

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



Université Saâd Dahlab Blida-1  
Faculté de Technologie  
Département des Énergies Renouvelables



Mémoire de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de master en énergies renouvelables  
Option : conversion photovoltaïque  
Thème

***Calcul des performances d'une centrale  
hybride CSP/PV sur sites Algériens.***

**Réalisé par :**

Melle. **SEBAI FATMA ZOHRA**

**Soutenu devant le jury composé de :**

<b>MR DOUMAS</b>	USDB 1	Président
<b>MR GOUNOUNOU</b>	USDB1	Examineur
<b>MR SAID</b>		Promoteur

Promotion : 2019/2020

### ملخص

لطالما كانت كهربية المواقع النائية خيارًا استراتيجيًا للبلدان ذات الإمكانيات الشمسية العالية ، ويمكن اعتماد تقنيات مختلفة للطاقة المتجددة بما في ذلك الأنظمة الكهروضوئية والحرارية .  
يمكن أن يؤدي تهجين محطة الطاقة الشمسية المركزة باستخدام نظام الكهروضوئية إلى زيادة عامل سعة المصنع الإجمالي من خلال السماح بتخزين الطاقة الحرارية أثناء إنتاج المحطة الكهروضوئية. تم تطوير توليد الطاقة والتحليل الاقتصادي لمحطات الطاقة الهجينة SAM. (محطة توليد الطاقة البرجية) باستخدام برنامج CSP + الكهروضوئية .  
تم أخذ الظروف البيئية في الاعتبار لموقع في الصحراء ، وهو بقعة ساخنة .  
الكلمات المفتاحية: محطات توليد الطاقة الكهروضوئية ، محطة الطاقة البرجية ، محطة توليد الطاقة الهجينة

## Résumé

L'électrification des sites isolés a toujours été un choix stratégique pour les pays avec un potentiel solaire élevé, différentes technologies énergétiques renouvelables peuvent être adoptés y compris les systèmes photovoltaïques et thermiques.

L'hybridation d'une centrale CSP avec un système PV peut augmenter le facteur de capacité globale de la centrale en permettant à l'énergie thermique d'être stockée pendant que la centrale PV est en production. Une production d'électricité et une analyse économique de centrales hybrides photovoltaïques +CSP (centrale à tour) ont été développées à l'aide du logiciel SAM.

Les conditions environnementales ont été prises en compte pour un site dans le désert, qui est un point chaud.

Mots clés : centrales photovoltaïques, centrale à tour, central hybride

## Abstract

Electrification of isolated sites has always been a strategic choice for countries with high solar potential, different renewable energy technologies can be adopted including photovoltaic and thermal systems.

Hybridizing a CSP plant with a PV system can increase the overall plant capacity factor by allowing thermal energy to be stored while the PV plant is in production. Power generation and an economic analysis of photovoltaic hybrid power plants + CSP (tower power plant) were developed using SAM software.

Environmental conditions were taken into account for a site in the desert, which is a hot spot.

Keywords: photovoltaic power plants, tower power plant, hybrid power plant

## Remerciement

Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience qui m'ont permis d'accomplir ce modeste travail.

Je tiens en premier à exprimer ma grande gratitude envers mon encadreur Monsieur Saïd Nouredine, qui m'a apporté son aide et ses valeureux conseils pour l'accomplissement et le suivi de ce travail.

J'adresse mes plus vifs remerciements au président du jury M..... et les membres du jury M..... qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail.

je tiens à exprimer mes sincères gratitude et remerciements aux personnels de département des énergies renouvelables de l'université de Blida, et en particuliers mes enseignants pour la formation qu'il nous ont inculqué pendant les cinq années d'études ainsi que le cadre administratif qui n'a épargné aucun effort pour nous assurer les meilleures conditions de travail.

Je tiens à exprimer tout particulièrement ma reconnaissance à Monsieur Hamid Charan, pour son soutien et conseils durant toute la période de préparation de ce mémoire.

Je tiens à remercier vivement les membres de ma famille qui m'ont toujours encouragée et soutenue et plus particulièrement mes parents et mes ami (es).

## Dédicaces

Je dédie ce travail de mémoire à mes deux chers parents, avec tous mes sentiments d'amour, de gratitude et de reconnaissance pour tous les sacrifices déployés pour m'élever dignement et assurer mon éducation dans les meilleures conditions....

Merci d'avoir toujours été là pour moi, que Dieu vous protège et vous accorde une longue vie.

Je tiens à dédie ce travail A toute ma famille en particulier mes deux sœur Meriem et Lina.

A mes enseignants sans exception, pour leurs efforts afin de m'assurer cette formation.

À tous mes amis et plus particulièrement Chanez, Sarah, Adnane et Ahmed.

Pour tous mes amis qui m'ont apporté leur soutien moral pendant ces années d'études, je les en remercie sincèrement

## Sommaire

**Résumés****Remerciements****Dédicaces****Listes des abréviations****Liste des figures et tableaux**

Introduction générale.....	1
I. Chapitre 01 : gisement solaire.....	5
1 Introduction .....	6
2 Le soleil .....	6
2.1 Le spectre solaire .....	7
2.2 Types de rayonnement .....	9
3 Calcul de la position du soleil .....	10
3.1 La sphère céleste.....	11
4 Repérage d'un site à la surface terrestre : .....	12
4.1 Les coordonnées géographiques : .....	12
4.2 Détermination de la direction du soleil :.....	13
4.3 Les coordonnées équatoriales : .....	13
4.4 Les coordonnées horizontales :.....	14
5 Rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère : .....	15
6 Estimation de l'éclairement solaire : .....	16
6.1 Modèles mathématiques (les expressions analytiques) :.....	17
6.2 Appareils de mesure du rayonnement solaire .....	18
6.3 Le réseau météorologique Algérien .....	20
6.4 L'imagerie satellitaire .....	20
7 Potentiel solaire en Algérie De par sa situation géographique.....	21
8 Conclusions : .....	21
II. Chapitre 02 : Etat de l'art .....	22
1 Introduction .....	23
2 Historique [16] .....	23
3 L'effet photovoltaïque : .....	25
4 La caractéristique électrique $i(v)$ .....	26

5	Les différentes technologies de cellule solaire.....	28
6	Les systèmes photovoltaïques : .....	28
6.1	Présentation des centrales Photovoltaïques [7].....	29
6.2	Différentes configurations des systèmes PV [8]:.....	30
7	Développement du photovoltaïque dans le monde .....	32
8	Installations de systèmes solaires dans le monde.....	35
9	Les systèmes thermiques : .....	36
9.1	Les composantes de base d'une centrale CSP sont :.....	37
9.2	Température maximale du fluide caloporteur.....	37
9.3	Le facteur de concentration.....	38
10	Les centrales à réflecteurs cylindro-parabolique [18] .....	39
11	Central solaire à tour :[18].....	41
12	Paraboles Solaires Dish Stirling[18].....	42
13	Collecteurs linéaires de Fresnel [18] : .....	43
14	Système multi-sources (système hybride) .....	45
15	Les centrales PV-CSP hybride [20].....	46
III.	Chapitre 03 : simulation .....	49
1	Définition de logiciel (SAM): .....	50
2	Méthodologie de travail : .....	51
2.1	Description de site : .....	51
2.2	Le Relief : .....	51
2.3	La température .....	52
2.4	Les vents : .....	53
2.5	L'éclairement directe et globale :.....	54
3	Description du projet :.....	55
3.1	Critères de choix : .....	55
3.2	Les étapes de la simulation : .....	56
3.3	La courbe de charge de la wilaya de Illizi .....	57
3.4	La simulation : .....	57
4	Résultats et discussions :.....	60
4.1	La puissance générée par la centrale à tour et central photovoltaïque :.....	60
4.2	L'étude économique : .....	66
IV.	Conclusion.....	73

References .....74  
Annexe .....76

**Liste des symboles :**

$G$  : Irradiation solaire reçue sur un plan horizontal (Wh. m<sup>-2</sup> .jour<sup>-1</sup> ).

$\omega_0$ : Angle horaire au coucher du soleil (°).

$S_0$  : Durée du jour (h).

TSV : temps solaire vrai

$\varphi$  : Latitude (°).

$L$  : Longitude (°).

$\delta$  : Déclinaison (°).

$\omega$  : Angle horaire (°).

$\gamma$ : Hauteur angulaire du soleil (°).

$a$  : Azimut du soleil (°).

$\theta_z$  : Angle zénithal (°).

$I_{sc}$  : valeur moyenne de la constante solaire

$V$  : tension appliquée à la diode(V)

$k$  : constante de Boltzmann (J.K<sup>-1</sup> )

$q$  : charge de l'électron (C)

$T$  : température absolue (K)

$I_s$  : courant de saturation de la diode (A)

$I_d$  : courant d'obscurité (A)

ICC : Courant de court-circuit (A).

VCO : Tension de circuit ouvert (V).

$P_{mpp}$  : Puissance au point de puissance maximale (W).

LCOE : Le coût actualisé de l'électricité (\$/kWh)



## Liste des figures

Figure( I-1) structure du soleil .....	7
Figure ( I-2) longueur d'onde du rayonnement solaire sue terre. ....	8
Figure ( I-3) Trajet optique du rayonnement solaire. ....	9
Tout point sur la terre est caractérisé par sa latitude et sa longitude. Ces deux grandeurs représentent les coordonnées géographiques de ce point, ainsi que par son altitude. Figure (I-I-4)	12
Figure( I-5) Les coordonnées géographiques [9] .....	12
Figure ( I-6) Coordonnées horaires [11].....	14
Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et la verticale du lieu. Dans ce repère les coordonnées du soleil sont : (la figure (I-I-7)) .....	14
Figure( I-8) Coordonnées horizontales. [9].....	15
Figure( I-9) Variation annuelle du rayonnement solaire extraterrestre dans un plan perpendiculaire aux rayons .....	15
Figure I-10 Héliographe de Campbell [21]. ....	19
Figure I-11 Pyranomètre d'Eppley. Pour éliminer le rayonnement direct, certains pyranomètres sont munis d'un cache à orienter suivant la saison pour suivre la déclinaison [21]. ....	19
Figure( II-1) Les débuts du photovoltaïque : (a) expérience électrochimique de A.E. Becquerel, (b)la première cellule solaire d'Adams et Day.....	24
Figure ( II-2) Les inventeurs de la première cellule solaire "réelle": Chapin, Fuller et Pearson. La figure à droite montre le premier module solaire au monde (mini module de 8 cellules solaires)	24
Figure( II-3) Fonctionnement d'une cellule PV .....	25
Figure II-4) schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	26
Figure II-5) la caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque .....	27
Figure( II-6) le classement des technologies des cellules photovoltaïques .....	28
Figure (II-7) Schéma synoptique décrivant le système photovoltaïque le plus général.....	28
Figure (II-8) la structure de fixation des modules d'une centrale [7].....	29
figure ( II-9).....	30
Figure( II-10) présentations d'un central photovoltaïque [7].....	30
Figure (II-11) Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes .....	31
Figure (II-12) Configuration du système hybride.....	31
Figure( II-13) une central PV connecté au réseau .....	32
Figure (II-14) Capacité photovoltaïque globale cumulée à l'horizon 2030 .....	33
Figure (II-15) Approvisionnement énergétique primaire total dans le monde en 2014 .....	33
Figure (II-16) Part de la production des différentes énergies renouvelables .....	34
Figure (II-17) Taux de croissance annuel d'approvisionnement énergétique mondial de 1990 à 2014.....	34
Figure( II-18) Capacité installée par pays en 2015 et 2020 (top 10 des pays) .....	35
Figure (II-19) Les composantes d'une centrale CSP [10] .....	36
Figure (II-20) Centrales Solaires Cylindro-paraboliques. ....	40
Figure ( II-21) Centrales Solaires à tour .....	42
Figure( II-22) Centrales Solaire Dish Stirling .....	43

*Figure (II-23) A gauche : Principe de fonctionnement d'un concentrateur à miroirs de Fresnel ...* 44

*Figure ( III-1) la variation de la température en fonction des heures de la journée .....* 52

*Figure( III-2 ) le profil annuel de la variation de la température en fonction des heures de la journée.....* 52

*Figure( III-3) la variation de la vitesse du vent en fonction des heures de la journée pour le mois de mai et décembre.....* 53

*Figure (III-4) profil annuel de la variation de la vitesse vent.....* 53

*Figure( III-5) la variation de l'éclairement global et directe en fonction des heures de la journée pour le mois de décembre et juillet .....* 54

*Figure( III-6) la variation de l'éclairement globale et directe en fonction des heures pour la ville de Illizi. (Annuel) .....* 55

*Figure (III-7) la consommation électrique pour une journée type de l'année de la wilaya de Illizi .....* 57

*Figure( III-8) les étapes de la simulation sur le logiciel SAM (la centrale PV). .....* 59

*Figure( III-9) les étapes de simulation sur le logiciel SAM (central à tour).....* 60

*Figure (III-10) la variation de la puissance générée durant la journée du 20 mars .....* 61

*Figure( III-11) représente la courbe de puissance pour la journée du 20 mars. ....* 61

*Figure (III-12) la variation de la puissance générée durant la journée du 22 sep.....* 61

*Figure( III-13) la variation de la puissance générée durant la journée du 20 juin.....* 62

*Figure( III-14) la variation de la puissance générée durant la journée du 21 décembre. ....* 62

*Figure( III-15) la variation de la puissance générée durant la journée du 20 mars .....* 63

*Figure( III-16) la variation de la puissance générée durant la journée du 22 sep.....* 63

*Figure ( III-17) la variation de la puissance générée durant la journée du 20 juin.....* 64

*Figure( III-18) la variation de la puissance générée durant la journée du 21 décembre .....* 64

*Figure( III-19) la variation de la puissance générée durant la journée du 20 mars .....* 65

*Figure III-20) la variation de la puissance générée durant la journée du 22 septembre. ....* 65

*Figure( III-21) la variation de la puissance générée durant la journée du 20 juin.....* 65

*Figure (III-22) la variation de la puissance générée durant la journée du 21 décembre. ....* 66

*Figure( III-23) la production annuelle de l'énergie .....* 69

*Figure( III-24) la production de la centrale à tour durant 25 ans.....* 70

*Figure( III-25) la production annuelle de la central hybride.....* 71

### Liste des tables

*Table (I-1) Coefficients d'albédo usuels.....* 10

*Table (I-2) les stations météorologiques en Algérie .....* 20

*Table ( I-3) les différents ensoleillements des régions Algériennes.....* 21

*Table (II-1) comparaison entre les technologies CSP .....* 38

*Table (II-2) tableau comparatif entre le PV et CSP.....* 48

*Table( III-1) les paramètres de la centrale photovoltaïque .....* 68

*Table (III-2) les paramètres de la centrale à tour .....* 69

*Table (III-3) les paramètres de la centrale hybride.....* 71

# Introduction générale

## Contexte générale

Dans le contexte mondial caractérisé par la forte augmentation des consommations énergétiques (+ 53 % entre 1990 et 2010) en lien notamment avec la croissance de la demande des pays émergents (la consommation de la Chine est désormais voisine de celle des Etats-Unis), on assiste à un début de « transition énergétique » remettant en cause le modèle de développement énergivore accusé de contribuer au réchauffement climatique et surtout à l'épuisement des ressources fossiles à moyen et long terme[1]

La demande mondiale d'énergie primaire a augmenté d'une moyenne annuelle d'environ 1,8% depuis 2011, bien que le rythme de croissance ait ralenti au cours des dernières années, avec de grandes variations par pays [1]. La croissance de la demande d'énergie primaire s'est accrue en grande partie dans les pays en développement.

Par conséquent, on constate que la croissance et le développement des énergies renouvelables reste la solution la plus efficace. La figure (A) montre l'évolution de la consommation énergétique mondiale.

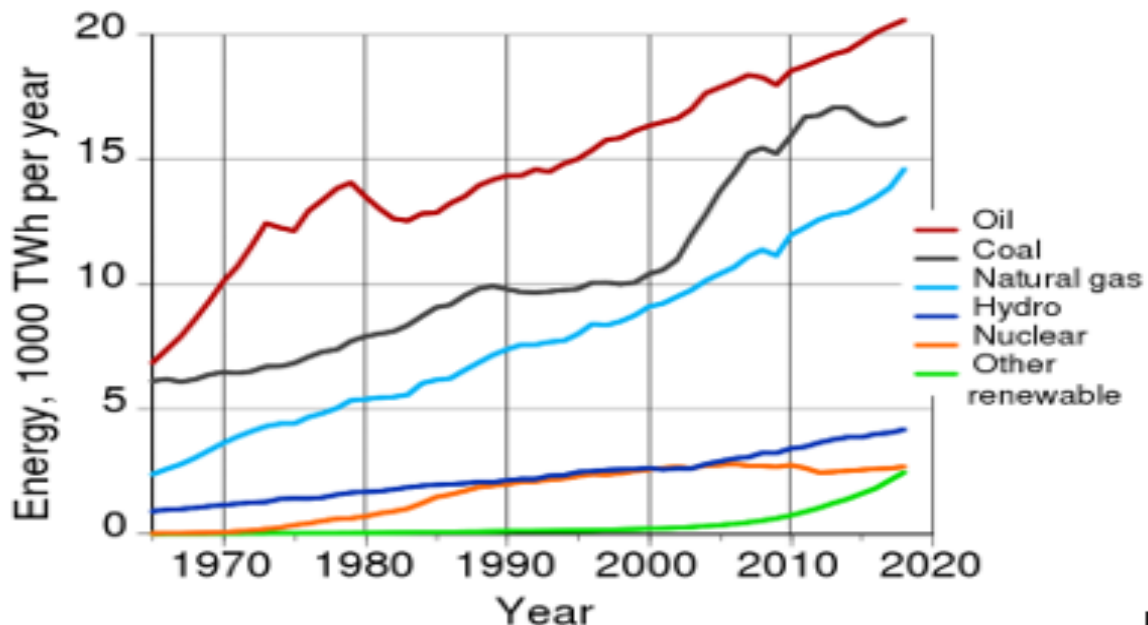


Figure (A) Consommation énergétique mondiale, en térawatts-heures (TWh), de 1965 à 2018 (pétrole, charbon, gaz naturel, hydraulique, nucléaire, autres renouvelables).

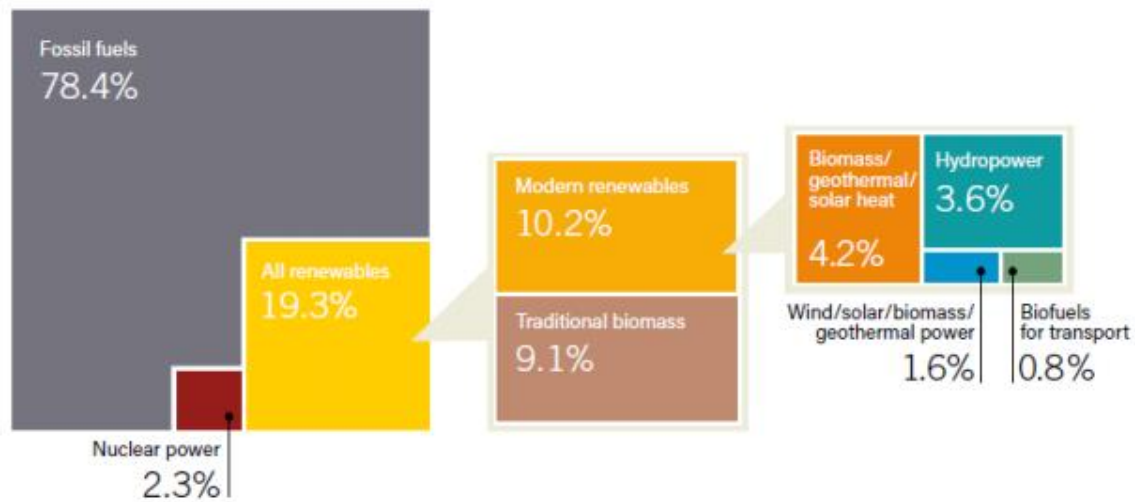


Figure (B) Part estimative d'énergie renouvelable de la consommation finale mondiale d'énergie, 2015 [2]

À partir de 2015, les énergies renouvelables fournissaient environ 19,3% de la consommation mondiale d'énergie. La biomasse traditionnelle, utilisée principalement pour la cuisine et le chauffage dans les régions rurales et éloignées des pays en développement, représentait environ 9,1% et les énergies renouvelables modernes (biomasse traditionnelle non compris) ont augmenté leur part par rapport à 2014 à environ 10,2%. En 2015, l'énergie hydroélectrique représentait environ 3,6% de la consommation totale d'énergie finale, d'autres sources d'énergie renouvelables représentaient 1,6%, l'énergie renouvelable basé sur la production de chaleur thermique représentait environ 4,2% et les biocarburants pour le transport représentaient environ 0,8% [2]. Nous observons que la part des énergies conventionnelles basée sur l'énergie fossile est plus de 78%, figure(B).

L'Algérie a tracé sa feuille de route pour l'usage et la promotion des énergies renouvelables. Motivé par son engagement envers la communauté internationale pour la lutte contre le réchauffement climatique et sa possession de l'un des plus grands gisements solaires au monde, l'état algérien se lance dans un programme qui est consacré au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Le solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité [2].

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche

métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie lumineuse extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est générée par les photons, qui libèrent les électrons, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro puissance calculé en watt crête ( $W_c$ ) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur.

L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée dans des batteries ou injectée dans le réseau.

Les centrales solaires thermodynamiques (ou CSP en anglais « Concentrated Solar Power ») utilisent la concentration du rayonnement solaire direct pour transformer l'énergie électromagnétique rayonnée en chaleur à haute température (énergie thermique), puis en énergie mécanique (via un cycle thermodynamique), et enfin en énergie électrique. L'avantage principal de cette technique est la possibilité de stocker l'énergie thermique produite afin de déphaser la production électrique ou de l'étendre à des périodes où l'ensoleillement est trop faible.

Le principe de ces technologies est de concentrer suffisamment le rayonnement solaire de façon à pouvoir chauffer un fluide caloporteur (de l'huile ou des sels fondus) à haute température (250°C à 2000°C).

Le PV solaire est actuellement la technologie solaire la plus répandue grâce au rythme rapide auquel il s'est développé et devrait atteindre 16% du total mondial de la consommation d'ici 2050 (3). Le coût des modules photovoltaïques a diminué d'un facteur cinq au cours des six dernières années et le coût des systèmes photovoltaïques complets a été divisé par près de trois. Cela a permis au PV de déminer coûts de l'électricité (LCOE) et atteindre la parité du réseau sans incitations sur certains marchés (3).

Mais l'un des obstacles importants l'absence un système de stockage d'électricité économiquement rentable.

Le déploiement des CSP a également connu une forte croissance ces dernières années, atteignant près de 4 GW de capacité cumulée fin 2013, mais insuffisant pour concurrencer le PV, qui est à 150 GW de capacité cumulée au cours de la même année (4).

La principale raison de cette différence réside dans complexité des systèmes CSP. De plus, des baisses de coûts ont été enregistrées à un rythme plus lent que le PV(4).

Néanmoins, la force du CSP sur le PV réside dans la possibilité d'intégrer le stockage d'énergie thermique. Ainsi, les centrales CSP peut fournir de l'électricité à la demande des gestionnaires de réseau électrique et devenir dispatchable pendant les périodes de pointe et le coucher du soleil, lorsque la demande de l'électricité est élevée.

Dans ce contexte, tout en étant initialement perçus comme concurrents, le PV et le CSP se sont révélés complémentaires. L'idée de mettre en œuvre les deux technologies dans un seul système permet la continuité de la production d'électricité pendant les heures de pointe et de la nuit par le stockage CSP, et la production continue durant la journée à partir du PV, ce qui permet d'avoir un système plus rentable par rapport aux deux technologies prises individuelles.

En conséquence, les entreprises d'énergie solaire ont commencé à commercialiser des projets hybrides associant PV et CSP pour offrir la puissance voulue en continue et un prix intéressant (5).

Ce mémoire s'articule autour de deux parties :

La première partie est l'étude théorique, elle sera divisée en deux chapitres : le premier chapitre "gisement solaire" où nous définirons les principaux paramètres climatiques influant sur le rendement de la centrale tel que le rayonnement solaire. Et le deuxième chapitre est une étude biographique sur les centrales photovoltaïques et les centrales solaires à concentration et les centrales combinées.

La deuxième partie consiste à dimensionner une centrale hybride pour la ville de Illizi à l'aide de logiciel SAM (system Advisor model).

Et on termine ce mémoire par une conclusion.

# **I. Chapitre 01 : gisement solaire**

## 1 Introduction

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est l'une des plus facilement exploitables, elle donne à l'utilisateur la possibilité de subvenir sans intermédiaire à une partie de ses besoins. La connaissance de la position du soleil dans le ciel à tout instant et en tout lieu est nécessaire pour l'étude de l'énergie interceptée. Les heures du lever et du coucher ainsi que la trajectoire du soleil dans le ciel au cours d'une journée permettent d'évaluer certaines grandeurs telles que la durée maximale d'insolation, l'irradiation globale.

Dans cette partie nous allons définir certaines grandeurs solaires à savoir :

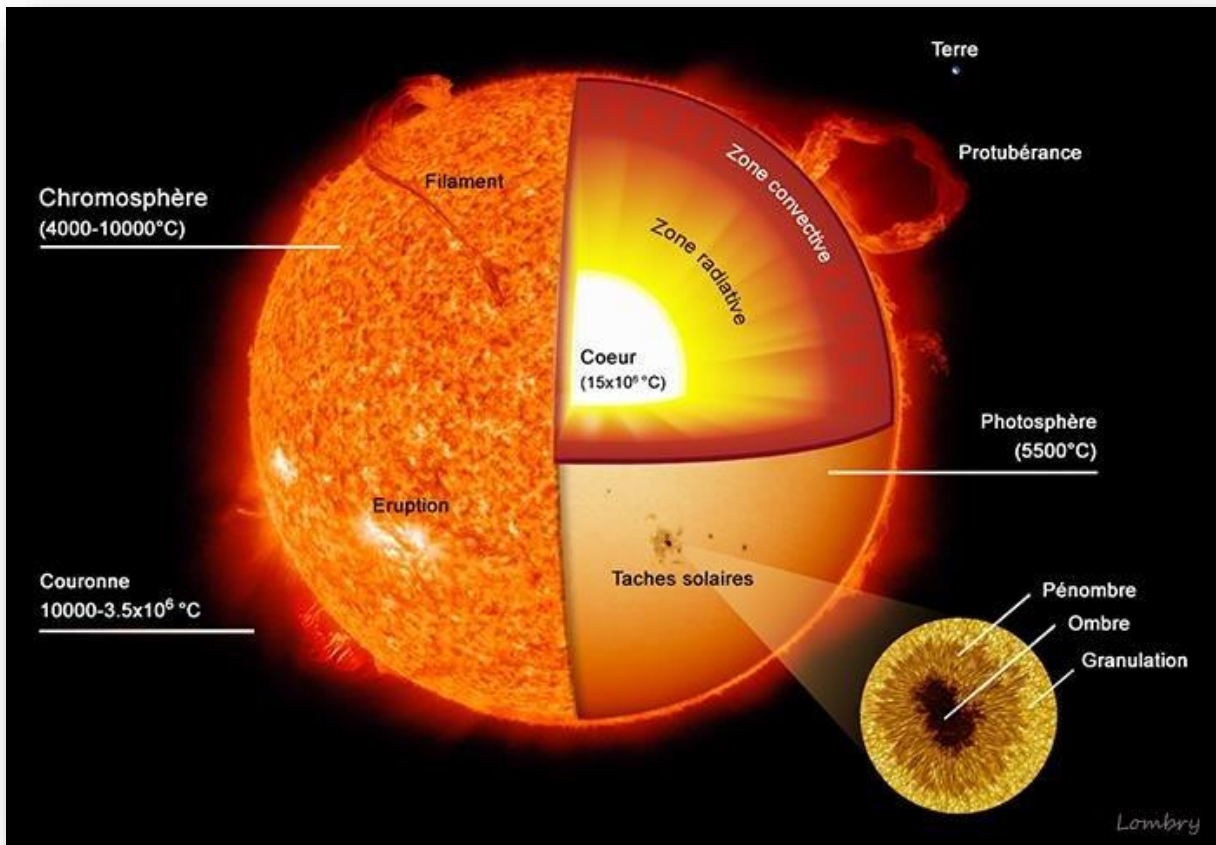
- Les grandeurs astronomiques.
- Les grandeurs géographiques.
- Le rayonnement solaire hors atmosphère.
- Le rayonnement direct, diffus et global.

## 2 Le soleil

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre. L'astre soleil est de constitution gazeuse, de forme sphérique de  $14 \times 10^5$  km de diamètre, sa masse est de l'ordre de  $2 \times 10^{30}$  kg. Il est constitué principalement de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant est un mélange de plus de 100 éléments [1], [2]. Il est situé à une distance moyenne de la terre égale à environ 150 millions de km. Sa luminosité totale, c'est-à-dire la puissance qu'il émet sous forme de photons, est à peu près égale à  $4 \times 10^{26}$  W [3], [2]. Seule une partie est interceptée par la terre, elle est de l'ordre de  $1,7 \times 10^{17}$  W. Elle nous parvient essentiellement sous forme d'ondes électromagnétiques ; 30% de cette puissance est réfléchi vers l'espace, 47% est absorbée et 23% est utilisée comme source d'énergie pour le cycle d'évaporation-précipitation de l'atmosphère [1], [2].

