

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES**



**Faculté de Technologie**  
**Département Génie Mécanique**  
**Mémoire de Master**

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

**Filière : Génie mécanique**

**Spécialité : Energies renouvelables en mécanique**

**THEME**

**Etude d'une centrale d'énergie renouvelable**  
**raccordée au réseau**

**Présenté par : ASSOUL Mohamed Amine**

**Promoteur : Professeur HACHEMI Madjid**

**Année universitaire 2022/2023**

## Résumé

Ce mémoire se concentre sur l'impact de deux technologies de panneaux photovoltaïques d'une centrale de 10 MW. L'étude vise à comparer deux types de panneaux solaires afin de déterminer lequel est le plus adapté pour une telle installation. Les panneaux solaires sont des composants essentiels des systèmes photovoltaïques, et leur performance peut avoir un impact significatif sur l'efficacité globale de la centrale.

## ملخص

يتركز هذا البحث على تأثير تقنيتين لوحيتين شمسيين في محطة بقدرة 10 ميغاوات. يهدف الدراسة إلى مقارنة نوعين من الألواح الشمسية لتحديد الأكثر تالئاً لما لمثل هذا التثبيت. تعتبر الألواح الشمسية مكونات أساسية في أنظمة الطاقة الشمسية، ويمكن أن يكون أداؤها تأثير كبير على الكفاءة العامة للمحطة

## Abstract

In this thesis, the focus is on the impact of a 10 MW grid-connected photovoltaic power plant on an electrical network. The study aims to compare two types of solar panels to determine which one is more suitable for such an installation. Solar panels are crucial components of photovoltaic systems, and their performance can significantly affect the overall efficiency of the power plant.

## **Mots clés**

Centrale photovoltaïque, Panneaux bifaciaux, Efficacité , Performance, Transition bas carbone, Cellules photovoltaïques, Albédo , Ombre, Irradiance , Température , Taux d'humidité , Intégration au réseau , Stockage de l'énergie , Impact environnemental , Développement durable.

## **Key words**

Photovoltaic power plant, Bifacial panels, Efficiency , Performance, Transition carbon scale, Photovoltaic cells, Albedo , Shade, Irradiance , Temperature , Humidity , Grid integration , Energy storage Environmental impact , Sustainable development.

## **كلمات مفتاحية**

محطة الطاقة الشمسية، الألواح ذات الوجهين، الكفاءة، الأداء، الانتقال إلى انبعاثات منخفضة للكربون، الخلايا الشمسية، السطوع، الظل، الإشعاع، درجة الحرارة، نسبة الرطوبة، التكامل مع الشبكة، تخزين الطاقة، التأثير البيئي، التنمية المستدامة.

## **Remerciements**

*Je tiens à exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Sans leur aide, ce travail n'aurait pas été possible.*

*Je voudrais tout d'abord remercier mon directeur de mémoire , professeur Hachemi Madjid, pour ses précieux conseils et son soutien tout au long de ce projet. Sa disponibilité et son expertise ont été d'une grande aide.*

*Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas vu le jour sans l'aide et le soutien moral de Mr Boucheneb Djallal , mon encadreur de stage au sein de SONATRACH, je remercie également chaque personne travaillant dans la DC REN pour leur accueil ,leur aide, et leur disponibilité afin de mener à bien ce travail de mémoire .*

*Je tiens à remercier ma famille pour leur soutien moral et leur encouragement tout au long de mes études. Leur amour et leur soutien ont été une source de motivation pour moi.*

*Je remercie également mes amis et mes collègues de travail pour leur soutien et leur encouragement. Leurs commentaires et leurs idées ont été très utiles pour améliorer cette mémoire.*

*Enfin, je voudrais remercier toutes les personnes qui ont participé à la réalisation de ce mémoire, qu'elles soient citées ou non. Leur contribution a été essentielle pour la réussite de ce projet.*

*Merci à tous.*

***Mohamed Amine***

## Sommaire

Résumé .....	
Remerciements .....	
Introduction générale .....	1
1. Introduction .....	4
1.1 Sources d'énergie renouvelables .....	4
1.1.1 Energie solaire .....	5
1.1.2 Énergie éolienne .....	5
1.1.2.1 Éoliennes modernes .....	6
1.1.3 L'énergie géothermique .....	7
1.1.3.1 Production d'électricité géothermique .....	7
1.1.4 L'hydroélectricité .....	8
1.1.4.1 Centrales hydroélectriques .....	8
1.1.4.2 Hauteur de chute et débit .....	9
1.1.5 Bioénergie .....	10
1.1.5.1 Biomasse .....	10
1.1.5.2 Types de biomasse .....	11
1.1.6 Énergie marine .....	12
1.2 Énergies alternatives en Algérie .....	13
1.3 Présentation de SONATRACH .....	14
1.3.1 Organigramme de SONATRACH .....	15
1.3.2. Stratégie des Energie renouvelables de SONATRACH .....	16
1.4. Conclusion .....	16
2. Introduction .....	18
2.1 Historique du photovoltaïque bifaciale .....	19
2.2 Rayonnement solaire .....	19
2.2.1 Les différents types de rayonnements .....	20
2.2.2 Variations de l'ensoleillement .....	21
2.2.3 Angle solaire d'altitude .....	22
2.2.4 Géométrie d'installation des panneaux solaires .....	22
2.2.4.1 Principe des systèmes photovoltaïques .....	23
2.2.5 Types de cellules photovoltaïques .....	23

2.2.5.1	Cellule en silicium monocristallin.....	23
2.2.5.2	Cellules en silicium polycristallin .....	24
2.2.5.3	Cellule à couche mince.....	24
2.2.5.4	Cellule multi-jonctions .....	24
2.2.5.5	Cellule bifaciale .....	25
2.2.6	Comportement électrique de la cellule photovoltaïque.....	27
2.2.6.1	La caractéristique courant-tension .....	27
2.2.6.2	Connexions en série et en parallèle des modules PV .....	28
2.2.6.3	Efficacité énergétique.....	30
2.2.6.4	Sélection du type de module.....	31
2.2.7	Types de systèmes photovoltaïques .....	31
2.2.7.1	Centrales sol en réseau (fermes) .....	32
2.2.7.2	Systèmes autonomes (hors réseau) ou systèmes isolés .....	32
2.2.7.3	Systèmes hybrides.....	33
2.4	Onduleurs .....	35
2.5	Avantages des systèmes photovoltaïques .....	36
2.6	Inconvénients des systèmes photovoltaïques.....	36
2.7	Conclusion.....	37
3.	Introduction .....	39
3.1.	Croissance de l'énergie.....	39
3.2	Centrales photovoltaïques raccordées au réseau en Algérie.....	40
3.3	Présentation du Logiciel PVSYST.....	41
3.4	But de l'étude .....	41
3.5	Options du logiciel PVSYST.....	41
3.6	Définition de l' EPC.....	42
3.6.1	Le prédimensionnement .....	42
3.6.2	Planification du projet.....	43
3.6.3	Les bases de données et outils.....	44
3.7	Introduction du Projet .....	44
3.7.1	Emplacement et coordonnées du site .....	45
3.7.2	Informations météorologiques.....	45
3.7.3	L'inclinaison des panneaux .....	46
3.7.4	La ligne d'horizon .....	47

3.8 Simulation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau.....	48
3.8.1 La dimension et la taille du système.....	48
3.8.2 Les particularités des Modules PV.....	49
3.8.3 Les particularités de l'onduleur.....	52
3.8.4 Connecteur de système.....	52
3.8.5 Ombrage proche.....	52
3.9 Conclusion.....	53
4.1 Introduction.....	55
4.2 Répartition de la puissance produite par le champ photovoltaïque.....	55
4.3 La puissance électrique produite par les systèmes photovoltaïque.....	56
4.4 La puissance électrique disponible à la sortie du système photovoltaïque.....	56
4.5 Quantité d'énergie électrique fournie au réseau électrique par le système photovoltaïque.....	57
4.6 Graphique d'entrée et sortie journalière.....	58
4.7 Graphique des pertes annuelles.....	59
4.8 Évaluation des productions standardisées.....	60
4.9 Indicateur de performance.....	61
4.10 Bilans énergétiques.....	62
4.11 Énergie totale injectée dans le réseau au fil du temps.....	63
4.12 Évaluation financière.....	64
4.13 Émissions de gaz à effet de serre évitées.....	65
4.14 résumé des deux systemes.....	66
4.2 Conclusion.....	67
Conclusion générale.....	68
References bibliographiques.....	69

## Nomenclature

PV : Photovoltaïque

WECS : systèmes de conversion de l'énergie éolienne

E:Énergie

L:Longueur (m)

DC : Courant continue

AC: Courant alternatif

kWh : Kilowatt-heure

kWc : Kilowatt-crête

E : Eclairement solaire en ( $1 \text{ kW} / \text{m}^2$ )

MPPT : Suivi du Point de Puissance Maximale (Maximum Power Point Tracking)

$I_{cc}$  : Intensité de court –circuit. (A)

$I_{mp}$ : Le courant maximal sous conditions standards (A).

$V_{op}$  : Tension optimal du générateur photovoltaïque (V)

$V_{co}$ : Tension de circuit ouvert. (v)

1 MWh (méga watt heure) = 1 000kWh,

$P_{max}$ : Puissance maximale aux bornes de la cellule PV. (W)

$V_{mp}$  : Tension au point de puissance maximale

$\mu$  :Rendement énergétique.

$I_{mp}$ : Courant au point de puissance maximale

FF : Facteur de forme

$T_c$ : Température de cellule( $^{\circ}\text{C}$ )



NOCT : Conditions de température normale de fonctionnement (Nominal Operating Cell Temperature)

STC : Conditions standards de test

PTC : Conditions de test de performance

BOS : Balance of System (Équilibre du système)

ROI : Retour sur Investissement

CO2 : Dioxyde de carbone

GES : Gaz à effet de serre

PVsyst : Logiciel de conception et d'analyse de systèmes photovoltaïques

RP : Ratio de Performance

BOS : Balance of System (Équipements complémentaires au générateur photovoltaïque)

DNI : Irradiance directe normale

DHI : Irradiance horizontale diffuse (Diffuse Horizontal Irradiance)

GHI : Irradiance globale horizontale

TMY : Année météorologique typique

CAPEX : Dépenses en capital

PVGIS : Système d'information géographique photovoltaïque

DER : Ressources énergétiques distribuées

EPC : Ingénierie, Approvisionnement et Construction

## Liste des figures

### Chapitre 1 :

Figure 1.1 : sources d'energies renouvelables.....	5
Figure 1.2 : Applications de l'énergie solaire .....	6
Figure 1.3 : Fonctionnement d'une éolienne.....	7
Figure 1.4 :énergie géothermique .....	9
Figure 1.5 :Centrale hydroélectrique .....	10
Figure 1.6 : différents types de bioenergie .....	11
Figure 1.7 : Différents types de biomasse.....	13
Figure 1.8 : Energie des vagues.....	14
Figure 1.9 : projets de sonatrach dans les ENR.....	16
Figure 1.10 :organigramme de sonatrach.....	17

### Chapitre 2 :

Figure 2.1 :Les types de rayonnements.....	22
Figure 2.2 : Variations de l'ensoleillement dans le monde.....	23
figure 2.3 : Géométrie d'installation des panneaux solaires .....	24
figure 2.4 : jonction pn d'une cellule PV .....	25
figure 2.5 : cellule bifaciale.....	25
figure 2.6 : comparaison entre les deux types de cellule.....	28
figure 2.7 :fonctionnement d'un panneau bifaciale.....	28
Figure 2.8 :Câblage des cellules dans un module.....	29
figure 2.9 : caractéristique courant-tension d'une cellule PV .....	30
figure 2.10 : branchement en serie et parallele des panneaux PV .....	31

Figure 2.11 :Exemple de système photovoltaïque connecté au réseau.....	34
Figure 2.12 :Exemple de système photovoltaïque autonome avec stockage.....	35
figure 2.13 :diodes bypass.....	36
Figure 2.14 : Différentes configurations d'onduleurs : onduleurs centralisés, de chaîne et de modules .....	37
Chapitre 3 :	
Figure 3.1 : evolution des parts de consommation énergétique (europe).....	42
Figure 3.3 : Emplacement et coordonnées du site .....	47
Figure 3.3 : informations meterologiques .....	48
Figure 3.4 : inclinaison des panneaux.....	49
Figure 3.5 : La ligne d'horizon.....	50
Figure 3.6 : panneau TSM-DEG15H-20-(II)-385 et ses caractéristiques électriques .....	52
Figure 3.7 : panneau 78M-7RL4-V-560-580M et ses caractéristiques électriques.....	53
Figure 3.8 : l'ondeur et ses détails techniques .....	54
Chapitre 4 :	
Figure 4.1 : Répartition de la puissance produite par le champ de panneaux solaires.....	56
Figure 4.4 : Puissance totale produite par le système .....	57
Figure 4.3 : Puissance électrique injectée dans le réseau... ..	58
Figure 4.4 : Graphique d'entrée et sortie journalière.....	59
Figure 4.5 : Diagramme des pertes sur une année complète .....	60
Figure 4.6 : Évaluation de la production d'énergie normalisée .....	61
Figure 4.7 : indice de performance .....	62
Figure 4.8 : Émissions de gaz à effet de serre évitées .....	66

Figure 4.9 : résumé de la centrale PV (panneaux bifaces) ..... 67

Figure 4.10 : résumé de la centrale PV (panneaux monofaciales)..... 67

## **Liste des tableaux**

Tableau 1.1 : les capacités cumulées du programme d'énergie renouvelable

Tableau 3.1 : description et informations générales

Tableau 4.1 : Puissance générée à la sortie de l'onduleur

Tableau 4.2 : bilan énergétique

Tableau 4.3 : Quantité d'énergie maximale injectée dans le réseau par heure

Tableau 4.3 : coût d'investissement

## **Introduction Générale**

## **Introduction générale**

Au cours des dernières décennies, la nécessité de passer aux énergies renouvelables est devenue une priorité mondiale en réponse aux défis du changement climatique et de la rareté des ressources énergétiques fossiles. Dans ce contexte, les centrales à énergie renouvelable jouent un rôle essentiel en fournissant des sources d'énergie alternatives propres et durables pour répondre à la demande croissante d'électricité. Ces centrales utilisent des ressources naturelles telles que le solaire, le vent, l'eau et la biomasse pour produire de l'électricité tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

L'une des avancées majeures dans le domaine des énergies renouvelables a été l'intégration des centrales de production d'énergie renouvelable dans les réseaux existants. Cette intégration étroite entre les centrales d'énergie renouvelable et le réseau électrique est une étape cruciale vers une transition énergétique durable.

Le but de ce travail consiste à étudier et simuler une centrale à énergie renouvelable raccordée au réseau située à Ouargla, en détaillant les technologies ainsi que le logiciel utilisé.

La rédaction de ce mémoire se compose de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous allons voir une analyse et une comparaison détaillées des différents avantages de l'utilisation des sources d'énergie renouvelables pour la production d'électricité. Il contient aussi l'implication et l'intérêt de sonatrach dans la transition énergétique et surtout dans le domaine du solaire.

Dans le second chapitre on va présenter les principaux paramètres à prendre en compte lors de la conception d'une centrale PV raccordée au réseau et montrer la comparaison entre les cellules mono faciales et celles bifaciales.

Dans le troisième chapitre, nous allons commencer avec un aperçu sur le domaine énergétique algérien, les projets réalisés, la croissance énergétique et l'importance de le potentiel solaire algérienne, en particulier l'énergie solaire photovoltaïque. En suite on fera une évaluation qualitative du logiciel PVSYST, qui permet la simulation et le dimensionnement d'une centrale photovoltaïque connecté au réseau, avec deux types de panneaux PV.

Dans le quatrième et dernier chapitre, Suite à notre simulation de la centrale PV raccordée au réseau électrique, on a présenté les résultats de la simulation pour les deux types de panneaux utilisés, tel que tous les graphes et les tableaux qui décrivent la centrale. Afin d'avoir l'évaluation économique, énergétique et environnementale.



# **Chapitre 1**

Les sources d'énergie renouvelable

## 1. Introduction

Les énergies renouvelables sont devenues un sujet de plus en plus important dans le monde d'aujourd'hui. Avec la croissance de la population mondiale et l'augmentation de la demande en énergie, il est devenu crucial de trouver des sources d'énergie alternatives et durables pour remplacer les combustibles fossiles qui sont non renouvelables et qui ont un impact négatif sur l'environnement. Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie qui sont renouvelées naturellement et qui ne s'épuisent pas avec le temps. Elles comprennent l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la géothermie, l'énergie marine et la biomasse. L'objectif de ce chapitre est d'analyser les différentes sources d'énergie renouvelable.

### 1.1 Sources d'énergie renouvelables

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie qui se renouvellent naturellement et sont considérées comme inépuisables à l'échelle humaine. Elles sont produites à partir de sources telles que les rayons du soleil, le vent, l'eau, la biomasse et la chaleur de la terre. Les énergies renouvelables sont une alternative aux énergies fossiles, qui sont limitées et non renouvelables à l'échelle du temps humain. Les avantages des énergies renouvelables sont nombreux, notamment la production d'énergie propre et renouvelable, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la réduction des coûts d'énergie à long terme. Les énergies renouvelables sont également une source d'emploi et de nouveaux métiers. Cependant, leur utilisation peut présenter des limites, notamment en termes de coûts, de disponibilité et de capacité de stockage. Malgré cela, les énergies renouvelables sont en constante évolution et leur part dans la consommation mondiale finale d'énergie est en augmentation constante. En 2018, elle était estimée à 17,9 %, dont 6,9 % de biomasse traditionnelle et 11,0 % d'énergies renouvelables modernes. [43]



Figure 5.1 sources d'énergies renouvelables

### 1.1.1 Énergie solaire

La génération d'électricité à partir de l'énergie solaire n'est plus une simple aspiration depuis un certain temps. Des systèmes de panneaux solaires installés sur des toits, d'une capacité de quelques kilowatts, jusqu'aux centrales solaires de plusieurs mégawatts, toutes ces infrastructures contribuent de manière significative à l'approvisionnement énergétique tout en respectant les préoccupations environnementales. Leur flexibilité ouvre la voie à des opportunités considérables dans le domaine de l'énergie.

Parallèlement, les centrales héliothermiques offrent la possibilité d'exploiter l'énergie solaire à une échelle industrielle pour la production d'électricité, en convertissant le rayonnement solaire en chaleur utilisable. Cette approche diversifiée exploite l'abondance, la gratuité et la nature non polluante de l'énergie solaire. Bien que l'énergie solaire reçue sur Terre varie en intensité et en durée, et puisse être relativement diffuse, son exploitation offre un éventail considérable de perspectives.



**Figure 1.2 Applications de l'énergie solaire**

Parmi les multiples applications de cette technologie, deux se démarquent : le solaire thermique, qui transforme le rayonnement solaire en chaleur, et le solaire photovoltaïque, qui convertit la lumière solaire en électricité. [2]

### 1.1.2 Énergie éolienne

L'exploitation de l'énergie éolienne à des fins de production électrique trouve ses racines au 19ème siècle. Cependant, durant cette période, le coût modéré des combustibles fossiles reléguait l'énergie éolienne à une position économique peu attrayante. Cette situation a

perduré, et ce n'est qu'à partir de 1973, en raison de la crise pétrolière, que l'intérêt pour la recherche et le développement des systèmes modernes de conversion de l'énergie éolienne (WECS) a été ravivé.

