci-dessous :

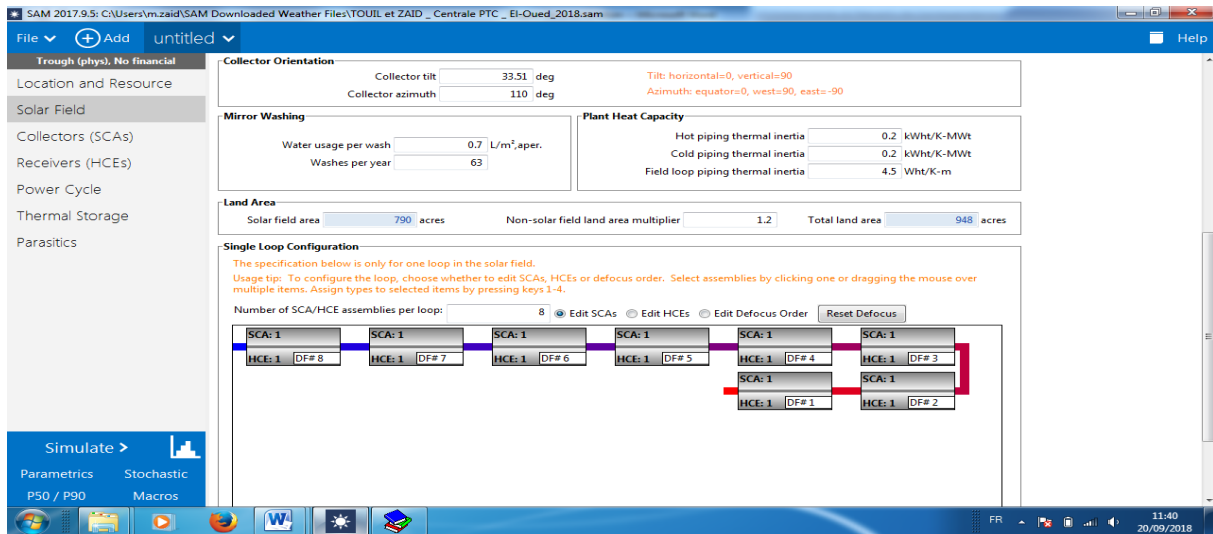


Figure VIII.7 : Configuration d'un nœud.

- **Etape 05**

L'étape suivante est définir le type des collecteurs et leurs paramètres (géométriques et optiques).

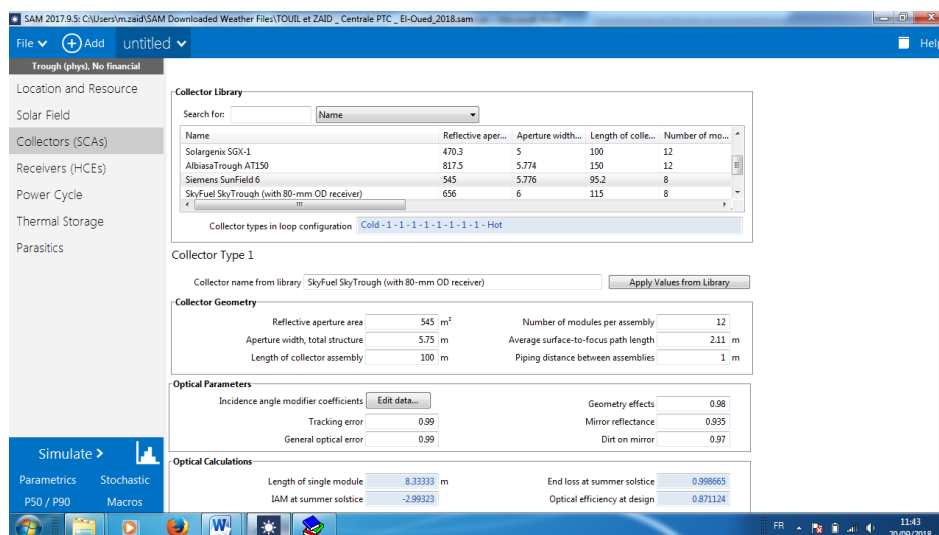


Figure VIII.8 : Fenêtre d'introduction des données des collecteurs et leurs paramètres.