La Figure (1.1) représente la structure du soleil (les couches de l'étoile et leurs températures).





Figure( I-1) structure du soleil

Le flux solaire reçu au niveau du sol terrestre dépend ainsi de plusieurs paramètres comme :

- L'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre,
- La latitude du lieu de collecte, de son degré de pollution ainsi que de son altitude,
- La période de l'année,
- L'instant considéré dans la journée,
- La nature des couches nuageuses.

### 2.1 Le spectre solaire

Le rayonnement solaire est caractérisé par un ensemble d'ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Ces ondes transportent l'énergie envoyée directement à partir de la photosphère du soleil, [4]. Il se compose donc d'ultraviolets, de la lumière visible, mais également d'ondes radio en plus des rayons cosmiques

## Chapitre 01 : Gisement solaire

La figure (1-2) présente la courbe d'énergie du corps noir à 5700K, le rayonnement solaire hors de l'atmosphère et le rayonnement solaire au niveau de la mer en fonction de la longueur d'onde. Ces courbes montrent que 9,2% de l'énergie de ce spectre se trouve dans l'ultraviolet, 42,4% dans le visible et 48,4% dans l'infrarouge.[4]

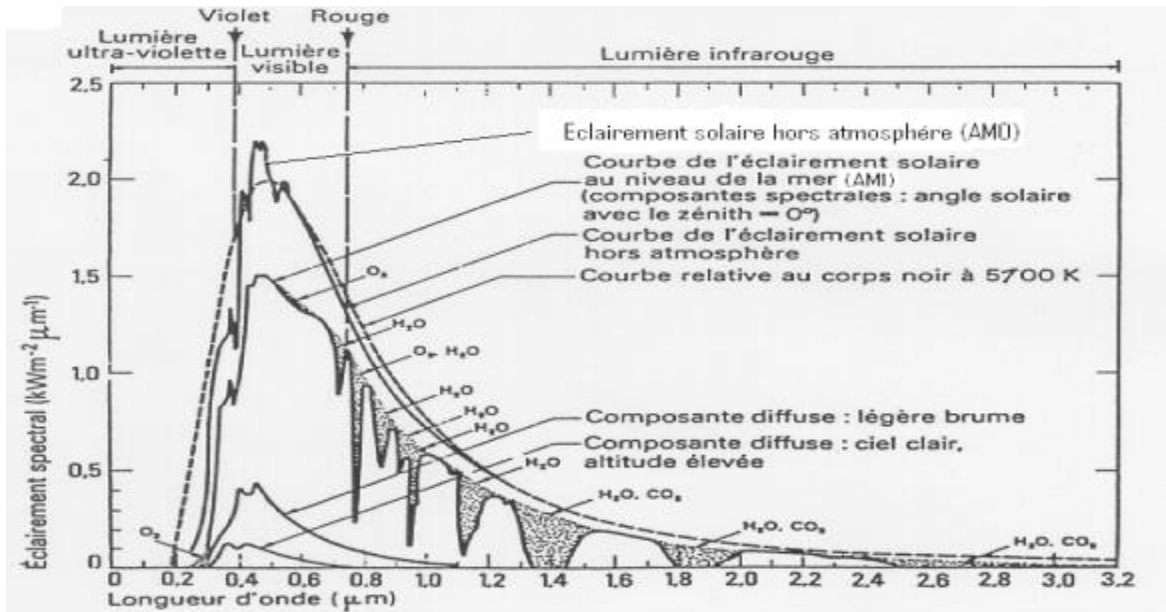


Figure (1-2) longueur d'onde du rayonnement solaire sur terre.

A la surface de la terre, le spectre solaire n'est pas le même que dans l'espace, car il est pondéré par l'absorption des molécules présentes dans l'atmosphère ( $O_3$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ , ...).[5]

Les conditions climatiques ainsi que la présence de particules influencent également la valeur réelle du spectre. Pour cela on introduit un coefficient appelé masse d'air ( $AM_x$ ) dont l'expression est :

$$x = \frac{1}{\sin \theta} \quad (I.1)$$

Où  $\theta$  est l'angle que fait le soleil avec son zénith

AM0 : Hors atmosphère (application spatiale).  $P = 1.36 \text{ kW.m}^{-2}$

AM1 : Le soleil est au zénith du lieu d'observation (à l'équateur).

AM1.5 : Spectre standard, le soleil est à  $45^\circ$ .  $P = 1 \text{ kW.m}^{-2}$  [6]

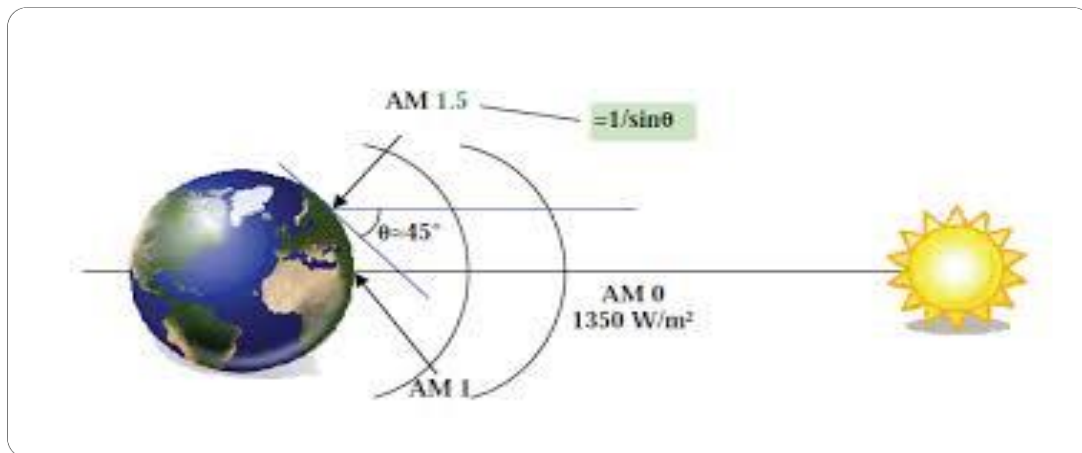


Figure ( I-3) Trajet optique du rayonnement solaire.

D'après la figure (I-3), nous constatons que le rayonnement solaire peut être réfléchi, diffusé ou absorbé.

Par ailleurs, les spectres des rayonnements réfléchi, diffusé, et absorbé sont différents.

### 2.2 Types de rayonnement

Bien que le rayonnement du soleil soit constant, au moment où il atteint la surface de la Terre il devient fortement variable et cela est dû à son absorption et à sa dispersion dans l'atmosphère terrestre. Ce rayonnement peut principalement être divisé en [5] :

- **Rayonnement directe** : le plus puissant, qui provient directement du soleil sans subir d'obstacles sur sa trajectoire et qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications (nuage, immeubles, ... etc.).
- **Rayonnement diffus** : il provient des multiples diffractions et réflexions du rayonnement solaire direct par les nuages. Représente la « lumière du jour ».
- **L'albédo** En réalité, la terre n'est pas un corps noir, une partie du rayonnement solaire incident est réfléchi par l'atmosphère (principalement par les nuages) et par le sol terrestre. Cette quantité est appelée le flux d'albédo. On définit généralement l'albédo comme étant le rapport de l'énergie solaire réfléchi par une surface sur l'énergie solaire incidente. On utilise une échelle graduée de 0 à 1, correspondant respectivement au noir, pour un corps avec aucune réflexion, et au miroir parfait, pour un corps qui diffuse dans toutes les directions et sans absorption de tout le rayonnement visible qu'il reçoit. Le tableau (I.1) regroupe les valeurs d'albédo pour différentes surfaces [7] :

Table I-1) Coefficients d'albédo usuels.

Type de surface	Albédo
Surface de lac	0,02 à 0,04
Forêt de conifères	0,05 à 0,15
Forêt tropicale	0,12
Herbe verte	0,25
Sable léger et sec	0,25 à 0,45
Sol sombre	0,05 à 0,15
Glace	0,30 à 0,40
Mer chaude	0,05
Mer froide	0,15
Neige tassée	0,60
Neige fraîche	0,85
Nuage	0,86
Verre à vitres	0.10

- **Rayonnement globale** L'énergie globale est l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale. C'est la somme des énergies directes et diffuses. Elle provient à tout moment du jour de l'ensemble de l'hémisphère apparent

### 3 Calcul de la position du soleil

La rotation de la Terre autour du Soleil décrit une ellipse légèrement aplatie avec une période de 365,25 jours. Dans cette ronde annuelle autour du Soleil, la Terre effectue un tour complet sur elle-même en 24 heures autour de l'axe des pôles. Cet axe nord - sud fait un angle de déclinaison  $\delta = 23^\circ 45'$  avec la direction perpendiculaire au plan de l'orbite terrestre autour du Soleil.

Cette inclinaison est constante tout au long de la rotation autour du Soleil et est responsable des variations saisonnières. Ainsi pendant les mois d'hiver, en hémisphère nord la durée d'insolation est relativement courte et le Soleil ne monte pas très haut dans le ciel. Pendant les mois d'été, la situation est inversée, l'hémisphère nord est tourné vers le Soleil. Les jours sont alors plus longs que les nuits dans l'hémisphère nord et le rayonnement incident se rapproche de la verticale, Figure (1.4). [4]

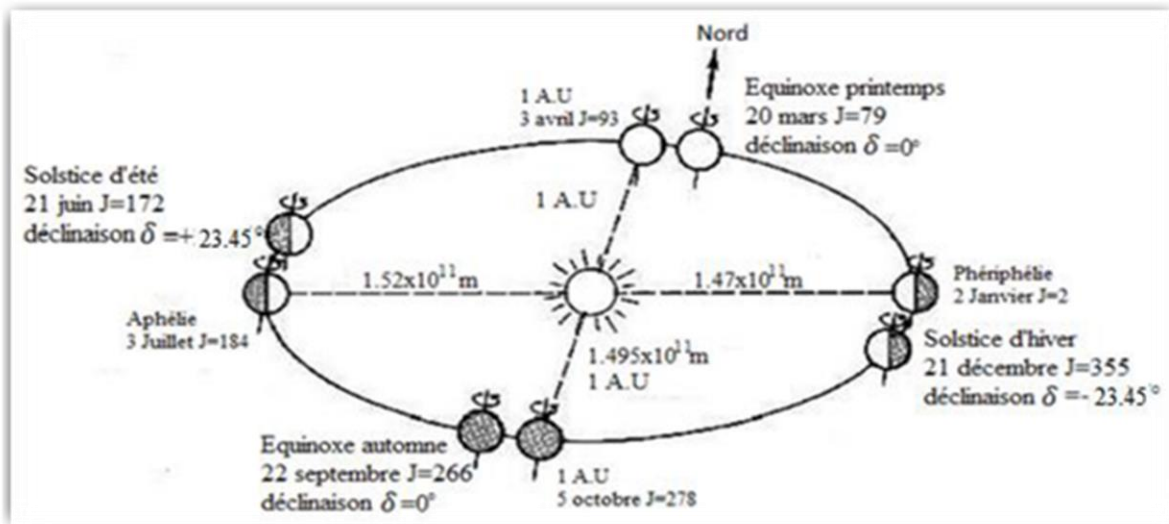


Figure (I-4) Variation saisonnière du rayonnement solaire.[8]

### 3.1 La sphère céleste

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, qui admet pour centre la terre, et pour rayon la distance (terre – soleil). On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes caractéristiques sur la sphère elle-même comme c'est indiqué sur la figure (I-5).

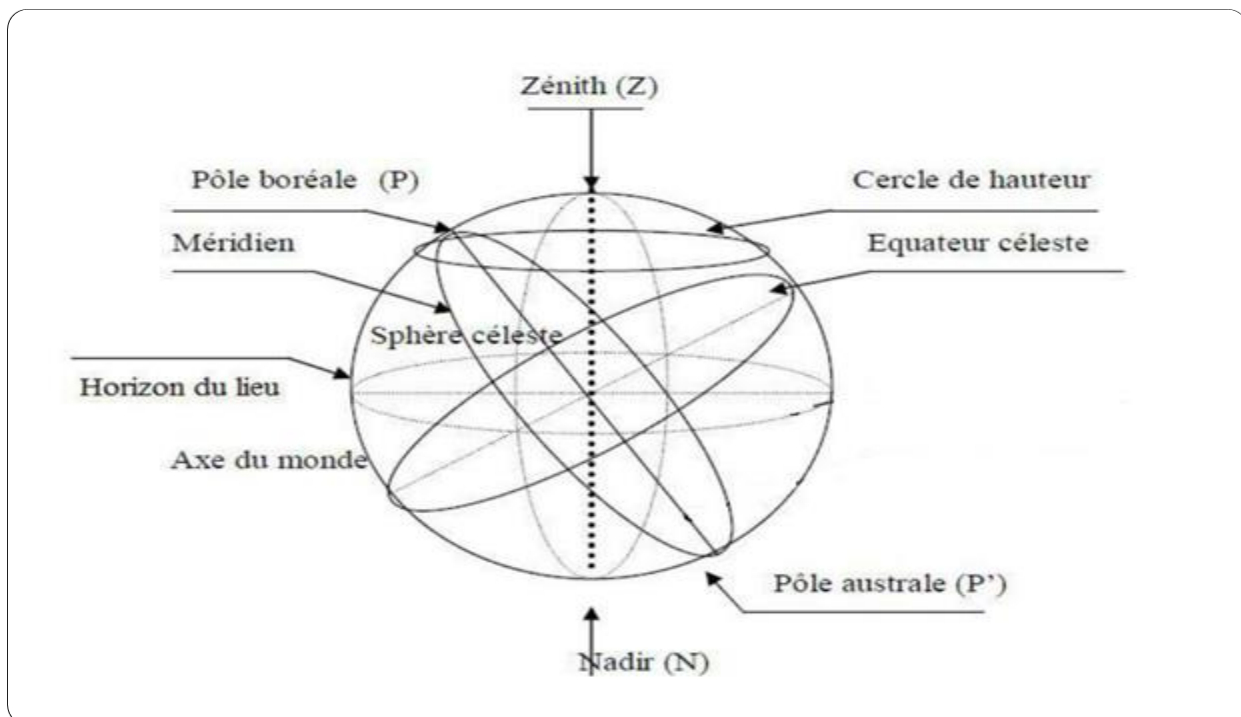


Figure (I-5) La sphère céleste.

La direction des objets peut être quantifiée de façon précise à l'aide d'un système de coordonnées célestes.

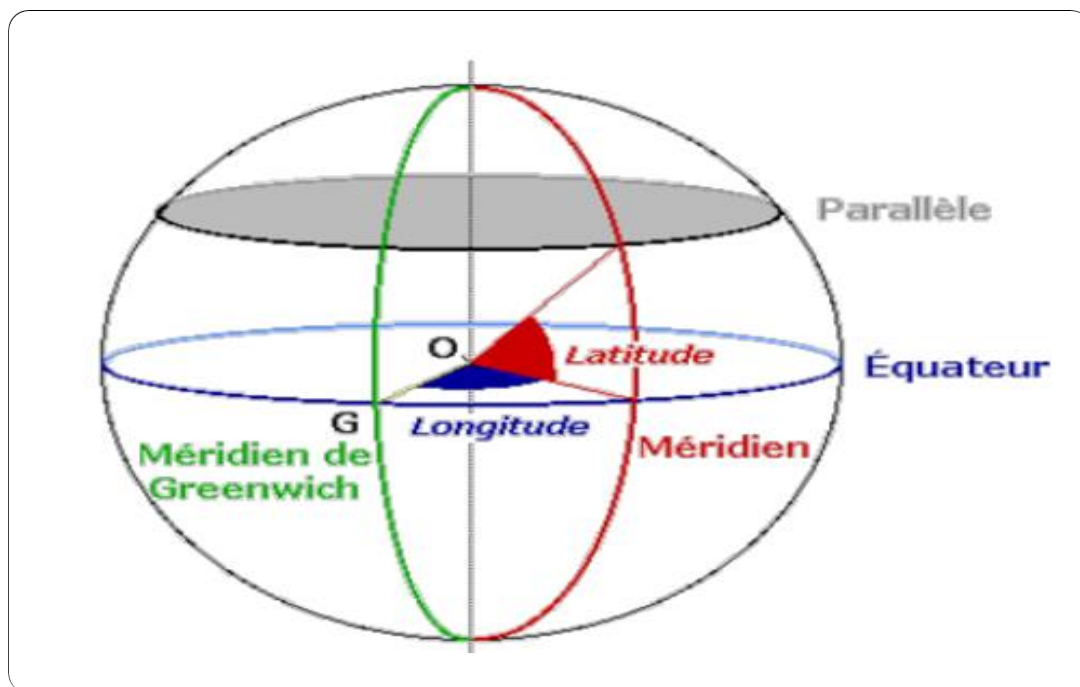
### 4 Repérage d'un site à la surface terrestre :

#### 4.1 Les coordonnées géographiques :

La Terre est pratiquement une sphère qui tourne autour d'un axe passant par le pôle Nord, et le pôle Sud.

Tout point sur la terre est caractérisé par sa latitude et sa longitude. Ces deux grandeurs représentent les coordonnées géographiques de ce point, ainsi que par son altitude. Figure (I-I-4)

- ✚ **La longitude (L) :** c'est l'angle formé par le méridien de Greenwich et le méridien du lieu considéré. La longitude est comprise entre  $-180^\circ$  (vers l'ouest) et  $+180^\circ$  (vers l'est). Comme la terre met 24 heures pour faire un tour sur elle-même ( $360^\circ$ ), chaque heure représente  $15^\circ$  d'écart de longitude et donc, chaque degré de longitude représente 4 minutes. [8]
- ✚ **La latitude :** la latitude d'un lieu à la surface de la terre est l'angle entre l'équateur et le rayon de la terre passant par le lieu considéré. Elle est comptée positivement de 0 à  $+90^\circ$  vers le nord et négativement de 0 à  $-90^\circ$  vers le sud [8].



Figure( I-5) Les coordonnées géographiques [9]

## 4.2 Détermination de la direction du soleil :

Pour un lieu donné on repère la direction du soleil de deux manières :

- Par rapport au plan horizontal du lieu désigné par les coordonnées horizontales liées à un point donné de la Terre.
- Par rapport au plan équatorial de la terre désigné par les coordonnées équatoriales.

## 4.3 Les coordonnées équatoriales :

Les coordonnées horaires dont le repère sont données par l'axe des pôles et le plan de l'équateur, le méridien du lieu étant pris comme origine. Chaque point de l'espace est repéré par sa déclinaison et son angle horaire [10].

- ✚ **La déclinaison ( $\delta$ )** : c'est l'angle que forme le vecteur reliant le centre de la terre au soleil et le plan équatorial de la terre. Elle varie de  $+23,45^\circ$  au solstice d'été (21 juin) à  $-23,45^\circ$  au solstice d'hiver (21 décembre) en passant par la valeur  $0^\circ$  aux équinoxes (21 mars et 23 septembre). Cette déclinaison est due à l'inclinaison de l'axe des pôles terrestres par rapport au plan écliptique ce qui nous donne les différentes saisons.  $\delta$  est donnée par la relation suivante [11] [12]:

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{2.\pi(j+248)}{365}\right) \quad (I.2)$$

Cette formule donne la déclinaison en degré

J : Le numéro du jour dans l'année compté à partir du premier janvier.

- ✚ **L'angle horaire ( $\omega$ )** : c'est l'angle compris entre le méridien origine passant par le sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du soleil dans le ciel. Il est donné par la relation suivante [11]:

$$TSV = \frac{180}{12} \times (TSV - 12) = 15 \times (TSV - 12) \quad \text{En degrés} \quad (I.3)$$

TSV : temps solaire vrai

Il vaut  $0^\circ$  à midi solaire (quand le soleil atteint son point le plus haut dans le ciel), ensuite chaque heure correspond à une variation de  $15^\circ$ , car la période de la terre dans sa rotation sur elle-même est égale à 24h, et varie entre  $180^\circ$  et  $-180^\circ$ , compté négativement le matin lorsque le soleil vers l'Est et positivement le soir.



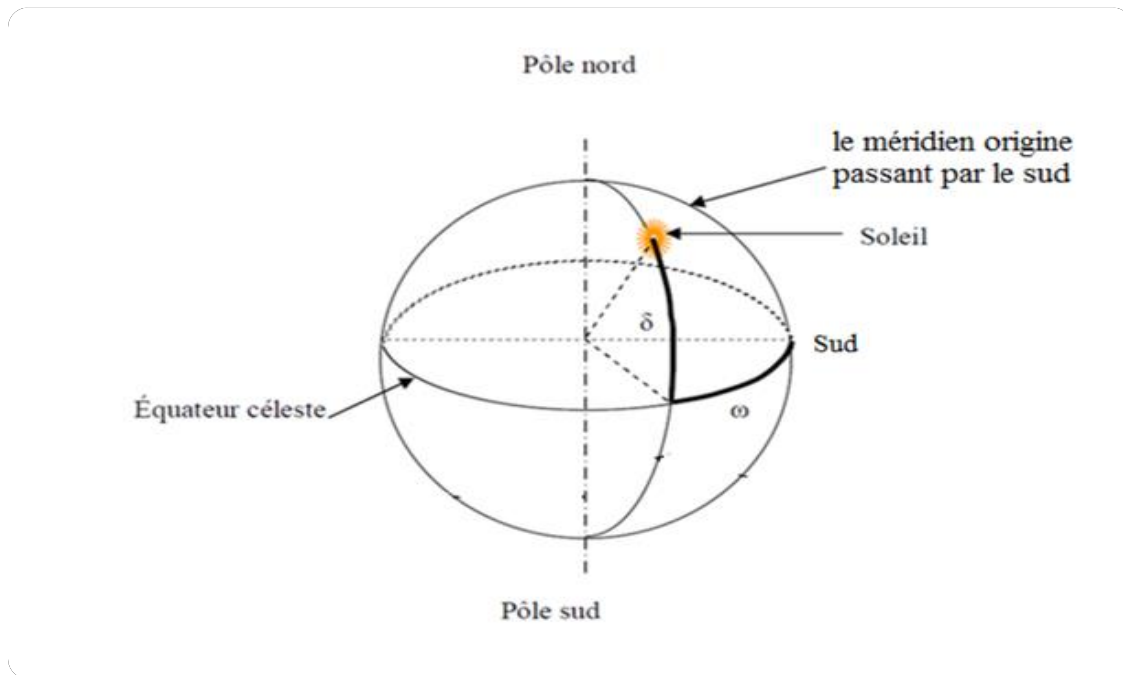


Figure (I-6) Coordonnées horaires [11]

## 4.4 Les coordonnées horizontales :

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et la verticale du lieu. Dans ce repère les coordonnées du soleil sont : (la figure (I-I-7))

- ✚ **La hauteur du soleil (h) :** La hauteur du soleil est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. Elle est égale à 0° au lever et au coucher astronomiques du soleil, sa valeur est maximale à midi, en temps solaire vrai. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et au cours de l'année selon la relation suivante [13]

$$\sin (h) = \sin (\varphi) . \sin (\delta) + \cos (\varphi) . \cos (\delta) . \cos (\omega) \quad (I.4)$$

$\varphi$  : Latitude du lieu.

$\delta$  : La déclinaison du soleil.

$\omega$  : L'angle horaire.

$h > 0$  correspond au jour

$h < 0$  correspond à la nuit  $h = 0$  correspond au lever et au coucher du soleil

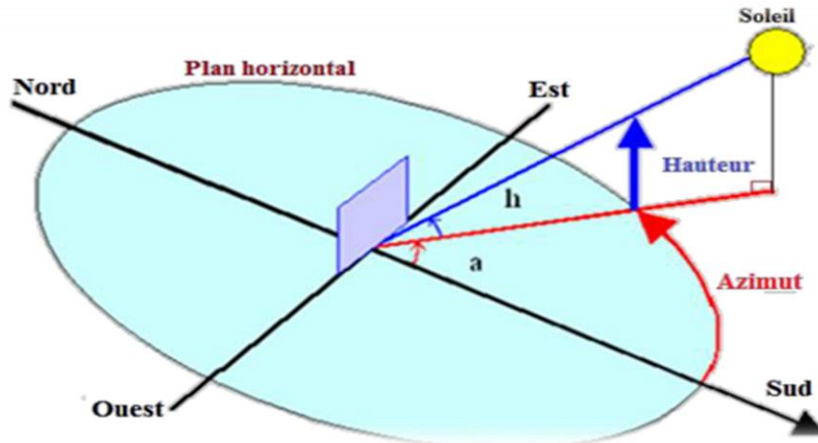
- ✚ **Angle de zénith  $\theta_z$  en (°) :** il est défini comme étant l'angle entre la verticale du lieu et la direction du soleil, autrement dit le complément de l'altitude solaire (h) [13] :



$$\theta_z = 90 - h \text{ (}^\circ\text{)} \quad (\text{I.5})$$

✚ **L'azimut (a)** : C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et le sud. L'azimut est compté positivement vers l'Est et négativement vers l'Ouest. Il est donné par la relation suivante [13]:

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (\text{I.6})$$

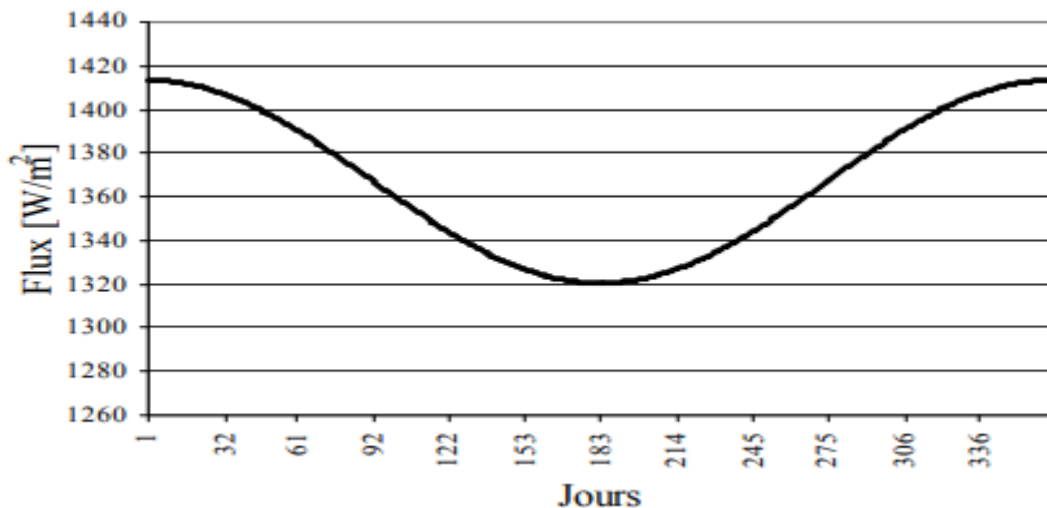


Figure( I-8) Coordonnées horizontales. [9]

## 5 Rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère :

L'émission de rayonnement électromagnétique du soleil se manifeste par une puissance moyenne de 1367 W/m<sup>2</sup> dans un plan perpendiculaire au rayonnement, qui varie de ± %4,3] environ au cours de l'année.

[17]



Figure( I-9) Variation annuelle du rayonnement solaire extraterrestre dans un plan perpendiculaire aux rayons

Le calcul du rayonnement extraterrestre peut être effectué par la formule approximative (Duffie and Beckmann, 1991) [2] suivante :

$$I = I_{sc} (1 + 0.034 \cos(\frac{2}{365} N)) \quad (\text{I.7})$$

$N$  est le nombre de jour dans l'année

Energie reçue par une surface horizontale située à l'extérieur de l'atmosphère L'intégration de la formule (1) entre le lever et le coucher du soleil, permet d'estimer l'irradiation (énergie) reçue par une surface réceptrice horizontale, hors atmosphère, ce qui donne la formule suivante [7] :

$$I_0 = \frac{24}{\pi} ISC \left[ \frac{\pi}{180} \sin \varphi \sin \delta + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega s \right] \quad (\text{I.8})$$

$\omega s$  : l'angle horaire du lever ou du coucher du soleil (en degré).

$$\omega s = \cos^{-1}(-\tan \varphi \cdot \tan(\delta)) \quad (\text{I.9})$$

$I_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$  : valeur moyenne de la constante solaire

### 6 Estimation de l'éclairement solaire :

L'éclairement solaire est défini comme étant la puissance ( $\text{W/m}^2$ ) reçue par unité de surface réceptrice plongée dans un flux énergétique. L'énergie solaire (constance solaire moyenne à l'entrée de l'atmosphère,  $1367 \text{ W/m}^2$ ) subit une dégradation lorsqu'elle traverse l'atmosphère, une partie seulement de cette énergie est disponible au sol.

- L'éclairement solaire est estimé par plusieurs méthodes :
  1. Modèles mathématiques (les expressions analytiques).
  2. Les bases de données du rayonnement.
  3. Satellites.
  4. Les instruments de mesures.
  5. Les logiciels (annexe A).