Les premières recherches étaient orientées vers la conception de turbines éoliennes contemporaines à haute puissance, pour lesquelles nécessitaient des générateurs électriques de proportions considérables. Cependant, les défis techniques rencontrés à cette époque et les coûts élevés de fabrication entraînaient la réalisation de telles turbines de grande envergure. C'est dans ce contexte que la recherche s'est réorientée vers la conception de générateurs électriques de capacités significatives, en mettant de côté les obstacles inhérents à la fabrication de turbines de dimensions gigantesques. [35]

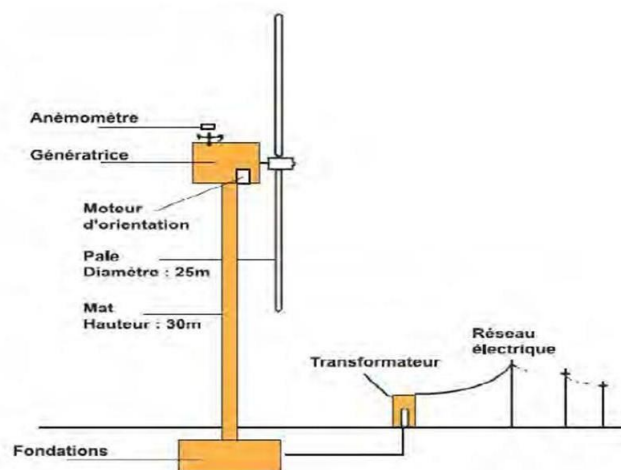


Figure 1.3 : Fonctionnement d'une éolienne.

### 1.1.2.1 Éoliennes modernes

L'énergie éolienne, en tant que composante majeure des centrales d'énergie renouvelable connectées au réseau, suscite un intérêt considérable en raison de son potentiel à générer une électricité propre et abondante à partir de la force du vent, l'énergie éolienne est une source d'énergie prometteuse, caractérisée par son faible impact environnemental par rapport aux sources d'énergie traditionnelles. L'énergie éolienne contribue de manière significative à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la diversification du mix énergétique. Toutefois, il met également en évidence des aspects tels que la variabilité de la production en fonction de la vitesse du vent et la nécessité de solutions de stockage pour assurer une alimentation stable au réseau électrique.

Cependant, malgré ses avantages, l'énergie éolienne présente également des inconvénients à prendre en considération. L'une des principales limitations est la dépendance à des conditions météorologiques favorables pour une production optimale d'électricité. Les vents instables ou faibles peuvent entraîner des fluctuations de la production énergétique, ce qui nécessite des mécanismes de stockage coûteux pour garantir la disponibilité continue d'électricité. De plus, l'implantation d'éoliennes peut soulever des préoccupations environnementales, notamment en ce qui concerne leur impact sur les oiseaux migrateurs et les chauves-souris. [3]

### **1.1.3 L'énergie géothermique**

L'énergie géothermique, une ressource thermique provenant de l'intérieur de la Terre, offre une voie intrigante vers une production d'électricité durable. La production d'électricité géothermique implique l'utilisation de la chaleur terrestre pour faire bouillir l'eau et produire de la vapeur, qui alimente ensuite des turbines pour générer de l'électricité. Cette méthode offre un avantage distinct : sa capacité à fournir une source d'énergie constante et fiable, indépendamment des conditions météorologiques extérieures. Pour approfondir la compréhension de la production d'électricité géothermique.

Cependant, malgré ses avantages, l'énergie géothermique n'est pas sans inconvénients. L'une des préoccupations majeures concerne les impacts environnementaux potentiels. L'extraction de la chaleur géothermique peut épuiser les réserves d'eau souterraine plus rapidement que leur régénération naturelle, entraînant ainsi une diminution des ressources en eau locales. De plus, des émissions de gaz à effet de serre, notamment du dioxyde de carbone et du sulfure d'hydrogène, peuvent être libérées lors de la production d'électricité géothermique. Ces émissions, bien que généralement moins élevées que celles des combustibles fossiles, nécessitent une gestion soignée pour minimiser leur impact sur l'environnement.

En somme, l'énergie géothermique offre une perspective prometteuse pour la production d'électricité propre et constante, mais elle doit être abordée avec un regard attentif sur ses implications environnementales. [4]

#### **1.1.3.1 Production d'électricité géothermique**

La production d'électricité géothermique est une source d'énergie renouvelable qui utilise la chaleur du sous-sol pour générer de l'électricité. Elle se divise en deux catégories en fonction de la température de la vapeur : la "moyenne énergie" et la "haute énergie". Cette méthode de production d'électricité est utilisée dans 27 pays, tandis que le chauffage géothermique est

utilisé dans 70 pays. Les capacités mondiales de production d'électricité géothermique installées étaient de 15,9 gigawatts en 2020. L'électricité géothermique est considérée comme durable, car l'extraction de chaleur est faible par rapport à l'enthalpie de la planète, et les émissions des centrales géothermiques existantes sont en moyenne de 122 kg de CO<sub>2</sub> par MWh, soit environ un huitième de celles d'une centrale à charbon conventionnelle. [5]



Figure 1.4 énergie géothermique

### 1.1.4 L'hydroélectricité

Les centrales hydroélectriques, en utilisant la force des cours d'eau, constituent depuis longtemps une source majeure et fiable d'énergie renouvelable. La production d'électricité hydroélectrique implique la conversion de l'énergie cinétique de l'eau en énergie mécanique, puis en énergie électrique par le biais de turbines et de générateurs. L'avantage essentiel de cette technologie réside dans sa capacité à fournir une énergie propre et renouvelable, sans émissions de gaz à effet de serre ni déchets toxiques. De plus, la production d'électricité hydroélectrique peut être rapidement réduite en fonction de la demande, contribuant ainsi à la stabilité du réseau électrique.

Cependant, l'hydroélectricité n'est pas sans conséquences sur l'environnement. Les impacts environnementaux comprennent la modification des habitats aquatiques, la perturbation des écosystèmes fluviaux et la possible altération des régimes de débit d'eau en aval. Les barrages peuvent également entraîner la submersion de vastes zones de terres, provoquant la déforestation et la dégradation des écosystèmes terrestres et aquatiques. [6]

#### 1.1.4.1 Centrales hydroélectriques

Les centrales hydroélectriques sont des installations qui produisent de l'électricité en utilisant la force motrice de l'eau. Il existe trois formes principales de production d'énergie hydroélectrique :

- Les centrales dites gravitaires, qui tirent leur nom du fait que les apports d'eau dans leur réservoir ou leur prise d'eau proviennent essentiellement de cours d'eau par gravitation. Cela inclut les centrales au fil de l'eau et les centrales hydroélectriques de lac.
- Les centrales éclusées, qui utilisent des écluses pour réguler le débit de l'eau et maintenir une production constante d'électricité.
- Les centrales de pompage-turbinage, qui stockent l'eau dans un réservoir supérieur et la libèrent pour produire de l'électricité lorsque la demande est élevée.



**Figure 1.5 Centrale hydroélectrique**

La production d'une centrale hydroélectrique dépend des apports des cours d'eau qui l'alimentent, ce qui peut fluctuer selon les saisons et d'une année à l'autre en fonction des prélèvements. Cependant, l'hydroélectricité est une source d'énergie renouvelable, car elle utilise la force motrice de l'eau, qui est constamment renouvelée par le cycle de l'eau. [7]

#### **1.1.4.2 Hauteur de chute et débit**

La hauteur de chute et le débit sont deux éléments essentiels dans la production d'électricité à partir de l'énergie hydraulique. Une centrale hydraulique est composée d'un barrage qui retient l'eau, d'une centrale qui produit l'électricité et de lignes électriques qui évacuent et distribuent l'énergie. La puissance de la centrale dépend de la hauteur de la goulotte et du débit de l'eau. Plus ces deux paramètres sont importants, plus la puissance de la centrale sera élevée. La hauteur de chute est la différence de niveau entre le réservoir d'eau en amont du barrage et la

turbine de la centrale. Le débit, quant à lui, correspond à la quantité d'eau qui passe par la turbine en une seconde. [7]

### 1.1.5 Bioénergie

La bioénergie est une forme d'énergie renouvelable produite à partir de matière organique, également appelée biomasse. Elle présente plusieurs avantages par rapport aux énergies fossiles, notamment en termes d'impact environnemental et de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). En effet, le cycle de production des bioénergies génère moins de GES que celui des énergies fossiles, qui sont responsables de l'extraction, du transport et du raffinage. De plus, les bioénergies peuvent être considérées comme non émettrices de GES lors de leur utilisation, si elles sont issues de matières organiques renouvelables et exploitées selon des règles de développement durable. [8]



Figure 1.6 : différents types de bioénergie.

#### 1.1.5.1 Biomasse

La biomasse, une ressource organique d'origine végétale et animale, présente un potentiel considérable pour la production de carburants tels que le biodiesel et le bioéthanol. Le biodiesel est obtenu à partir de matières grasses végétales ou animales, tandis que le bioéthanol est produit par la fermentation de sucres contenus dans les plantes. Ces biocarburants offrent l'avantage de réduire les émissions de gaz à effet de serre par rapport aux combustibles fossiles, contribuant ainsi à l'atténuation du changement climatique. Ils peuvent également aider à réduire la dépendance aux ressources pétrolières non



renouvelables. Toutefois, la production de biocarburants à partir de la biomasse n'est pas sans inconvénients. L'utilisation croissante de terres agricoles pour la culture de plantes dédiées à la production de biocarburants peut entraîner la compétition avec les cultures alimentaires, ce qui peut avoir des implications sur la sécurité alimentaire mondiale. De plus, la monoculture à grande échelle pour la biomasse peut épuiser les sols et nécessiter l'utilisation intensive d'engrais et de pesticides, entraînant des impacts environnementaux négatifs. En somme, la biomasse en tant que source de biocarburants offre des avantages environnementaux considérables, mais elle nécessite une gestion soignée pour minimiser ses impacts négatifs sur la sécurité alimentaire et les écosystèmes. [9]

### 1.1.5.2 Types de biomasse

La biomasse définit l'ensemble des matières organiques pouvant se transformer en énergie. Elle est considérée comme une source d'énergie renouvelable si sa régénération est au moins égale à sa consommation. La biomasse est une réserve d'énergie considérable née de l'action du soleil grâce à la photosynthèse, existante sous forme de carbone organique. Elle peut être séparée en deux catégories principales : traditionnelle et moderne.

- Biomasse traditionnelle : combustion de bois énergie, d'excréments d'animaux et de charbon de bois.
- Biomasse moderne : production de pellets, de biocarburants et de biogaz.
- Déjections animales : fumier, lisier.
- Résidus et production de cultures végétales : cultures à croissance rapide, résidus des activités de récolte et de transformation forestière.



Figure 1.7 Différents types de biomasse

La biomasse couvre près de 10% des besoins mondiaux en énergie, et deux niveaux de la consommation mondiale d'énergie issue de la biomasse sont utilisés pour le chauffage. Cependant, l'utilisation de la biomasse peut engendrer des déséquilibres environnementaux, tels que la déforestation, la réduction de la biodiversité et la production de polluants. Son efficacité énergétique est également limitée en raison de la faible efficacité de la photosynthèse. [10]

### 1.1.6 Énergie marine

L'énergie marine, puisée des océans et des mers, émerge comme étant une source d'énergie propre et continue dans le domaine des énergies renouvelables. Elle comprend diverses technologies telles que l'énergie des vagues, l'énergie marémotrice et l'énergie thermique des mers, qui exploitent les mouvements des vagues, les marées et les différences de température pour produire de l'électricité. L'avantage majeur de l'énergie marine réside dans sa capacité à fournir une source d'énergie constante et prévisible, contrairement à certaines autres énergies renouvelables intermittentes. Elle est également peu intrusive en termes de ressources terrestres, offrant ainsi une alternative viable aux installations terrestres.

Cependant, l'énergie marine n'est pas sans défis environnementaux. Les infrastructures nécessaires à la collecte de cette énergie, telles que les convertisseurs de vagues et les turbines marémotrices, peuvent avoir des impacts sur les écosystèmes marins, affectant la faune marine et les habitats. De plus, les changements induits par ces installations dans les flux d'eau et les marées peuvent éventuellement perturber les écosystèmes côtiers et la circulation des sédiments. [11]



Figure 1.8 Energie des vagues

## 1.2 Énergies alternatives en Algérie

L'Algérie, qui dépend à 99% des hydrocarbures pour satisfaire ses besoins énergétiques, a amorcé une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique. Cette vision du gouvernement algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire photovoltaïque et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Le programme des énergies renouvelables consiste actuellement à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique. Les énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire, éolienne et hydraulique, sont considérées comme des alternatives aux énergies fossiles. L'Algérie a un potentiel important en matière d'énergie solaire, avec une irradiation solaire moyenne de 2 000 kWh/m<sup>2</sup>/an , d'un niveau d'ensoleillement de 3 000 heures par année , ce potentiel est réparti sur l'ensemble du territoire national. L'objectif de l'Algérie est d'atteindre 15 000 MW d'énergie solaire d'ici à 2035. Cette transition énergétique permettra de réduire la dépendance aux hydrocarbures et de contribuer à la lutte contre le changement climatique. [12] [13]

	1 <sup>ère</sup> phase 2015-2020	2 <sup>ème</sup> phase 2021- 2030	TOTAL
<b>Photovoltaïque</b>	3000	10575	13575
<b>Eolien</b>	1010	4000	5010
<b>CSP</b>	-	2000	2000
<b>Cogénération</b>	150	250	400
<b>Biomasse</b>	360	640	1000
<b>Géothermie</b>	05	10	15
<b>TOTAL</b>	4525	17475	22000

**Tableau 1.1 les capacités cumulées du programme d'énergie renouvelable national Algérien**

### 1.3 Présentation de SONATRACH

SONATRACH, entreprise algérienne spécialisée dans l'exploration, la production, le transport et la commercialisation des hydrocarbures, a récemment adopté une stratégie de développement des énergies renouvelables. Cette stratégie vise à diversifier les sources d'énergie de l'entreprise et à réduire sa dépendance aux hydrocarbures. Pour cela, SONATRACH a signé une convention-cadre avec le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique en 2021 pour accompagner cette stratégie. L'entreprise prévoit d'investir dans les énergies renouvelables pour se positionner sur le marché électrique, qui remplacera progressivement la part relative au marché actuel des hydrocarbures. En outre, SONATRACH participe à des ateliers et des formations sur les énergies renouvelables en collaboration avec des universités et des centres de développement des énergies renouvelables. Cette stratégie s'inscrit dans une démarche de transition énergétique et de développement durable, en accord avec les objectifs de l'Algérie en matière d'énergie renouvelable. [14]



**Figure 1.9 projets de sonatrach dans les ENR**

-Centrale CSP de Hassi R'mel (a gauche) et la centrale de BRN (a droite)

### 1.3.1 Organigramme de SONATRACH

La structure de l'entreprise est divisée en plusieurs directions, chacune ayant des responsabilités spécifiques, la Direction des Ressources Nouvelles (DCREN) est chargée de la mise en œuvre de la stratégie de SONATRACH en matière d'énergies renouvelables. Cette direction est en charge de la recherche, de l'exploration et de la production d'énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire et éolienne. La DCERN est également responsable de la mise en place de projets de production d'énergie renouvelable en Algérie, en collaboration avec d'autres entreprises du secteur.

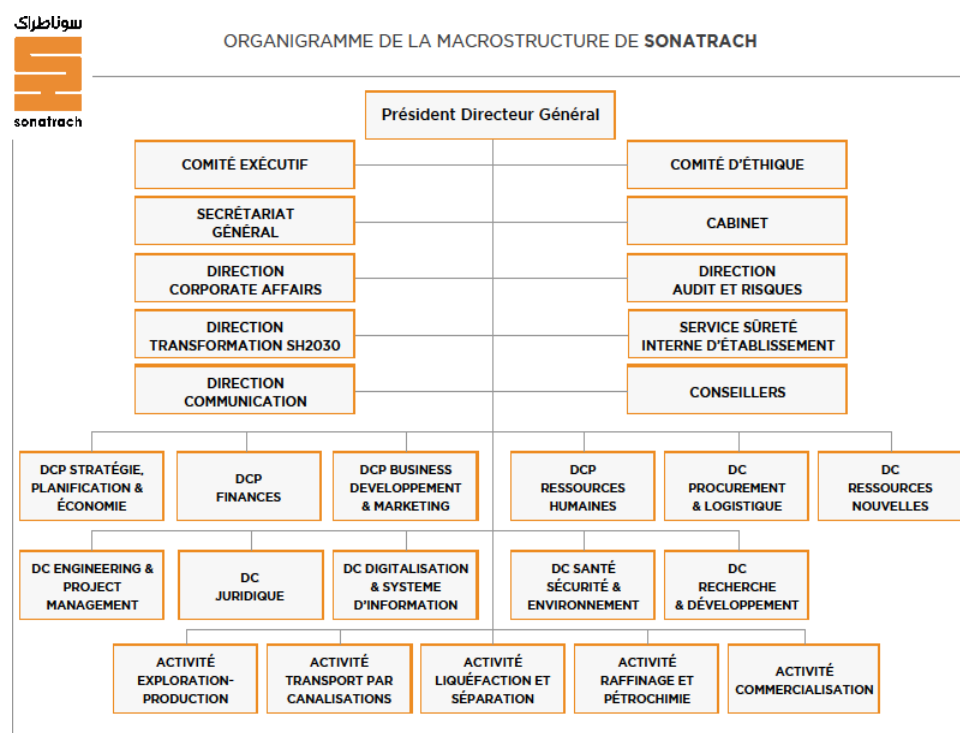


Figure1.10 organigramme de sonatrach

### **1.3.2. Stratégie des Energie renouvelables de SONATRACH**

SONATRACH et Eni sont deux entreprises pétrolières et gazières qui ont récemment signé un accord stratégique pour le développement des énergies renouvelables en Algérie. Cet accord porte sur la réalisation d'une seconde centrale solaire photovoltaïque sur le site de Bir Rebaa Nord d'une capacité de 10 MW. Les deux parties se sont engagés à atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 et ce partenariat avec SONATRACH est en ligne avec cet objectif. Les deux entreprises ont également organisé un atelier technique pour un plan d'action pour la neutralité carbone. En outre, SONATRACH et Eni ont inauguré un laboratoire spécialisé dans l'énergie solaire, le Solar Lab, et ont posé la première pierre d'une centrale photovoltaïque. Cette stratégie de développement des énergies renouvelables est en ligne avec la transition énergétique de l'Algérie et permet au pays de diversifier ses sources d'énergie. [15]

### **1.4. Conclusion**

Le potentiel des sources d'énergie renouvelables est énorme, car elles peuvent en principe répondre à plusieurs fois la demande énergétique mondiale. Les sources d'énergie renouvelables telles que la biomasse, le vent, le soleil, l'hydroélectricité et la géothermie peuvent fournir des services énergétiques durables, basés sur l'utilisation de ressources indigènes disponibles en permanence. Les sources d'énergie renouvelables fournissent actuellement entre 15 et 20 % de la demande mondiale totale d'énergie. L'offre est dominée par la biomasse traditionnelle, principalement le bois de chauffage utilisé pour la cuisine et le chauffage, en particulier dans les pays en développement d'Afrique, d'Amérique latine et d'Asie. Nous avons vu dans ce chapitre une analyse et une comparaison détaillées des différentes utilisations, des avantages et des de l'utilisation de différentes sources d'énergie renouvelables pour la production d'électricité. on a vu aussi l'implication et l'intérêt de sonatrach dans la transition énergétique et surtout dans le domaine du solaire.

## **Chapitre 2**

### Énergie et technologie photovoltaïque

## 2. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est une source d'énergie renouvelable qui présente de nombreux avantages pour le développement durable et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. En Algérie, les conditions géographiques, climatiques et météorologiques sont favorables à l'utilisation de l'énergie solaire, avec plus de 2500 heures d'ensoleillement en moyenne par an sur une grande partie de son territoire. Cependant, malgré ce potentiel, le marché de l'énergie solaire en Algérie est encore presque vierge.