Ensuite, nous allons introduire le type des récepteurs et leurs paramètres géométriques et leur variation.

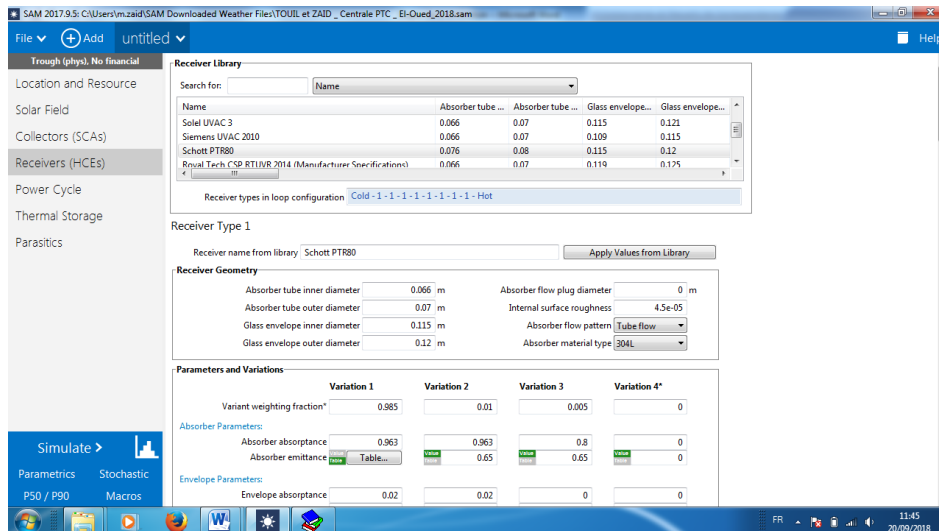


Figure VIII.9 : Fenêtre d'introduction des données de récepteurs et leurs paramètres.

- **Etape 06**

Pour le désigne du bloc de puissance avec une puissance brute de 167 MWe et approximativement une puissance nette de 150 MWe.

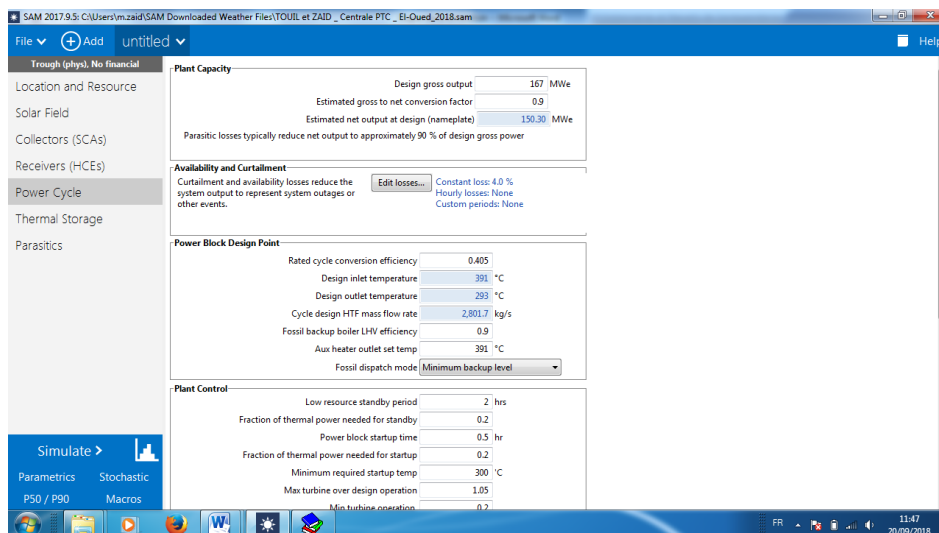


Figure VIII.10 : Fenêtre d'introduction des données de cycle de puissance.