### 6.1 Modèles mathématiques (les expressions analytiques) :

Le rayonnement solaire se décompose en deux parties principales qui sont le rayonnement solaire direct ( $I_{DN}$ ) et le rayonnement solaire diffus (D).

La somme de ces deux rayonnements est appelée : rayonnement solaire global (G).

Ces expressions empiriques ont été obtenues par analyse de nombreuses mesures météorologiques réalisées (C. Perrin de Brichambaut) (voir tableau I.2):

Tableau (I.2) Expressions empiriques des éclairagements solaires par, ciel clair mais pour trois Conditions de troubles en fonction la hauteur solaire [17].

Condition de troubles	$I_{DN}$ [W/m <sup>2</sup> ]	G [W/m <sup>2</sup> ]
Conditions normales	$1230 \exp\left[-\frac{1}{3,8 \sin(h+1,6)}\right]$	$1130(\sinh)^{1,15}$
Ciel très pur	$1210 \exp\left[-\frac{1}{6 \sin(h+1)}\right]$	$1080(\sinh)^{1,22}$
Zone industrielle	$1260 \exp\left[-\frac{1}{2,3 \sin(h+3)}\right]$	$995(\sinh)^{1,25}$

- Le modèle de Capderou

Utilise le trouble atmosphérique pour calculer les composantes directe et diffusé de l'irradiation reçue sur un plan. L'absorption et la diffusion causées par les constituants de l'atmosphère peuvent être exprimés par des facteurs des troubles ; à partir de ces facteurs, on peut exprimer les irradiances directes et diffusées par ciel clair. La connaissance de facteur de trouble atmosphérique est nécessaire pour déterminer les irradiances par ciel clair. Ce facteur est le rapport entre l'extinction du rayonnement directe traversant une atmosphère de référence constituée uniquement d'air pur et sec sous la même incidence. Dans ce modèle, le facteur de trouble atmosphérique de Linke  $T_L$  par ciel clair est donné par :

$$TL = T_0 + T_1 + T_2 \quad (I.10)$$

**T0** est le trouble dû à l'absorption gazeuse tant par les constituants fixes de l'atmosphère que par l'ozone et surtout par la vapeur d'eau. Une modélisation de ce facteur en fonction des seuls paramètres géo – astronomiques a permis à Capderou de proposer l'expression suivante :

$$A_h = \sin \left( \left( \frac{360}{365} \right) * (j-121) \right) \quad (\text{I.11})$$

$$T_0 = 2.4 - 0.9 \sin(\phi) + 0.1(2 + \sin(\phi)) A_h - 0.2z - (1.22 + 0.14 A_h)(1 - \sin(h)) \quad (\text{I.12})$$

$z$  : Altitude du lieu,  $j$  : Numéro du jour dans l'année,  $\phi$  : Latitude du lieu,  $h$  : Hauteur du soleil.

T1 est le trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, et O<sub>3</sub>) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh donné par l'approche :

$$T_1 = 0.89^z \quad (\text{I.13})$$

T2 est le trouble relatif à la diffusion par les aérosols couplées à une légère absorption (dépendent la fois de la nature et de la quantité des aérosols). En fonction du coefficient de trouble d'Angstrom  $\beta$ , T2 est donnée par :

$$T_2 = (0.9 + 0.4 A_h) (0.63)^z \quad (\text{I.14})$$

### 6.2 Appareils de mesure du rayonnement solaire

#### ✚ L'héliographe

L'héliographe mesure les périodes de la journée pendant lesquelles l'intensité du rayonnement direct a dépassé un certain seuil. Tant que l'on peut observer des ombres sur le sol ( $E > 120 \text{ W/m}^2$ ), les météorologistes parlent de radiation directe à laquelle est sensible l'héliographe. La somme de ces périodes représente la durée d'insolation journalière permettant de définir la fraction d'insolation. Dans l'héliographe de Campbell-Stokes, une sphère de verre concentre le rayonnement direct en un point qui brûle un papier spécial. En se déplaçant, le point brûlé décrit le mouvement apparent du soleil en traçant une courbe dont la longueur est proportionnelle à la durée d'insolation. L'héliographe de Jordan utilise du papier photographique. On utilise maintenant des héliographes automatiques constitués de cellules photovoltaïques disposées sur une bande cylindrique dont l'axe est perpendiculaire au plan de la trajectoire apparente du soleil. Un dispositif électronique totalise les intervalles de temps d'ensoleillement.[21].



Figure I-10 Héliographe de Campbell [21].

### ✚ Le pyranomètre

Les pyranomètres mesurent le rayonnement global (direct + diffus) de tout l'hémisphère céleste dans la bande de longueur d'onde 0,3 à 3  $\mu\text{m}$ . Le pyranomètre d'Eppley est une thermopile adaptée à cet usage. La surface réceptrice comporte deux anneaux concentriques en argent ; l'anneau extérieur recouvert de blanc. La différence de température mesurée entre les deux anneaux par des thermocouples en contact thermique avec les surfaces intérieures des anneaux mais isolés électriquement, peut être enregistrée à raison d'une lecture par heure sous forme d'une tension de sortie de l'ordre du mV (en fait 10  $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ ) [21]



Figure I-11 Pyranomètre d'Eppley. Pour éliminer le rayonnement direct, certains pyranomètres sont munis d'un cache à orienter suivant la saison pour suivre la déclinaison [21].

### ✚ Le pyréliomètre

Les pyréliomètres mesurent le rayonnement direct. Ils comportent une ouverture réduite et une surface réceptrice qui doit être maintenue normale au rayonnement pas un système de poursuite automatiques.

La surface sensible est un disque d'argent noirci placé à la base d'un tube muni d'un obturateur et d'un diaphragme limitant l'angle d'ouverture à  $5.7^\circ$  (le diamètre apparent du soleil et de  $0.5^\circ$ ). Le tube est fixé sur une monture équatoriale. On mesure la température du disque d'argent à intervalles réguliers en ouvrant et en occultant alternativement l'entrée de l'appareil [21].

### 6.3 Le réseau météorologique Algérien

La mesure du rayonnement solaire en Algérie est réalisée par l'Office National de la Météorologie (O.N.M) à travers son réseau constitué de quatre-vingt et une (81) stations météorologiques mesurant la durée d'insolation. Parmi celles-ci, seules sept (07) stations ont assuré entre les années 1970 et 1989 la mesure des composantes diffuses et globales reçues sur le plan horizontal. De plus, ces séries de mesures comportent des données manquantes causées par des périodes plus ou moins longues de non fonctionnement des appareils de mesure. Les informations récoltées en 2011 indiquaient que seules trois (03) stations à savoir Oran, Tamanrasset et Ksar Chellala assuraient d'une manière régulière la mesure du rayonnement solaire sur le plan horizontal. Huit autres stations automatiques mesurent le rayonnement depuis 2009 et qui sont : Alger (aéroport), Oran (Sénia), In amenas, Ghardaïa, Annaba, Tamanrasset, Tlemcen et Constantine.[22]

Table I-2) les stations météorologiques en Algérie

Stations	Lat (degrés minutes)	Lon (degrés minutes)	Alt (m)
Alger (Dar elBeida)	36°43	3°15E	25
Annaba	36°50	7°49E	3
Oran	35°16	00°38W	90
Tlemcen Zenata	35°01	01°27W	249
Ghardaia	32°24	3°48E	468
Tam (aéroport)	22°48	05°27E	1362
Ain Amenas	28°03	09°38E	561
Constantine	36°17	06°37E	694

### 6.4 L'imagerie satellitaire

Les images satellitaires sont des mesures du rayonnement solaire réfléchi ou émis par la surface terrestre et les nuages, ou absorbé par l'atmosphère dans différentes bandes spectrales. Ces images sont fournies par différents satellites tel que les satellites météorologiques. La mission principale des satellites météorologiques est le recueil de données utilisées pour la surveillance du temps et du climat de la Terre.

Chaque nouvelle génération de satellite comporte des capteurs plus performants et capables d'effectuer des mesures sur un plus grand nombre de canaux ce qui permet de les utiliser pour différencier les divers phénomènes météorologiques tels que les nuages, les précipitations, les vents, brouillard, etc. Il existe deux types de satellites météorologiques.

### 7 Potentiel solaire en Algérie De par sa situation géographique

L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur le quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700KWh/m<sup>2</sup> /an au Nord et 2263 kwh/m<sup>2</sup> /an au Sud du pays.

Table ( 1-3) les différents ensoleillements des régions Algériennes.

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

### 8 Conclusions :

Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteurs photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique.

En exploitant le rayonnement solaire, considéré comme la ressource principale, qui est très considérable à l'échelle planétaire, ce type d'énergie offre une véritable alternative à la consommation des ressources fossiles avec un faible impact environnemental et un fort potentiel de réduction des coûts.

L'aspect aléatoire de cette source d'énergie montre l'importance et la nécessité de connaître le potentiel solaire avant de procéder à l'installation de n'importe quel système solaire. Le meilleur moyen d'identifier ce potentiel sur un site donné est de disposer d'une bonne série de mesures de différents paramètres de rayonnement au sol

## **II. Chapitre 02 : Etat de l'art**



### 1 Introduction

La technologie solaire offre un grand potentiel en matière de fourniture des besoins énergétiques de la planète. Cependant, l'utilisation de cette énergie reste encore limitée. La cause principale est liée au coût initial d'investissement élevé pour la construction de ces systèmes. Les rayonnements solaires est un rayonnement électromagnétique émis par le soleil qui peut être capté et transformé en énergie utile, telle que la chaleur ou l'électricité, en utilisant une variété de technologies. Toutefois, la faisabilité technique et le fonctionnement économique de ces technologies à un endroit précis dépend de la ressource solaire disponible [2-4]. L'énergie solaire peut être utilisée par trois les procédés technologiques suivants [7] : chimiques, électriques et thermiques.

- 1) Le Processus chimique grâce à la photosynthèse, maintient la vie sur la terre par la production d'aliments et convertir le CO<sub>2</sub> en O<sub>2</sub>.
- 2) Le Processus électrique, utilisant des convertisseurs photovoltaïques, fournit de l'énergie pour les satellites et est utilisé dans de nombreuses applications terrestres.
- 3) le Procédé thermique peut être utilisée pour fournir une grande partie de l'énergie thermique nécessaire pour le chauffage solaire de l'eau et le chauffage du bâtiment ou le solaire thermique à concentration (CSP). Une autre forme de conversion du rayonnement solaire est l'énergie mécanique du vent.

Le solaire photovoltaïque

### 2 Historique [16]

En 1838, le physicien français Alexandre Edmond Becquerel a découvert l'effet photovoltaïque dans une batterie électrolytique et des électrodes en platine lors de son exposition au soleil

Quelques années plus tard, en 1877, l'anglais William Grylles Adams, professeur de philosophie naturelle au Kings Collège de Londres, avec son étudiant Richard Evans Day, créa la première cellule photovoltaïque au sélénium.

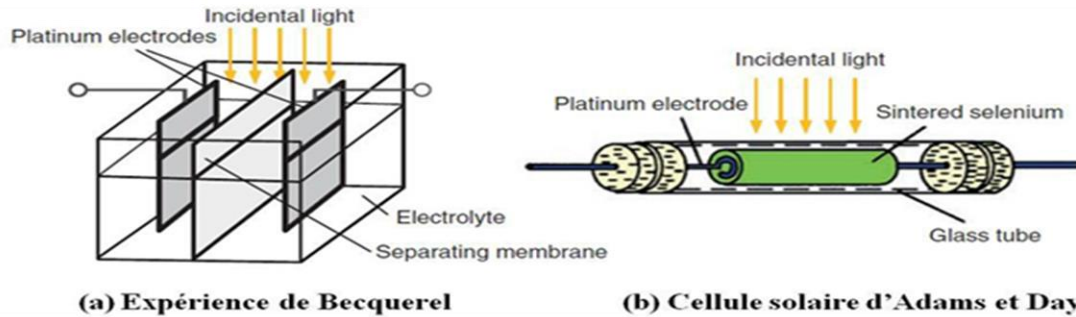


Figure (II-1) Les débuts du photovoltaïque : (a) expérience électrochimique de A.E. Becquerel, (b) la première cellule solaire d'Adams et Day

En 1883, l'inventeur américain Charles Fritts construit un petit "Module" de cellules de sélénium en les couvrant avec une très mince électrode d'or, d'une superficie d'environ 30 cm<sup>2</sup> en obtenant un rendement de conversion d'environ 1%,

En 1904, Albert Einstein (1879-1955) expliqua la théorie de cet l'effet photoélectrique,

En 1949, William B. Shockley (1910–1989) a établi la théorie de la jonction PN (Shockley 1949) et a lancé les bases théoriques des cellules solaires utilisées aujourd'hui,

Sur cette base, Daryl Chapin, Calvin Fuller et Gerald Pearson ont développé, dans les laboratoires Bell, la première cellule solaire de silicium d'une superficie de 2 cm<sup>2</sup> et un rendement allant jusqu'à 6 % et l'ont présenté au public le 25 Avril 1954 (Chapin et al. 1954)

Ce rendement a atteint les 10 % dans les années qui ont suivi, mais avec des prix élevés du module solaire (le prix par Watt était d'environ 1000 fois plus que le prix d'aujourd'hui) donc ils étaient utilisés uniquement pour des applications spéciales,



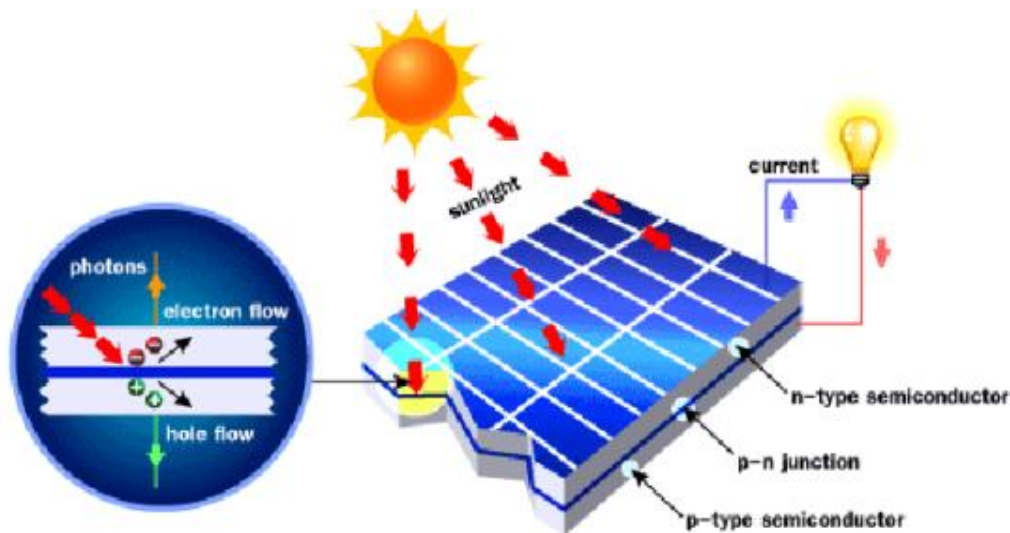
Figure (II-2) Les inventeurs de la première cellule solaire "réelle": Chapin, Fuller et Pearson. La figure à droite montre le premier module solaire au monde (mini module de 8 cellules solaires)

Le 17 Mars 1958, Le premier emploi aérospatial de l'énergie photovoltaïque était par le satellite artificiel américain Vanguard,

Dans les années 1960, le développement en du photovoltaïque était très avancé en utilisant des nouveaux matériaux semi-conducteurs comme l'arséniure de gallium (GaAs). Les recherches dans ce domaine continuent à se développer très rapidement avec de nouvelles technologies atteignant des rendements très élevés.

### 3 L'effet photovoltaïque :

Les cellules PV sont basées sur l'effet photoélectrique qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Lorsque qu'un rayonnement lumineux (photon) atteint la surface d'une cellule solaire, la cellule crée des porteurs de charges comme des électrons et des trous. Les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge d'espace de la jonction p- n sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région et entraînées dans les zones neutres de chaque côté de la jonction. Si le dispositif est isolé, il apparaît une d'extérieure, les électrons libres doivent traverser la charge pour se recombiner avec des trous positifs



Figure( II-3) Fonctionnement d'une cellule PV

une cellule solaire est une diode au silicium de grande surface.

La caractéristique d'une diode est définie par l'équation ( à l'obscurité )

$$I_d = I_s. (e^{\frac{qV}{kt}} - 1) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$V$  : tension appliquée à la diode(V)

$k$  : constante de Boltzmann (J.K-1 )

$q$  : charge de l'électron (C)

$T$  : température absolue (K)

$I_s$  : courant de saturation de la diode (A)

$I_d$  : courant d'obscurité (A)

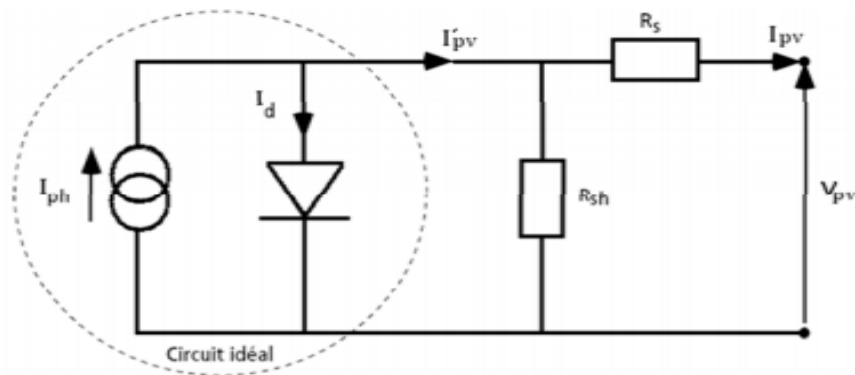


Figure II-4) schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Sous éclaircissements et pour une cellules photovoltaïques réelles, l'équation de la caractéristique I(V) :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{vq + IR_s}{kt}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.2})$$

Le générateur du courant ( **$I_{ph}$** ): délivre le courant  **$I_{ph}$**  correspondant au courant photo générer

La diode (D) : modélise la jonction P-N.

La résistance série  **$R_s$**  : modélise les pertes résistives au sein de la photopile.

La résistance parallèle (résistance shunt  **$R_{sh}$** ) : correspond à une résistance de fuite entre les deux zones N et P de la jonction ; il en résulte qu'une partie du courant  **$I_{ph}$**  sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge. Cette résistance devra être la plus élevée possible.

#### 4 La caractéristique électrique i(v)

La cellule photovoltaïque possède une caractéristique I(V) non linéaire

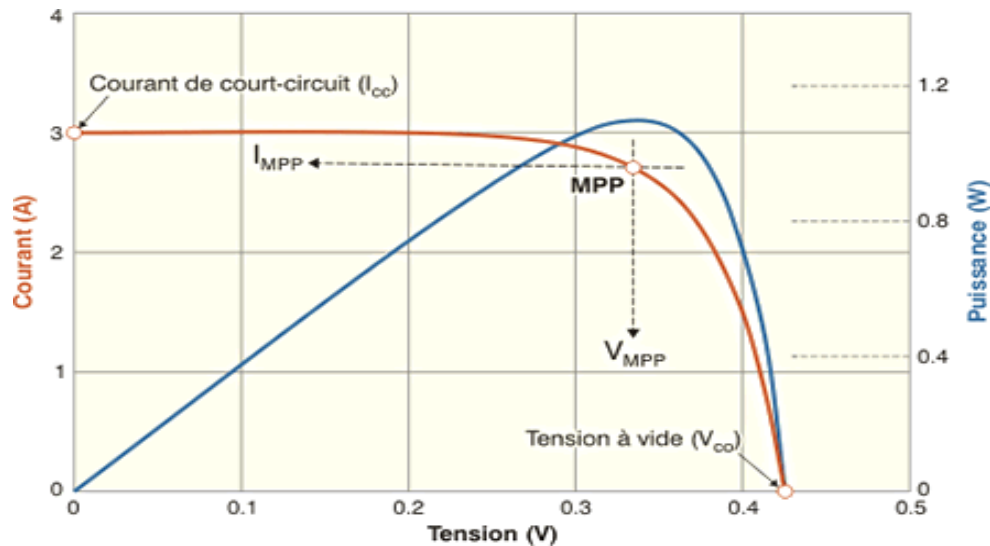
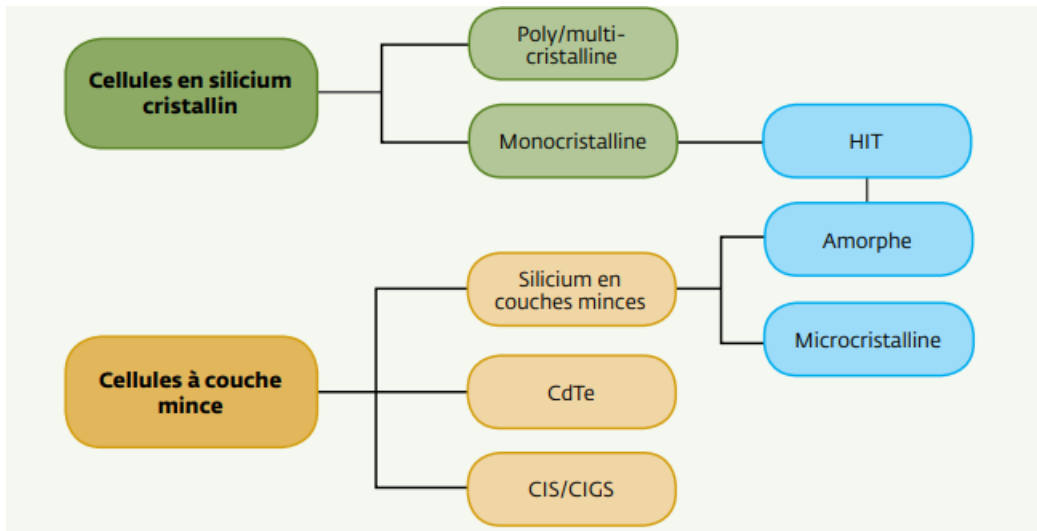


Figure II-5) la caractéristique  $I(V)$  d'une cellule photovoltaïque

- Tension à vide  $V_{co}$  : Tension aux bornes de la cellule en l'absence de tout courant, pour un éclairage "plein soleil".
- Courant de court-circuit :  $I_{cc}$  Courant débité par la cellule en court-circuit pour un éclairage "plein soleil"
- Puissance crête  $P_c$  : La puissance maximale produite par une cellule photovoltaïque dans les conditions standards : ensoleillement de  $1000 \text{ W/m}^2$  à l'horizontale, température ambiante de  $25^\circ\text{C}$ , masse d'air optique (AM) égale à 1,5.
- Point de fonctionnement optimum lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $P_{max} = V_{pm} \cdot I_{pm}$ .
- Rendement maximal : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale  $P_{max}$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule :  $V_{co}, I_{cc}$ .

## 5 Les différentes technologies de cellule solaire



Figure( II-6) le classement des technologies des cellules photovoltaïques

## 6 Les systèmes photovoltaïques :

Un système photovoltaïque est un système de captation et transformation de l'énergie solaire, il est constitué principalement de quatre éléments principaux qui sont [6] :

Le système de captage

Le système de stockage

Le système de régulation

Le système de conversion

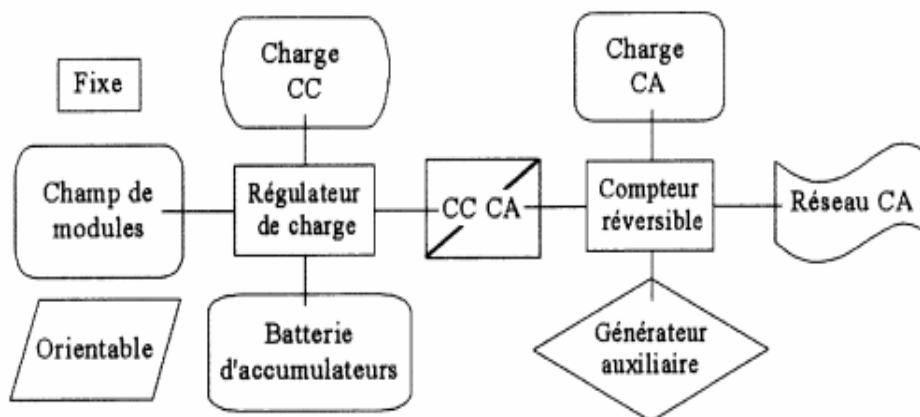
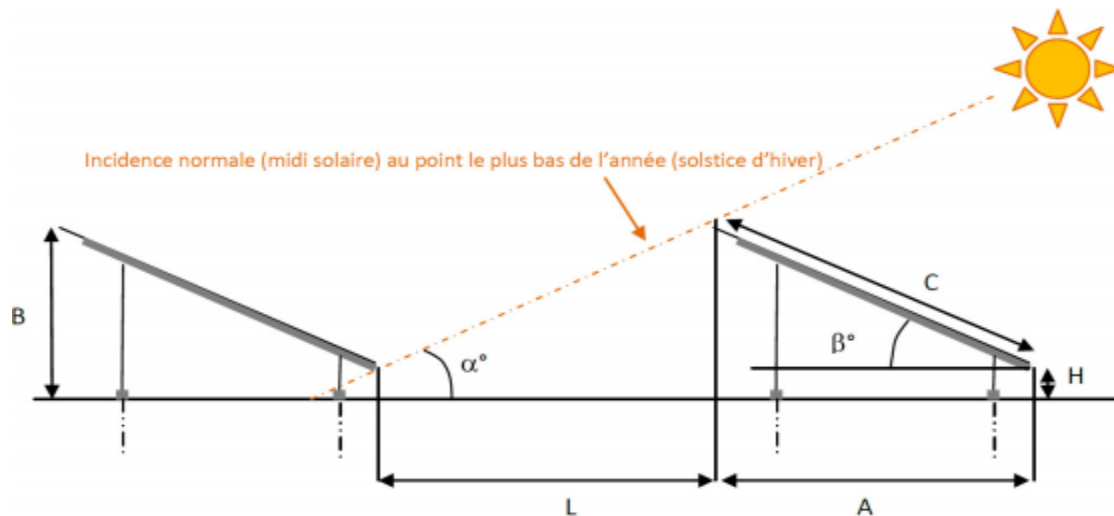


Figure II-7) Schéma synoptique décrivant le système photovoltaïque le plus général

## 6.1 Présentation des centrales Photovoltaïques [7]

Les principales composantes sont :

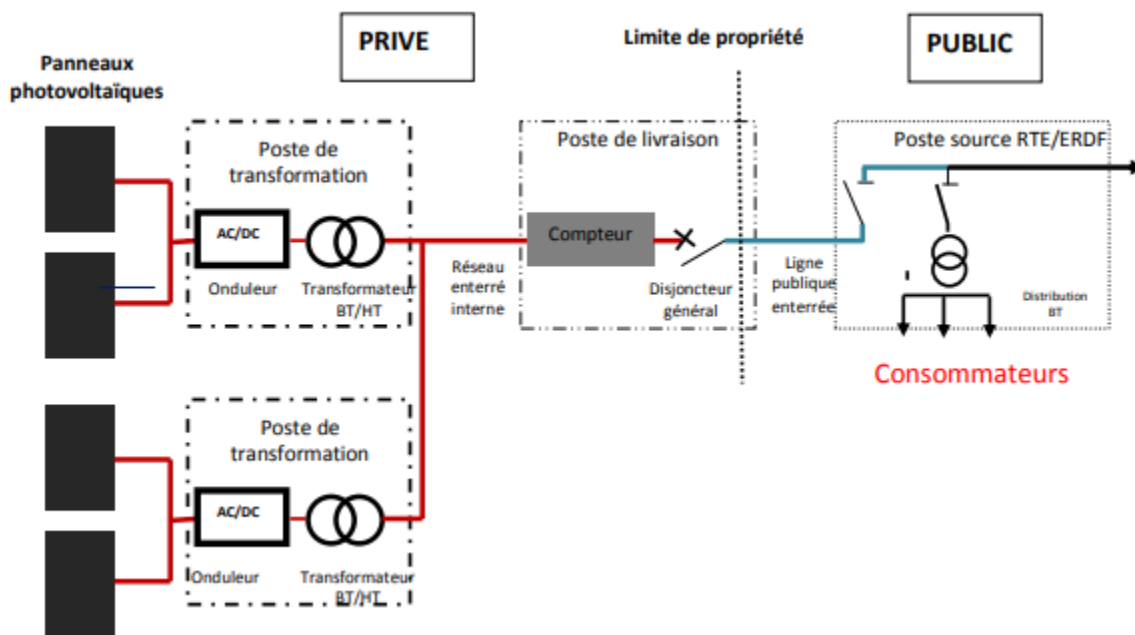
- Des modules solaires PV : convertissent directement les radiations solaires en électricité au moyen de l'effet photovoltaïque. Le produit d'une cellule solaire PV est de l'électricité en CC. Une centrale électrique PV contient de nombreuses cellules interconnectées dans des modules, et de nombreux modules interconnectés en chaîne pour produire la puissance de sortie en CC.
- Des onduleurs : Les onduleurs sont requis pour convertir l'électricité CC en courant alternatif (CA) en vue du raccordement au réseau. Un grand nombre de chaînes de modules en série et de chaînes en parallèle est raccordé aux onduleurs.
- Des systèmes de fixation (ou de poursuite) du module : Ces systèmes permettent aux modules PV d'être correctement fixés au sol à un angle d'inclinaison fixe ou sur des cadres permettant la poursuite solaire.