L'énergie photovoltaïque est la meilleure façon de convertir l'énergie solaire en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques solaires sont des dispositifs semi-conducteurs similaires aux ordinateurs et aux puces mémoire, nécessitant des exigences strictes en matière de pureté et de contrôle de la qualité. Aujourd'hui, la production de cellules solaires a atteint une grande échelle, principalement située en Extrême-Orient, avec des coûts de production faibles. Les cellules photovoltaïques produites par les plus grands producteurs sont composées de silicium cristallin, et les modules solaires photovoltaïques sont très fiables, durables et silencieux.

L'énergie solaire photovoltaïque est la solution idéale pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, lutter contre le changement climatique et assurer un accès à l'énergie propre et abordable pour toutes les populations. En somme, l'énergie photovoltaïque présente de nombreux avantages pour l'Algérie, offrant un potentiel considérable pour le développement durable du pays.

Dans ce chapitre nous allons définir certaines grandeurs solaires ainsi que les différentes notions sur le système photovoltaïque et leurs caractéristiques principales.



## 2.1 Historique du photovoltaïque bifaciale

L'histoire des cellules photovoltaïques bifaciales remonte à plusieurs décennies. Les premières recherches sur les cellules bifaciales ont été menées dans les années 1960, mais la technologie n'était pas encore mature. Au fil des décennies, des progrès significatifs ont été réalisés, notamment dans les domaines de la conception des cellules, des matériaux et des processus de fabrication.

Dans les années 1970 et 1980, des chercheurs ont commencé à explorer les avantages potentiels des cellules bifaciales, notamment leur capacité à capturer la lumière solaire réfléchiée par le sol ou d'autres surfaces environnantes. Cependant, la technologie n'était pas encore largement utilisée en raison de ses coûts élevés et de sa complexité.

Au cours des deux dernières décennies, la technologie des cellules bifaciales a connu une croissance significative, en grande partie grâce aux avancées dans les matériaux et les processus de fabrication. Aujourd'hui, les cellules bifaciales sont de plus en plus utilisées dans une variété d'applications, notamment les centrales solaires commerciales et industrielles, les installations agricoles et les projets de recherche.

Les cellules bifaciales offrent plusieurs avantages par rapport aux cellules photovoltaïques traditionnelles, notamment une plus grande efficacité énergétique, une meilleure performance dans des conditions de faible luminosité et une plus grande flexibilité dans la conception des systèmes. En conséquence, la technologie des cellules bifaciales est de plus en plus considérée comme une solution attrayante pour l'avenir de l'énergie solaire.

## 2.2 Rayonnement solaire

Le Soleil est une étoile parmi tant d'autres dans l'univers. Avec un diamètre de 1 390 000 km, il est environ 50 fois plus grand que la Terre. Sa composition est principalement constituée d'hydrogène (80%), d'hélium (19%) et d'un mélange de 100 autres éléments chimiques (1%). Depuis la découverte de la théorie de la fusion nucléaire, il est admis que le Soleil est une bombe thermonucléaire qui transforme chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium. Cette réaction se produit dans son noyau, à une température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Le Soleil perd environ 4 millions de

tonnes de masse chaque seconde sous forme de rayonnement. Sa lumière met environ 8 minutes pour atteindre la Terre, se déplaçant à une vitesse de 300 000 km/s. Sa température de surface est d'environ 5 780°C.[29]

### 2.2.1 Les différents types de rayonnements

Lorsque le rayonnement solaire atteint l'atmosphère, il interagit avec les constituants gazeux et les particules en suspension, tels que les aérosols, les gouttelettes d'eau et les cristaux de glace. Ce rayonnement solaire se distingue en plusieurs types : réfléchi, diffusé ou absorbé.

- Le rayonnement solaire incident, également appelé direct, est reçu directement du soleil sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.
- Le rayonnement solaire diffus, également appelé indirect, est constitué de photons diffusés par l'atmosphère dans toutes les directions. Le phénomène de diffusion représente la portion du rayonnement solaire qui a touché au moins une particule de gaz atmosphérique en modifiant l'angle d'incidence et qui, cependant, atteint le sol car il est dirigé vers lui.
- Le rayonnement solaire réfléchi, également appelé albédo, est la partie du rayonnement réfléchi par la surface terrestre en raison de l'effet albédo. Il dépend de l'environnement du site et peut être réfléchi de manière diffuse et anisotrope. L'albédo se calcule comme suit :  $\text{albédo} = \text{énergie lumineuse réfléchie} / \text{énergie lumineuse incidente}$ . [17] [18]

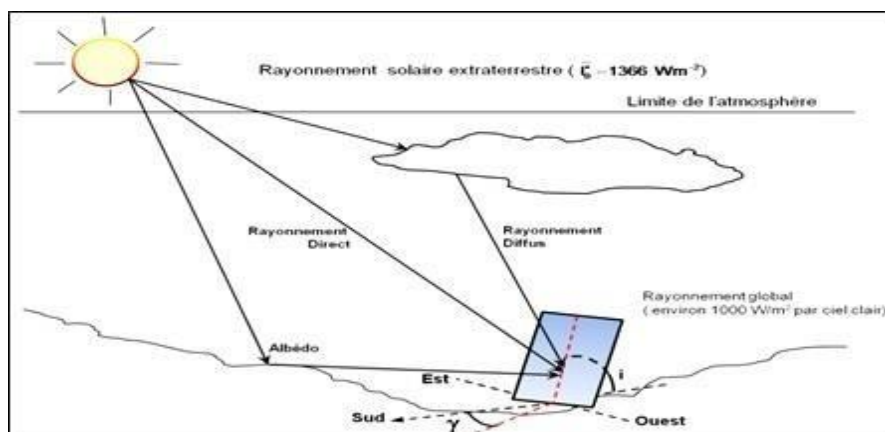


Figure 2.1 Les types de rayonnements

### 2.2.2 Variations de l'ensoleillement

Pour maximiser la production d'électricité photovoltaïque, il est nécessaire d'orienter les modules photovoltaïques de manière perpendiculaire aux rayons du soleil. Cependant, cela est généralement difficile à réaliser car la position du soleil varie constamment en fonction de l'heure de la journée et de la période de l'année. Par conséquent, il est important de comprendre la trajectoire apparente du soleil, qui dépend de l'altitude et de la longitude d'un point donné sur la surface de la Terre.[1]

- La longitude est une mesure angulaire qui permet de déterminer la position est-ouest d'un point donné par rapport au méridien de Greenwich. Elle est définie comme l'angle formé par deux plans méridiens passant par l'axe des pôles, l'un étant pris pour origine et l'autre déterminé au lieu considéré. La longitude est comprise entre  $-180^\circ$  à  $+180^\circ$
- La latitude est une mesure angulaire qui permet de déterminer la position nord-sud d'un point donné sur la surface de la Terre. Elle est définie comme l'angle entre l'équateur et le rayon de la Terre passant par le lieu considéré. La latitude est comptée de  $0^\circ$  à  $+90^\circ$  pour l'hémisphère nord et de  $0^\circ$  à  $-90^\circ$  pour l'hémisphère sud
- L'altitude est la hauteur d'un point par rapport à une surface de référence, généralement le niveau de la mer, et est exprimée en mètres
- L'azimut est l'angle dans le plan horizontal entre la direction d'un objet et une direction de référence, qui peut être le nord géographique ou magnétique. [1]

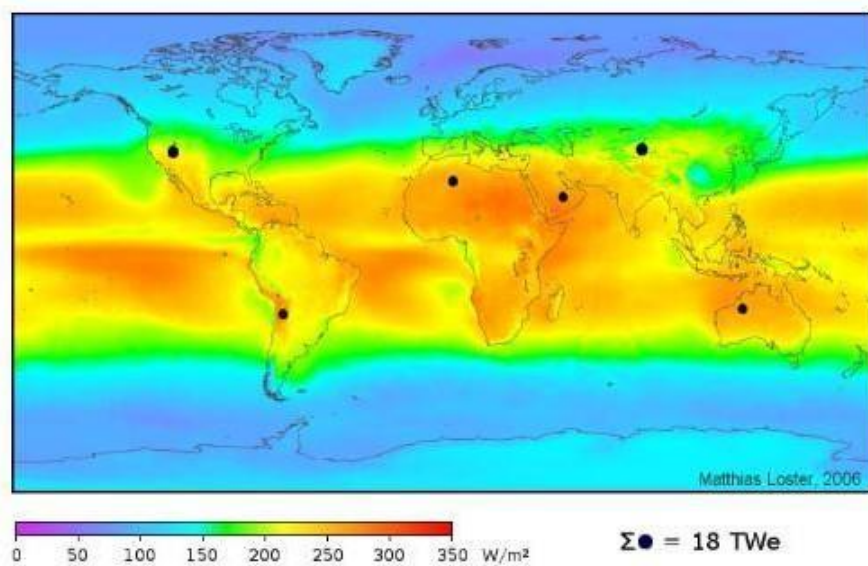


Figure 2.2 Variations de l'ensoleillement dans le monde[8]

### 2.2.3 Angle solaire d'altitude

Cet angle représente l'inclinaison entre la trajectoire du soleil et la surface horizontale. Il revêt une importance significative dans l'évaluation de l'occultation solaire.[38]

### 2.2.4 Géométrie d'installation des panneaux solaires

La géométrie d'installation des panneaux solaires dans une centrale photovoltaïque est un aspect crucial pour maximiser l'efficacité de la production d'énergie solaire. Différentes configurations peuvent être utilisées en fonction des contraintes de l'emplacement et des objectifs de production . [20]

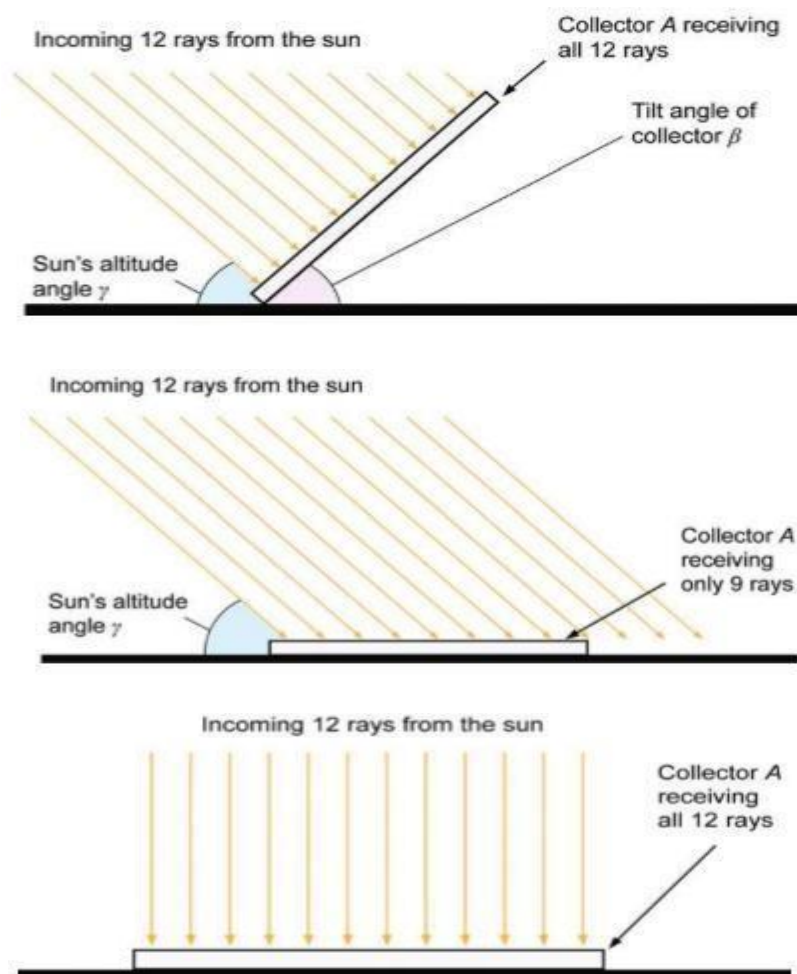


figure 2.3 Géométrie d'installation des panneaux solaires

### 2.2.4.1 Principe des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques sont des dispositifs qui convertissent l'énergie lumineuse en énergie électrique. Le principe de fonctionnement repose sur l'effet photoélectrique, qui permet aux cellules photovoltaïques de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques. Les cellules photovoltaïques sont constituées d'une jonction pn, qui est asymétriquement dopée, avec la base p au fond et l'émetteur n+ fortement dopé en haut. Lorsque la lumière pénètre dans la cellule, chaque photon absorbant, dont l'énergie est supérieure ou égale à son énergie de gap, génère une paire d'électrons-trou. Les particules sont séparées du champ de la zone de charge d'espace et déplacées vers les contacts, les trous traversant la base vers le contact arrière inférieur et les électrons traversant l'émetteur vers les contacts avant. Les électrons générés sont transportés vers le collecteur de courant Rail par de petites bandes métalliques. Si une charge est reliée aux deux pôles de la cellule solaire, cela peut générer une énergie électrique. [19]

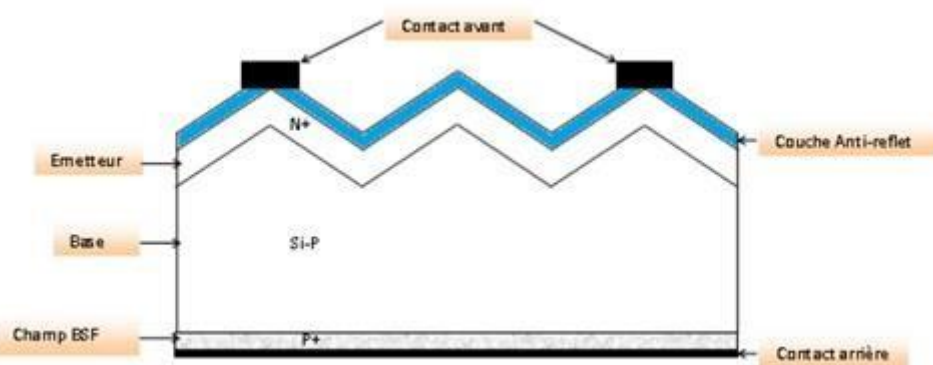


figure 2.4 jonction pn d'une cellule PV

### 2.2.5 Types de cellules photovoltaïques

Les types les plus utilisés dans l'industrie sont : Les cellules monocristallines, Les cellules multi cristalline (poly cristallines) , les cellules amorphes , les cellules à couche mince et les cellules multi-jonctions ainsi que les cellules bifaciales .

#### 2.2.5.1 Cellule en silicium monocristallin

Les cellules en silicium monocristallin sont utilisées dans la fabrication des panneaux solaires monocristallins. Ces cellules sont composées de cristaux de silicium purs et homogènes, tirés

du même bloc de silice. Le silicium est un élément très abondant sur terre et est un semi-conducteur très utilisé en électronique. Les cristaux de silicium sont cubiques, de couleur gris-noir, avec des reflets bleutés. Les cellules photovoltaïques monocristallines sont encapsulées dans un revêtement étanche qui protège de l'eau et de la vapeur d'eau. Les panneaux solaires monocristallins sont souvent recouverts d'une plaque en verre et reliés à un onduleur qui a pour fonction de transformer la tension de sortie en tension alternative. [21]

### **2.2.5.2 Cellules en silicium polycristallin**

Les cellules photovoltaïques en silicium polycristallin sont l'un des types de cellules solaires les plus couramment utilisées. Elles sont fabriquées en faisant fondre des morceaux de silicium pur dans un moule de section carrée, puis en les laissant refroidir pour cristalliser le silicium. Les cellules polycristallines sont moins chères à produire que les cellules monocristallines, car leur processus de fabrication est plus simple et nécessite moins d'énergie. Cependant, leur rendement est légèrement inférieur à celui des cellules monocristallines, car leur structure cristalline est moins homogène. Les cellules photovoltaïques en silicium polycristallin sont utilisées dans une grande variété d'applications, allant des équipements autonomes non reliés au réseau électrique aux installations résidentielles et industrielles. [21]

### **2.2.5.3 Cellule à couche mince**

Les cellules solaires à couche mince sont une technologie de pointe dans le domaine de l'énergie solaire. Elles sont utilisées commercialement dans plusieurs technologies, notamment le tellure de cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre, indium, gallium (CIGS) et les pérovskites. Les cellules solaires à couche mince ont un rendement élevé, pouvant atteindre jusqu'à 25%. Elles sont plus légères et plus flexibles que les panneaux solaires traditionnels, ce qui les rendent plus faciles à installer et à transporter. Les techniques de dépôt de couches minces sont utilisées pour produire ces cellules solaires, en utilisant des matériaux tels que le  $\text{Cu(In,Ga)S}_2$  (CIGS) et le  $\text{Zn(O,S)}$ . Les filières photovoltaïques en couches minces représentent 17% du marché et sont issues des technologies du revêtement de différents supports, tels que le verre [21]

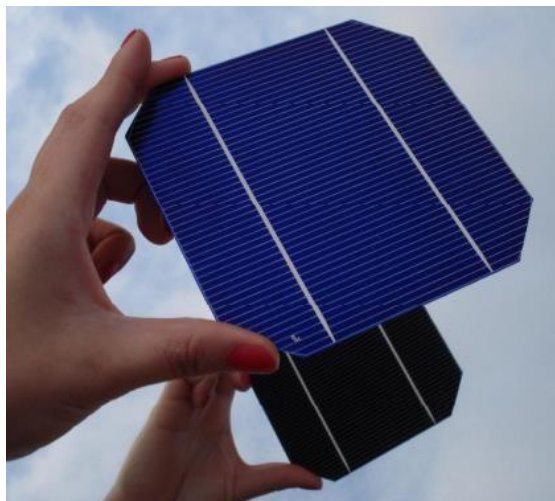
### **2.2.5.4 Cellule multi-jonctions**

Les cellules dites multijonction, ou généralement tandem, sont celles qui combinent deux types différents de matériaux semi-conducteurs. Cette superposition de jonctions p-n

augmente la sensibilité des différentes longueurs d'onde et améliore les performances, puisque chaque type de matériau n'utilise qu'une partie du spectre électromagnétique du rayonnement solaire. Les dispositifs à jonction multiple utilisent une cellule supérieure à large bande interdite qui absorbe les photons les plus énergétiques, tout en laissant les photons moins énergétiques se diriger vers le matériau suivant, dont la bande interdite est légèrement inférieure, pour y être absorbés. En combinant deux ou trois types de matériaux, il est possible de profiter d'une plus grande partie de la lumière du soleil. Avec ce type de cellules, des rendements de 35% ont été atteints. Selon certaines études, les unions de trois matériaux pourraient théoriquement atteindre des rendements de près de 50 %.[ 23]

### 2.2.5.5 Cellule bifaciale

La cellule photovoltaïque bifaciale est une technologie qui permet de capter la lumière solaire des deux côtés du module, ce qui augmente le rendement de conversion de l'énergie solaire en électricité. Les cellules bifaciales sont capables de capter la lumière réfléchie par le sol, ce qui les rend particulièrement efficaces dans les régions enneigées ou à forte réverbération. Selon une étude menée par l'Université de Californie à Berkeley, les cellules bifaciales peuvent avoir un rendement supérieur de 5% à 15% par rapport aux cellules monofaciales. Les cellules bifaciales sont disponibles en plusieurs technologies, notamment les cellules monocristallines, polycristallines et amorphes. Les cellules bifaciales sont également plus chères que les cellules monofaciales, mais leur coût diminue progressivement grâce à l'amélioration des techniques de production. [45]



**figure 2.5 cellule bifaciale**

Les cellules bifaciales sont utilisées pour monter les panneaux solaires bifaciaux , qui capte la lumière solaire des deux côtés du module. Les panneaux bifaciaux ont un rendement supérieur

à celui des panneaux monofaciaux en raison de leur capacité à capter la lumière réfléchie par le sol. Selon une étude menée par l'Université de technologie de Delft aux Pays-Bas, les panneaux bifaciaux peuvent être plus rentables que les panneaux monofaciaux dans certaines conditions, telles que les toits plats avec une surface réfléchissante.