Ensuite nous introduisons les paramètres du cycle de Rankine

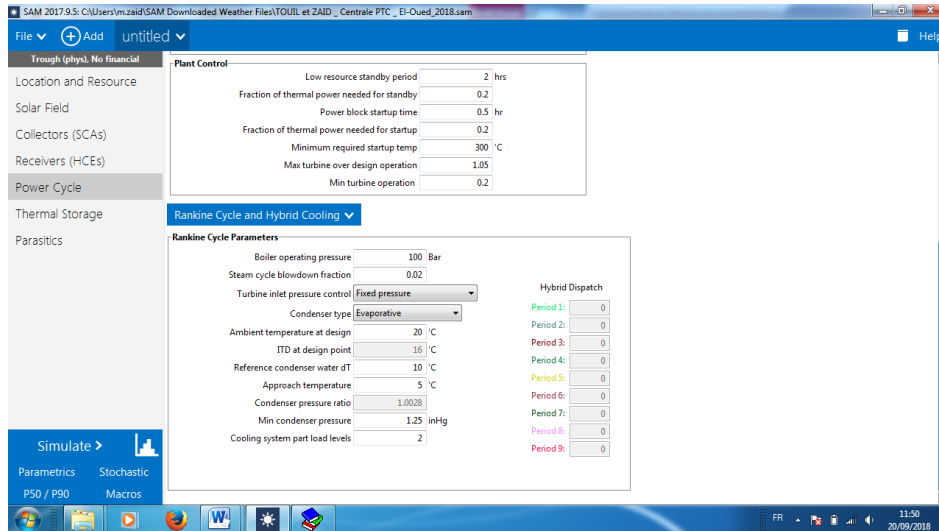


Figure VIII.11 : Fenêtre d'introduction des données de cycle de Rankine (cycle de puissance).

- **Etape 07**

Introduire les paramètres de stockage de l'énergie :

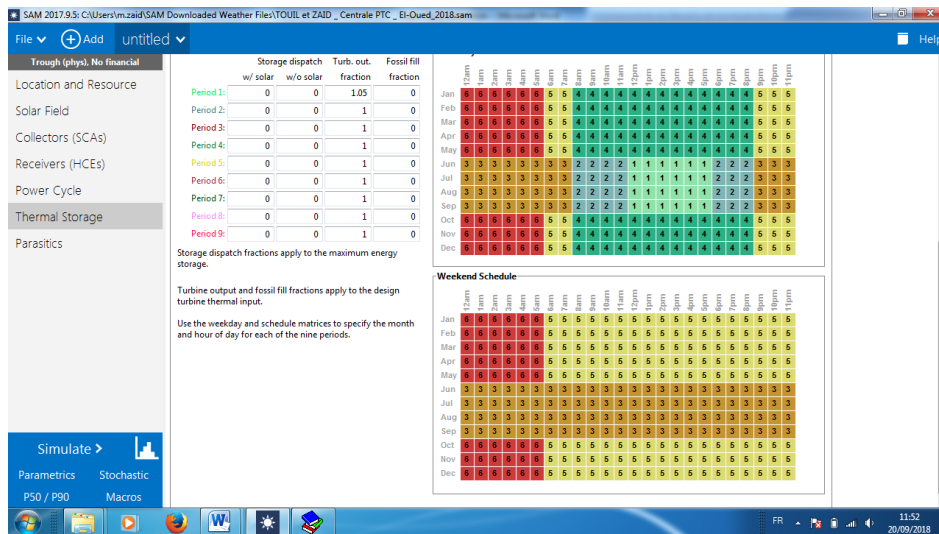


Figure VIII.12 : Fenêtre d'introduction des données de stockage de l'énergie.