Paramètre	Symbole
Incidence du soleil (point le plus bas de l'année à midi)	$\alpha$
Inclinaison des panneaux	$\beta$
Largeur au sol des structures	A
Hauteur des structures	B
Largeur des panneaux	C
Point bas des structures	H
Distance entre deux structures	L

Figure II-8) la structure de fixation des modules d'une centrale [7]

- Les transformateurs élévateurs : La puissance générée par les onduleurs nécessite généralement une élévation supplémentaire de la tension pour atteindre la tension requise pour par le réseau (par exemple 25 000 V, 33 000 V, 38 000 V ou 110 000 V, en fonction du point de raccordement au réseau et des normes nationales).
- L'interface de raccordement au réseau : C'est à ce niveau que l'électricité est exportée dans le réseau. La sous-station disposera également du commutateur d'interface de raccordement au réseau requis, comme des disjoncteurs et mises à l'arrêt pour protéger et isoler la centrale électrique PV, ainsi que des systèmes de mesure. La sous-station et le point de mesure sont souvent situés à l'extérieur de la limite de la centrale électrique PV, généralement sur la propriété de l'opérateur du réseau, voir figure ( II-9).



Figure( II-10) présentations d'un central photovoltaïque [7]

### 6.2 Différentes configurations des systèmes PV [8]:

Les systèmes autonomes : Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes sont décrits sur la figure (I.8) qui traduit les différentes possibilités offertes : couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking), fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique.



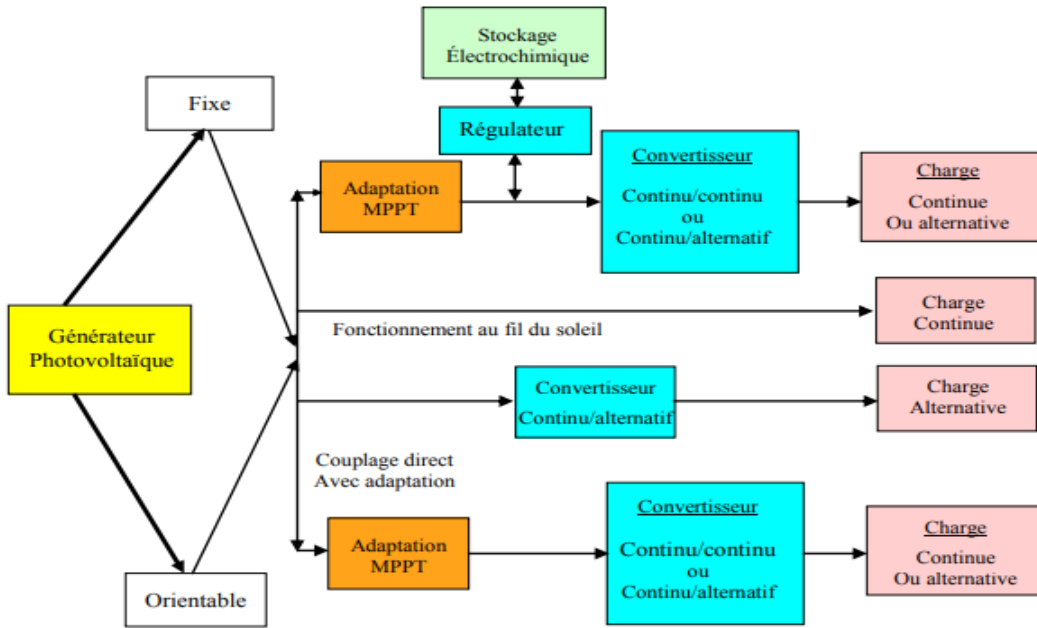


Figure II-11) Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes

Les systèmes hybrides : Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques.

Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées.

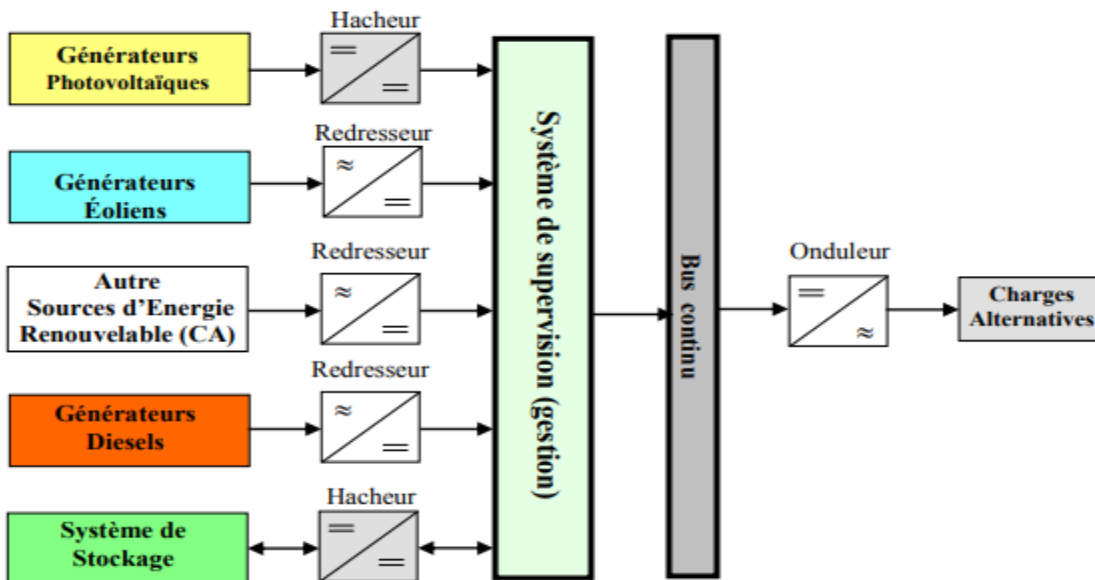
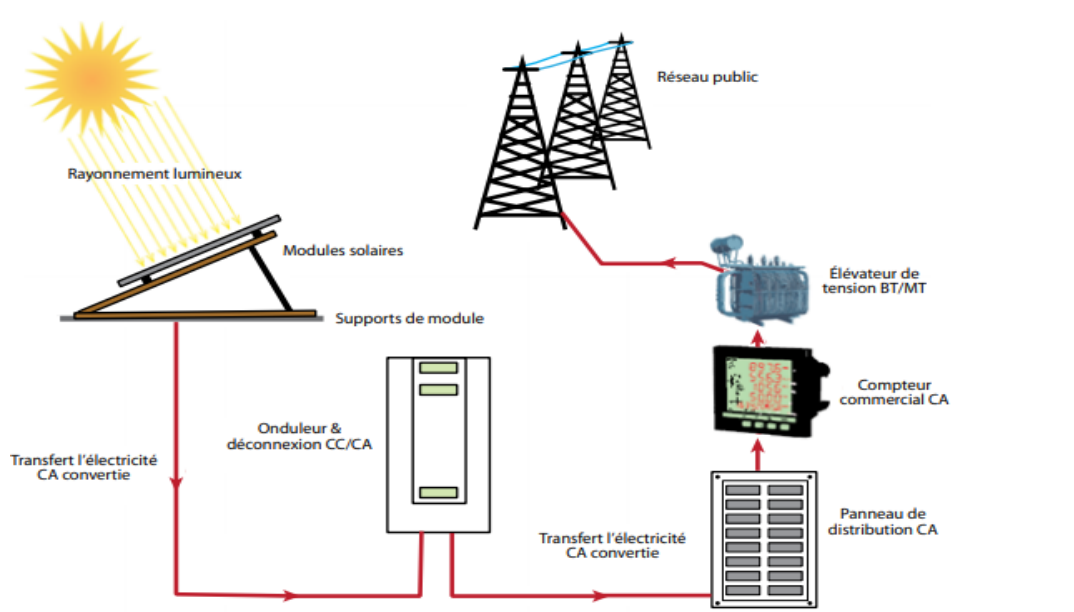


Figure II-12) Configuration du système hybride

Les systèmes connectés au réseau : Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau sont une résultante de décentralisation du réseau électrique. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Ils produisent leur propre électricité et acheminent son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel ils s'approvisionnent au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ces systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau.



Figure( II-13) une central PV connecté au réseau

### 7 Développement du photovoltaïque dans le monde

Grâce à ses avantages intéressants, l'énergie photovoltaïque se développe considérablement dans le monde depuis une vingtaine d'années. Le parc solaire photovoltaïque croît en moyenne de 35 % par an depuis 1998 .

En 2015, l'industrie photovoltaïque mondiale a connu une augmentation de 50 GW (40 GW en 2014) de puissance PV installées, atteignant 229 GW de capacité cumulée, soit plus de 100 fois la capacité de 2000. Les prévisions pour 2016 et 2017 sont respectivement, de 61 GW et 67 GW de nouvelles installations mondiales (Solar Power Europe 2016).

Cette diminution de la demande mondiale en 2017 est peut-être en raison de la réduction des mesures de soutien aux secteurs prévus par certaines nations. Néanmoins, les analystes et les employés du secteur sont optimistes quant à l'avenir de l'énergie photovoltaïque

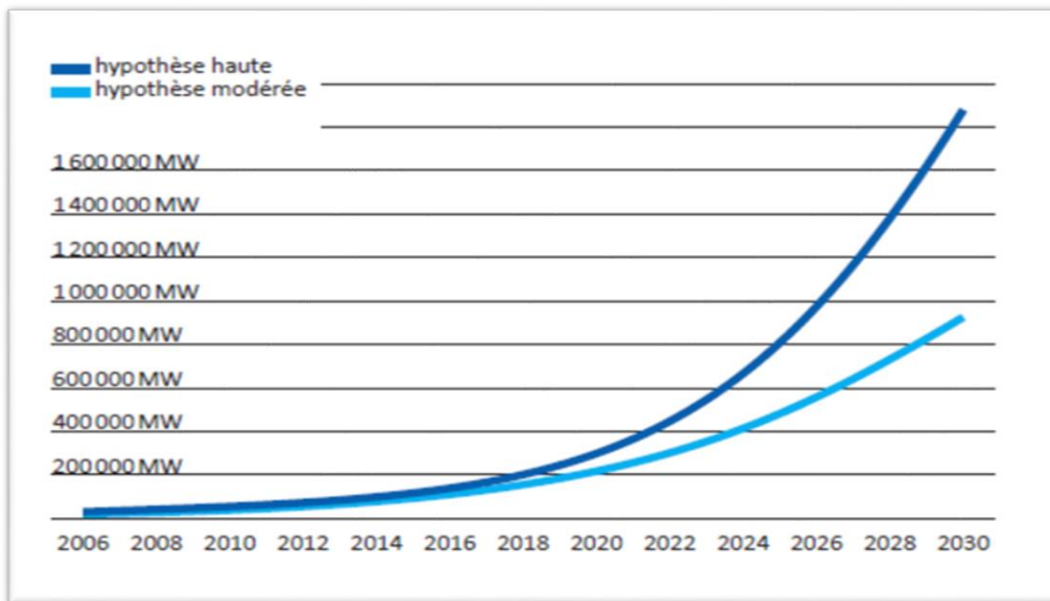


Figure II-14) Capacité photovoltaïque globale cumulée à l'horizon 2030

En 2014, l'approvisionnement énergétique primaire total dans le monde (en anglais Total Primary Energy Supply TPES) était de 13.700 Mtep (million de tonnes d'équivalent pétrole, 1 tep=41.868 GJ), dont 13.8 %, soit 1.894 Mtep, a été produit à partir des énergies renouvelables (amélioration de 2.6 % par rapport à 2013)

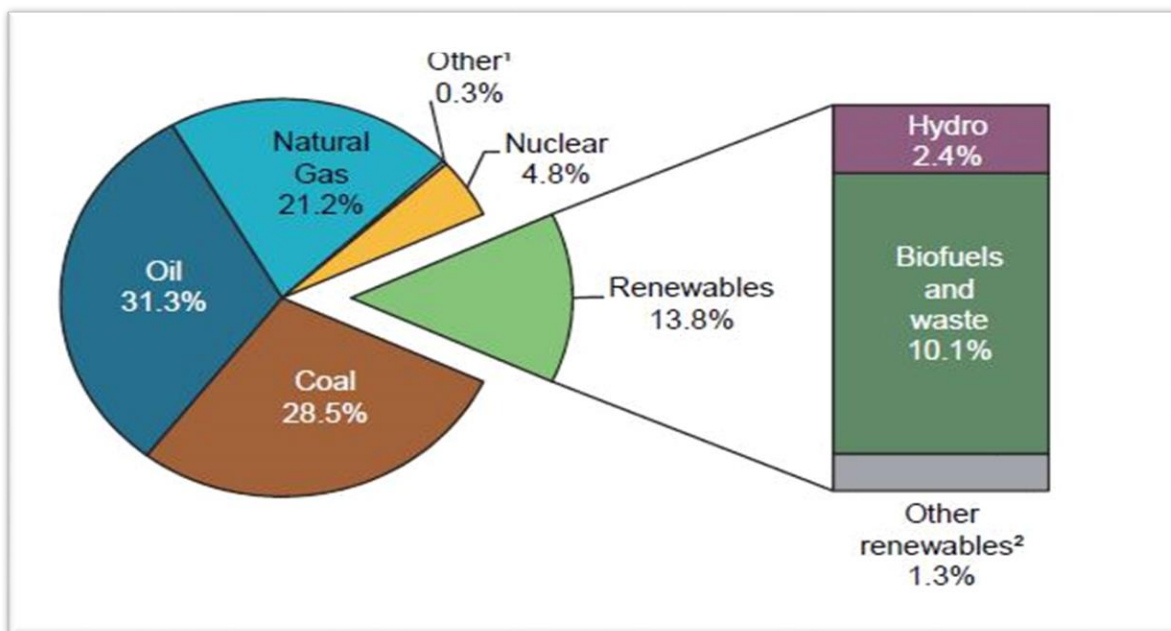


Figure II-15) Approvisionnement énergétique primaire total dans le monde en 2014

Le taux de 2,5 % pour l'énergie solaire est relativement faible par rapport à la totalité des énergies renouvelables. Cependant les recherches très avancées dans ce domaine tendent à améliorer ce taux

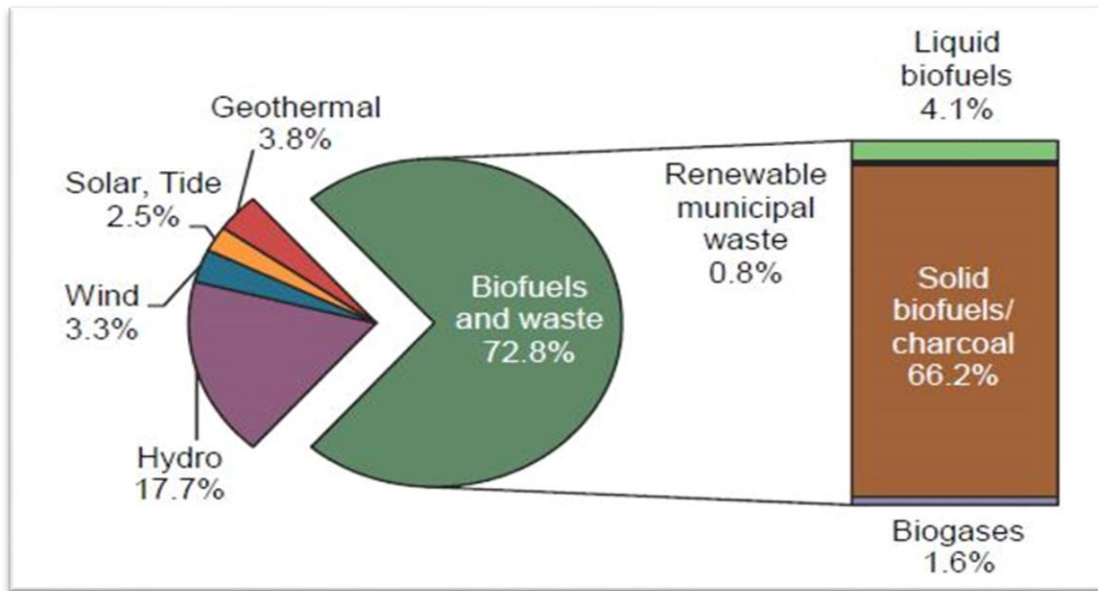


Figure II-16) Part de la production des différentes énergies renouvelables

Depuis 1990, les sources d'énergie renouvelables ont augmenté d'un taux annuel moyen de 2.2 %, ce qui est légèrement supérieur au taux de croissance des TPES mondiales de 1.9 %. La croissance a été particulièrement élevée pour les énergies photovoltaïques et éoliennes, qui ont augmenté d'un taux moyen annuel de 46.2 % et 24.3 % respectivement

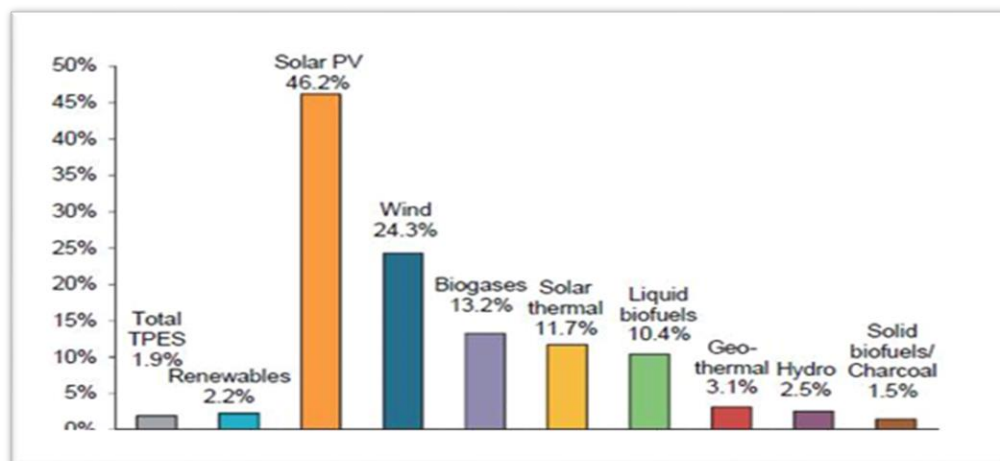


Figure II-17) Taux de croissance annuel d'approvisionnement énergétique mondial de 1990 à 2014

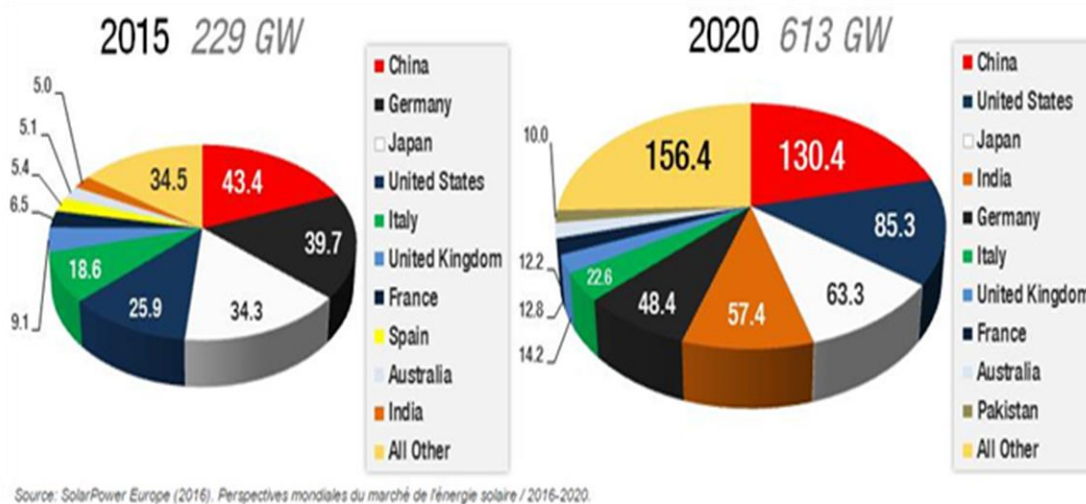
## 8 Installations de systèmes solaires dans le monde

Le développement des grands marchés de l'énergie solaire en Asie (Chine, Inde et Japon) et aux États-Unis ont démontré que l'énergie solaire n'est plus centrée sur l'Europe. Malgré cela, l'Europe reste le leader avec 97 GW de capacité installée à la fin de 2015 (l'Allemagne pour 39.7 GW, soit 41 %), cependant, les pays de l'Asie/Pacifique ( 96 GW) prendront certainement la première place dans le proche avenir.

L'Inde a installé uniquement 0.6 GW et 2.0 GW en 2014 et 2015. Cependant, la capacité totale de l'Inde croit de 5 GW en 2015 à 57.4 GW d'ici 2020, ce qui signifie qu'il va installer 52.4 GW durant 2016-2020. Ce pays cible les 100 GW d'énergie solaire en 2022 .

En 2015, la Chine, avec une capacité d'énergie solaire totale installée de 43.4 GW, a dépassé l'Allemagne (39.7 GW), prenant par la même occasion la première position comme le plus grand marché mondial du solaire par les nouvelles installations et la capacité cumulée. Le gouvernement va augmenter sa capacité installée cumulée à 130.4 GW d'ici la fin de 2020, soit une augmentation d'environ 87 GW (plus de 200 %).

Quant aux États-Unis, ils vont augmenter leur capacité installée cumulée de 25.9 GW en 2015 à 85.3 GW d'ici la fin de l'an 2020, soit une augmentation d'environ 60 GW (229 %), se positionnant à la deuxième place après la Chine. L'Allemagne va chuter à la cinquième place avec 48.4 GW devant dans l'ordre l'Italie (22.6 GW), le Royaume-Uni (14.2 GW), la France (12.8 GW), l'Australie (12.2 GW) et le Pakistan (10 GW).



Figure( II-18) Capacité installée par pays en 2015 et 2020 (top 10 des pays)

Jusqu'en 2020, d'importants nouveaux marchés solaires devraient se développer en Algérie, au Brésil, en Egypte, au Mexique, au Pakistan, aux Philippines, en Arabie Saoudite et aux Emirats Arabes Unis. Aujourd'hui, la plupart de ces pays ont très peu de capacité installée.

### 9 Les systèmes thermiques :

Le principe de ces technologies est de concentrer le rayonnement solaire de façon à pouvoir chauffer un fluide caloporteur (de l'huile, des sels fondus...) à haute température (250°C à 2000°C).

La chaleur ainsi emmagasinée par le fluide peut être utilisée directement pour des usages industriels ou utilisée pour produire de l'électricité via une turbine à vapeur ou un autre cycle de conversion. Par rapport au photovoltaïque où la production s'arrête dès qu'il n'y a plus de soleil, la production au-delà de la période d'ensoleillement peut continuer dans les cas où il existe un réservoir de stockage du fluide chauffé.

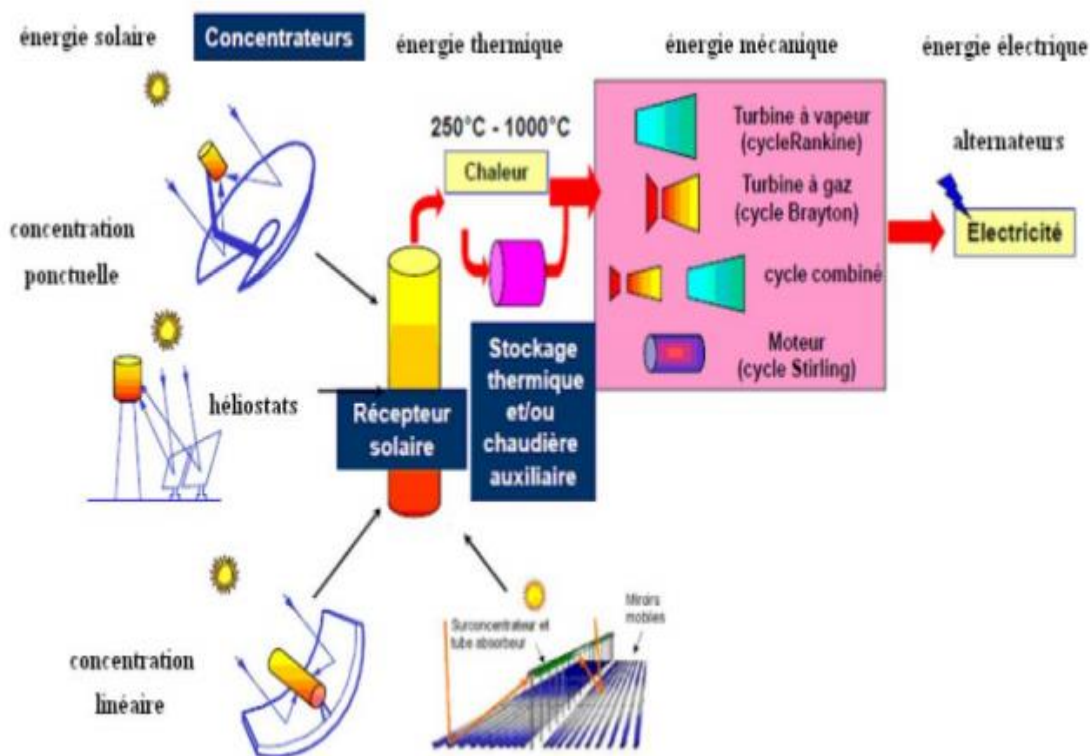


Figure II-19) Les composants d'une centrale CSP [10]

On distingue plusieurs types de technologies :

**Centrales solaires cylindro-paraboliques** : des miroirs paraboliques d'un rayon de courbure de 2 à 2,5 m et d'environ 20 m de longueur concentrent les rayons du soleil sur un tube à fluide caloporteur.



Les réflecteurs linéaires de Fresnel qui peuvent être considérés comme une technologie dérivée des centrales cylindro-paraboliques et qui mettent en œuvre des miroirs quasi-plans disposés à plat et près du sol et concentrant les rayons sur des tubes récepteurs fixes. Ces miroirs peuvent pivoter de façon à suivre la trajectoire du soleil tout au long de la journée.

**Centrales solaires à tour** : une multitude de miroirs orientables, appelés héliostats, concentrent l'énergie solaire sur une chaudière unique située sur une tour.

**Paraboles solaires Dish-Stirling** : cette technologie met en œuvre un miroir parabolique d'une dizaine de mètres de diamètre couplé à un moteur Stirling à combustion externe dont la source chaude est du sodium, le gaz moteur de l'hélium ou de l'hydrogène.[9]

### 9.1 Les composantes de base d'une centrale CSP sont :

**Le champ solaire** : qui représente l'équivalent de l'alimentation en combustible (charbon, pétrole, gaz, uranium) pour les centrales thermiques. Dans les centrales CSP de type Fresnel, le champ solaire joue aussi le rôle de la chaudière, vu que la production de la vapeur se fait elle aussi au niveau du champ solaire. Le champ solaire est composé de miroirs, qui concentrent les rayons solaires sur un tube noir (le capteur) formant l'axe focal des miroirs. Les rayons solaires sont absorbés à la surface noire, transformés en chaleur, qui est transférée au fluide caloporteur traversant le capteur.

**Le réseau des conduites** : qui assure le transfert du fluide caloporteur chauffé du champ solaire vers l'unité de production d'électricité et son retour après refroidissement vers le champ solaire.

**L'unité de puissance** (c'est-à-dire l'unité de production d'électricité) : qui contient les pompes à eau de haute pression, les échangeurs de chaleur pour le préchauffage de l'eau, la production de vapeur, le chauffage de la vapeur, la turbine à vapeur, le générateur, le tour de refroidissement et l'unité de déminéralisation, requise pour éviter la formation de cristaux de sel très abrasifs dans la turbine[10]

### 9.2 Température maximale du fluide caloporteur

La température qui peut être atteinte au niveau de l'absorbeur d'une centrale CSP dépend, en plus du niveau de perte de chaleur par convection, conduction et rayonnement, du facteur de concentration du rayonnement solaire et du débit du fluide caloporteur. Les pertes de chaleur augmentent considérablement avec l'augmentation de la température.