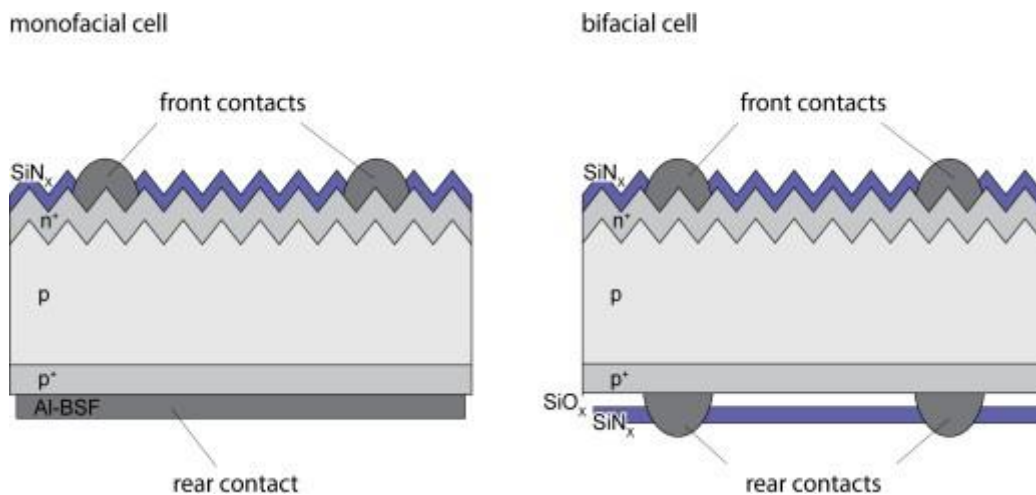


figure 2.6 comparaison entre les deux types de cellule

Les panneaux bifaciaux sont également plus chers que les panneaux monofaciaux en raison de leur conception plus complexe et de l'utilisation de matériaux transparents pour permettre la transmission de la lumière. Cependant, leur coût diminue progressivement grâce à l'amélioration des techniques de production. Les panneaux bifaciaux nécessitent une installation spécifique pour maximiser leur rendement, telle qu'une structure placée en hauteur, pivotante ou non, afin d'utiliser au maximum l'albédo. L'albédo mesure la proportion du rayonnement solaire réfléchi par le sol, ce qui permet aux panneaux bifaciaux de convertir ce rayonnement lorsqu'il est capté par leur face arrière. [46]

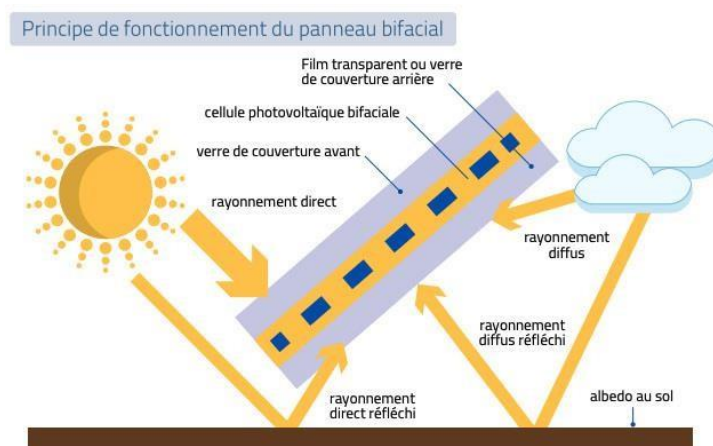


figure 2.7 fonctionnement d'un panneau bifaciale



### 2.2.6 Comportement électrique de la cellule photovoltaïque

Le comportement électrique d'une cellule photovoltaïque est basé sur l'effet photovoltaïque, qui est la transformation directe de l'énergie solaire en électricité. Lorsque les photons de la lumière solaire frappent la cellule, ils excitent les électrons dans les semi-conducteurs, créant ainsi un flux d'électrons. Les cellules photovoltaïques sont des composants électroniques qui produisent de l'électricité lorsqu'elles sont exposées à la lumière. La puissance électrique obtenue dépend de la quantité de lumière incidente et des caractéristiques de la cellule.

Les cellules photovoltaïques sont souvent regroupées dans des modules ou des panneaux solaires, en fonction de la puissance recherchée. Ces panneaux solaires peuvent être utilisés pour alimenter des appareils électroniques, des bâtiments ou même des réseaux électriques. Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est basé sur les propriétés des semi-conducteurs, qui permettent aux électrons de se déplacer lorsqu'ils sont excités par les photons. Les semi-conducteurs les plus utilisés dans les cellules photovoltaïques sont le silicium cristallin et le silicium amorphe.

Les cellules photovoltaïques sont caractérisées par une courbe courant-tension (IV) qui représente l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule sous un éclairage donné. Les conditions de test standardisées (STC) pour mesurer les performances des cellules photovoltaïques comprennent une émission lumineuse de 1 000 W/m<sup>2</sup>, une température de 25 °C et des conditions spectrales Air Mass 1.5.[24]

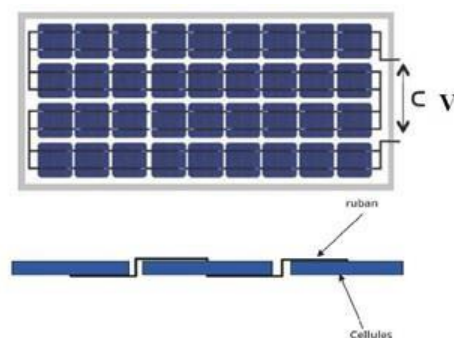


Figure 2.8 Câblage des cellules dans un module

#### 2.2.6.1 La caractéristique courant-tension

La caractéristique courant-tension (IV) d'une cellule photovoltaïque est représentée par une courbe qui permet de distinguer trois zones de fonctionnement.

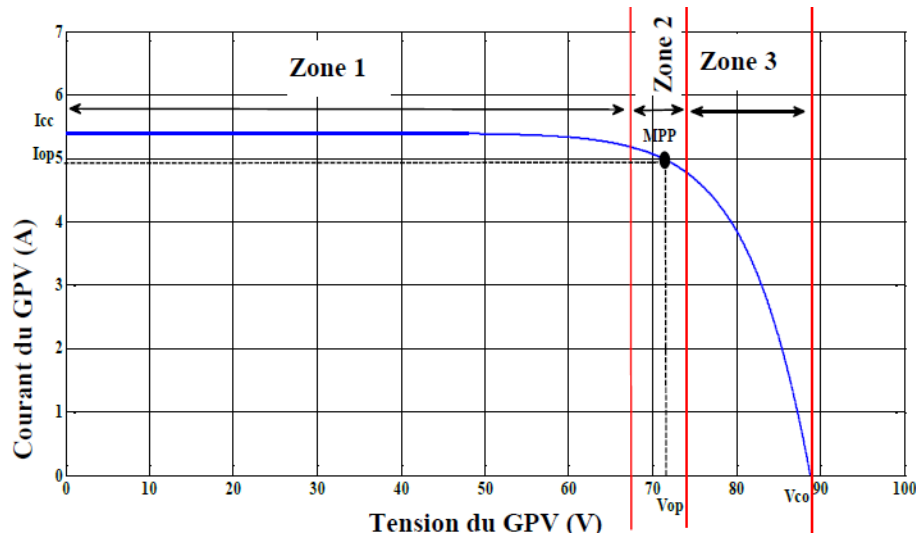


figure 2.9 caractéristique courant-tension d'une cellule PV

- La zone 1-2 est assimilable à un générateur de courant proportionnel à l'irradiation solaire, mais donne des puissances faibles, des courants élevés et des tensions faibles.
- La zone 2-3 correspond au coude de la courbe, où le fonctionnement du générateur donne des puissances élevées à des valeurs de courant et de tension modérées. Un point optimal de puissance (MPP) peut être identifié au point  $(I_{op}, V_{op})$ , permettant d'exploiter au mieux le gisement solaire.
- La zone 3-4 est assimilable à un générateur de tension, mais donne des puissances faibles, des courants faibles et des tensions élevées. Les caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques sont définies dans des conditions de test bien précises (STC = Standard Test Conditions), qui sont une émission lumineuse de  $1\,000\text{ W/m}^2$ , une température de  $25\text{ °C}$  et des conditions spectrales Air Mass 1.5[25]

### 2.2.6.2 Connexions en série et en parallèle des modules PV

Les modules photovoltaïques sont constitués de cellules élémentaires qui sont associées en série et/ou en parallèle pour augmenter la tension ou le selon les besoins. La connexion en série augmente la tension pour un même courant, tandis que la connexion en parallèle augmente le courant pour une tension identique. Pour que l'électricité générée soit utilisable pour nos applications électriques, il est donc nécessaire d'associer un grand nombre de cellules. Les modules sont généralement présentés sous forme de panneaux et sont constitués d'un certain nombre de cellules élémentaires placées en série afin de rendre la tension à la

sortie utilisable. Les cellules photovoltaïques peuvent être associées en série et en parallèle pour constituer un panneau solaire. Les panneaux solaires peuvent être branchés en série pour augmenter la tension et en parallèle pour augmenter le courant. [26]

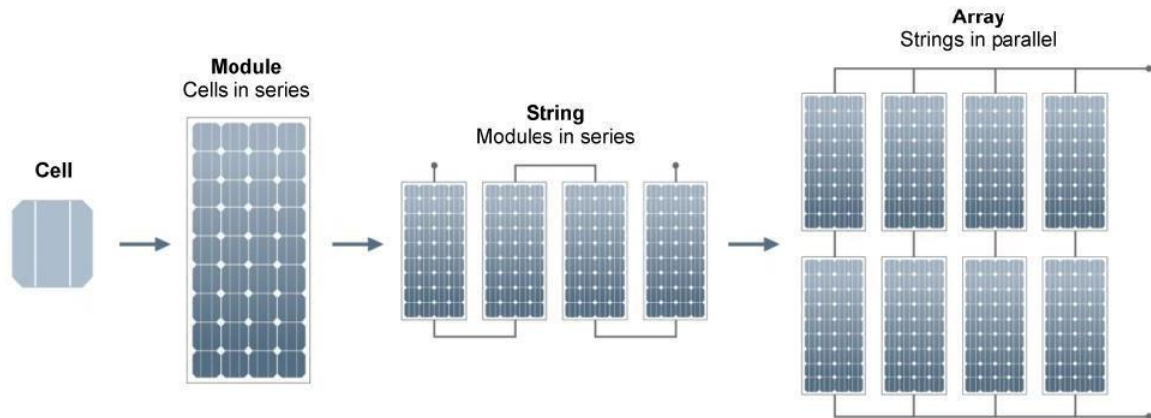


figure 2.10 branchement en serie et parallele des panneaux PV

- **Branchement en serie :**

L'équation pour la tension totale dans un branchement en parallèle est égale à la tension de chaque panneau, car ils sont tous connectés en parallèle :

$$V_{\text{total}} = V_1 + V_2 + \dots + V_n \dots \dots \dots (\text{II.1})$$

Où  $V_{\text{total}}$  est la tension totale du système,  $V_1, V_2, \dots, V_n$  sont les tensions individuelles des panneaux.

L'équation pour le courant total dans un branchement en série est égale au courant de chaque panneau, car ils sont tous connectés en série :

$$j_{\text{total}} = j_{e1} = j_{e2} = \dots = j_{en} \dots \dots \dots (\text{II.2})$$

Où  $j_{\text{total}}$  est le courant total du système,  $j_{e1}, j_{e2}, \dots, j_{en}$  sont les courants individuels des panneaux.

- **Branchement en parallèle :**

L'équation pour la tension totale dans un branchement en parallèle est égale à la tension de chaque panneau, car ils sont tous connectés en parallèle :

$$V_{\text{total}} = V_1 = V_2 = \dots = V_n \dots \dots \dots \text{(II.3)}$$

Où  $V_{\text{total}}$  est la tension totale du système,  $V_1, V_2, \dots, V_n$  sont les tensions individuelles des panneaux.

L'équation pour le courant total dans un branchement en parallèle est la somme des courants individuels des panneaux :

$$j_{\text{total}} = j_{e1} + j_{e2} + \dots + j_{en} \dots \dots \dots \text{(II.4)}$$

Où  $j_{\text{total}}$  est le courant total du système,  $J_{e1}, J_{e2}, \dots, J_{en}$  sont les courants individuels des panneaux. [44]

### 2.2.6.3 Efficacité énergétique

Le rendement, ou bien l'efficacité énergétique est une mesure de l'efficacité d'un module solaire à convertir le rayonnement solaire en énergie électrique. Elle est définie comme le rapport entre la puissance maximale produite par le module et la puissance du rayonnement solaire reçu par le module. La formule d'efficacité énergétique est exprimée sous la forme :

$$\text{Efficacité énergétique} = \frac{\text{Energie utile en sortie}}{\text{Énergie fournie}} \dots \dots \dots \text{(II.5)}$$

Cette formule est couramment utilisée dans le domaine de l'énergie solaire pour calculer l'efficacité des panneaux solaires. L'efficacité d'un panneau solaire est un facteur important pour déterminer la faisabilité et l'efficacité des systèmes d'énergie solaire. [27]

#### **2.2.6.4 Sélection du type de module**

La sélection du type de module photovoltaïque est une étape cruciale dans la conception d'un système photovoltaïque. En pratique, la puissance délivrée par un module varie en fonction de l'énergie solaire reçue, qui dépend du jour, de l'heure, de la météo et de l'orientation du module. La puissance-crête est une donnée normative utilisée pour caractériser les cellules et modules photovoltaïques, mesurée lors d'un test effectué en laboratoire, sous une irradiation de 1000 W/m<sup>2</sup> et à une température de 25°C, la lumière ayant le spectre attendu après la traversée de 1,5 fois l'épaisseur de l'atmosphère (Air Mass 1,5). Elle correspond à la puissance qui peut délivrer une cellule, un module ou un champ photovoltaïque dans ces conditions standard (STC). Les modules photovoltaïques à haut rendement basés sur des conceptions de cellules HJT et les cellules photovoltaïques de type n de nouvelle génération avec des contacts passivants sont des tendances technologiques qui gagnent rapidement du terrain et sont acceptées par le marché. La structure de connexion des modules PV et les convertisseurs statiques existants avec leur commande associée sont également des éléments à prendre en compte lors de la sélection du type de module photovoltaïque. [28]

#### **2.2.7 Types de systèmes photovoltaïques**

Les systèmes photovoltaïques sont des installations qui permettent de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire. Ils sont constitués de plusieurs éléments, dont la cellule photovoltaïque qui est la base du système. Cette cellule est un empilement de matériaux qui permet de convertir le rayonnement solaire en énergie électrique. Il existe différents types de systèmes photovoltaïques, tels que les systèmes autonomes, les systèmes reliés au réseau et les systèmes hybrides. Les systèmes autonomes sont utilisés pour alimenter des appareils d'usage courant au chalet ou à la maison, des dispositifs employés en agriculture, des clôtures électriques, des pompes à eau, entre autres. Les systèmes reliés au réseau sont connectés au réseau public et produisent de l'énergie plus près des lieux de consommation. Ils réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Les systèmes hybrides sont composés d'un générateur photovoltaïque combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustion interne. Les avantages et inconvénients de l'installation de panneaux photovoltaïques sont nombreux et dépendent de plusieurs facteurs, tels que le coût, la durée de vie, la performance, la maintenance, l'impact environnemental, entre autres. [20]

### 2.2.7.1 Centrales sol en réseau (fermes)

L'une des caractéristiques distinctives de l'énergie photovoltaïque lorsqu'elle est reliée au réseau réside dans le fait que, dans la plupart des scénarios, les centrales photovoltaïques peuvent être implantées à proximité des points de consommation. Cela permet d'éviter les pertes en ligne, qui peuvent s'élever jusqu'à 15 % sur les réseaux électriques à grande échelle lorsque des distances considérables séparent les sites de production et de consommation. Cette approche s'aligne parfaitement avec le concept de la décentralisation. Les centrales photovoltaïques connectées au réseau fonctionnent de manière transparente pour les utilisateurs et ne nécessitent pas leur intervention directe. Leur fonctionnement est hautement optimisé.

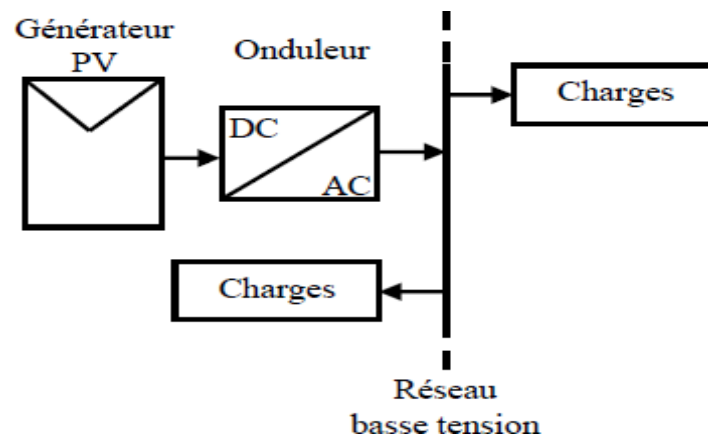


Figure 2.11 Exemple de système photovoltaïque connecté au réseau

Étant donné que l'énergie produite est généralement injectée directement dans le réseau, l'utilisation de batteries de stockage n'est pas essentielle, sauf dans le cas où l'on souhaiterait disposer d'une source d'énergie autonome en cas de coupures de courant [29].

### 2.2.7.2 Systèmes autonomes (hors réseau) ou systèmes isolés

Un système photovoltaïque autonome représente un système indépendant qui fournit de l'électricité à l'utilisateur sans être connecté au réseau électrique principal. Dans la plupart des scénarios, un système autonome nécessitera des batteries pour stocker l'énergie générée.

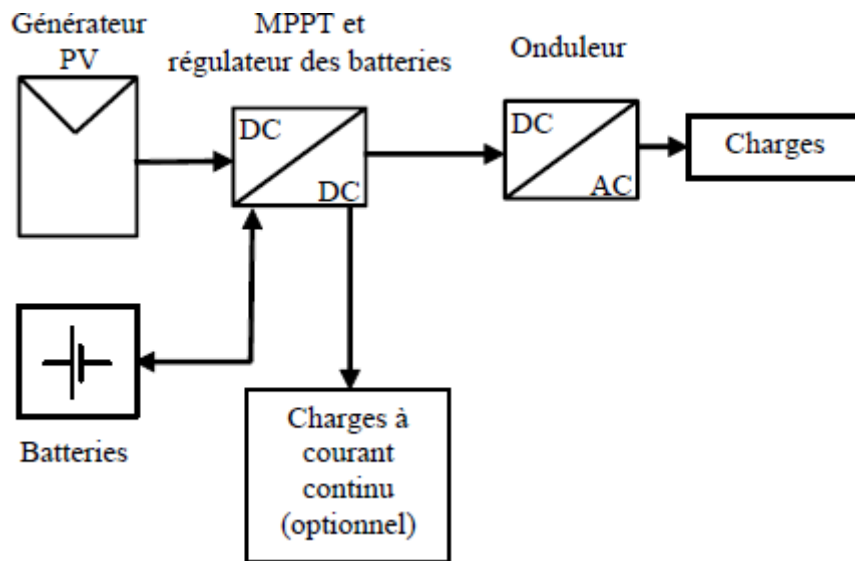


Figure 2.12 Exemple de système photovoltaïque autonome avec stockage

Ces batteries sont typiquement utilisées pour alimenter des habitations situées dans des zones isolées, telles que des îles ou des régions montagneuses, ainsi que pour des applications comme la surveillance à distance et le pompage d'eau. La présence d'éléments de stockage est essentielle pour garantir une alimentation continue à l'utilisateur, même en cas d'éventuelle absence de production d'électricité [8].