- **Etape 08**

Introduire les paramètres des pertes d'énergie

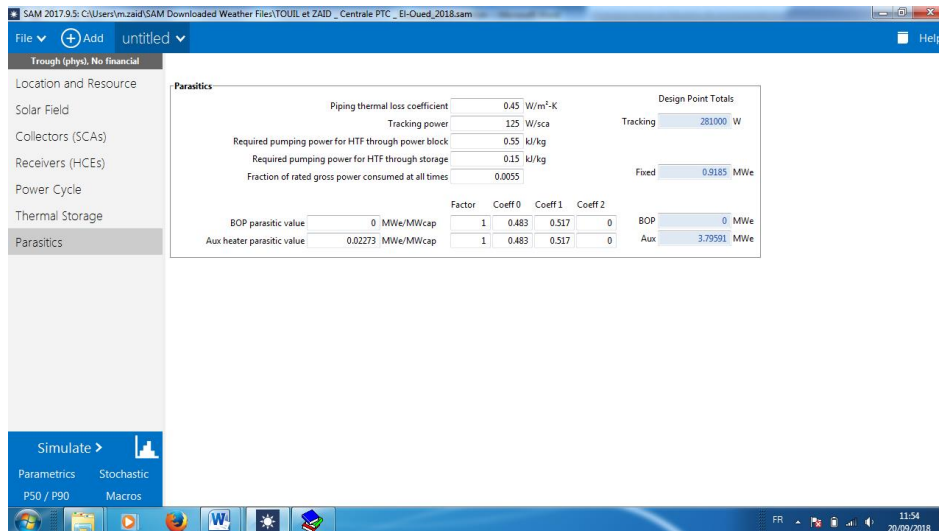


Figure VIII.13 : Fenêtre d'introduction des données de perte d'énergie.

- **Etape 09**

Lancer la simulation et la fenêtre suivante apparaît.

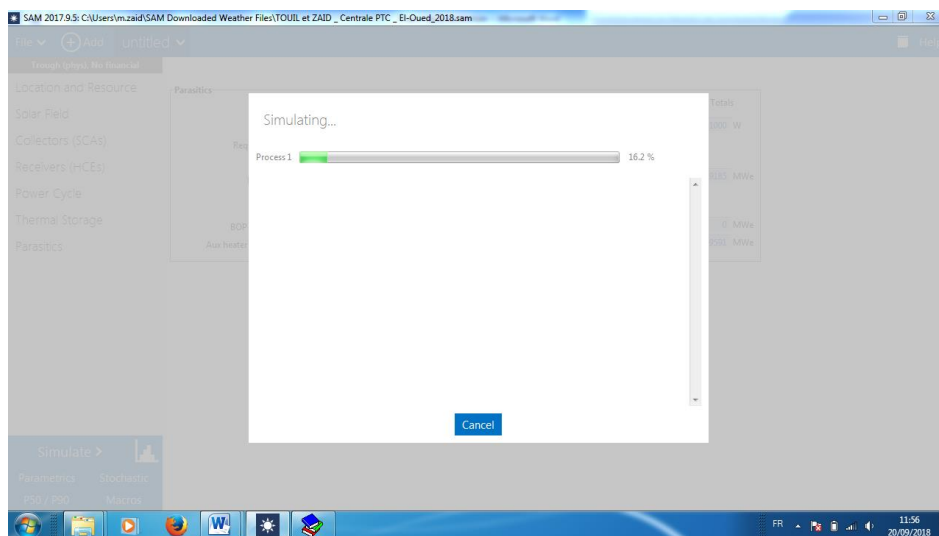
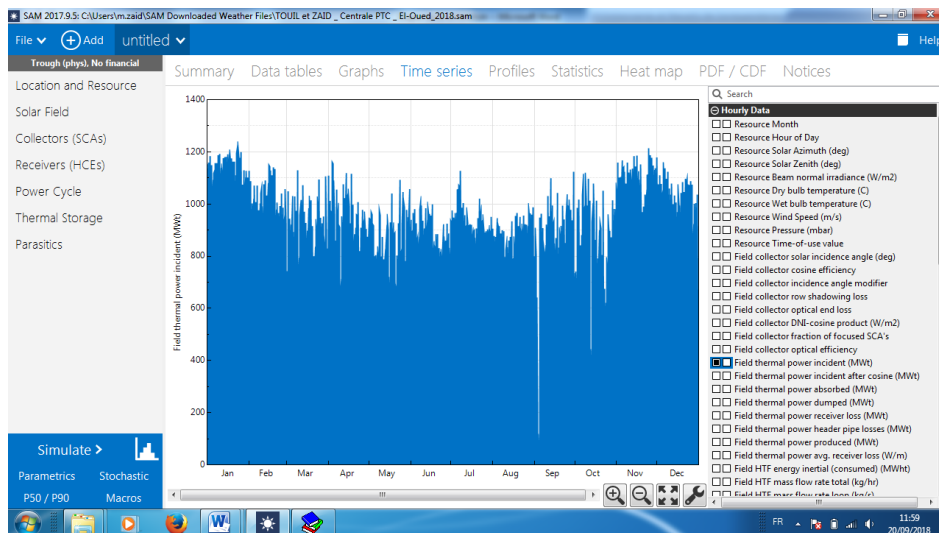