La température du fluide caloporteur à la sortie du champ solaire dépend essentiellement de deux paramètres : le débit et la stabilité thermique du fluide. L'huile synthétique utilisée actuellement dans les

systèmes à miroirs cylindro-paraboliques a encore une bonne stabilité thermique à 400 °C. Un fluide caloporteur supportant une température plus élevée permettrait une augmentation du rendement du système de production d'électricité. Les fluides utilisés dans les centrales à tour ou dans le système Stirling supportent des températures beaucoup plus élevées, mais ne s'adaptent pas aussi bien que l'huile synthétique utilisée aux conditions techniques des CSP cylindro-paraboliques. Le tableau nous donne plus de détail sur la température de absorber pour les technologies CSP.[10]

Table II-1) comparaison entre les technologies CSP

CSP Type	Operating Temperature (°C)	Ratio of Solar Concentration	Thermal Storage Suitability	Average Annual Efficiency	Land Use Efficiency (Total Area/Power)
Parabolic Trough	20–400	15–45	Suitable	15%	3.9
Linear Fresnel Reflector	50–300	10–40	Suitable	8–11%	0.8–1
Solar Trough	300–1000	150–1500	Highly suitable	17–35%	5.4
Parabolic Dish	120–1500	100–1000	Difficult	25–30%	1.2–1.6

### 9.3 Le facteur de concentration

On caractérise la performance du système par son facteur de concentration. Ce coefficient permet d'évaluer l'intensité de la concentration solaire : plus le facteur de concentration est élevé, plus la température atteinte sera importante.

$$\text{Facteur de concentration} = \text{Surface des miroirs} / \text{surface du récepteur}$$

L'énergie thermique provenant du rayonnement solaire collecté est convertie grâce à un fluide caloporteur puis un fluide thermodynamique. Dans certains cas, le fluide caloporteur est utilisé directement comme fluide thermodynamique. Le choix du fluide caloporteur détermine la température maximale admissible, oriente le choix de la technologie et des matériaux du récepteur et conditionne la possibilité et la commodité du stockage.

Les huiles sont des fluides monophasiques qui présentent un bon coefficient d'échange. Leur gamme de température est limitée à environ 400 °C. C'est le fluide le plus couramment employé dans les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques.

Les sels fondus à base de nitrates de sodium et de potassium offrent un bon coefficient d'échange et possèdent une densité élevée. Ils sont donc également de très bons fluides de stockage. Leur température



de sortie peut atteindre 650 °C. Leur association avec un concentrateur à tour et un cycle de Rankine constitue une combinaison déjà prouvée.

Les gaz tels l'hydrogène ou l'hélium peuvent être utilisés comme fluides thermodynamiques et entraîner les moteurs Stirling qui sont associés aux collecteurs paraboliques.

L'eau liquide est, a priori, un fluide de transfert idéal. Elle offre un excellent coefficient d'échange et possède une forte capacité thermique. En outre, elle peut être utilisée directement comme fluide thermodynamique dans un cycle de Rankine. Cependant son utilisation implique de travailler à des pressions très élevées dans les récepteurs en raison des hautes températures atteintes, ce qui pose problème pour les technologies cylindro-paraboliques.

Les fluides organiques (butane, propane, etc.) possèdent une température d'évaporation relativement basse et sont utilisés comme fluide thermodynamique dans un cycle de Rankine.

L'air peut être utilisé comme fluide caloporteur ou comme fluide thermodynamique dans les turbines à gaz.

### **10 Les centrales à réflecteurs cylindro-parabolique [18]**

Les centrales à réflecteurs cylindro-paraboliques ont des capacités entre 50 à 300 MW . Cette technologie est démontrée à l'échelle industrielle d'exploitation commerciale depuis 1984.

Elle est privilégiée pour les nouvelles centrales aux Etats -Unis, en Europe et en Afrique du Nord (Maroc, Egypte) Plus de 30 centrales sont en construction en Espagne.

Les centrales solaires cylindro-paraboliques utilisent des miroirs de forme Cylindro-paraboliques qui concentre les rayons du soleil vers un tube absorbeur où circule un fluide caloporteur. Ce fluide, en général une huile de synthèse, est chauffée à des températures d'environ 400° C. Cette technologie est la plus utilisée sur le marché du solaire thermodynamique à concentration. Son utilisation remonte aux années 1980 aux Etats-Unis avec une capacité installée de 350 MW. De nouvelles centrales, basées sur cette technologie ont été construites ces dernières années, comme l'unité Solar One de 65 MW implantée dans le Nevada.

En décembre 2009, plus de 30 centrales de ce type sont en construction en Espagne, pour une capacité totale s'élevant à plus de 1.500 MW et un certain nombre de projets sont en cours de développement aux Etats-Unis.

De plus, deux centrales, l'une en Algérie et l'autre au Maroc, comportant un cycle intégré solaire de 20MW ont été attribuées à des sociétés européennes suite à appels d'offres. Une autre centrale du même

type est en construction en Egypte et un appel d'offres pour une centrale de 100 MW à Abu Dhabi a été lancé.

Enfin les pays du Moyen-Orient, la Chine et d'autres pays bénéficiant d'un ensoleillement favorable manifestent un intérêt grandissant pour cette technologie. L'investissement total pour les projets mentionnés est proche de 7.000 M€. Plusieurs centrales espagnoles en construction ont été conçues non seulement pour produire la puissance nominale durant les heures d'ensoleillement, mais également pour stocker l'énergie, permettant ainsi à la centrale de produire cette puissance pendant 7h30 après le coucher du soleil, ce qui accroît considérablement l'intégration de l'électricité solaire thermodynamique à concentration dans le réseau. Pour le stockage, la technologie des sels fondus est généralement utilisée, dans un concept à 2 réservoirs, l'un dit chaud et l'autre froid.

Centrales en fonctionnement en Europe :

Andasol 1 (50 MW + stockage 7h30) Grenade, Espagne

Puertollano (50 MW) Ciudad Real, Espagne

Alvarado (50 MW) Badajoz, Espagne

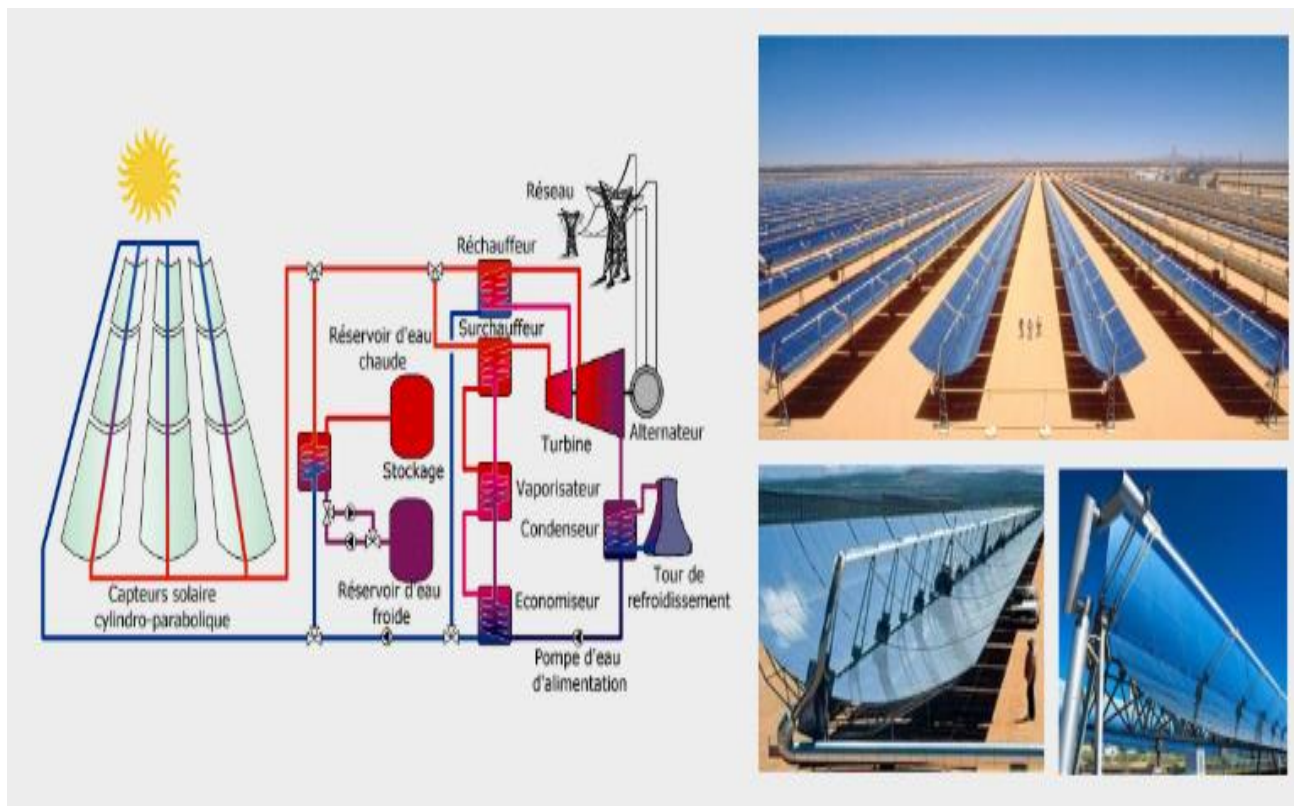


Figure II-20) Centrales Solaires Cylindro-paraboliques.

### 11 Central solaire à tour :[18]

La capacité des centrales à tours solaire est de l'ordre de 10 à 50 MW et la démonstration est faite dans les années 1980. Les centrales solaires à tour utilisent de grands miroirs (héliostats) de plus de 100m<sup>2</sup> qui sont presque plats et suivent le soleil sur deux axes.

Le rayonnement concentré est dirigé vers le récepteur situé en haut de la tour. La température dépend du type de fluide utilisé pour collecter l'énergie et s'élève entre 500 et 600°C. Les centrales à tour PS10 et PS20 à Séville sont les deux seules centrales commerciales en opération à ce jour. Leurs puissances nominales sont de 10 MW et 20 MW respectivement, elles sont conçues avec un champ d'héliostats orientés au Nord et avec de la vapeur saturée comme fluide dans le récepteur.

Le système de stockage est conçu pour répondre à des phases transitoires. Une autre centrale de 17 MW, Gemasolar, est en construction. Située dans la province de Séville, elle dispose d'un champ circulaire équipé d'un récepteur à sels fondus et bénéficie d'une capacité de stockage de 15h.

La taille de ces centrales peut être limitée par la distance maximale des dernières rangées d'héliostats par rapport à la tour. A ce stade, il est prématuré d'établir des ratios coût/puissance fiables pour cette technologie en raison du faible nombre de projets opérationnels et en phase de conception, mais ces ratios ne devraient pas être très différents de ceux des centrales solaires cylindro-paraboliques.

Dans le cas des centrales à tour, le rendement à l'hectare est moins élevé. En revanche cette technologie ne requiert pas une surface plane à la différence des centrales cylindro-paraboliques. Un autre avantage est la possibilité d'augmenter le rendement total de conversion (jusqu'à 20%) par l'augmentation de la température du fluide. La confiance commerciale envers cette technologie s'accroît à mesure que des centrales opérationnelles sont construites et que des améliorations techniques sont apportées. Il est possible d'utiliser l'hybridation, bien qu'aucun projet commercial de ce type n'ait été construit jusqu'à présent.

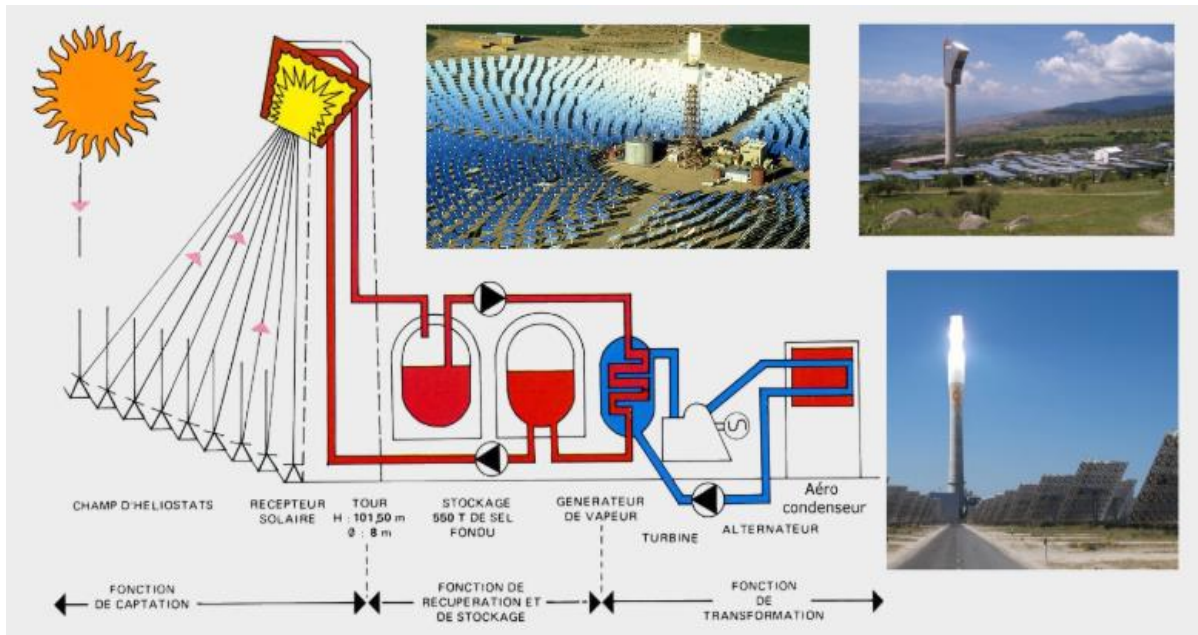


Figure ( II-21) Centrales Solaires à tour

## 12 Paraboles Solaires Dish Stirling[18]

Les Paraboles Solaires Dish Stirling (voir fig II-22.) ont des Capacités de 10 kW à 25 kW par unité. Plusieurs installations de petite taille sont déjà opérationnelles.

Les applications des paraboles Dish Stirling conviennent à la fois pour la distribution d'électricité à grande échelle et pour la production à petite échelle, en site isolé.

La technologie du Dish Stirling consiste en un système constitué d'un concentrateur solaire en forme de parabole équipé d'un ensemble de miroirs incurvés. La parabole suit le soleil tout au long de la journée et concentre la radiation sur l'unité d'absorption de chaleur du moteur Stirling, placé au point focal de la parabole. L'énergie solaire thermique ainsi concentrée est

transformée en électricité directement injectable sur le réseau. Le procédé de conversion comprend un moteur Stirling utilisant un fluide interne (généralement de l'hydrogène ou de l'hélium) en circuit fermé. Le fluide est chauffé et pressurisé par le récepteur solaire, qui provoque la rotation du moteur.

Les paraboles solaires Dish Stirling sont en exploitation depuis plusieurs décennies. Ces systèmes sont flexibles en termes de capacité et de déploiement.

En raison de leur caractère modulaire, ces paraboles peuvent répondre à des besoins isolés de production électrique.

Cette technologie n'utilise pas d'eau dans le processus de conversion énergétique (il n'y a pas de génération de vapeur ou de refroidissement), seul le nettoyage des miroirs nécessite de l'eau. La technologie du Dish Stirling est rendue attractive par sa haute efficacité et sa conception modulaire qui lui donnent des avantages clés : tolérance pour des terrains en pente et flexibilité sur site (aucun besoin de terrassement, impact environnemental réduit), grande disponibilité globale puisque la maintenance peut être assurée sur une unité individuelle sans affecter la génération d'électricité par les autres unités, enfin un faible coût de fabrication et de déploiement obtenu grâce à l'utilisation des techniques de production et d'assemblage issues de l'industrie automobile.

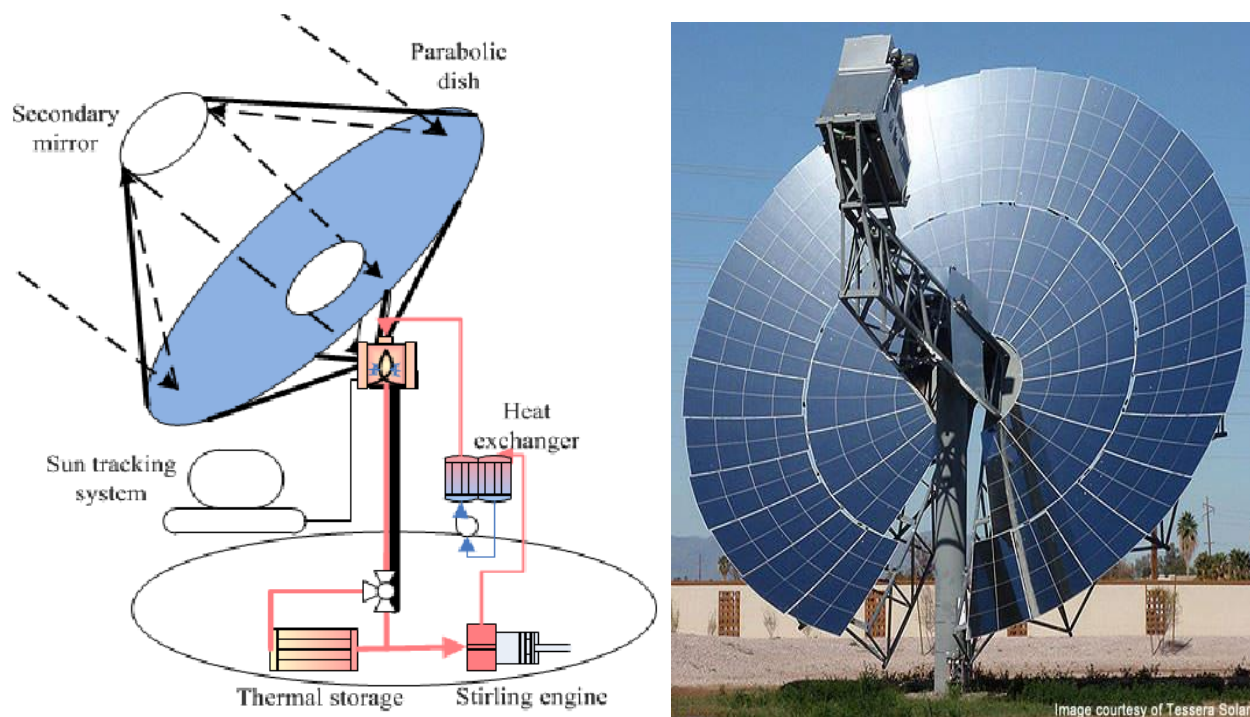


Figure II-22) Centrales Solaire Dish Stirling

### 13 Collecteurs linéaires de Fresnel [18] :

Les projets de démonstration en cours ont une capacité allant jusqu'à 6 MW et de grandes centrales sont en cours de développement allant jusqu'à 150 MW.

Les collecteurs linéaires de Fresnel (voir fig.II.23) sont des systèmes de concentration linéaire comme les systèmes cylindro-paraboliques avec la même technologie de production d'énergie.

La différence avec ces derniers réside dans le fait que le tube absorbeur est fixe, ce sont les modules constitués de petits miroirs plans positionnés horizontalement qui s'inclinent individuellement ou collectivement, afin de suivre la course du soleil. La technologie de Fresnel, actuellement testée en



conditions réelles de fonctionnement est comparativement simple à fabriquer, construire et exploiter. Les réflecteurs, qui réfléchissent et concentrent les rayons du soleil, sont complètement plats et positionnés de façon linéaire. Ils forment de longues rangées de miroirs mobiles. Les miroirs, assemblés parallèlement, concentrent l'énergie de la radiation solaire vers un système absorbeur situé à environ 8 mètres plus haut. L'eau qui circule dans le tube central du système absorbeur est chauffée et se transforme en vapeur atteignant des températures jusqu'à 450°C.

Cette vapeur est ensuite convertie en énergie électrique dans une turbine à vapeur (comme une centrale conventionnelle). Les collecteurs de Fresnel sont innovants en ce qu'ils ne sont pas sensibles au vent et requièrent moins de terrain que les autres collecteurs solaires. En complément de la production d'énergie solaire, la zone située en-dessous des miroirs peut être utilisée de plusieurs façons. Dans les environnements désertiques, cette zone d'ombre où l'irradiation solaire est diminuée de 80%, peut être utilisée pour du stockage, du parking, des bâtiments de bureau (avec des coûts réduits de climatisation), voire des serres agricoles. Jusqu'à présent, aucune centrale basée sur le système de Fresnel n'est développée commercialement en Europe. Des centrales de démonstration sont construites en Europe et aux Etats-Unis pour évaluer et démontrer les coûts de production d'énergie, afin d'acquérir une expérience opérationnelle et créer la confiance au niveau commercial

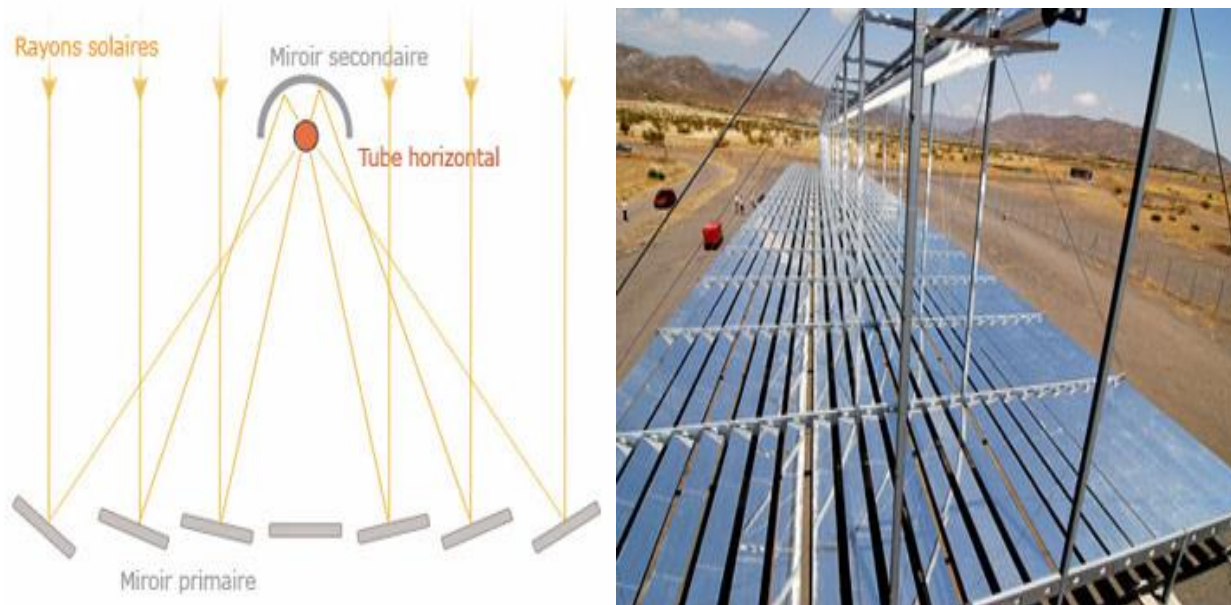


Figure II-23) A gauche : Principe de fonctionnement d'un concentrateur à miroirs de Fresnel

A droite : La centrale solaire à miroir de Fresnel de Almería en Andalousie

### 14 Système multi-sources (système hybride)

Un système d'énergie hybride peut consister en divers composants de conversion d'énergie renouvelable avec ou sans source d'énergie classique (exemple: générateur diesel).

Au cours des dernières années, plusieurs formes d'énergie renouvelable sont utilisées dans les systèmes hybrides. Ces sources d'énergie, sont largement utilisées pour fournir de l'énergie électrique aux consommateurs dans des régions éloignées.

Elles ont des caractéristiques de production différentes tels que les changements de débit d'eau dans la rivière en fonction des saisons, l'irradiation solaire qui est supérieure en été qu'en hiver et plus élevée pendant la journée et nul dans la nuit. De même la vitesse du vent qui est élevée en été, etc. Voilà pourquoi ils sont généralement utilisés dans des configurations de systèmes hybrides. De tels systèmes peuvent varier de petits systèmes capables de fournir une puissance pour une maison à de grands systèmes qui peuvent alimenter un village ou une île.

Les systèmes hybrides sont pensés pour fournir de l'énergie à un grand nombre de collectivités éloignées. En particulier, dans les pays en développement où le raccordement au réseau national n'est économiquement et techniquement pas viable.

Les avantages des systèmes hybrides sont les suivantes :

- Deux ou plusieurs sources d'énergies renouvelables peuvent être intégrées dans un système, basé sur leurs potentiels locaux.
- Pas d'émission de gaz à effet de serre n'est produite par les énergies renouvelables d'un système hybride.
- Modulaire, facile à installer et la majorité des cas, n'a pas besoin de conception pour l'usage domestique.
- Les Systèmes hybrides sont moins chers que les grands systèmes et moins complexes que les systèmes nucléaires.
- Le système hybride est le mieux adapté pour l'électrification hors réseau.
- La source pour le système hybride est abondante, gratuite et inépuisable donc l'énergie électrique produite par ces systèmes est indépendante du prix du carburant.
- Minimiser le coût de stockage et optimiser sa capacité est la raison essentielle de la combinaison des systèmes

### 15 Les centrales PV-CSP hybride [20]

Ces derniers temps, le concept de centrales hybrides PV-CSP a gagné en intérêt. Hybrides PV-CSP peut offrir un moyen plus économique de produire une production d'électricité intermédiaire, en pointe ou en marches spécifiques que le CSP ou le PV seul. Une configuration d'installation PV-CSP simplifiée est illustrée à la figure II-24

Le concept de base est que le PV, fonctionne pendant la journée à faible coût, et le stockage du CSP prend le relai la nuit ou pendant des heures de faibles ensoleillements.

Plusieurs projets PV-CSP, hybrides et localisés, sont en cours de développement dans le monde, en particulier au Chili, en Afrique du Sud et au Maroc.

#### Copiapó, Chili

Copiapó se composait initialement de deux tours solaires de 130 MWe avec un stockage thermique de 14 h et une centrale PV de 150 MW. Une opération hybride permettrait à la centrale photovoltaïque de fournir l'énergie nécessaire pendant la journée, alors que le CSP offrirait un approvisionnement énergétique la nuit grâce à son stockage capacités, fournissant ainsi une puissance de charge de base. Le projet hybride a obtenu le permis environnemental en 2015 et l'entreprise attendait un AAE approprié. En Août 2016 la direction de SolarReserve a choisi de soumissionner à ce son projet à 0,063 \$ / kWh.

#### Cerro Dominador, Chili

Abengoa a commencé la construction de la central Cerro Dominador à Antofagasta, au Chili. Le projet consiste en une Centrale CSP et PV: une tour solaire thermique de 110 MWe et une PV de 100 MW.

La combinaison des deux centrales devrait acheminer l'énergie dans le réseau chilien 24 heures sur 24, étant capable de répondre pendant les périodes de forte demande de l'industrie et des ménages.

Le Cerro Dominador la centrale CSP et le projet PV Maria Elena s'appelaient à l'origine Atacama 1.

Appelé maintenant Cerro Dominador. Après avoir été détenu et développé par Abengoa, ce projet a été vendu à EIG Global Energy Partners, la centrale CSP entrera en service en 2019 et le parc photovoltaïque en 2017.

#### Redstone CSP, Afrique du Sud

Redstone est une centrale PV et CSP. Il s'agit d'un projet CSP à installer avec le deux parcs photovoltaïques déjà construits par SolarReserve à Postmasburg, en Afrique du Sud (Lesedi et Jasper).

La puissance installée totale des 3 centrales combinées sera de 271 MWe. Ce projet a été



développé dans le cadre de l'approvisionnement indépendant des producteurs d'énergie renouvelable Programme (REIPPPP). Dans le cadre de ce programme, il y a actuellement environ 2 GW de capacité PV et 600 MWe de CSP en cours de planification ou de construction.

### Bokpoort II, Afrique du Sud

Bokpoort II était à l'origine un projet PV / CSP comprenant des installations photovoltaïques de 4x75 MW ensemble avec une tour parabolique 2x100 MWe CSP pour une capacité totale de 500 MW . C'est Maintenant il est prévu de produire 2 x 75 MW PV plus une tour CSP de 150 MWe pour un total de 300 MWe .

### Mendoza, Argentine

En 2016, un pré-contrat a été signé par la société néerlandaise Gigawatt Global pour la construction d'un PV de 100 MW et une centrale solaire thermique de 110 MWe à Mendoza, Argentine. La centrale PV est valorisée à 220 M \$ et 520 M \$ représentent l'investissement estimé pour le CSP, soit un total de 740 M \$ .

### Noor Midelt, Maroc

La centrale Noor Midelt sera composée d'une centrale hybride PV / CSP de 800 MWe. Pour la phase I, deux des centrales hybrides sont proposées par MASEN (Agence marocaine de l'énergie solaire).

La capacité CSP de chaque centrale devrait être comprise entre 150 MWe et 190 MWe .

Une capacité connectée à plein temps de 400 MWe sont nécessaires pour chaque projet, quelle que soit la capacité totale installée.