### 2.2.7.3 Systèmes hybrides

Un système hybride combine l'énergie photovoltaïque avec d'autres sources d'énergie. Habituellement, il intègre une source d'énergie renouvelable ainsi qu'une source d'appoint électrogène au diesel, au propane ou à l'essence. Ce type de système est adapté aux résidences ou aux bâtiments commerciaux non reliés à un réseau de distribution. Il est particulièrement pertinent pour les consommateurs ayant un besoin énergétique quotidien supérieur à 2,5 kWh et nécessitant une source d'appoint électrogène, ou résidant dans des régions où l'ensoleillement est limité pendant de longues périodes. Dans ces situations, un système hybride s'avère généralement un choix judicieux.

La plupart des systèmes hybrides sont équipés de batteries pour stocker l'énergie. Les panneaux solaires maintiennent la charge des batteries lorsque le soleil est abondant. Si une éolienne est intégrée au système, elle recharge les batteries pendant les périodes de vent, qui surviennent souvent lorsque le ciel est couvert ou pendant la nuit. Ainsi, les composantes éoliennes et solaires se complètent avantageusement. L'appoint électrogène n'est activé que

lorsque nécessaire, durant les périodes prolongées de ciel nuageux ou de faible vent. Lorsqu'il fonctionne, il opère à pleine capacité, ce qui améliore son efficacité énergétique et sa durabilité. Les systèmes comprenant à la fois des composantes solaires et éoliennes satisfont fréquemment les besoins énergétiques sans nécessiter l'usage de l'appoint électrogène. [29]

### 2.3 Ombrage partiel et diodes by pass

La production d'énergie d'une cellule est proportionnelle à l'irradiation qu'elle reçoit. Lorsque l'ombrage d'une cellule se produit, cette production diminue proportionnellement à l'importance de l'ombrage, des points chauds et d'autres défauts peuvent apparaître en raison de l'ombrage, lorsqu'une cellule commence à agir comme une charge résistive.

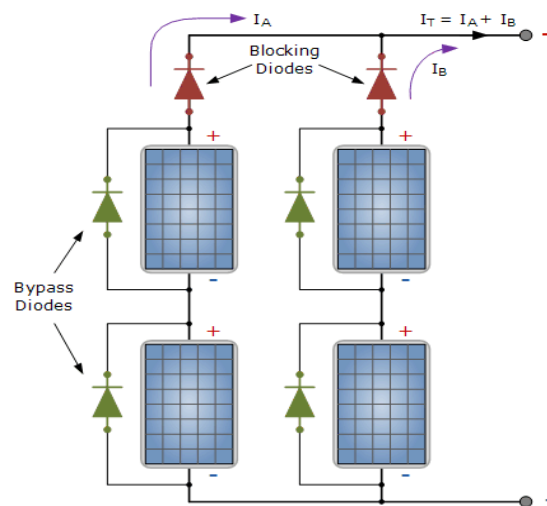


figure 2.13 diodes bypass

Il est donc important de protéger le système contre ce type d'effets destructeurs en plaçant des diodes dans le circuit qui bloquent le courant circulant à travers les dispositifs ombragés. Lorsque les modules sont connectés en série, des diodes de dérivation sont installées en parallèle, de sorte que si l'un des modules est ombragé et fonctionne comme une charge résistive, le courant peut passer par la diode et non par le module.

Si les modules sont placés dans une configuration parallèle, comme des réseaux, et que l'un d'entre eux est ombragé, le module ombragé fonctionne comme une charge résistive à une tension imposée par les autres unités dans une configuration instable. Dans cette situation, des diodes de blocage installées en série avec les dispositifs sont nécessaires, afin qu'elles puissent isoler les cellules ombragées. [14]



## 2.4 Onduleurs

Les onduleurs sont essentiels pour changer le type de courant de sortie en fonction de son utilisation finale. Dans le cas des installations ou des centrales photovoltaïques, celles-ci produisent un courant continu. La distribution est également effectuée en courant continu, mais lorsqu'elle est livrée au réseau, elle doit être sous forme de courant alternatif. Pour transformer le courant continu en courant alternatif compatible et synchronisé avec le réseau électrique, il est nécessaire d'utiliser un onduleur. De plus, les onduleurs sont équipés d'un (MPPT), qui recherche le point de puissance de sortie maximale, sélectionnant la meilleure paire de tension et de courant (MPP) qui varie constamment en raison de l'irradiance et de la température de la cellule. [30]

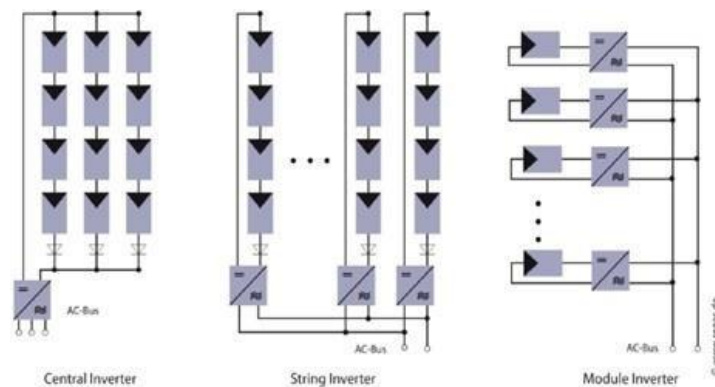


Figure 2.14 Différentes configurations d'onduleurs : onduleurs centralisés, de chaîne et de modules

- **Les onduleurs centraux** sont des onduleurs qui fusionnent plusieurs branches en les connectant en parallèle et en amplifiant leur courant et leur tension. Ils fonctionnent dans une plage de 100 à 1200 kW et sont classés comme onduleurs à un étage, car un seul convertisseur est chargé du suivi du MPPT, du contrôle du courant du réseau et de l'amplification de la tension. Ils sont utilisés dans les grandes installations photovoltaïques lorsque tous les modules fonctionnent dans les mêmes conditions.
- **Les onduleurs de branche** sont le type d'onduleur le plus couramment utilisé dans les installations photovoltaïques. Chaque chaîne de modules connectés en série est associée à un seul onduleur solaire. Les onduleurs de branche ne sont pas une bonne solution lorsque les modules sont orientés dans des directions différentes, comme sur les deux côtés d'un toit. Ils ont une puissance comprise entre 0,4 et 2 kW et sont le type d'onduleur le plus abordable. Les tâches d'entretien sont simples, car il n'y a qu'une seule section du circuit à surveiller.

- **Les micro-onduleurs** sont utilisés dans les installations photovoltaïques pour permettre à chaque panneau photovoltaïque de fonctionner de manière indépendante. Dans ce type de système, une chaîne entière est connectée à un onduleur, mais chacun des modules PV de la matrice est également connecté à un micro-onduleur, et tous ces micro-onduleurs sont connectés en parallèle pour créer un circuit de courant alternatif. Ainsi, l'ombrage ou les différentes orientations ne posent pas de problème dans ces installations. Les micro-onduleurs fonctionnent dans une plage de 50 à 400 kW dans les petites installations photovoltaïques. En outre, chaque micro-onduleur peut assurer des fonctions de surveillance pour chaque panneau individuel, en détectant les problèmes et en les résolvant. Cependant, ce type de système est beaucoup plus coûteux que les autres, et sa maintenance est également complexe, car chaque onduleur se trouve sous les panneaux. Lorsque les panneaux sont installés de manière à ce que leur support ne soit pas facilement accessible, la maintenance devient une tâche compliquée. De plus, comme le courant continu produit par les panneaux est directement converti en courant alternatif, il n'est pas possible de charger un réservoir de batteries. [31]

## 2.5 Avantages des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques, et plus spécifiquement les centrales au sol, présentent plusieurs avantages. Tout d'abord, ces installations permettent de produire de l'électricité à partir d'une source d'énergie renouvelable, le soleil, ce qui contribue à réduire la dépendance aux énergies fossiles et à limiter les émissions de gaz à effet de serre. De plus, les centrales au sol peuvent être construites sur des terrains non utilisés, tels que des friches industrielles ou des terrains militaires, ce qui permet de valoriser ces espaces et de les transformer en sources de production d'énergie propre. Les parcs photovoltaïques au sol sont également des projets de grande envergure qui mobilisent des investissements importants et une ingénierie conséquente, ce qui peut contribuer à dynamiser l'économie locale et à créer des emplois. Enfin, les centrales au sol peuvent être vendues à la mise en service ou après quelques années d'exploitation, ce qui permet aux développeurs de financer de nouveaux projets.

## 2.6 Inconvénients des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques, en particulier les centrales au sol, présentent certains inconvénients. Tout d'abord, les centrales au sol nécessitent une grande surface de terrain, ce qui peut entraîner une utilisation excessive des terres arables. De plus, leur installation peut avoir un impact négatif sur l'environnement, en raison de la déforestation, de la perte de

biodiversité et de la fragmentation des habitats. Les centrales au sol peuvent également être coûteuses à construire et à entretenir, nécessitant des investissements importants et une ingénierie conséquente. En outre, les systèmes photovoltaïques peuvent être affectés par les conditions météorologiques, telles que les nuages et les tempêtes, ce qui peut réduire leur efficacité. Enfin, la production d'énergie solaire peut être intermittente, ce qui peut poser des problèmes de stabilité du réseau électrique. Ces inconvénients doivent être pris en compte lors de la mise en place des systèmes photovoltaïques, afin de minimiser leur impact environnemental et économique. [32]

## **2.7 Conclusion**

La production de l'électricité en base des centrales PV à grande échelle est prometteuse en raison de sa propreté et sa caractéristique respectueuse de l'environnement, à noter un certain nombre d'effets indésirables sur les systèmes électriques, en particulier la stabilité du système.

Dans ce chapitre on a présenté les principaux paramètres à prendre en compte lors de la conception d'une centrale PV et a montré la comparaison entre les cellules mono faciales et celles bifaciales, on a vu aussi les principales composantes des centrales PV.

## **Chapitre 3**

La simulation d'une centrale PV rattachée au réseau dans la  
région d'El Borma (Ouargla) Par PVSYST

### **3. Introduction**

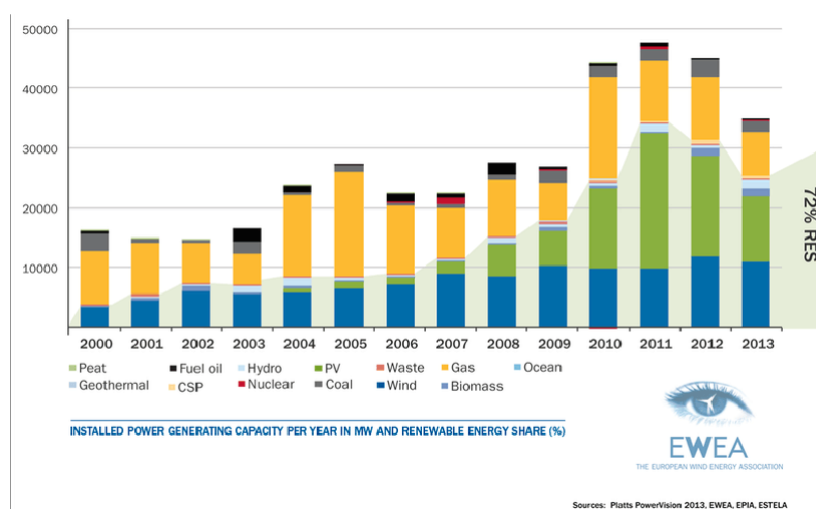
L'Algérie, pays ensoleillé, a un grand potentiel pour développer les énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire photovoltaïque. Le gouvernement algérien a mis en place des politiques pour encourager l'utilisation des énergies renouvelables, notamment en élaborant des études de faisabilité technico-économique de centrales photovoltaïques. Les technologies photovoltaïques reposent sur des cellules qui transforment le rayonnement solaire en courant électrique continu. Ces cellules sont couplées entre elles pour former un module, lui-même relié à différents composants électriques (onduleur, boîtier de raccordement, etc.). L'ensemble constitue un système photovoltaïque. Les énergies renouvelables, y compris l'énergie solaire, sont une source d'opportunités pour l'Algérie, car elles peuvent contribuer à la réduction de la dépendance aux énergies fossiles et à la diversification de l'économie. Les technologies et innovations liées aux énergies renouvelables évoluent constamment, offrant ainsi de nombreuses opportunités pour les personnes intéressées par ce domaine.. Le gouvernement algérien a également élaboré un guide pour aider les acteurs de la filière photovoltaïque à réaliser des études d'impact de qualité et à fournir une base objective et partagée pour la prise de décision. [33]

Dans ce chapitre, nous allons voir un aperçu sur le domaine énergétique algérien les projets réalisés, la croissance énergétique et l'importance de le potentiel solaire algérienne, en particulier l'énergie solaire photovoltaïque. En suite on fait une évaluation qualitative du logiciel PVSYST, qui permet la simulation et le dimensionnement d'une centrale photovoltaïque connecté au réseau ,en mettant en evidence les types de panneaux choisis pour la simulation.

#### **3.1. Croissance de l'énergie**

La croissance énergétique est un aspect crucial du développement économique, car elle est essentielle pour alimenter les industries, les transports et les ménages. Cependant, l'approche traditionnelle de la production et de la consommation d'énergie a conduit à la dégradation de l'environnement, à l'épuisement des ressources et à l'inégalité sociale. Pour relever ces défis, l'accent est mis de plus en plus sur l'amélioration de l'efficacité énergétique et la promotion des sources d'énergie renouvelables. Cette évolution vers des pratiques énergétiques durables est motivée par la reconnaissance du fait que le modèle actuel de croissance énergétique n'est

pas viable à long terme. L'utilisation des combustibles fossiles est limitée, et leur extraction et leur consommation ont des effets négatifs sur l'environnement et la santé humaine. En revanche, les sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne et l'énergie hydroélectrique sont abondantes et ont un impact minimal sur l'environnement. La transition vers les sources d'énergie renouvelables nécessite des investissements importants dans la recherche et le développement, les infrastructures et le soutien politique. Cependant, les avantages de cette transition sont considérables, notamment la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'amélioration de la qualité de l'air et le renforcement de la sécurité énergétique. [34]



**Figure 3.1** evolution des parts de consommation énergétique

### 3.2 Centrales photovoltaïques raccordées au réseau en Algérie

Les centrales photovoltaïques raccordées au réseau en Algérie permettent de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire et de la distribuer sur le réseau électrique national. La centrale solaire de Hassi R'mel, inaugurée en 2011, est la première centrale solaire photovoltaïque en Algérie, d'une capacité de 25 MW. En 2022, SONATRACH et Eni ont signé un accord pour la réalisation d'une seconde centrale solaire photovoltaïque sur le site de Bir Rebaa Nord d'une capacité de 10 MW. La deuxième phase du programme de développement des énergies renouvelables en Algérie, qui s'étend de 2021 à 2024, prévoit la réalisation de 4000 MW en solaire photovoltaïque. Ces centrales permettent de diversifier les sources d'énergie en Algérie et de réduire la dépendance aux hydrocarbures.

### **3.3 Présentation du Logiciel PVSYST**

PVsyst est un logiciel performant pour les systèmes photovoltaïques. Il est conçu pour être utilisé par les architectes, les ingénieurs et les chercheurs. PVsyst permet de simuler le fonctionnement d'une installation photovoltaïque, en prenant en compte les caractéristiques des panneaux solaires, de l'onduleur, de la batterie, de l'orientation et de l'inclinaison des panneaux, de la localisation géographique, de l'ombrage, des pertes thermiques, entre autres. Le logiciel permet également de calculer la production d'énergie électrique, la rentabilité économique et les émissions de CO<sub>2</sub> évitées. PVsyst offre plusieurs options pour l'analyse des données, telles que la visualisation des résultats sous forme de graphiques et de tableaux, la comparaison de différents scénarios, l'optimisation de la taille de l'installation, la simulation de l'autoconsommation, entre autres. D'autres logiciels sont également disponibles pour estimer la production d'une installation photovoltaïque, tels que Sunny Design, Polysun, Helioscope, SAM, entre autres. [35]

### **3.4 But de l'étude**

L'étude de comparaison entre deux centrales PV, l'une avec des panneaux photovoltaïques mono faciaux et l'autre avec des panneaux bifaciaux, a pour but de déterminer les avantages et les inconvénients de chaque technologie. Cette étude permettra de comparer les performances des deux centrales en termes de production d'énergie, de rentabilité et de coûts. En utilisant le logiciel PVsyst, il sera possible de simuler les conditions d'irradiance, de température et d'ombrage pour chaque centrale, et de calculer la production d'énergie annuelle, mensuelle et horaire pour chaque technologie. Les résultats de cette étude permettront de déterminer quelle technologie est la plus adaptée en fonction des conditions climatiques et des coûts d'investissement et d'exploitation. .

### **3.5 Options du logiciel PVSYST**

PVsyst est un logiciel performant pour les systèmes photovoltaïques, conçu pour être utilisé par les architectes, les ingénieurs et les chercheurs. Voici quelques-unes des caractéristiques de PVsyst:

- Configuration de modules / système permettant de réaliser une première simulation préliminaire.

- Système de messages d'erreur et de conseils pour aider à la configuration du système.
- Base de données de modules et d'onduleurs, ainsi que la possibilité de créer des modèles personnalisés.
- Simulation de l'irradiance, de la température, de l'ombrage et de la performance des modules.
- Calcul de la production d'énergie annuelle, mensuelle et horaire.
- Analyse de la rentabilité du système, y compris les coûts d'investissement, les coûts d'exploitation et les revenus générés.
- Possibilité de comparer différents scénarios et de trouver la meilleure solution pour le système photovoltaïque. [35]

### **3.6 Définition de l' EPC**

Dans le cadre des projets photovoltaïques, le contrat EPC (Engineering, Procurement, and Construction) est un contrat clé en main qui implique la conception, l'approvisionnement et la construction de la centrale solaire. Le contrat EPC est souvent utilisé dans l'industrie de l'énergie pour les projets de grande envergure, car il permet de gérer l'ensemble du projet de manière efficace et de garantir que toutes les parties impliquées travaillent ensemble pour atteindre les objectifs du projet. Le responsable du projet (MOA) fournit au contractant une conception détaillée comprenant des spécifications techniques et fonctionnelles, et le contractant est responsable de la gestion et de l'exécution de la mission pendant toute la durée du projet. Les contrats EPC sont souvent appelés « projets clé en main » car le contractant porte la responsabilité du projet, pour livrer celui-ci dans un état opérationnel à son client.