Figure VIII.14 : Fenêtre apparaît pendant le processus de simulation.

**Etape 10**

Une fois le processus achevé, on peut naviguer à travers les onglets de la fenêtre qui apparaît. On peut créer les graphes selon les paramètres souhaités et figurant dans la liste des paramètres dans le logiciel. Vous pouvez exporter les données ou les graphes en fichier Excel ou PDF.



**Figure VIII.15 :** Fenêtre de traitement des données et affichage des graphes.

Ensuite il faut continuer à traiter les données, les graphes et exploiter le logiciel afin d'obtenir des résultats satisfaisants.



## II. Caractéristiques de HITEC Salar Salt (fluide caloporteur)

**Tableau VIII.3** : *Caractéristiques de HITEC Salar Salt (fluide caloporteur)*

<b>Paramètres</b>	<b>Valeur</b>
Point de congélation	142 °C
Viscosité	16 CP @ 150°C & 1.75 CP @400°C
Conductivité électrique	1.7 $\Omega$ .cm
Stabilité thermique	454-538°C
Densité	1.81 g/ml @280°C
Conductivité thermique	0.35 Btu.ft/ft <sup>2</sup> .h.F (242 -365°C)
Chaleur spécifique (solide)	0.32 cal/g.C
Chaleur spécifique (fondue)	0.373 cal/g.C
Chaleur latente (fondue)	20 cal/g

**Titre du mémoire :**

Simulation d'une centrale solaire cylindro-parabolique avec system de stockage thermique appliqué au climat d'El-Oued.

**Master :** Énergies renouvelables en génie mécanique.

**Auteur :** MM. TOUIL Messaoud & ZAID Messaoud

**Mots clés :** Energie, électricité, solaire, concentrateur cylindro-parabolique.

**Résumé :**

Pour répondre à la demande énergétique surtout l'énergie électrique qui est en augmentation en continue sous les contraintes de réchauffement climatiques, les pays et les scientifiques sont en recherche constante pour trouver des ressources nouvelles telles que l'énergie éolienne, hydraulique et l'énergie solaire. Cette dernière c'est l'une des solutions prometteuses avec diverses technologies que ce soit photovoltaïque ou thermique. Après recherches bibliographiques sur le développement de l'énergie solaire et particulièrement les concentrateurs cylindro-parabolique, nous avons présenté les différentes technologies et ressources disponibles pour générer de l'énergie électrique. Une simulation d'une centrale solaire à concentrateurs cylindro-paraboliques a été réalisée avec le logiciel SAM, adaptée aux conditions climatiques de la wilaya d'eloued. Le résultat de cette simulation a montré que l'exploitation de ce type de technologie est faisable dans cette région par la génération d'une énergie électrique de 170 MWe avec un rendement globale de la centrale est de 43%. La surface du champ solaire est de l'ordre de 1225160 m<sup>2</sup> avec un rendement optique de l'ordre de 65% et réception d'une quantité d'énergie de l'ordre de 800 MWt. Le fluide caloporteur absorbe une quantité d'énergie d'environ 500 MWt, avec des pertes thermiques qui varient de 13 à 53 MWt au niveau du tube absorbeur. En plus, le système de stockage reçoit une énergie qui peut aller jusqu'au 70 MWt et restitue une quantité d'énergie qui oscille entre 50 et 65 MWt.