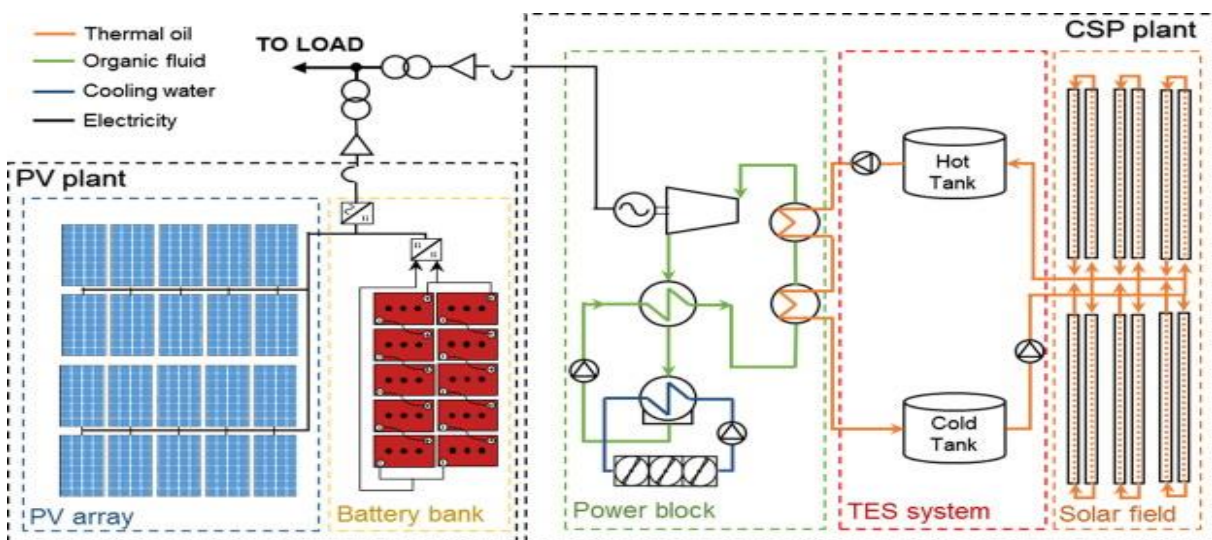
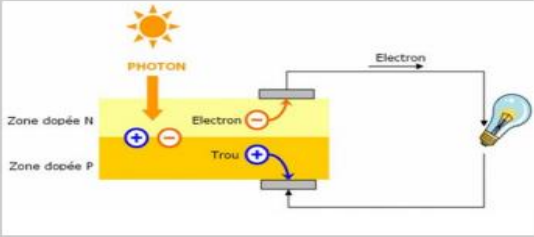
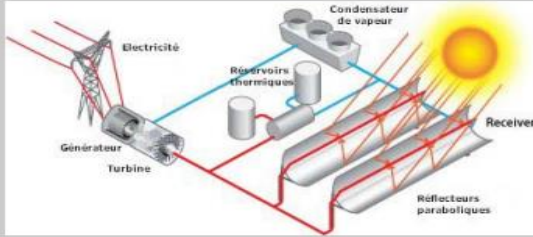


Figure II-24) un central solaire hybride PV-CSP

Table II-2 tableau comparatif entre le PV et CSP

	
<p>Transformation directe de l'énergie solaire en électricité</p>	<p>Transformation indirecte de l'énergie solaire en électricité</p>
<p>Stockage (électrochimique) complexe et coûteux</p>	<p>Stockage thermique simple et abordable</p>
<p>Production instantanée</p>	<p>Possibilité de production hors période ensoleillée (nuit/passages nuageux)</p>
<p>Faible coût d'électricité</p>	<p>Coût relativement élevé</p>

### Objectif de la thèse :

Sur la base de l'étude bibliographique réalisée, on constate que la technologie hybride (CSP-PV) est l'un des domaines de recherche ciblés dans le domaine de l'énergie solaire, en raison de divers avantages par rapport aux technologies PV seul et CSP seul. Comparé au système PV seul, le système hybride CSP-PV peut produire de l'électricité avec une meilleure qualité d'énergie. Par rapport au système CSP seul, le coût de production d'électricité peut être réduit.

L'efficacité de production globale sera également grandement améliorée si le composant PV et le composant CSP du système hybride sont hybrides «de manière compacte». Le développement des systèmes hybrides CSP-PV s'est accéléré ces dernières années avec l'augmentation de la maturité des technologies PV et CSP

Ce travail a pour objectif principal Calcul des performances d'une centrale hybride CSP/PV sur sites Algérien

# **III. Chapitre 03 : simulation**

## **Résultats et discussions**

### 1 Définition de logiciel (SAM):

“System Advisor Model“, “SAM“, est un logiciel qui réalise l’analyse du coût et des performances. Il a été conçu pour la prise de décision pour les personnes impliquées dans l’industrie des énergies renouvelables. Il a été développé par le laboratoire national des énergies renouvelables le ‘NREL’, les laboratoires nationaux de Sandia, en partenariat avec le département d’énergie des Etats Unies le ‘DOE’.

SAM modélise une gamme de technologies d’énergie renouvelable pour la production d’électricité, y compris les systèmes photovoltaïques, les auges solaires thermiques, les tours électriques et les systèmes paraboliques Stirling. SAM comprend également des modèles pour les systèmes éolien, biomasse et géothermique, ainsi qu’un modèle de centrale thermique simple pour comparer les projets d’énergie renouvelable avec les projets d’énergie conventionnels. SAM utilise un modèle de performance horaire pour estimer la production annuelle totale d’un système électrique et un modèle de coût et financier pour calculer les flux de trésorerie d’un projet. SAM rapporte les performances et les mesures financières dans des tableaux et des graphiques, qui peuvent être exportés pour être utilisés dans des rapports ou pour une analyse plus approfondie dans d’autres modèles.

- Le mode de fonctionnement de SAM :

SAM calcule la production totale d’électricité d’un système en kilowattheures pour la première année sur la base des données météorologiques horaires pour un emplacement particulier et des spécifications physiques des composants du système électrique. Il calcule ensuite la production totale pour les années suivantes en fonction d’un facteur de dégradation annuel et des flux de trésorerie annuels basés sur des intrants financiers et économiques pour déterminer le coût actualisé de l’énergie et d’autres paramètres économiques.

### 2 Méthodologie de travail :

#### 2.1 Description de site :

La wilaya de Illizi est la troisième plus importante wilaya par la superficie. Elle est située à l'extrême sud-Est du pays et elle est limitrophe avec deux pays sur 1 233 km de frontière avec : la Tunisie, la Libye , elle est caractériser par :

Latitude	26° 29' 00''
Longitude	8° 28' 00''
Altitude	568 m
Superficie	284,618 km <sup>2</sup>
Population	52333 hab

#### 2.2 Le Relief :

Quatre principales formes géomorphologiques caractérisant la wilaya qui sont:

- Le relief dunaire présenté par le grand erg oriental au Nord, il couvre la majeure partie des communes d'In amenas (erg Issaouene) et Deb Deb (erg Bourahreht). Au centre, le grand erg oriental domine particulièrement la commune d'illizi (erg Admer) et le Sud d'In Amenas (erg Tihodane). Au Sud, il chevauche sur la commune de Bordj el houes et de Djanet.
- Le relief de plateau s'observe au Nord par la hamada de Tinhert et le plateau des Tassilis au Sud.
- Le relief de montagne s'allonge et localisé notamment au centre au Sud dans la direction NO/SE
- Le relief de plaine couvre une faible portion et principalement celle la plaine d'Admer entre les communes de Djanet et Bordj el Houes.

### 2.3 La température

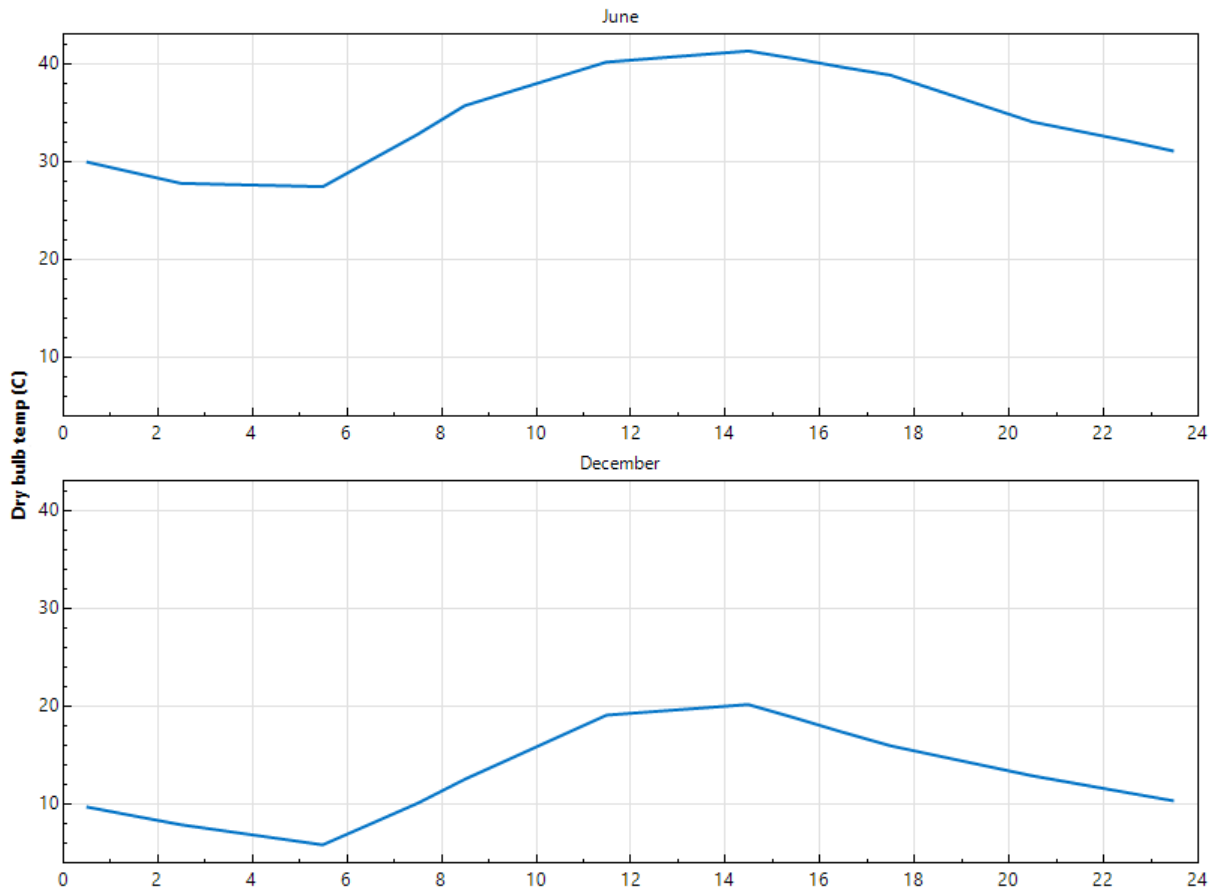


Figure ( III-1) la variation de la température en fonction des heures de la journée

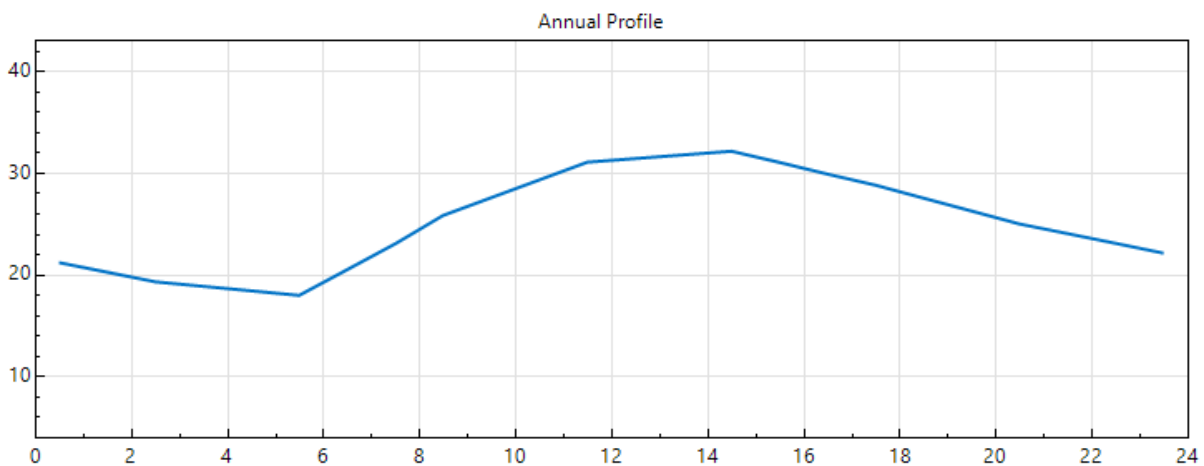


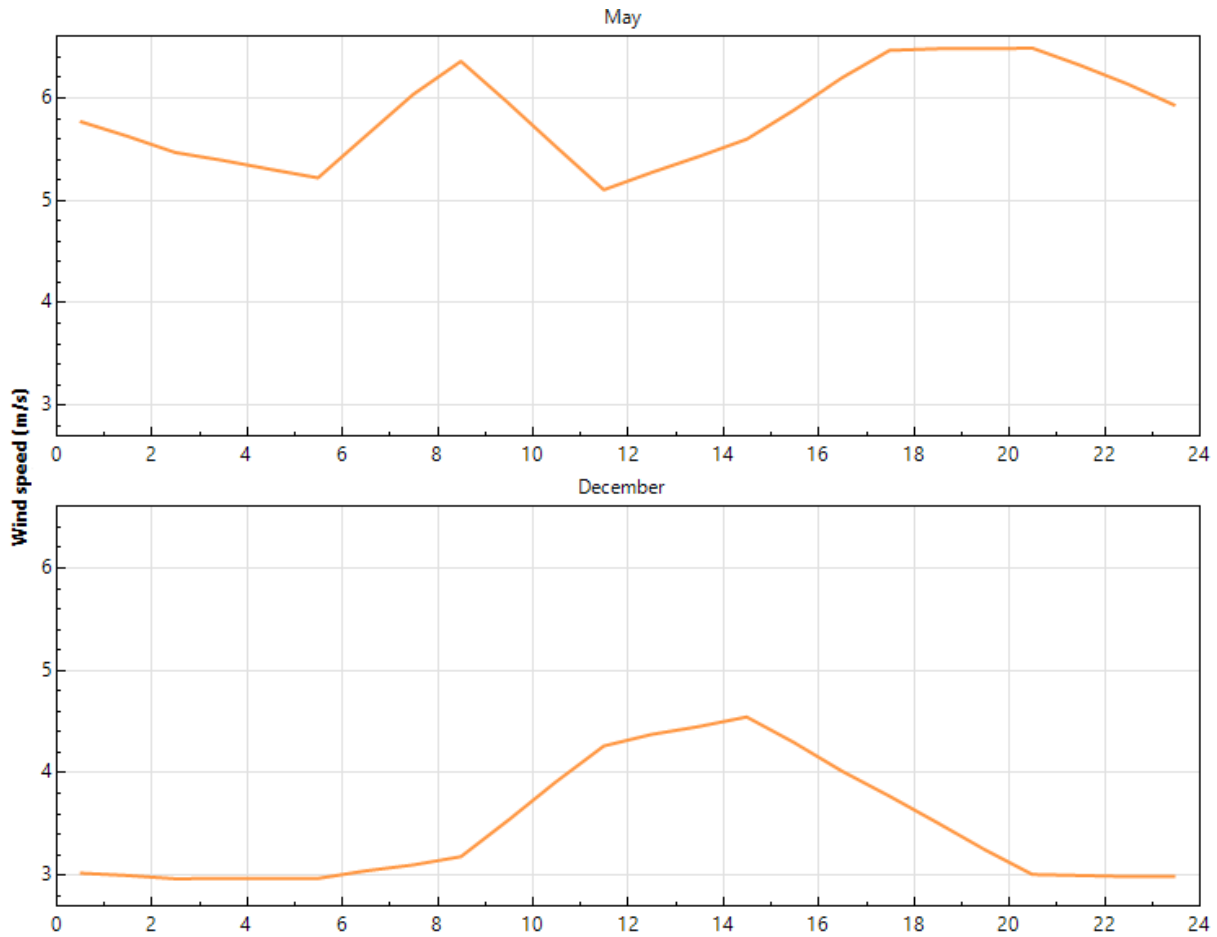
Figure III-2 ) le profil annuel de la variation de la température en fonction des heures de la journée.

Ces graphes représentent la variante de la température durant les heures de la journée. La température est considérée comme facteurs important quand il est en interaction avec d'autres facteurs climatiques, mais également est l'un des facteurs principaux qui assure le bon fonctionnement de la centrale solaire.

## Chapitre 03 : résultats et discussions

On remarque que la température minimale est de 5 °C tandis que la température maximale est de + 26°C. Mai à juin, c'est la période des grandes chaleurs avec une moyenne maximale de température de +42°C et des pics allant jusqu'à +47°C.

### 2.4 Les vents :



Figure( III-3) la variation de la vitesse du vent en fonction des heures de la journée pour le mois de mai et décembre

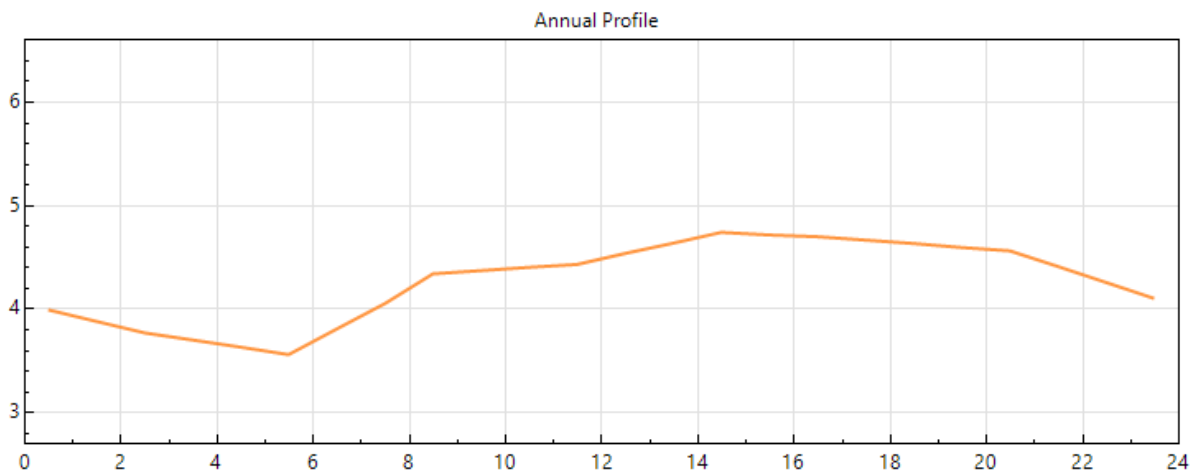


Figure III-4) profil annuel de la variation de la vitesse vent.

## Chapitre 03 : résultats et discussions

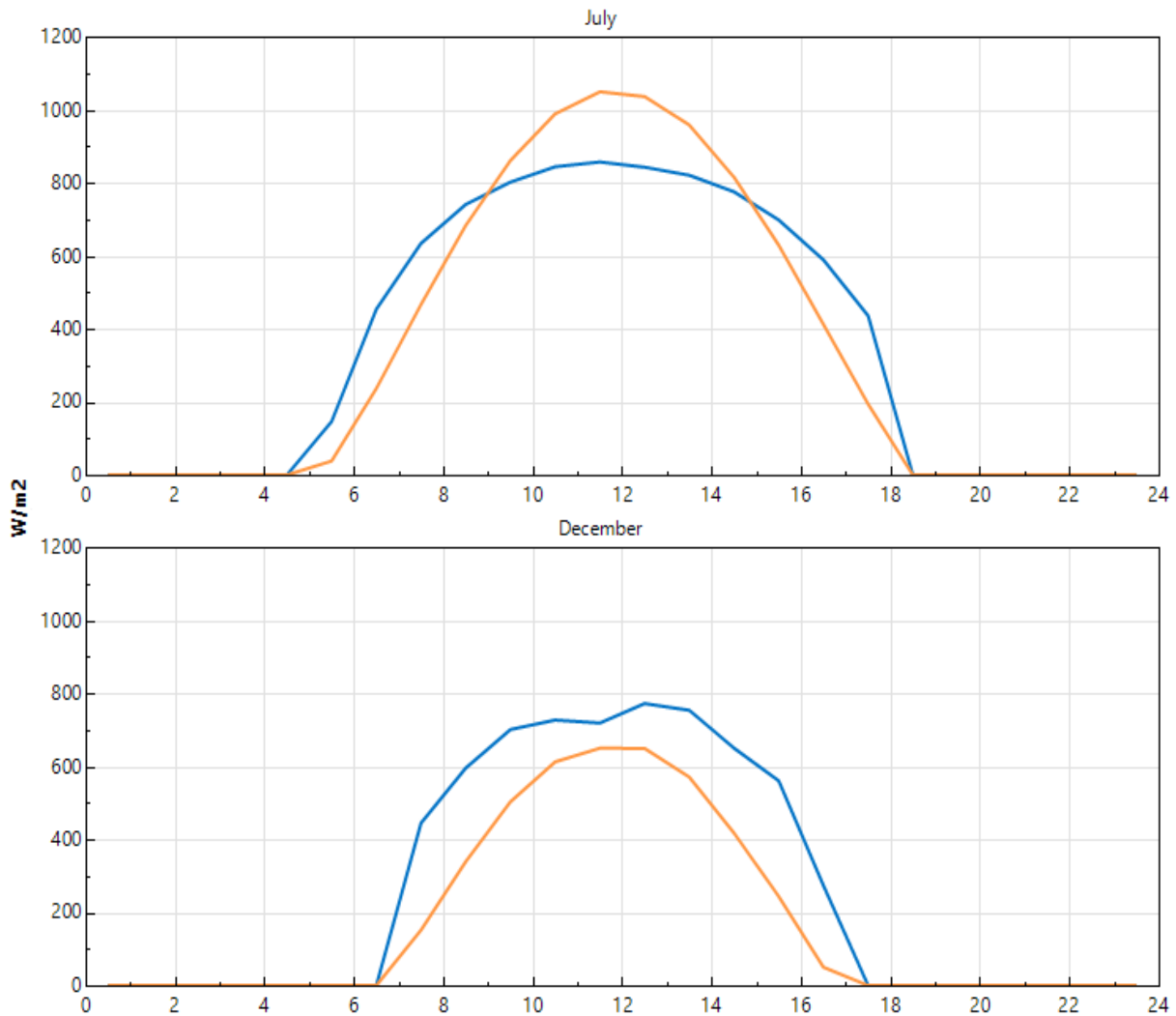
Figure III-3 représente la variation de la vitesse du vent en fonction des heures de la journée pour le mois de mai et décembre et la figure III-4 représente le profil annuel

Les vents sont très variables selon les saisons de l'année, on remarque que :

La période de la plus venteuse est Mai avec une vitesse de 9-11 m/s.

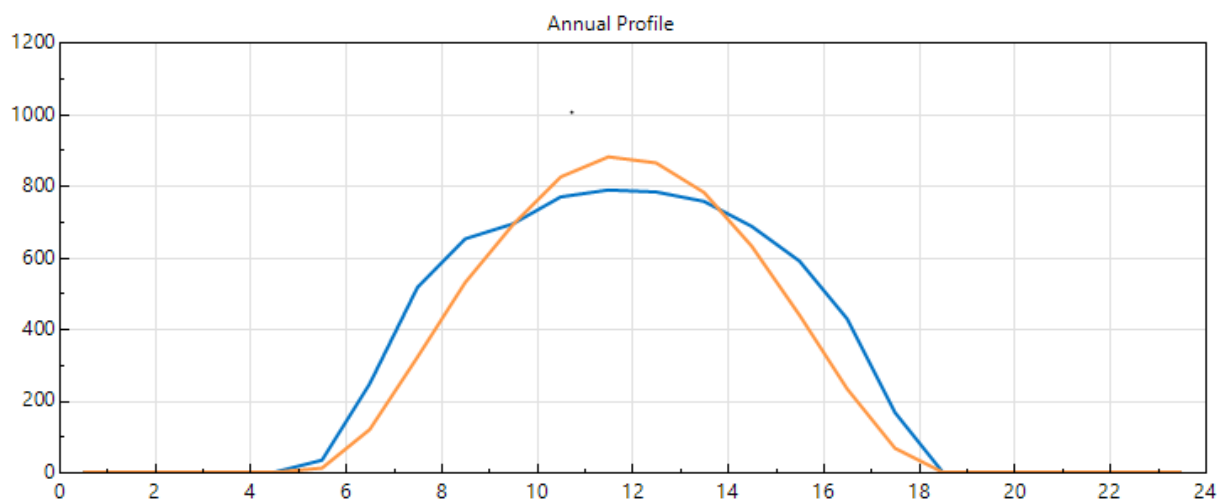
La moyenne annuelle est autour de 5 m/s et des perturbations au mois de Mai ou la vitesse attend les 10 m/s.

### 2.5 L'éclairement directe et globale :



Figure( III-5) la variation de l'éclairement global et directe en fonction des heures de la journée pour le mois de décembre et juillet





Figure( III-6) la variation de l'éclairement globale et directe en fonction des heures pour la ville de Illizi. (Annuel)

Ces graphes montre le profil de l'éclairement globale et directe on remarque que durant le mois de juin l'éclairement globale dépasse la valeur de 1000 w/m<sup>2</sup> et pour le mois de décembre la valeur l'éclairement directe est supérieur que celle du globale et qui atteint la valeur de 800 w/m<sup>2</sup>.

Les technologies PV et CSP utilisent différentes ressources solaires. Alors que le système PV utilise le rayonnement directe et diffuse, les systèmes CSP ne peut pas capturer sa composante diffuse car elle ne peut pas être optiquement concentré. En ce sens, ces technologies sont complémentaires.

Le CSP définie généralement un seuil inférieur pour un DNI de 1900 kW h / m<sup>2</sup> / an à 2100 kW h / m<sup>2</sup> / an afin d'atteindre une performance économique raisonnable.

### 3 Description du projet :

Le projet consiste à Combiner le solaire photovoltaïque et thermique constitue une perspective de production d'électricité en permanence (24h/24) et à un coût compétitif, L'électricité PV est consommée en direct durant la journée tandis que l'électricité CSP est utilisée quand la production PV devient insuffisante ou nulle (durant la nuit) ;

Une centrale à toure avec une capacité de 20 MW et une centrale photovoltaïque avec une capacité de 48000 KW.

#### 3.1 Critères de choix :

**Le choix de la technologie des panneaux photovoltaïques est basé sur :**

- Une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées.

## Chapitre 03 : résultats et discussions

- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du Milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est faible vu les entretiens réduits, Avec une longue durée de vie.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit final est non polluant (électricité propre), silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- Ils fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et dans de nombreuses applications résidentielles et commerciales.
- Ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre à vos besoins en matière d'électricité.
- Temps de réalisation d'une centrale PV minimum.
- On élimine les frais et les risques de transport associé aux énergies fossiles.

### Le choix de la technologie de la central CSP (central à tour) :

- Le solaire concentré possède l'atout de voir les zones ayant le plus de potentiel situé dans des déserts et autres zones peu habitées, ce qui ne gêne en général pas les populations et n'occupe pas de surfaces cultivables. Des installations sur seulement quelques centaines de km<sup>2</sup> désertiques pourraient fournir la totalité de l'électricité consommée en Europe.
- La chaleur se stockant bien plus aisément que l'électricité, le solaire à concentration peut stocker la chaleur pendant la nuit et assurer la production nocturne
- La centrale solaire à concentration est un dispositif centralisé de production, ce qui permet l'optimisation de la puissance installée par habitant. De plus, l'électricité produite est en haute tension et peut donc être transportée sur de grandes distances sans pertes importantes.
- Technologie assez développée permettant une bonne accessibilité sur le plan commercial.
- Coût d'investissement modéré par rapport au prix de revient du kWh produit.
- Possibilité d'hybridation avec des centrales électriques classiques

### 3.2 Les étapes de la simulation :

Définir le besoin électrique de la ville de Illizi :

Désignations	Puissance Installée en MW	Heures de Fonctionnement par jour	Energie Consommée par jour en MWh	Energie Consommée par an en GWh
Population	36	6	216	78,84
Industrie	15	8	120	43,8
Agriculture	10	5	50	18,25
Collectivités locales	5	8	40	14,6
Hôpital	1	24	24	8,76
Aéroport	2	5	10	3,65
Autres	16	5	80	29,2
<b>Total</b>	<b>85</b>	<b>61</b>	<b>540</b>	<b>197,1</b>

En prenant en compte le nombre d'habitants et le nombre de foyers de la ville, on a établi ce tableau qui représente la consommation énergétique journalière et annuelle de la ville.