[36]

#### **3.6.1 Le prédimensionnement**

Le pré-dimensionnement est une étape importante dans la conception de systèmes photovoltaïques. Cette étape vise à réaliser une conception approfondie du système en utilisant des simulations horaires détaillées. Dans le cadre d'un projet, l'utilisateur peut effectuer différents essais de simulation du système et les comparer. Il doit définir l'orientation du plan et choisir les composants spécifiques du système. Il est assisté dans la conception du réseau de PV, étant donné un modèle d'onduleur choisi. Dans une deuxième étape, l'utilisateur peut spécifier des paramètres plus détaillés et analyser les effets fins tels



que le comportement thermique, la qualité du module, l'inadéquation et l'angle d'incidence des pertes, l'horizon (loin ombrage), ou les ombrages partiels d'objets près de la baie. Les résultats comprennent plusieurs dizaines de variables de simulation, qui peuvent être dans les valeurs mensuelles, quotidiennes ou horaires, et même transférées à d'autres logiciels. La "perte Diagramme" est particulièrement utile pour identifier les faiblesses de la conception du système. Un rapport d'ingénieur peut être imprimé pour chaque exécution de la simulation, y compris tous les paramètres utilisés pour la simulation, et les principaux résultats. Une évaluation économique détaillée peut être effectuée en utilisant les prix des composants réels, les coûts supplémentaires et les conditions d'investissement. Le pré-dimensionnement est une étape importante pour garantir la performance et la rentabilité des projets photovoltaïques. [37]

### **3.6.2 Planification du projet**

Le processus de conception de projet dans le domaine photovoltaïque vise à réaliser une conception approfondie du système en utilisant des simulations horaires détaillées. L'utilisateur peut effectuer différents essais de simulation du système et les comparer. Il doit définir l'orientation du plan et choisir les composants spécifiques du système. Il est assisté dans la conception du réseau de PV, étant donné un modèle d'onduleur choisi, la batterie ou de la pompe. Dans une deuxième étape, l'utilisateur peut spécifier des paramètres plus détaillés et analyser les effets fins tels que le comportement thermique, le câblage, la qualité du module, l'inadéquation et l'angle d'incidence des pertes, l'horizon (loin ombrage), ou les ombrages partiels d'objets près de la baie. Pour les systèmes de pompage, plusieurs conceptions de système peuvent être testées et comparées les unes aux autres, avec une analyse détaillée des comportements et de l'efficacité. Les résultats comprennent plusieurs dizaines de variables de simulation, qui peuvent être dans les valeurs mensuelles, quotidiennes ou horaires, et même transférées à d'autres logiciels. La "perte Diagramme" est particulièrement utile pour identifier les faiblesses de la conception du système. Un rapport d'ingénieur peut être imprimé pour chaque exécution de la simulation, y compris tous les paramètres utilisés pour la simulation, et les principaux résultats. Une évaluation économique détaillée peut être effectuée en utilisant les prix des composants réels, les coûts supplémentaires et les conditions d'investissement. Le processus de conception de projet est crucial pour garantir la performance et la rentabilité des projets photovoltaïques. [38]

### **3.6.3 Les bases de données et outils**

PVsystem dispose d'une base de données de modules et d'onduleurs pour faciliter la configuration des systèmes photovoltaïques. Les modules et les onduleurs sont choisis dans une liste déroulante, et il est également possible de créer des modèles personnalisés. Les composants de la base de données sont régulièrement mis à jour pour inclure les dernières technologies disponibles sur le marché. PVsystem dispose également d'un nouvel outil permettant de visualiser l'assemblage des chaînes de modules PV avec les onduleurs sous la forme d'un circuit, ce qui facilite la compréhension de l'installation. Les données de la base de données proviennent de différentes sources, notamment de la publication Photon, qui répertorie des milliers de modules et de modèles d'onduleurs. Les paramètres du système principal, y compris le modèle du module et de l'onduleur, la capacité du système, les longueurs des chaînes, etc., sont définis dans la base de données pour faciliter la configuration du système. [39]

### **3.7 Introduction du Projet**

Le projet photovoltaïque consiste à simuler deux centrales solaires, chacune produira une puissance de 10MW, l'une équipée de panneaux mono faciaux et l'autre équipée de panneaux bifaciaux, afin de déterminer laquelle des deux technologies est la plus adaptée en termes de production d'énergie, de rentabilité et de coûts. Pour cela, il est nécessaire de prendre en compte un grand nombre de paramètres pour optimiser la production d'énergie et la rentabilité des projets, tels que la latitude, le relief, les conditions climatiques, l'irradiation et la température, l'orientation des modules, leur inclinaison, les obstacles proches générant des ombrages, etc. Les coûts d'investissement générés doivent également être pris en compte pour évaluer la rentabilité du projet. En utilisant le logiciel PVsystem, il est possible de simuler les conditions d'irradiance, de température et d'ombrage pour chaque centrale, et de calculer la production d'énergie annuelle, mensuelle et horaire pour chaque technologie. Les résultats de cette simulation permettront de déterminer quelle technologie est la plus adaptée en fonction des conditions climatiques et des coûts d'investissement et d'exploitation.

### 3.7.1 Emplacement et coordonnées du site

El Borma est une commune de la wilaya d'Ouargla en Algérie, les coordonnées géographiques du site sont 31,1311 "N 8,3429 "E. Située dans le sud-est du pays. La ville est coextensive avec le district d'El Borma et se trouve à la frontière avec le gouvernorat de Tataouine en Tunisie. Selon le recensement de 2008, la population de la ville est de 3 250 habitants, avec un taux de croissance annuel de 4,9%, le deuxième plus élevé de la province. [40]



**figure 3.2 Emplacement et coordonnées du site**

La ville est principalement soutenue par l'industrie pétrolière, en raison des champs pétrolifères de la région. Le pâturage est également important, bien que limité en raison de la vie végétale marginale de la région. L'agriculture est actuellement impossible en raison du manque de ressources en eau suffisantes. La ville est isolée, sans établissements significatifs ou routes majeures à proximité. Une route locale mène à l'ouest à Hassi Messaoud, à environ 300 kilomètres à l'ouest, et se dirige vers le sud, atteignant Ghadamès. La région d'El Borma est située au sud de l'Algérie alpine, et appartient au craton nord-africain. [41]

### 3.7.2 Informations météorologiques

La localité de Borma, située dans la région d'Ouargla en Algérie, bénéficie d'un climat désertique chaud et sec tout au long de l'année. Les températures moyennes maximales sont supérieures à 38°C pendant plus de trois mois, de juin à septembre. [40]

	Irradiation globale horizontale kWh/m <sup>2</sup> /mois	Irradiation diffuse horizontale kWh/m <sup>2</sup> /mois	Température °C	Vitesse du vent m/s	Turbidité Linke [-]	Humidité relative %
Janvier	95.1	40.0	12.2	4.00	3.716	49.9
Février	106.0	47.7	14.3	4.60	4.141	41.5
Mars	149.3	72.6	19.9	5.00	6.155	31.4
Avril	181.8	83.2	24.3	5.29	7.000	27.0
Mai	207.1	96.3	29.9	5.50	7.000	22.8
Juin	205.6	96.2	33.4	5.30	7.000	21.4
Juillet	223.7	88.6	36.5	4.80	6.861	20.1
Août	205.5	84.2	35.7	4.70	6.385	22.6
Septembre	167.7	71.0	32.0	4.80	7.000	29.5
Octobre	137.6	59.9	26.4	4.10	6.101	36.8
Novembre	106.4	39.7	19.1	3.90	4.560	43.6
Décembre	89.0	37.5	13.5	3.70	3.864	53.6
<b>Année</b>	<b>1874.8</b>	<b>816.9</b>	<b>24.8</b>	<b>4.6</b>	<b>5.815</b>	<b>33.4</b>
	Coller	Coller	Coller	Coller		

Irradiation globale horizontale variabilité d'une année sur l'autre 3.7%

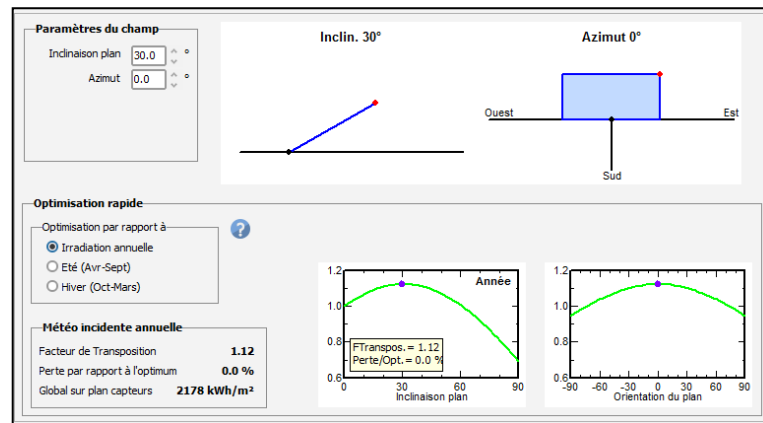
figure 3.3 informations meterologiques

### 3.7.3 L'inclinaison des panneaux

L'inclinaison et l'orientation des panneaux solaires sont des facteurs essentiels dans le dimensionnement d'une centrale photovoltaïque. Ces paramètres influencent directement le rendement de l'installation en déterminant la quantité d'énergie solaire captée et convertie en électricité. Voici quelques points clés pour comprendre l'importance de l'orientation et de l'inclinaison dans le dimensionnement d'une centrale PV :

- Orientation optimale : L'orientation idéale des panneaux solaires est plein sud, ce qui permet une exposition maximale au soleil tout au long de la journée. Les autres orientations peuvent également offrir de bons résultats, mais l'orientation nord est à éviter. En fonction de la latitude de la localité, l'angle d'inclinaison des panneaux solaires peut varier pour optimiser la capture du rayonnement solaire.
- Inclinaison optimale : L'inclinaison optimale des panneaux solaires se situe généralement entre 30° et 35°, avec des variations saisonnières. Cette inclinaison permet de capter un maximum de rayonnement solaire du matin jusqu'au soir, tous les jours de l'année. Une inclinaison trop faible ou trop élevée peut entraîner une diminution du rendement de l'installation.
- Impact sur la production d'énergie : Lorsque l'angle d'inclinaison des panneaux solaires n'est pas idéal, cela peut avoir un impact sur la production d'énergie. Une illustration montre la variation de l'ensoleillement en fonction de l'orientation et de

l'inclinaison, sur une surface donnée. Il est donc important de prendre en compte ces paramètres lors du dimensionnement d'une centrale PV pour maximiser son rendement

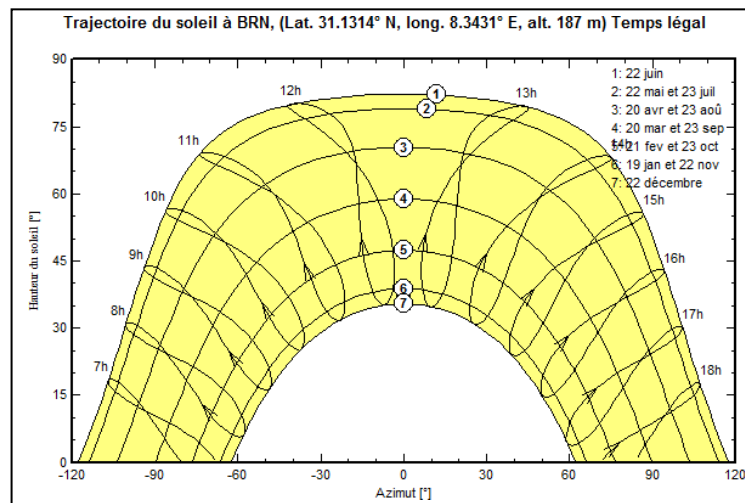


**figure 3.4** inclinaison des panneaux

En conclusion, l'orientation et l'inclinaison des panneaux solaires jouent un rôle crucial dans le dimensionnement d'une centrale photovoltaïque. En optimisant ces paramètres, il est possible d'augmenter le rendement de l'installation et d'optimiser la production d'énergie solaire. [42]

### 3.7.4 La ligne d'horizon

La définition de la ligne d'horizon ou bien aussi appelé profil de l'horizon est une opération simple et importante dans le domaine des centrales photovoltaïques. Elle permet de prendre en compte l'horizon lors de la conception et de l'installation des panneaux solaires pour maximiser la production d'énergie solaire et la rentabilité des projets. L'outil graphique PVSyst permet de définir un profil de l'horizon en superposant une ligne brisée sur le diagramme de trajectoire du soleil, qui peut contenir un nombre quelconque de hauteur / points d'azimut. L'angle de la hauteur du soleil est l'angle compris entre la direction du soleil et le plan horizontal, qui varie de «0° à 90°» vers le zénith et de «0° vers - 90°» vers le nadir. Cette fonctionnalité est essentielle pour optimiser la production d'énergie solaire et la rentabilité des projets, en prenant en compte les paramètres tels que la latitude, le relief, les conditions climatiques, l'irradiation et la température, l'orientation des modules, leur inclinaison, les obstacles proches générant des ombrages.[35]



**figure 3.5** La ligne d'horizon

### 3.8 Simulation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau

Pour construire un système photovoltaïque connecté au réseau, plusieurs paramètres sont nécessaires pour réaliser le dimensionnement et la configuration du système de production et de conversion d'énergie. Le schéma simplifié de notre système photovoltaïque couplé au réseau est divisé en trois parties : la partie photovoltaïque (panneau), le système (convertisseur continu/alternative, onduleur) et le réseau électrique. Pour générer l'énergie, le nombre de modules PV nécessaires est déterminé, et des convertisseurs de courant continu sont connectés au générateur photovoltaïque pour adapter sa tension aux bornes. Les résultats de la simulation comprennent plusieurs variables de simulation, qui peuvent être dans les valeurs mensuelles, quotidiennes ou horaires, et même transférées à d'autres logiciels. Les avantages et les inconvénients du photovoltaïque sont également pris en compte dans la conception du système. Le système photovoltaïque est conçu pour convertir l'énergie solaire en énergie électrique et pour alimenter le réseau électrique.

#### 3.8.1 La dimension et la taille du système

Le dimensionnement du système repose sur une procédure simple et rapide, où les paramètres techniques des modules PV et du convertisseur sont déterminés pour injecter un générateur PV, sans batterie, dans le réseau électrique. Cette approche est utilisée pour intégrer des systèmes photovoltaïques dans diverses applications, telles que l'alimentation d'un séparateur électrostatique. L'objectif principal est de trouver le meilleur point de fonctionnement du

### Chapitre 3 La simulation d'une centrale PV rattachée au réseau dans la région d'El Borma (Ouargla) Par PVSYST

système, en tenant compte des caractéristiques de l'onduleur PV et du générateur PV, dans notre cas les deux système sont a prendre en considération , c'est-à-dire le premier avec des panneaux mono faciaux, et le deuxième avec des panneaux bifaciaux .

Wilaya	Coordonnées géographiques	Site	Puissance [MW]	Tension [kV]	Superficie Disponible [Ha]
Ouargla	31,1311 "N 8,3429 "E	El borma	10	220	25

tableau 3.1 description et informations generales

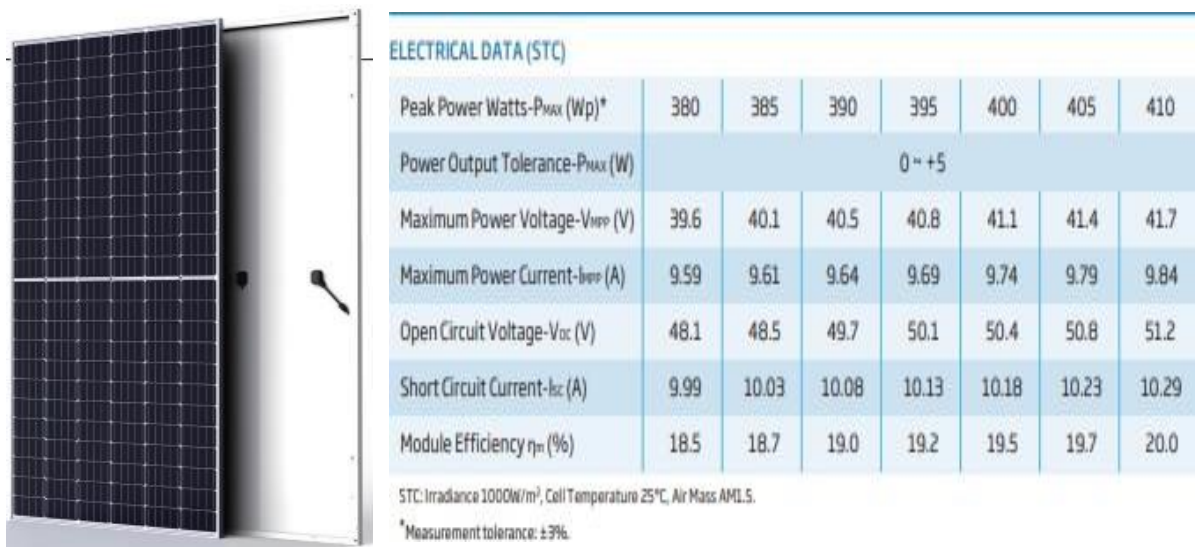
Concernant les panneaux photovoltaïques utilisés, le choix c'est porté sur :

- Panneau mono facial : le TSM-DEG15H-20-(II)-385 de Trina Solar
- Panneau bifaciale : le Tiger Pro 78M-7RL4-V-560-580M de Jinko Solar

#### 3.8.2 Les particularités des Modules PV

Nous allons voir dans ce qui suit , les caratersitique et specificités des deux type module utilisées dans la simulation de la centrale PV :

- Panneau mono facial : Le TSM-DEG15H-20-(II)-385 est un panneau solaire monofacial à 144 cellules fabriqué par Trina Solar. Le panneau a une plage de puissance de sortie de 385 à 405 W et une couleur de cadre argentée. Il est conçu pour réduire les coûts d'équilibre du système (BOS) avec un bac haute puissance et une tension système de 1 500 V.



**Figure 3.6** panneau TSM-DEG15H-20-(II)-385 ses caractéristiques électriques

- Le panneau bénéficie d'une garantie de puissance de sortie linéaire de 30 ans et convient à une utilisation dans des applications résidentielles, commerciales et utilitaires. Les performances du panneau dépendent de l'irradiation, de la température ambiante et de la vitesse du vent.



- Panneau bifaciale : le Tiger Pro 78M-7RL4-V-560-580M de Jinko Solar



**Figure 3.7** panneau 78M-7RL4-V-560-580M et ses caractéristiques électriques

Le Tiger Pro 78M-7RL4-V-560-580M est un panneau solaire monocristallin fabriqué par Jinko Solar Holding Co., Ltd. Il a une plage de puissance de 560 à 580 Wc et un rendement de 21,4 %. Le panneau a une tolérance de puissance positive de 0 ~ + 3 % et une garantie de puissance linéaire de 30 ans. Le Tiger Pro 78M-7RL4-V-560-580M possède un cadre en alliage d'aluminium anodisé et un verre trempé avec revêtement antireflet d'une épaisseur de 3,2 mm. L'indice de protection de la boîte de jonction est IP 68 et la section du câble est de 4 mm<sup>2</sup>. Le panneau peut fonctionner dans une plage de température de -40 à 85 °C et son coefficient de température Pmax est de -0,35 %/°C. Le Tiger Pro 78M-7RL4-V-560-580M est un panneau solaire de haute qualité adapté à une large gamme d'applications.

### 3.8.3 Les particularités de l'onduleur

L'onduleur Solei 200 de Siel est un équipement électronique qui permet de convertir le courant continu en courant alternatif. Il est conçu pour être utilisé avec des panneaux solaires.



Figure 3.8 l'onduleur et ses details techniques

### 3.8.4 Connecteur de système

Un connecteur de système est un élément essentiel dans la conception et le fonctionnement d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau. Il permet de relier les différents composants du système, tels que les panneaux solaires, les onduleurs et les dispositifs de surveillance, afin de garantir une production d'énergie efficace et fiable. Les connecteurs de système sont souvent des connecteurs électriques spécialement conçus pour les applications solaires, offrant une connexion sécurisée et étanche pour résister aux conditions environnementales difficiles. Ces connecteurs jouent un rôle crucial dans la transmission du courant continu (DC) généré par les panneaux solaires vers les onduleurs, qui le convertit ensuite en courant alternatif (AC) utilisable par le réseau électrique. [2]

### 3.8.5 Ombrage proche

Le logiciel PVsyst, largement utilisé par les professionnels de l'énergie solaire tels et les chercheurs. Ce logiciel permet de définir différentes pertes, y compris les pertes d'ombrage proches, et fournit des outils spécialisés pour évaluer ces pertes. Les pertes d'ombrage proches sont discutées pour le dimensionnement et la réalisation de projets à l'usage des bureaux d'ingénieurs. L'ombrage proche peut avoir un impact significatif sur la performance des systèmes photovoltaïques, il est donc essentiel de le prendre en compte lors de la conception et de l'optimisation des installations solaires.[2]

### **3.9 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons commencer avec un aperçu sur le domaine énergétique algérien les projets réalises, la croissance énergétique et l'importance de le potentiel solaire algérienne, en particulier l'énergie solaire photovoltaïque. En suite on fait une évaluation qualitative du logiciel PVSYST, qui permet la simulation et le dimensionnement d'une centrale photovoltaïque connecté au réseau ,avec deux types de panneaux PV.