---

**Report title:** Simulation of a parabolic solar power plant with thermal storage system applied to the El-Oued climate.

**Keywords:** Energy, electricity, solar, cylindro-parabolic concentrator.

**Abstract:**

To meet the energy demand, especially electrical energy, which is constantly increasing under the constraints of global warming, countries and scientists are constantly looking for new resources such as wind, hydro and solar energy. The latter is one of the promising solutions with various technologies whether photovoltaic or thermal. After bibliographic research on the development of solar energy and particularly the cylindro-parabolic concentrators, we presented the different technologies and resources available to generate electrical energy. A simulation of a solar plant with cylindro-parabolic concentrators was carried out with the SAM software, adapted to the climatic conditions of eloued. The result of this simulation showed that the exploitation of this type of technology is feasible in this region by the generation of a 170 MWe electric power with an overall efficiency of the plant is 43%. The solar field surface is of the order of 1 225 160 m<sup>2</sup> with an optical efficiency about 65% and reception of a quantity of energy égal to 800 MWt. The coolant absorbs a quantity of energy about 500 MWt, with thermal losses ranging from 13 to 53 MWt at the absorber tube. In addition, the storage system receives energy up to 70 MWt and returns a quantity of energy that oscillates between 50 and 65 MWt.

---

عنوان المذكرة: محاكاة لمركز شمسي نصف اسطواني مع نظام للتخزين الحراري لمنطقة الوادي .

الكلمات المفتاحية: الطاقة ،الكهرباء ، شمسي ، مركز شمسي خطي نصف اسطواني .

**الملخص:**

لتلبية الطلب على الطاقة ، وخاصة الطاقة الكهربائية ، التي تتزايد باستمرار في ظل قيود الاحتباس الحراري ، تبحث البلدان والعلماء باستمرار عن موارد جديدة مثل الرياح والطاقة المائية والطاقة الشمسية وهذه الأخيرة هي واحدة من الحلول الواعدة ذات التقنيات المتنوعة سواء كانت ضوئية أو حرارية ، وبعد البحث الجيولوجي حول تطوير الطاقة الشمسية وخاصة المكثفات المكافئة ، قدمنا التقنيات والموارد المختلفة المتاحة لتوليد الطاقة الكهربائية . تم تنفيذ محاكاة لمصنع شمسي مع مركّزات cylindro-parabolique مع برنامج SAM ، متكيفة مع الظروف المناخية لولاية وادي سوف . وأظهرت نتائج هذه المحاكاة أن استغلال هذا النوع من التكنولوجيا ممكن في هذه المنطقة من خلال توليد قوة كهربائية بقدرة 170 ميغواط بكفاءة كلية تبلغ 43%. تبلغ مساحة المجال الشمسي 1225160 م<sup>2</sup> بكفاءة بصرية تصل إلى 65%. واستقبال كمية من الطاقة تبلغ 800 ميغواط. يمتص أنبوب الامتصاص كمية من الطاقة تبلغ حوالي 500 ميغواط ، مع خسائر حرارية تتراوح من 13 إلى 53 ميغواط في أنبوب الامتصاص .بالإضافة إلى ذلك ، يستقبل نظام التخزين طاقة تصل إلى 70 ميغا واط ، ويعيد كمية من الطاقة تتأرجح بين 50 و 65 ميغواط .