### 3.3 La courbe de charge de la wilaya de Illizi

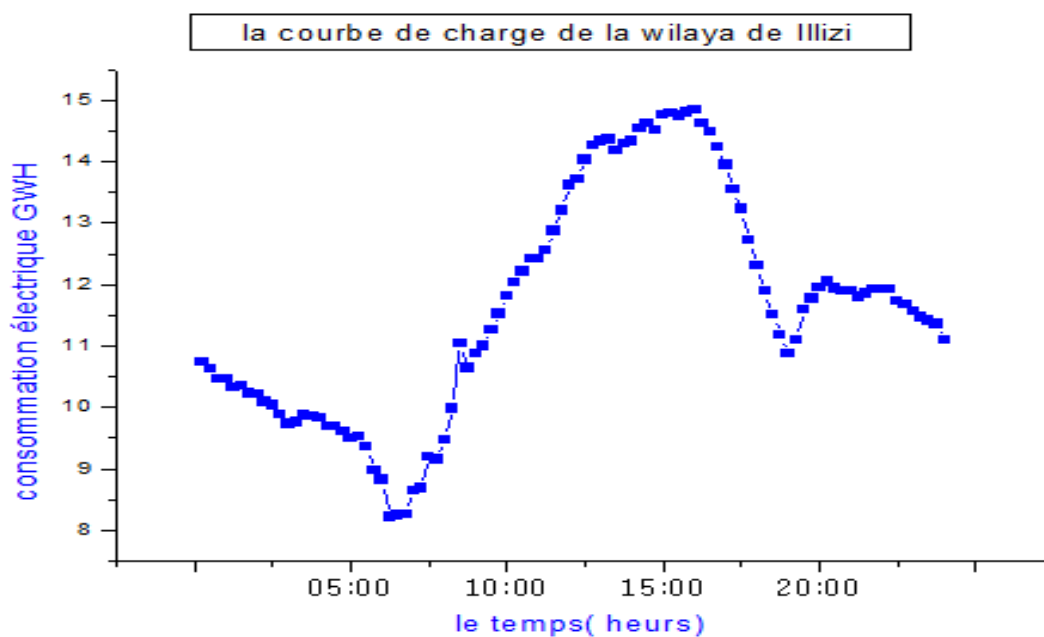


Figure III-7) la consommation électrique pour une journée type de l'année de la wilaya de Illizi

### 3.4 La simulation :

## Chapitre 03 : résultats et discussions

### La simulation de la centrale photovoltaïques se fait selon l'ordre suivant :

1. Choisissir un fichier météo.
2. Préciser les caractéristiques du système.
  - a) Sur la page Module, choisir le module et ses caractéristiques.
  - b) Sur la page Onduleur, choisir l'onduleur et ses paramètres.

Utilisez l'option Inverter CEC Database. Pour un onduleur qui ne figure pas dans la liste, si vous disposez de la fiche technique du fabricant, choisissez le modèle Fiche technique de l'onduleur.

3. Sur la page Conception du système, spécifiez la taille du système.
4. Identification des pertes : les pertes de saleté, les pertes de courant continu, les pertes de courant alternatif et les pertes dues aux exigences de disponibilité du système sur la page Pertes.
5. Préciser les coûts du projet.
  - Sur la page Coûts du système, spécifier les valeurs des coûts d'investissement et des coûts d'exploitation et de maintenance.
6. Exécuter une simulation et examiner les résultats.
  - Cliquez sur Simuler et examinez les résultats sur la page de résultats.

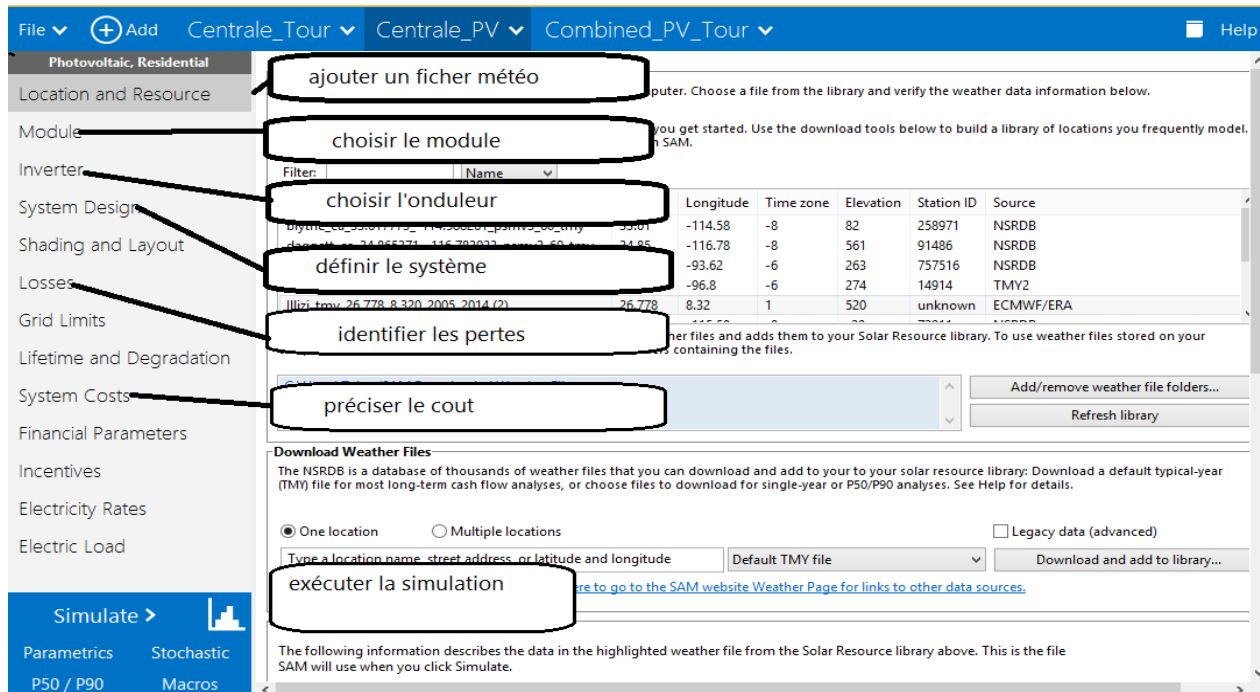


Figure III-8) les étapes de la simulation sur le logiciel SAM (la centrale PV).

### ✚ La simulation de la centrale à tour se fait selon l'ordre suivant :

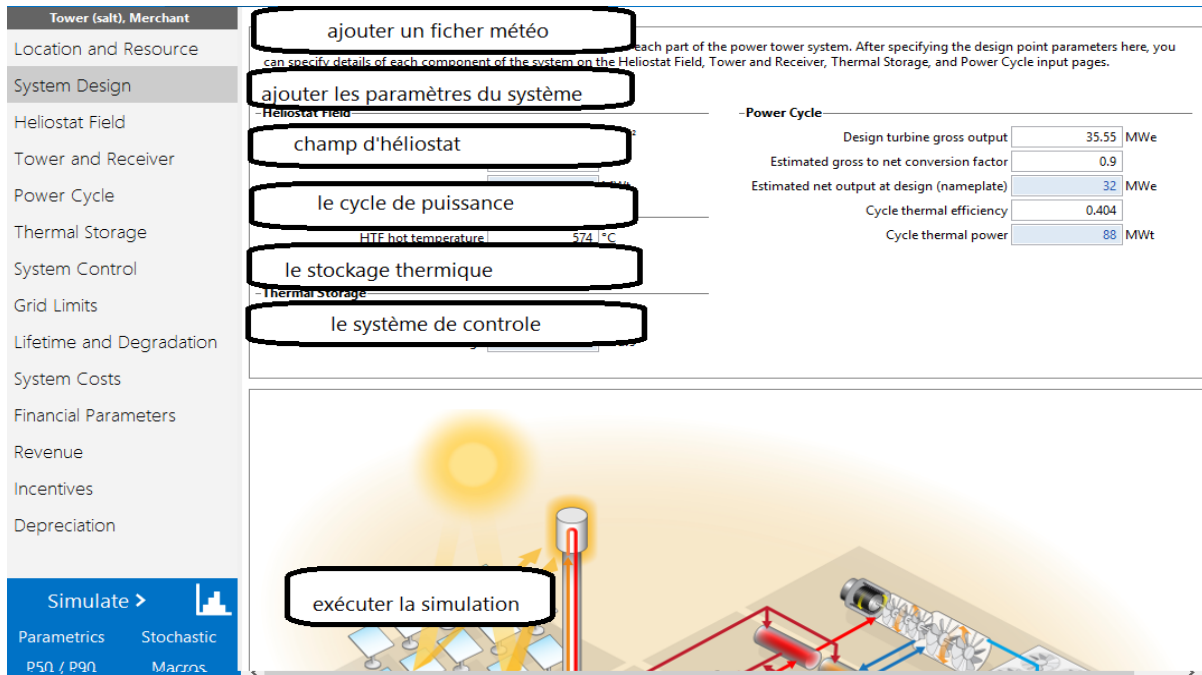
#### . Les paramètres de conception :

Les composants des centrales CSP devrait avoir une conception optimisée pour un meilleur ajustement avec HTF, système de Stockage thermique d'énergie (TES), et les paramètres du champ solaire, le stockage et le bloc de puissance, Puis, pour fournir la capacité de stockage de chaleur nécessaire, le champ solaire (à savoir les miroirs et les collecteurs de chaleur) d'une centrale CSP doit être surdimensionné par rapport à la capacité électrique nominale (MW) de la centrale. Ainsi, à partir d'un point de vue technique, les exigences de conception sont le facteur multiple solaire, Fraction de combustible de remplissage (FFF) de l'hybridation, facteur de capacité (efficacité CF), et la capacité du système de stockage (Heures de pleine charge FLH).

- Multiple solaire (SM): est le rapport entre la taille réelle du champ solaire à la taille du champ solaire nécessaire pour alimenter la turbine à capacité nominale avec irradiance solaire maximale.
- Heures de pleine charge (FLH) est le nombre d'heures que le système de stockage peut fournir de l'énergie à la capacité d'entrée de turbine de conception de bloc de puissance.
- Fraction de combustible de remplissage (FFF) est une fraction de la production brute de turbine de conception de bloc de puissance qui peut être atteint par la chaudière de sauvegarde. Il sert à calculer l'énergie de la chaudière de sauvegarde.

## Chapitre 03 : résultats et discussions

- Le facteur de capacité est le rapport de la valeur prédite électrique de sortie du système dans la première année de fonctionnement à la sortie de la plaque signalétique, ce qui équivaut à la quantité d'énergie du système produirait si elle fonctionne à sa capacité nominale pour chaque heure de l'année.



Figure( III-9) les étapes de simulation sur le logiciel SAM (central à tour).

## 4 Résultats et discussions :

### 4.1 La puissance générée par la centrale à tour et central photovoltaïque :

Le résultat de dimensionnement nous a permis de tracer les graphes de puissances pour les journées types de l'année pour la centrale à tour et la centrale photovoltaïque et la combinaison entre les deux centrales.

#### a. La centrale à tour:

- Les équinoxes correspondent respectivement au 20 mars et au 22 Septembre :
- ▶ La puissance générer le 20 mars :

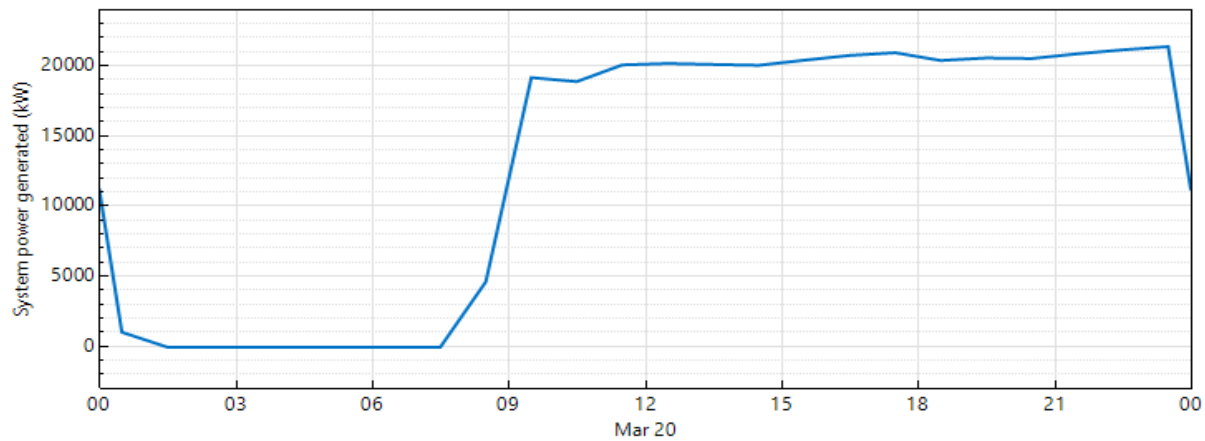


Figure III-10) la variation de la puissance générée durant la journée du 20 mars

La Figure III-11) représente la courbe de puissance pour la journée du 20 mars on remarque que la production de la puissance commence à partir de 08h et dépasse la valeur 20.000 kW ou elle reste constante.

### ► La puissance générer le 22 Septembre :

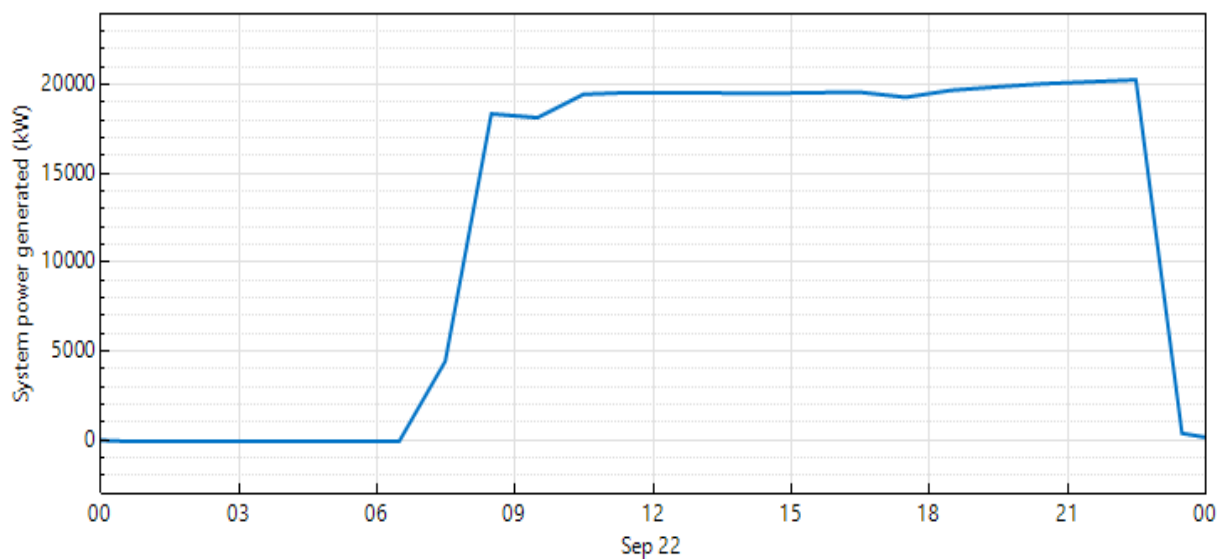


Figure III-12) la variation de la puissance générée durant la journée du 22 sep.

Et pour la journée de 22 septembre la production commence à 07h du matin et attend la valeur de 20.000 kW ou elle va se stabiliser puis diminue la nuit (après l'utilisation du stockage qui dure 6h)

➤ Les solstices correspondent respectivement au 20 juin et au 21 décembre :

### ► La puissance générer le 20 juin par la centrale à tour :

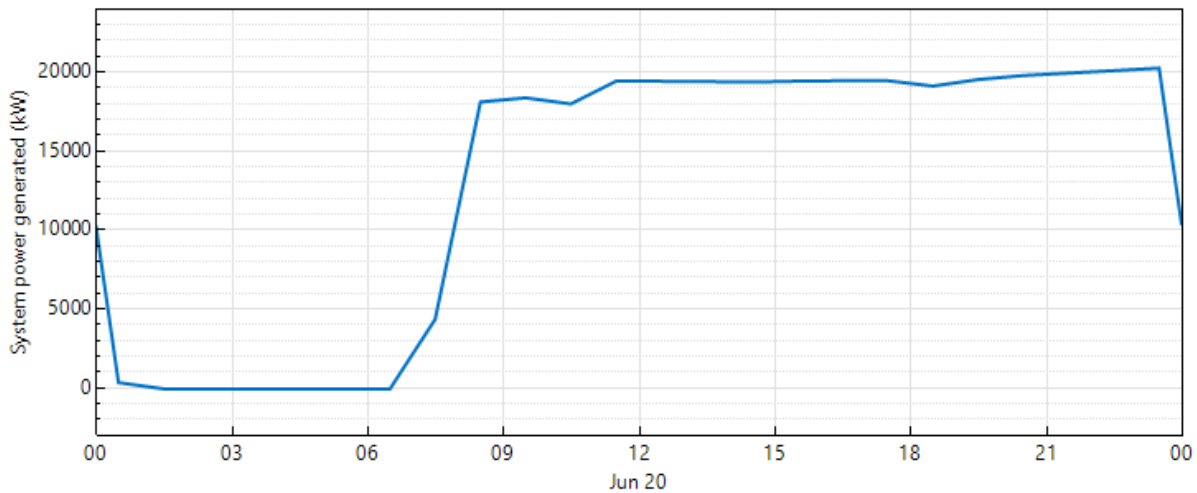


Figure III-13) la variation de la puissance générée durant la journée du 20 juin

Pour la journée de 20 juin la génération commence partir de 7h et augmente rapidement ou elle se stabilise à 20.000KW.

### ► La puissance générer le 21 décembre :

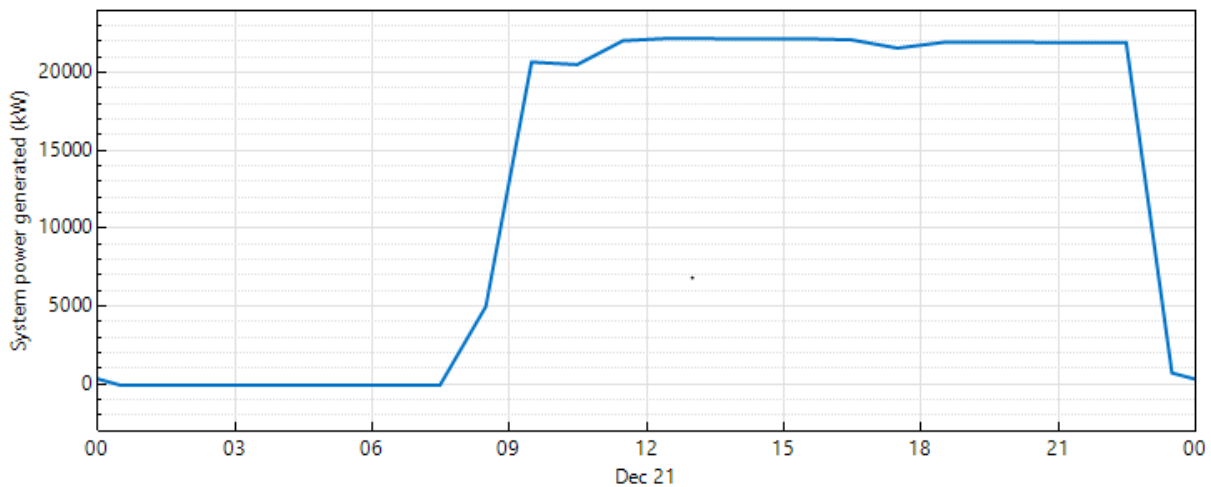


Figure III-14) la variation de la puissance générée durant la journée du 21 décembre.

Remarque :

D'après les graphes tracés de la centrale à tour pour les quatre journées types de l'année on remarque que le profil de la puissance générée par la centrale est presque constant.

### b. La centrale photovoltaïque:

- Les équinoxes correspondent respectivement au 20 mars et au 22 septembre
- 20 mars :



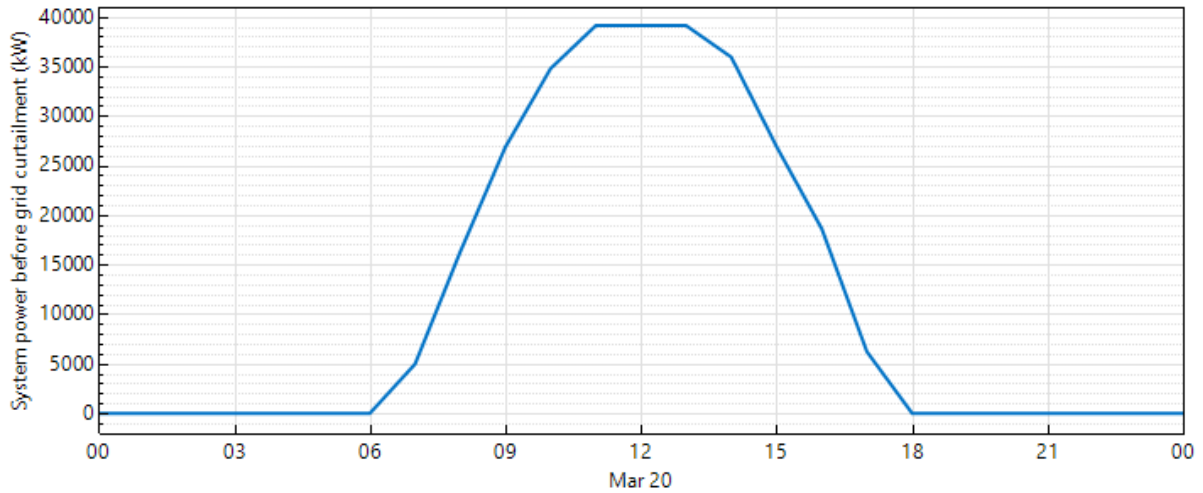


Figure III-15) la variation de la puissance générée durant la journée du 20 mars

- **22 septembre :**

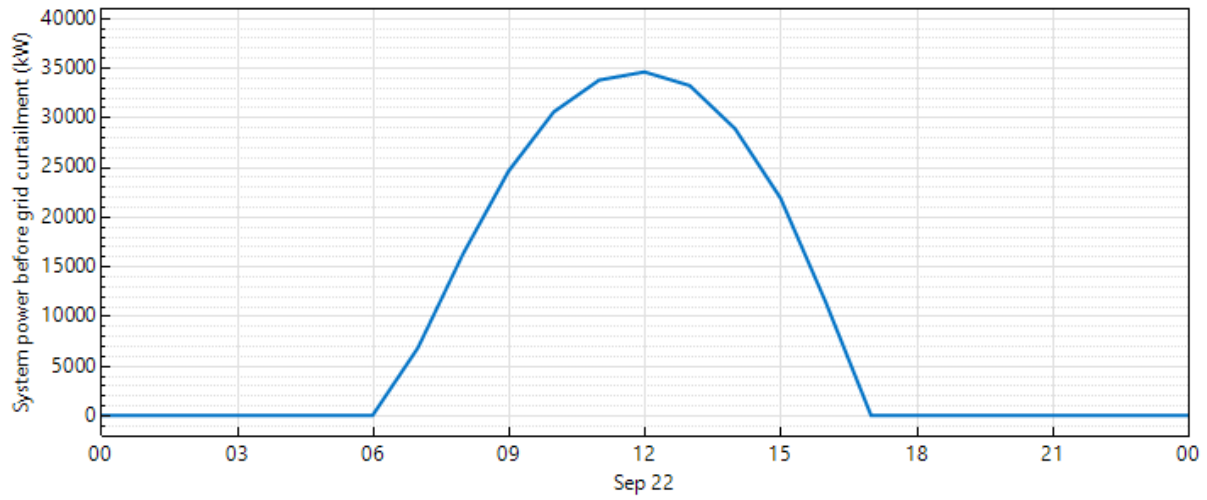


Figure III-16) la variation de la puissance générée durant la journée du 22 sep

➤ Les solstices correspondent respectivement au 20 juin et au 21 décembre.

20 Juin :

## Chapitre 03 : résultats et discussions

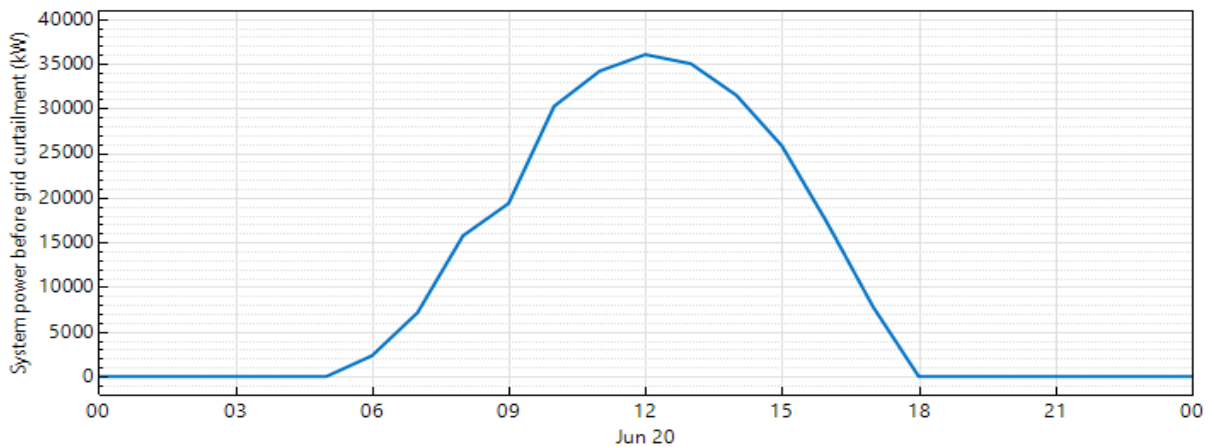
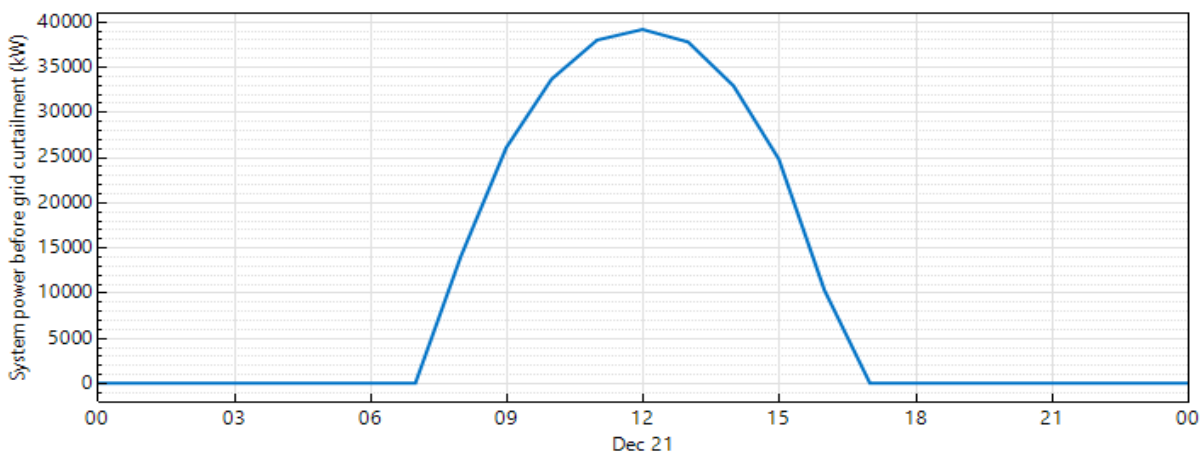


Figure ( III-17) la variation de la puissance générée durant la journée du 20 juin



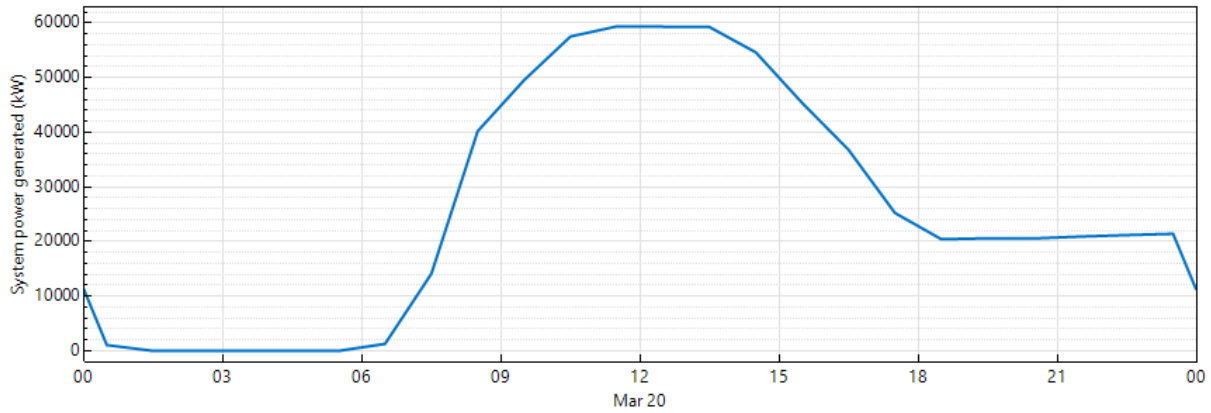
Figure( III-18) la variation de la puissance générée durant la journée du 21 décembre

Remarque :

Pour la centrale photovoltaïque on remarque que les courbes de puissance sont sous forme de cloche ce qui signifie que la production se fait durant les heures d'ensoleillement de la journée contrairement à la centrale à tour qui continue la production même après les heures d'ensoleillement ( le stockage thermique).