## **Chapitre 4**

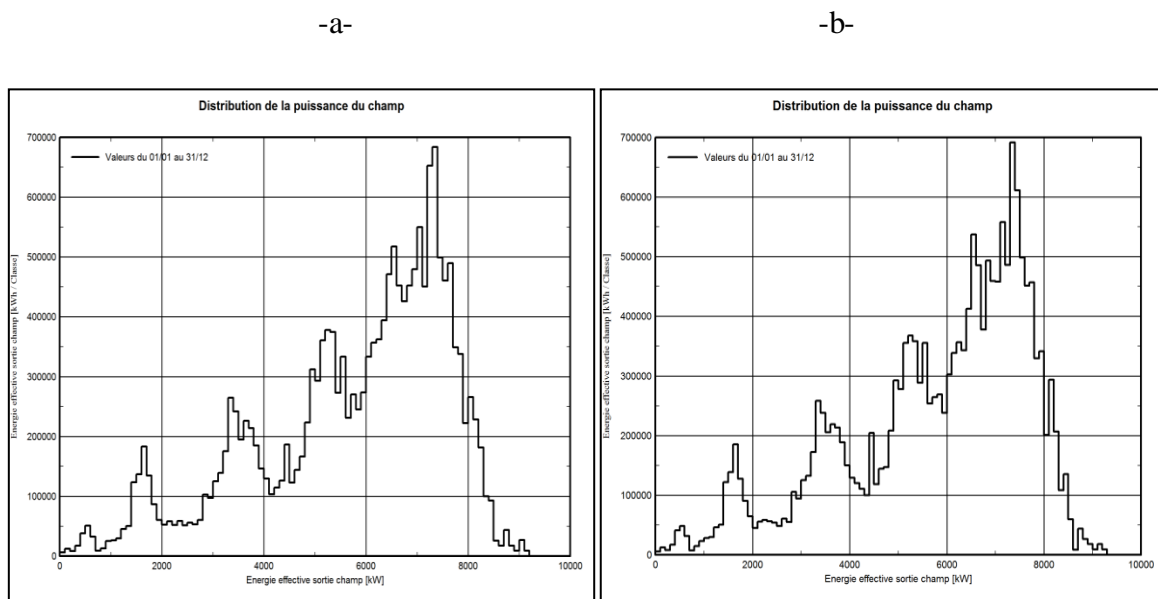
### **Résultats de simulation**

## 4.1 Introduction

Suite à notre étude de la centrale PV raccordée au réseau électrique, dans ce chapitre on présentera les résultats de la simulation pour les deux types de panneaux utilisées, tel que tous les graphes et les tableaux . Afin d'avoir l'évaluation économique, énergétique et environnementale .

## 4.2 Répartition de la puissance produite par le champ photovoltaïque

Répartition de la puissance produite par le champ de panneaux solaires



**figure 4.1 Répartition de la puissance produite par le champ de panneaux solaires**

On voit dans la figure «4.1»la puissance effective annuelle produite par le champ PV pouvant atteindre un pic de 780(MWh) pour le système (a) tandis ce que le système (b) atteint un pic de 790(MWh), nous remarquons que la distribution de la puissance en sortie du champ PV varie suivant la même tendance que la distribution du rayonnement incident, à une échelle différente. Cela est dû à des pertes globales variables dépendant de la qualité des modules, enparticulier, les pertes mismatch, les pertes ohmiques de câblage qui dues à la température et influencent fortement sur la production des modules. Aussi , ce ses pertes ohmiques de câblage dues au niveau d'irradiante, qui varient suivant le rayonnement global reçu, et l'éclairement.

### 4.3 La puissance électrique produite par les systèmes photovoltaïques

-a-

-b-

	EOutnv MWh	EffinvR %		EOutnv MWh	EffinvR %
Janvier	1242	96.0	Janvier	1243	96.0
Février	1228	95.9	Février	1230	95.9
Mars	1480	95.9	Mars	1485	95.9
Avril	1591	95.8	Avril	1599	95.8
Mai	1625	95.9	Mai	1636	95.9
Juin	1528	95.9	Juin	1540	95.9
Juillet	1649	95.9	Juillet	1664	95.9
Août	1649	95.8	Août	1663	95.8
Septembre	1521	95.9	Septembre	1533	95.9
Octobre	1458	96.0	Octobre	1466	96.0
Novembre	1336	96.0	Novembre	1340	96.0
Décembre	1206	96.0	Décembre	1207	96.0
Année	17514	95.9	Année	17607	95.9

Tableau 4.1 Puissance générée à la sortie de l'onduleur

la puissance à la sortie du champ passe par un onduleur pour convertie le courant continu en courant Alternatif avec un taux de perte d'onduleur de **0.0%** , cette puissance equivaut à 17514MWh anuelle pour le système (a) et à 17607MWh pour le système (b).

### 4.4 La puissance électrique disponible à la sortie du système photovoltaïque

Puissance totale produite par le système

-a-

-b-

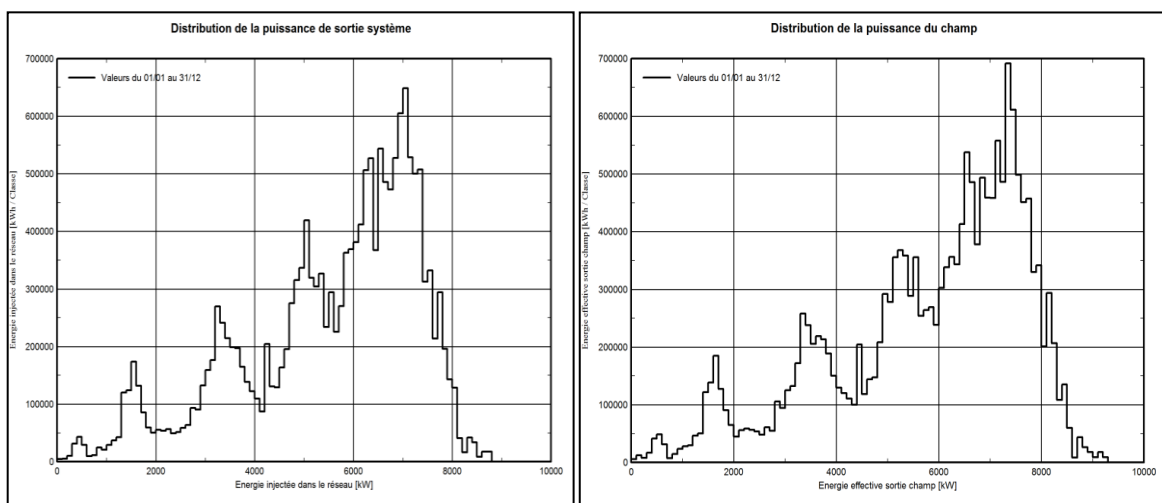


figure 4.2 Puissance totale produite par le système

A partir de la Figure «4.3», nous avons vu que les puissances en sortie de l'onduleur avec le point de puissance MPP maximum du courant continu produit par le champ PV, et la puissance convertie en courant alternatif sont différentes, de sorte qu'ils sont capables de visualiser la puissance crête produite 650 MWh / m<sup>2</sup> pour le système (a) , moins que le système (b) avec 690 MWh / m<sup>2</sup> .Aussi nous noter que la distribution de puissance en sortie du champ PV varie dans le même sens que celle du rayonnement incident, à une échelle différente.

#### 4.5 Quantité d'énergie électrique fournie au réseau électrique par le système photovoltaïque.

-a-

-b-

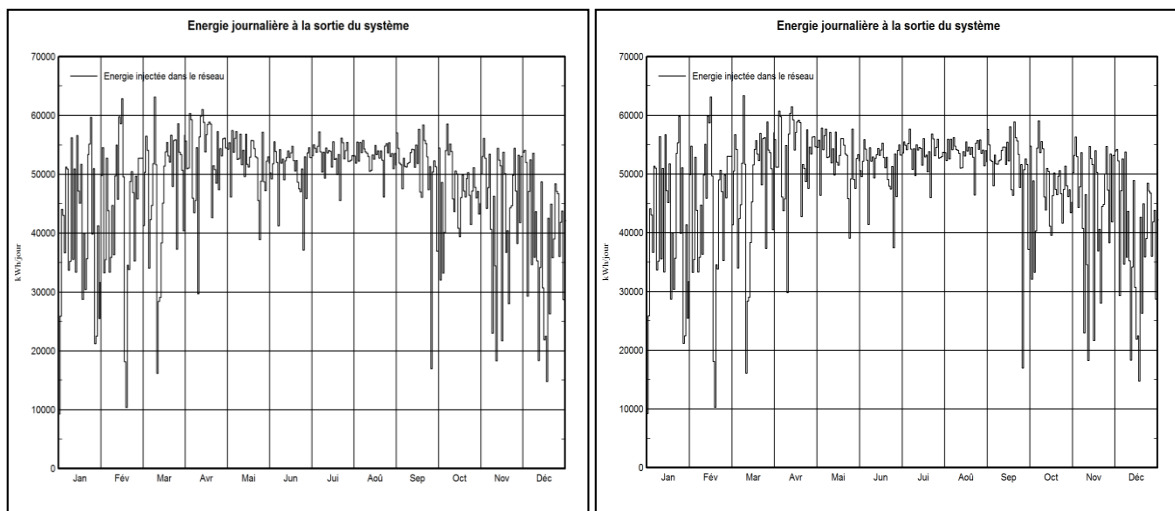


figure 4.3 Puissance électrique injectée dans le réseau

Le graphe dans la figure «4.4» nous donne une variation journalière constante et croissante de **20** (MWh/j) minimale et de **63** (MWh/j) maximale.

#### 4.6 Graphique d'entrée et sortie journalière :

-a-

-b-

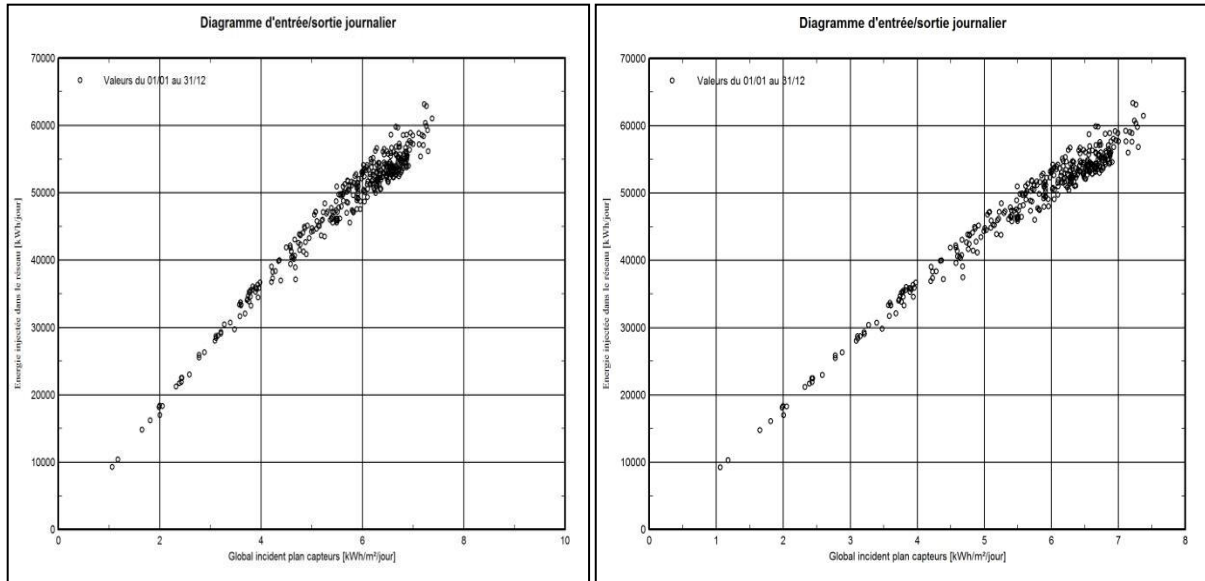


figure 4.4 Graphique d'entrée et sortie journalière

Le diagramme journalier Entrée/Sortie de la figure «4.6». Nous donne l'Énergie injectée dans le réseau en fonction l'Irradiation journalière globale incidente en [kWh/jour] pendant toute l'année dans la région étudiée. On va voir que l'énergie produite injectée dans le réseau électrique augmente en fonction du rayonnement incident global sur la surface des panneaux photovoltaïques. Alors pour le but de meilleur dimensionnement, il devrait s'agir approximativement d'une ligne droite légèrement saturée pour de grandes valeurs d'irradiation. Cette légère courbure est un effet de température. Si certains points (jours) s'écartent à des rayonnements élevés, cela indique des conditions de surcharge, c'est le cas de système injecté au réseau.



## 4.7 Graphique des pertes annuelles :

-a-

-b-

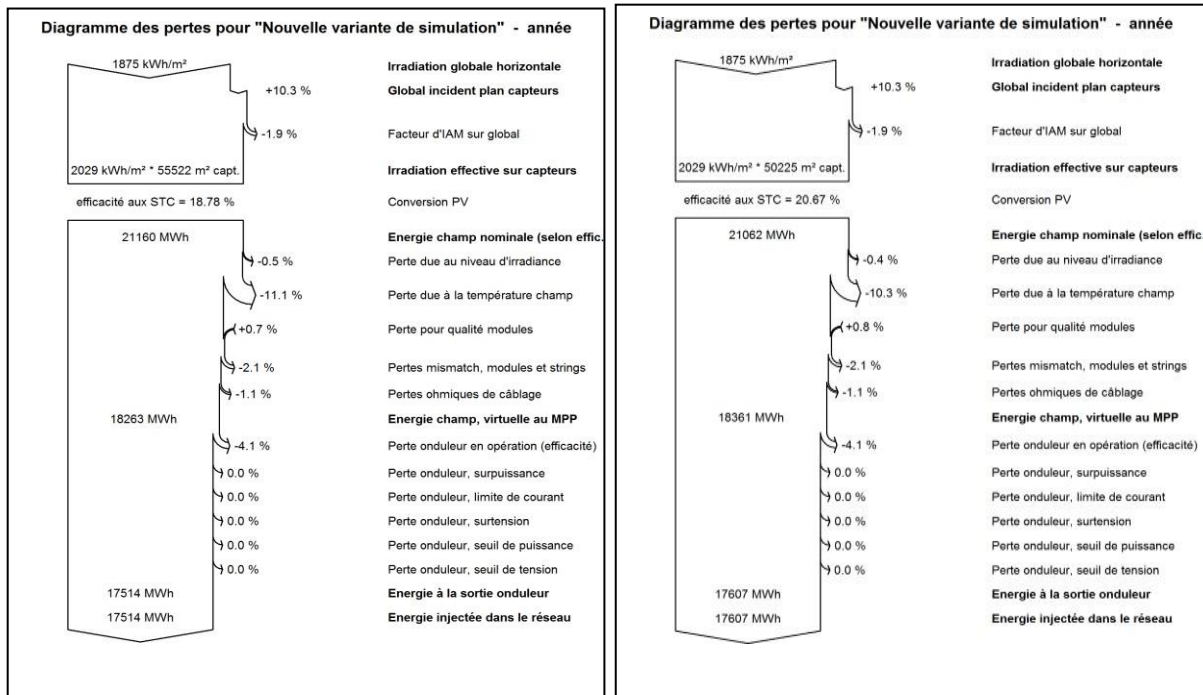


figure 4.5 Diagramme des pertes sur une année complète

Le diagramme de la figure «IV».Résume les pertes de la production de système PV à savoir: les pertes ohmiques du câblage, effet d'incidence, pertes dues a la température du champ, pertes dues a la qualité des modules,...etc.

- **Facteur d'IAM sur global:** La perte de **1.9 %** pour la limite de collection des irradiantes rasantes varie en fonction de la latitude. Afin de minimiser cette valeur on peut utiliser des panneaux à verre structuré ou changer le site beaucoup plus au sud.

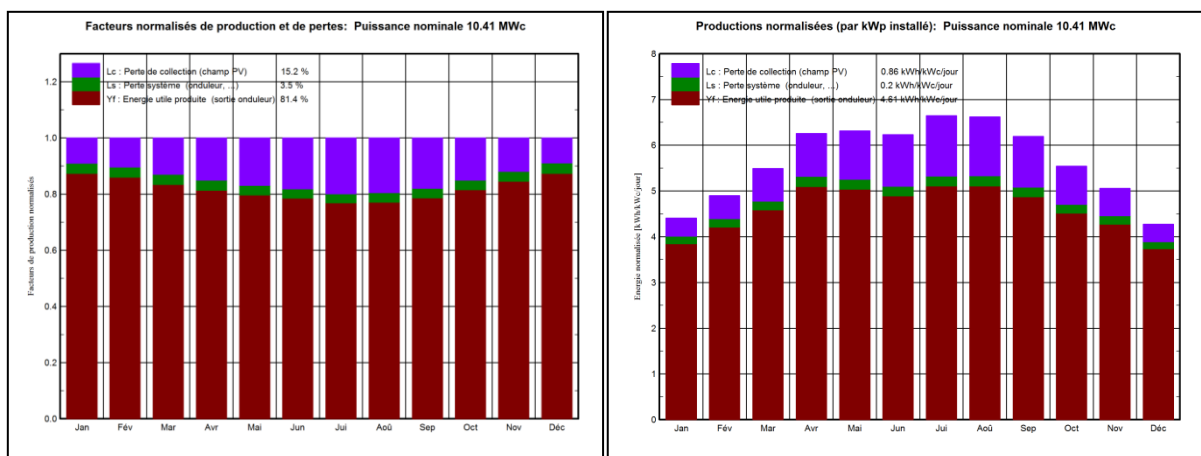
- **Perte due au niveau d'irradiance:** Cette perte de **0.5 %** pour la partie (a) et de **0.4 %** pour la partie (b) est due aux niveaux de lumière faible ou le courant PV est consommé en interne par la résistance shunt des cellules. cette résistance n'est pas modifiable par le concepteur.

- **Perte due à la température champ:** les perte de **11.1%** pour le système (a) et de **10.3 %** le système (b), sont due au température ambiante (plus que la température ambiante est élevé cette perte devient importante). Ce chiffre aussi dépend du mode de montage (le mode le plus favorable ou les panneaux sont parfaitement libres et ventilés sur les deux faces.

- **Perte du champ pour "mis match:** les pertes de **2.1 %** pour les deux système proviennent indirectement de la tolérance des panneaux.
- **Pertes ohmiques de câblage:** Cette perte de **1.1 %** pour les deux systèmes est due aux câbles on peut l'abaisser si on augmente les Sections des câbles.
- **Perte par rapport à la fonction MPP :4.1%** pour les deux systèmes , elle sont due généralement a la distance entre les panneaux.