### c. La centrale combinée : PV centrale à tour

- Les équinoxes correspondent respectivement au 20 mars et au 22 septembre :



Figure( III-19) la variation de la puissance générée durant la journée du 20 mars

22 septembre

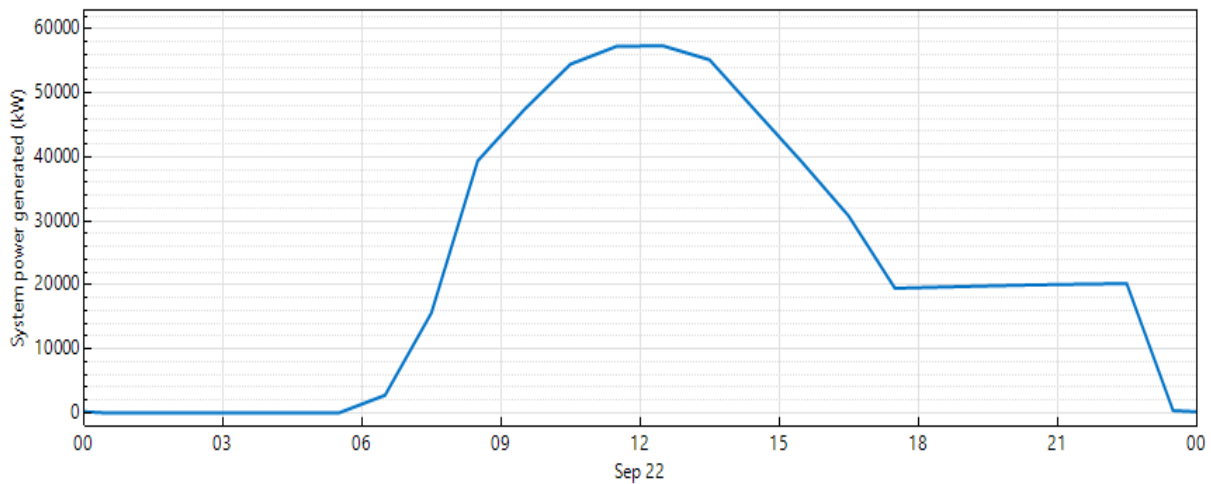
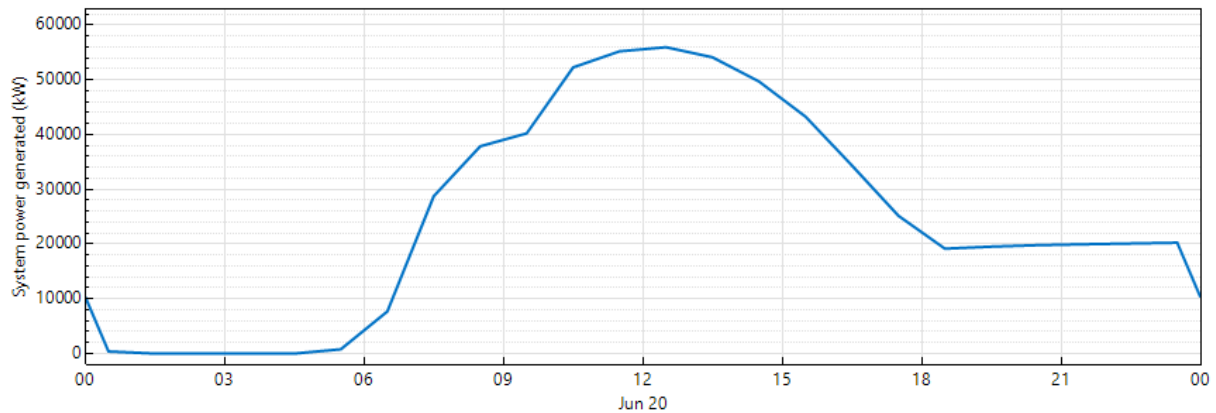


Figure III-20) la variation de la puissance générée durant la journée du 22 septembre.

➤ Les solstices correspondent respectivement au 20 Juin et au 21 Décembre.

- **20 Juin :**



Figure( III-21) la variation de la puissance générée durant la journée du 20 juin.

- **21 Décembre :**

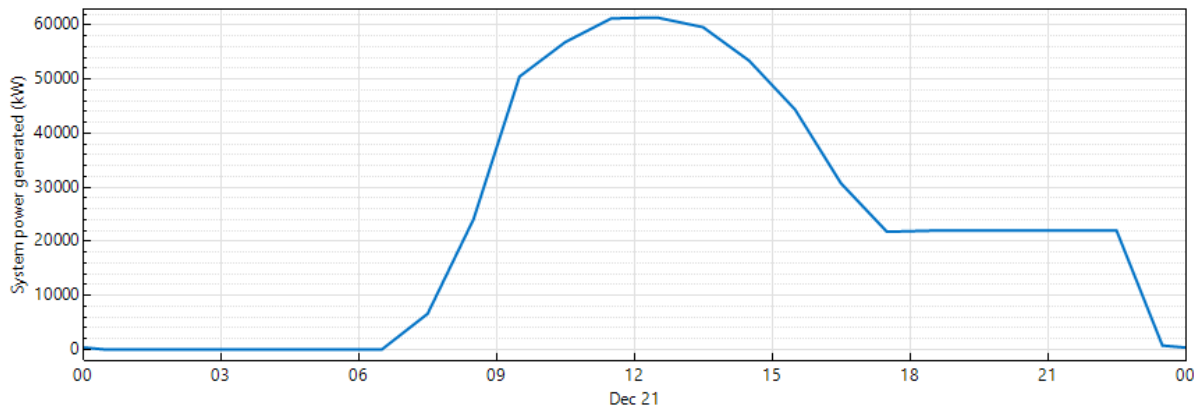


Figure III-22) la variation de la puissance générée durant la journée du 21 décembre.

Remarque :

Après la combinaison on remarque que la puissance générée à augmenter et les heures de production aussi afin de satisfaire la demande en électricité durant ces heures de la journée ou on n'aura pas d'ensoleillement mais le demande augmente.

### 4.2 L'étude économique :

- **Coût actualisé de l'électricité (LCOE)**

Le coût actualisé de l'électricité peut être défini comme le prix minimum de l'électricité sur l'ensemble de la durée de vie de la centrale

- **Analyse du kWh produit LCOE**

Le calcul du LCOE utilise une méthode simple pour calculer le coût actualisé de l'énergie (LCOE) d'un projet en utilisant uniquement les entrées suivantes :

- Coût du capital, \$ (TCC) ou coûts du capital installé.
- Coût d'exploitation annuel fixe, \$ (FOC), ou frais d'exploitation et d'entretien.
- Coût d'exploitation variable, \$ / kWh (COV), ou coûts d'exploitation et d'entretien par unité de production annuelle d'électricité.

Taux de charge fixe (FCR)

- Production annuelle d'électricité, kWh (AEP).

Le LCOE est donné par :

$$LCOE = \frac{FCR \times TCC + FOC}{AEP} + VOC$$

### Capacité du système

La capacité nominale du système d'énergie renouvelable. Sa valeur dépend du modèle de performance que vous utilisez pour la simulation et est indiquée ici à titre de référence lorsque vous entrez les coûts en \$ / kW.

### Entrez les coûts en \$

Saisir le coût en capital et les coûts d'exploitation fixes annuels sous forme de montants en dollars.

### Entrez les coûts en \$ / kW

Saisir le coût en capital et les coûts d'exploitation fixes annuels en dollars par kilowatt de capacité du système. La capacité du système dépend du modèle de ses performances

### Coût en capital

Le coût d'investissement total du projet ou les coûts d'investissement installés.

### Coût d'exploitation fixe

Coûts annuels d'exploitation et de maintenance qui ne varient pas avec la quantité d'électricité produite par le système.

### Coût d'exploitation variable

Coûts annuels d'exploitation et d'entretien en dollars par kilowattheure qui varient en fonction de la quantité d'électricité produite par le système.

### Taux de charge fixe :

Le taux de charge fixe du projet est un rendement annuel en tant que fraction du coût en capital, ou des revenus par montant d'investissement requis pour couvrir le coût d'investissement. Il s'agit soit de la valeur que vous entrez sous Hypothèses financières, soit de la valeur que SAM calcule à partir des détails financiers que vous entrez

La centrale photovoltaïque :

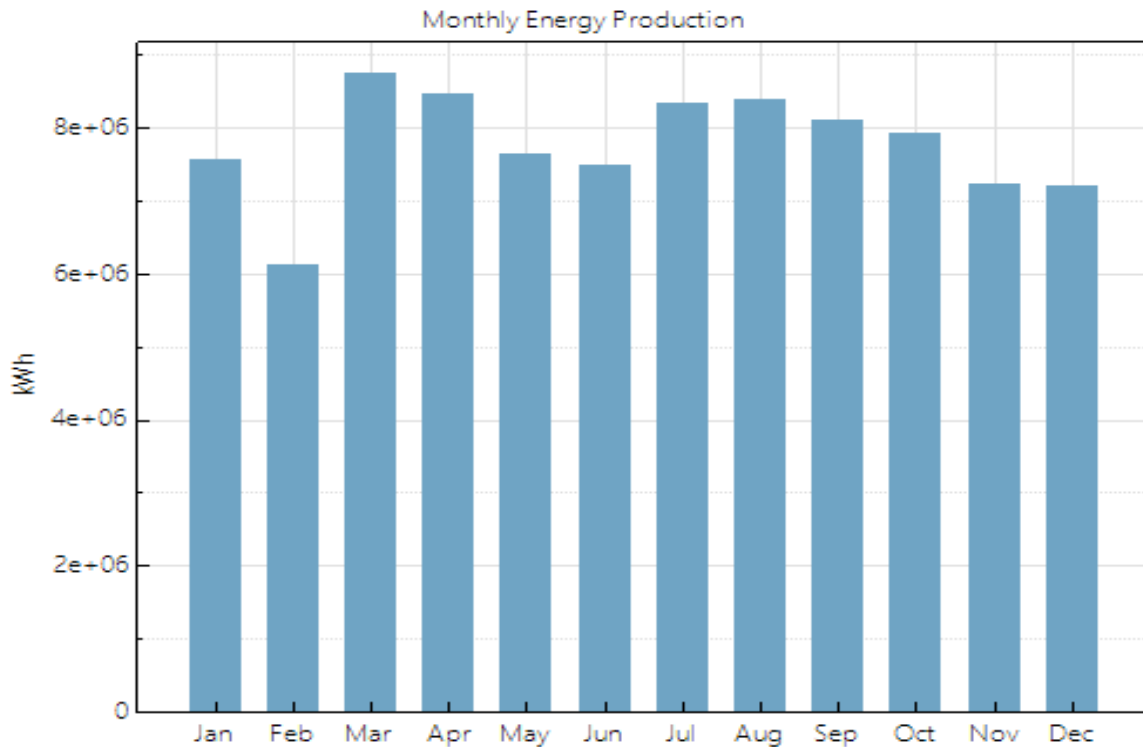
Table III-1 les paramètres de la centrale photovoltaïque

Metric	Value
Annual energy (year 1)	93,254,632 kWh
Capacity factor (year 1)	22.2%
Energy yield (year 1)	1,943 kWh/kW
Performance ratio (year 1)	0.79
Levelized COE (nominal)	7.29 ¢/kWh
Levelized COE (real)	5.82 ¢/kWh
Electricity bill without system (year 1)	\$1,514
Electricity bill with system (year 1)	\$120
Net savings with system (year 1)	\$1,394
Net present value	\$-64,084,580
Simple payback period	NaN
Discounted payback period	NaN
Net capital cost	\$120,532,000
Equity	\$0
Debt	\$120,532,000

Ce tableau résume le résultat de simulation pour la centrale photovoltaïque, il regroupe les facteurs les plus importants et qui permettent de suivre l'état générale de la centrale tel que la production annuelle, le facteur de capacité, le coût actualisé de l'énergie ...

La production annuelle de l'énergie :

## Chapitre 03 : résultats et discussions



Figure( III-23) la production annuelle de l'énergie

Le graphe suivante représente la génération électrique de la centrale photovoltaïque en fonction des mois, on remarque que l'énergie produite dépasse la valeur de  $8 \times 10^6$  kWh pour le mois de février.

Centrale à tour :

Table III-2) les paramètres de la centrale à tour

Metric	Value
Annual energy (year 1)	107,042,608 kWh
Capacity factor (year 1)	61.1%
Annual Water Usage	64,896 m <sup>3</sup>
Levelized COE (nominal)	13.33 ¢/kWh
Levelized COE (real)	10.58 ¢/kWh
Net present value	\$-139,466,656
Internal rate of return (IRR)	NaN
Year IRR is achieved	25
IRR at end of project	NaN
Net capital cost	\$180,375,744
Equity	\$203,884,064
Size of debt	\$-23,508,318

### Chapitre 03 : résultats et discussions

Ce tableau résume les paramètres qui caractérisent la centrale à tour tel que l'énergie annuelle et facteur de capacité le cout d'investissement, et qui nous permettent de comparer les résultats entre les deux centrales photovoltaïques et à tour et la combinaison entre les deux.

La production annuelle de l'énergie :

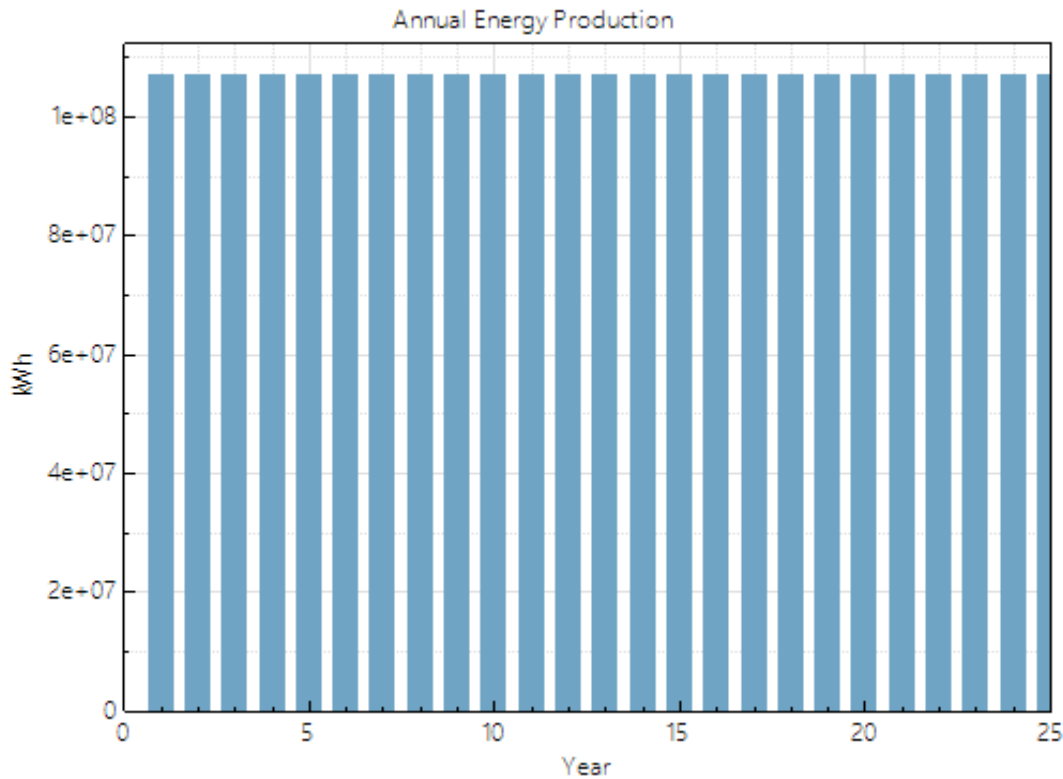


Figure III-24) la production de la centrale à tour durant 25 ans

Ce graphe résume l'état de la centrale à tour et montre que l'énergie produite reste constante durant toute sa durée de vie  $1 \cdot 10^8$  kWh .



## Chapitre 03 : résultats et discussions

Centrale combinée :

Table III-3) les paramètres de la centrale hybride

Metric	Value
Annual energy (year 1)	206,355,632 kWh
Capacity factor (year 1)	34.6%
PPA price (year 1)	16.80 €/kWh
PPA price escalation	1.00 %/year
Levelized PPA price (nominal)	18.19 €/kWh
Levelized PPA price (real)	14.45 €/kWh
Levelized COE (nominal)	16.92 €/kWh
Levelized COE (real)	13.44 €/kWh
Net present value	\$25,629,062
Internal rate of return (IRR)	11.00 %
Year IRR is achieved	20
IRR at end of project	13.29 %
Net capital cost	\$318,040,736
Equity	\$84,325,168
Size of debt	\$233,715,584

Les tableaux résumant les paramètres les plus importantes de chaque centrale telle que l'énergie annuelle, le ratio de performance, le facteur de capacité et le LCOE en comparant les résultats de la centrale PV et la centrale à toure on remarque que la production annuelle couvre le besoin énergétique demandé et le cout de l'électricité LCOE est de 13.44 \$/KWh

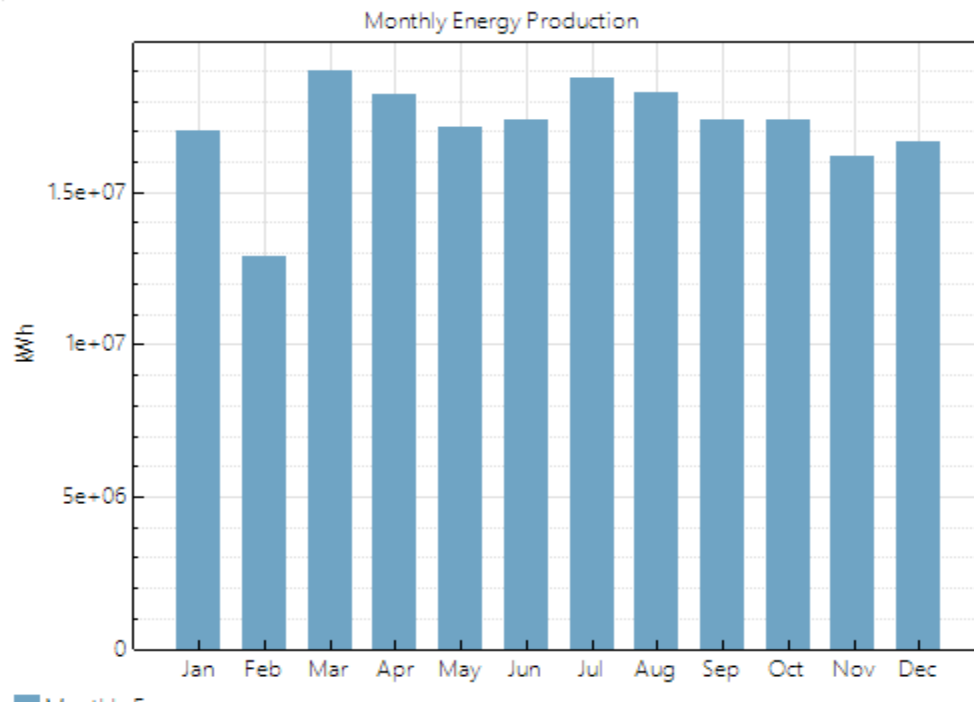


Figure III-25) la production annuelle de la central hybride

## Chapitre 03 : résultats et discussions

Ces paramètres nous permettent de savoir l'état de chaque central ainsi de détecter un problème en cas de défiance.

<b>Paramètres</b>	<b>Centrale PV</b>	<b>Centrale CSP</b>	<b>PV- CSP</b>	<b>Unités</b>
<b>L'énergie annuel produite</b>	93.254.632	107.042.608	206.355.632	KWH
<b>Facteur de capacité</b>	22.2	61.1	34.6	%
<b>Capacité de stockage</b>	-	6	6	H
<b>Coût actualisé de l'électricité (LCOE)</b>	5.82	10.58	13.44	\$/KWH

## IV. Conclusion

L'utilisation d'énergie solaire est actuellement une réalité mondiale et l'Algérie donne une grande importance à son développement, le sud algérien dispose naturellement d'un potentiel solaire important, le nombre d'heure d'ensoleillement dépasse 3500 h/an. Ce constat qualitatif favorise l'exploitation et l'épanouissement de cette ressource énergétique.

Dans le but de fournir une énergie entièrement distribuable en utilisant uniquement l'énergie solaire, ce mémoire se concentre sur un système de production d'électricité hybride basé sur des centrales solaires à concentration (CSP) et photovoltaïques (PV). En particulier, la section CSP est basée sur une centrale à tour utilisant le sel thermique comme fluide caloporteur. Dans la section PV, le champs de captation (les panneaux solaire) les onduleurs, régulateurs.

Le système PV-CSP a été proposé pour tirer parti du faible coût du stockage thermique et des modules photovoltaïques, afin de lutter contre les problèmes de coût et d'entretien des batteries, qui sont généralement utilisés dans les sites isolés.

Afin d'optimiser le dimensionnement de la centrale solaire on a utilisé le logiciel SAM "System Advisor Model" qui est un logiciel qui réalise l'analyse du coût et des performances des centrales solaire.

Les résultats démontrent que l'hybridation des technologies PV et CSP devient très rentable si une puissance de sortie constante est requise pendant des périodes de la journée ou la demande de la puissance augmente, pour des périodes de production inférieures à 8 h, l'utilisation d'un système de stockage du CSP est la solution la plus rentable pour la centrale hybride, et durant la journée la production de l'électricité est réalisée au fil du soleil.

# References

[1] Data for 2010-2014 from International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook 2016 (Paris: 2016), <http://www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2016/>.

[2] Renewables 2017 global status report, [http://www.ren21.net/wpcontent/uploads/2017/06/178399\\_GSR\\_2017\\_Full\\_Report\\_0621\\_Opt.pdf](http://www.ren21.net/wpcontent/uploads/2017/06/178399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf)

[3] Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy. Paris : International Energy Agency, 2014.

[4.] Technology Roadmap: Solar Thermal Energy. Paris : International Energy Agency, 2014

[5] R. France, "Multijunction solar cells for high-temperature operation in hybrid CPV-CSP systems," in 12th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems; CPV-12, Freiburg, Germany, 2016

Chapiter 01 : gisement solaire

[1] : J.M Chassériaux, Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984.

[2] : R. Bernard; G. Menguy; M. Schwartz, Le rayonnement solaire conversion thermique et applications ; Technique et documentation Lavoisier , 2ème édition 1980.

[3] : J.M Chassériaux, Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984

[4] Le système Soleil -Terre <https://slideplayer.fr/slide/2570667/>

[5]« Centre de ressources sur les panneaux solaires et la production d'électricité », <http://www.photovoltaique.info/>

[6] F.Z.Mimouni, « Elaboration et caractérisation des couches minces de CuInS<sub>2</sub> par pulvérisation chimique réactive SPRAY -Couche absorbante pour les cellules solaires- », Mémoire de Magister, Université Mohammed Boudiaf Oran, 2009.

[7] Salima KARROUT, « Etude théoriques et numériques des systèmes couples : distillateur plan-captur et distillateur HOT BOX – captur », mémoire Magister, Université de CONSTANTINE, 2009

[8] : J.M Chassériaux, Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984.

[9] : Michel Daguene: les séchoirs solaires : théorie et pratique, Unisco, paris ; 1985.

[10] : Michel Capderou , Atlas solaire de l'Algérie, tome 1,2 ;O.P.U. 1986.

[11] : M. Capderou, Atlas solaire de l'Algérie, Tome 1, Vol. 1 et 2 ; OPU, 1987.

- [12] : [www.Energie solaire photovoltaïque Semaine 08](http://www.Energie solaire photovoltaïque Semaine 08) (Consulté le 05/2015)
- [13] : Yves Jannot. Thermique solaire. Paris (2007).
- [14] : <http://web.laghuniv.dz/web/fr/doc/publications/ouvrage/techno/Mesri.pdf> ( 05/2015)
- [15] : DUFFIE J. A. , BECKMAN W. A., Solar energy thermal processes, John Wiley and Sons, New York,1974.
- [16]: Coordonnées célestes: sciences- physiques.ac-dijon.fr /astronomie/Lexique- astronomique /lexique- astro/c/coordonnees\_celestes.html. (Consulté le 04/2015)
- [17] : BOUCHOUICHA Kada « MODELISATION MULTISPECTRALE DES IMAGES SATELLITAIRE - Application : Quantification du bilan d'énergie Sol-Atmosphère » Université des sciences et technologie d'Oran, Oran.(2016/2017)
- [18] A.MEFTI, 'Contribution à la détermination du gisement solaire par traitement de données solaires au sol et d'images météosat', Thèse de Doctorat d'Etat en Physique, Spécialité, Conversion Thermodynamique, Université USTHB, 2007.
- [19] M.BOULIFA, 'Estimation du rayonnement solaire par traitement d'images satellitaires : Utilisation de l'équation du transfert radiatif', Mémoire de Magister en électronique, option Télédétection, 2005
- [20] C.PERRIN de BRICHAMBAUT et C.VAUGE, 'le gisement solaire : Evaluation de la ressource énergétique', Technique et Documentation, Librairie Lavoisier, Paris, France, 1982
- [21] M. Ghassemi, Solar Ressource from « Solar Energy: Renewable Energy and the Environment », page 20 et 21, 2010.
- [22] MEZIANI Fariza « Détermination du gisement solaire par traitement d'images MSG » Magister en électronique ,Option télédétection , UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU

### *Chapitre 02 : Etat de l'art*

- [16] « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes. ». Mekemeche Abdelkader L'Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem 2017
- [17]. ESTELA (Association Européenne de l'Electricité Solaire Thermodynamique Concentration) : Electricité solaire thermodynamique, Valoriser le potentiel méditerranéen, 2009
- [18]. Syndicat des énergies renouvelables : fiches solaire thermodynamique intégral, mai 2010 et la dernière révision de document, Paris juin 2011,
- [19] Techno-Economic Analysis of Hybrid PV-CSP Power Plants Advantages and disadvantages of intermediate and peak load operation Federico Dominio
- [20] Aachen University of Applied Sciences Campus Jülich Faculty 10: Energy Technology M.Sc. in Energy Systems Techno-economic Assessment of Hybrid Photovoltaic/Solar Thermal Power Plants: Modeling and Potential for Synergies Master Thesis by Ricardo Alexander Chico Caminos Cologne, Germany October 20

# Annexe

Outils sur le gisement solaire, l'irradiation et les données climatiques :

<a href="#">CalSol</a> (INES)	Ce logiciel conçu par l'INES, accessible gratuitement sur Internet, permet d'apprécier le potentiel en énergie solaire pour une quinzaine de villes en France suivant l'inclinaison et l'orientation et d'effectuer une pré étude énergétique, économique et environnementale pour une installation PV connectée au réseau électrique (à venir : PV en site isolé, eau chaude sanitaire solaire, chauffage solaire et solaire passif).
<a href="#">EERE</a> (USA)	Energy Efficiency and Renewable Energy de US Departement of Energy, données climatiques et solaires sur 230 villes dans 85 pays
<a href="#">IES</a> (I)	Base de données de l'Institute for Environment and Sustainability à Ispra en Italie, sur l'irradiation solaire (valeurs moyennes mensuelles pour différentes inclinaisons, trouble de Link, rapport diffus/global ...) pour différents lieux dans 60 pays dans le monde dont 500 en France.
<a href="#">INFOCLIMAT</a> (F)	Normales climatiques d'une centaine de stations françaises, période 1961-1990, sur la température, les précipitations, la durée d'insolation, l'humidité relative ...
<a href="#">MétéoFrance</a> (F)	Service professionnel payant de Météo France
<a href="#">METEONORM 5.0</a> (CH)	Logiciel (de Meteotest) de données climatiques et irradiation solaire, calcule suivant l'orientation et l'inclinaison. Logiciel <a href="#">téléchargeable</a> fonctionnant en mode démonstration durant 10 jours.
<a href="#">Meteosun 1.0</a> (CH) de SPF	Données météorologiques mondiales sur 4 500 sites (utilisé par le logiciel thermique PolySun).
<a href="#">RETScreen</a> (CAN)	Logiciels téléchargeables gratuits sur les données solaires, simulation de systèmes photovoltaïques, thermiques, passifs et sur l'émission GES.
<a href="#">S@tel-light</a> (EU)	S@tel-light permet (à partir d'observations satellite 1996-2000) de générer des cartes sur l'irradiation solaire en Europe
<a href="#">SoDa</a> (F)	Service web (de l'Ecole des Mines de Paris) pour les professionnels en énergie solaire. Base de données climatiques et en irradiation solaire sur la planète avec différentes applications.
<a href="#">Solar Irradiation</a>	Site de John Duffy, University of Massachusetts. Irradiation solaire mensuelle de 2 300

<a href="#">database</a> (USA)	villes dans 120 pays (42 villes en France).
<a href="#">SRRl</a> (USA)	Solar Radiation Resources Information, Données sur l'irradiation solaire dans le monde (en anglais)
<a href="#">SunAngles</a> (USA)	Calcul de la position du soleil (en anglais)
<a href="#">Sun Position</a> (GR)	Calcul de la position du soleil (en allemand)
<a href="#">SWITCH</a> (F) (Solar water integrated thermal cooling and heating systems)	Ce site (de l'Ecole des Mines de Paris) permet d'obtenir des données sur l'irradiation solaire mensuelle (globale et suivant une inclinaison et une orientation) ainsi que le trouble de Link et la température min/max pour 16 pays en Europe et 31 villes en France.
<a href="#">worldclimate</a> (USA)	Ce site fournit des données climatiques (température, précipitation ...) de 85 000 lieux à travers le monde.
<a href="#">WRDC</a> (USA)	World Radiation Data Center, Données sur l'irradiation solaire dans le monde (en anglais)