#### 4.8 Évaluation des productions standardisées :

-a-



-b-

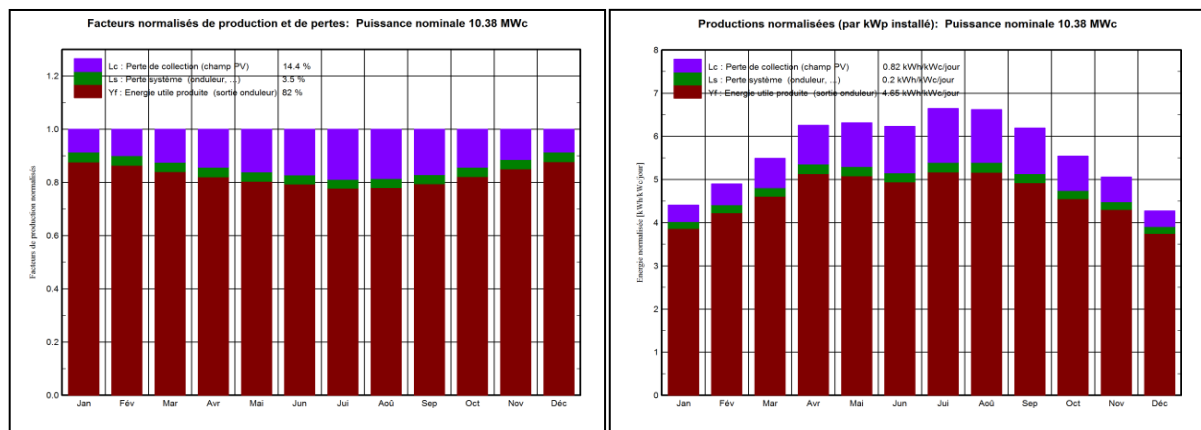


figure 4.6 Évaluation de la production d'énergie normalisée

La figure (4.7).Montre l'énergie produite par l'installation photovoltaïque durant une année pour chaque mois. Sur cette figure on remarque que l'énergie maximale est produite durant la

période d'été (juin –Aout).L'énergie minimale est produite durant le mois de Décembre. Les pertes  $L_c$ ,  $L_s$  sont les pertes correspondantes au champ PV on remarque que ces valeurs des pertes égales à **0.82** (KWh/kWp/jr) représentant un pourcentage de **14.4** %(bifaciale -b-). Et à **0.86** (KWh/kWp/jr) représentant un pourcentage de **15.2** %(mono faciale -a-)

#### 4.9 Indicateur de performance

-a-

-b-

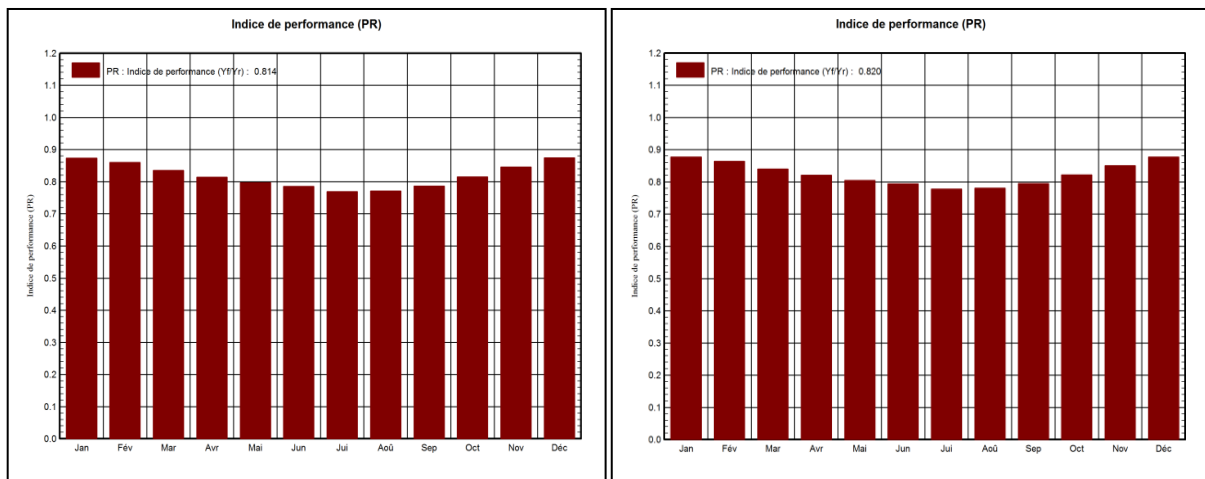


figure 4.7 indice de performance

L'indice de performance (PR) est l'une des valeurs les plus importantes pour l'évaluation de l'efficacité d'une installation photovoltaïque. L'indice de performance désigne le rapport entre le rendement énergétique réel et le rendement énergétique théoriquement possible. Il est en grande partie indépendant de l'orientation des panneaux et du rayonnement incident. Le PR peut atteindre **82%**(bifaciale -b-) et **81%**(mono faciale -a-) dans la figure «4.8» qui présente l'indice de performance obtenus pour notre site, on remarque que ce coefficient varie au cours de l'année. Il s'agit essentiellement d'un effet de la température des capteurs. Rappelons que la puissance fournie par un champ PV diminue avec la température.

## 4.10 Bilans énergétiques

-a-

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	DiffHor kWh/m <sup>2</sup>	T_Amb °C	GlobInc kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	EArray MWh	E_Grid MWh	PR ratio
January	95.1	40.00	12.17	136.6	134.6	1295	1242	0.874
February	106.0	47.70	14.30	137.2	135.0	1281	1228	0.860
March	149.3	72.60	19.94	170.3	167.0	1542	1480	0.835
April	181.8	83.20	24.33	187.7	184.1	1661	1591	0.814
May	207.1	96.30	29.93	195.8	191.6	1695	1625	0.797
June	205.6	96.20	33.36	186.9	182.6	1594	1528	0.786
July	223.7	88.60	36.53	206.1	201.2	1720	1649	0.769
August	205.5	84.20	35.67	205.3	201.2	1720	1649	0.771
September	167.7	71.00	32.02	185.7	182.4	1587	1521	0.787
October	137.6	59.90	26.35	171.8	169.0	1519	1458	0.815
November	106.4	39.70	19.06	151.7	149.5	1392	1336	0.846
December	89.0	37.50	13.51	132.5	130.6	1257	1206	0.874
Year	1874.8	816.90	24.82	2067.6	2028.9	18263	17514	0.814

-b-

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	DiffHor kWh/m <sup>2</sup>	T_Amb °C	GlobInc kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	EArray MWh	E_Grid MWh	PR ratio
January	95.1	40.00	12.17	136.6	134.6	1296	1243	0.877
February	106.0	47.70	14.30	137.2	135.0	1283	1230	0.864
March	149.3	72.60	19.94	170.3	167.0	1548	1485	0.840
April	181.8	83.20	24.33	187.7	184.1	1669	1599	0.821
May	207.1	96.30	29.93	195.8	191.6	1706	1636	0.805
June	205.6	96.20	33.36	186.9	182.6	1606	1540	0.794
July	223.7	88.60	36.53	206.1	201.2	1735	1664	0.778
August	205.5	84.20	35.67	205.3	201.2	1736	1663	0.781
September	167.7	71.00	32.02	185.7	182.4	1599	1533	0.795
October	137.6	59.90	26.35	171.8	169.0	1528	1466	0.822
November	106.4	39.70	19.06	151.7	149.5	1396	1340	0.851
December	89.0	37.50	13.51	132.5	130.6	1258	1207	0.878
Year	1874.8	816.90	24.82	2067.6	2028.9	18361	17607	0.820

**Tableau 4.2 bilan énergétique**

Le tableau suivant résume le bilan de l'énergie reçu et délivrée par les deux centrales durant une année par mois. D'après le tableau des bilans et les résultats, on enregistre une production annuelle de 17514MWh (système « a ») et de 17607MWh (système « b ») ; la plus importante respectivement à 1649 MWh et 1664MWh , valeurs atteinte au mois de juillet.

## 4.11 Énergie totale injectée dans le réseau au fil du temps

-a-

Nouvelle variante de simulation													
Sommes horaires mensuelles pour E_Grid [MWh]													
	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H
Janvier	0	0	62	122	160	181	187	179	164	119	68	0	0
Février	0	2	55	106	144	169	179	176	160	128	84	25	0
Mars	0	25	81	130	178	198	203	200	183	148	95	39	0
Avril	5	42	102	155	191	214	212	201	181	148	97	42	2
Mai	13	52	107	158	192	209	214	204	180	146	95	45	10
Juin	15	47	98	142	177	197	200	191	170	138	93	47	13
Juillet	12	44	101	152	187	206	212	208	190	157	110	56	15
Août	7	42	101	153	191	215	220	213	192	155	103	49	8
Septembre	1	40	97	148	182	204	212	203	177	141	86	30	0
Octobre	0	40	102	154	191	215	210	194	165	120	61	5	0
Novembre	0	20	89	142	178	199	204	187	158	109	49	0	0
Décembre	0	0	70	124	161	184	183	174	150	111	49	0	0
Année	52	356	1064	1687	2133	2391	2435	2330	2069	1621	989	338	48

-b-

Nouvelle variante de simulation													
Sommes horaires mensuelles pour E_Grid [MWh]													
	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H
Janvier	0	0	62	122	160	182	187	180	164	119	68	0	0
Février	0	1	55	106	145	169	179	176	161	128	84	25	0
Mars	0	25	81	131	178	199	204	201	184	148	95	39	0
Avril	4	42	102	156	192	215	213	203	182	149	97	42	2
Mai	13	52	107	158	194	211	217	206	181	147	96	45	10
Juin	15	47	98	143	179	199	202	193	171	139	93	47	13
Juillet	12	44	101	153	189	208	215	210	192	159	110	56	15
Août	7	42	101	154	193	217	223	216	194	157	104	49	8
Septembre	1	40	97	149	183	206	214	205	179	142	86	30	0
Octobre	0	40	102	155	192	216	212	196	166	120	61	5	0
Novembre	0	20	89	142	179	200	206	188	158	109	49	0	0
Décembre	0	0	69	124	161	185	183	175	150	111	48	0	0
Année	51	355	1064	1693	2145	2409	2455	2349	2083	1628	991	338	47

**Tableau 4.3 Quantité d'énergie maximale injectée dans le réseau par heure**

Le tableau « 4.2» représente l'énergie horaire maximale injectée au réseau de chaque mois et on conclura l'énergie max injectée chaque année. On remarque que l'énergie max injectée au réseau chaque année vaut 2435 (MWh) pour le système (a) avec une énergie max injectée de 220 (MWh) et de 2455(MWh) pour le système (b) , avec une énergie max injectée de 223 (MWh) .

#### 4.12 Évaluation financière

La figure (4.11) décrit l'évaluation financière des deux systèmes

-a-

Installation costs			
Item	Quantity units	Cost EUR	Total EUR
PV modules TSM-DEG15H-20-(II)-385	27040	214.00	5786560.00
Inverters Soleil 200	52	200.00	10400.00
Total			5796960.00
Depreciable asset			5796960.00

-b-

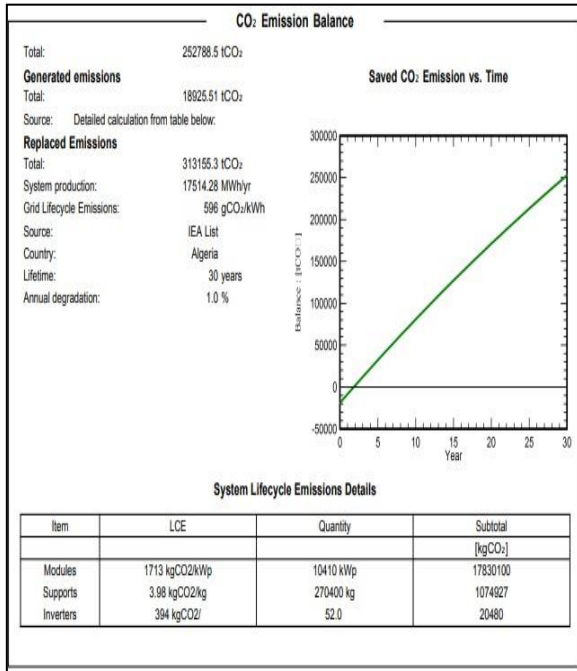
Installation costs			
Item	Quantity units	Cost EUR	Total EUR
PV modules JKM565M-7RL4-V	18370	282.00	5180340.00
Inverters Soleil 200	52	200.00	10400.00
Total			5190740.00
Depreciable asset			5190740.00

**Tableau 4.3 cout d'investissement**

on remarque que l'investissement initial du système (b) bifaciale est inférieur au système monofaciale (a), malgré le fait que le premier système a besoin de 18370 panneaux bifaciales pour un total de 5190740 euros, en revanche le deuxième système a besoin de 27040 panneaux monofaciales pour un total de 5796960 euros.

## 4.13 Émissions de gaz à effet de serre évitées

-a-



-b-

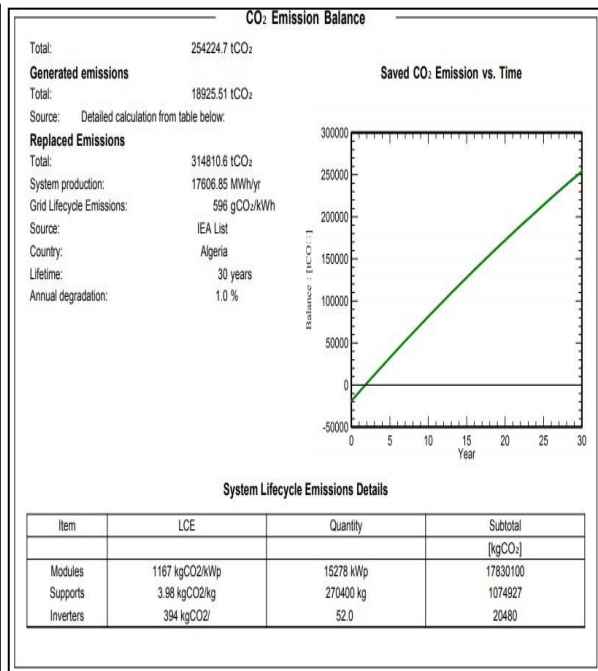


figure 4.8 Émissions de gaz à effet de serre évitées

La figure (4.12) nous montre la quantité de GES que les deux systèmes évitent de rejeter dans l'atmosphère, avec un total de 252788.5 tCO<sub>2</sub> pour le système (a) et de 254224.7 tCO<sub>2</sub> pour le système (b).

## 4.14 résumé des deux systemes

- La figure 4.13 résume l'ensemble des information de la centrale etablie avec les panneaux bifaces affichée dans le logiciel PVSYST.

The screenshot displays the PVSYST interface for a bifacial PV system. The main configuration window is titled 'Sous-champ' and includes the following sections:

- Nom et orientation du sous-champ:** Nom: Champ PV, Ordre: 1, Inclinaison: 30°, Azimut: 0°, Orient.: Plan incliné fixe.
- Aide au dimensionnement:** Entrez Pnom désirée: 800.0 kWc, ou surface disponible(modules): 3871 m².
- Sélection du module PV:** Jinkosolar, 565 Wp 37V, Si-mono, JKMS565M-7RL4-V, Depuis 2021, Datasheets 2021. Module bifacial, Système bifacial.
- Sélection de l'onduleur:** Siel, 180 kW, 330 - 700 V, LF Tr, 50 Hz, Soleil 200, Depuis 2006. Nbre d'onduleurs: 4. Tension de fonctionnement: 330-700 V, Puissance globale ond.: 720 kWac, Tension entrée maximale: 780 V.
- Dimensionnement du champ:** Nombre de modules et chaînes: Mod. en série: 12, Nb. chaînes: 118. Cond. de fonctionnement: Vmpp (60°C): 459 V, Vmpp (20°C): 536 V, Vco (-10°C): 699 V. Irradiance plan: 1000 W/m². Imp (STC): 1525 A, Isc (STC): 1604 A. Puiss. max. en fonctionnement (à 1000 W/m² et 50°C): 730 kW, Puiss. nom. champ (STC): 800 kWc.

The 'Liste des sous-champs' window shows a table of sub-fields:

Nom	#Mod	#Ond.	#Chaîne	#MPPT
Champ PV				
Jinkosolar - JKMS565M-7RL4-V	12	4	118	
Siel - Soleil 200	4	1		
Sous-champ #2				
Jinkosolar - JKMS565M-7RL4-V	12	4	118	
Siel - Soleil 200	4	1		
Sous-champ #3				
Jinkosolar - JKMS565M-7RL4-V	12	4	118	
Siel - Soleil 200	4	1		
Sous-champ #4				
Jinkosolar - JKMS565M-7RL4-V	12	4	118	
Siel - Soleil 200	4	1		
Sous-champ #5				
Jinkosolar - JKMS565M-7RL4-V	12	4	118	
Siel - Soleil 200	4	1		

The 'Résumé système global' window provides the following summary:

- Nombre de modules: 18370
- Surface modules: 50225 m²
- Nbre d'onduleurs: 52
- Puissance PV nominale: 10379 kWc
- Puissance PV maximale: 10146 kWDC
- Puissance AC nominale: 9360 kWAC
- Rapport Pnom: 1.109

Figure 4.9 resumé de la centrale PV (panneaux bifaces)

- La figure 4.14 résume l'ensemble des informations de la centrale etablie avec les panneaux monofaciales affichée dans le logiciel PVSYST.

The screenshot displays the PVSYST interface for a monofacial PV system. The main configuration window is titled 'Sous-champ' and includes the following sections:

- Nom et orientation du sous-champ:** Nom: Champ PV, Ordre: 1, Inclinaison: 30°, Azimut: 0°, Orient.: Plan incliné fixe.
- Aide au dimensionnement:** Entrez Pnom désirée: 800.0 kWc, ou surface disponible(modules): 4267 m².
- Sélection du module PV:** Trina Solar, 385 Wp 34V, Si-mono, TSM-DEG15H-20-(11)-385, Depuis 2020, Datasheets 2020. Modules nécessaires approx.: 2078.
- Sélection de l'onduleur:** Siel, 180 kW, 330 - 700 V, LF Tr, 50 Hz, Soleil 200, Depuis 2006. Nbre d'onduleurs: 4. Tension de fonctionnement: 330-700 V, Puissance globale ond.: 720 kWac, Tension entrée maximale: 780 V.
- Dimensionnement du champ:** Nombre de modules et chaînes: Mod. en série: 13, Nb. chaînes: 160. Cond. de fonctionnement: Vmpp (60°C): 454 V, Vmpp (20°C): 536 V, Vco (-10°C): 698 V. Irradiance plan: 1000 W/m². Imp (STC): 1534 A, Isc (STC): 1605 A. Puiss. max. en fonctionnement (à 1000 W/m² et 50°C): 728 kW, Puiss. nom. champ (STC): 801 kWc.

The 'Liste des sous-champs' window shows a table of sub-fields:

Nom	#Mod	#Ond.	#Chaîne	#MPPT
Champ PV				
Trina Solar - TSM-DEG15H-2...	13	4	160	
Siel - Soleil 200	4	1		
Sous-champ #2				
Trina Solar - TSM-DEG15H-2...	13	4	160	
Siel - Soleil 200	4	1		
Sous-champ #3				
Trina Solar - TSM-DEG15H-2...	13	4	160	
Siel - Soleil 200	4	1		
Sous-champ #4				
Trina Solar - TSM-DEG15H-2...	13	4	160	
Siel - Soleil 200	4	1		
Sous-champ #5				
Trina Solar - TSM-DEG15H-2...	13	4	160	
Siel - Soleil 200	4	1		

The 'Résumé système global' window provides the following summary:

- Nombre de modules: 27040
- Surface modules: 55522 m²
- Nbre d'onduleurs: 52
- Puissance PV nominale: 10410 kWc
- Puissance PV maximale: 10141 kWDC
- Puissance AC nominale: 9360 kWAC
- Rapport Pnom: 1.112

Figure 4.10 resumé de la centrale PV (panneaux monofaciales)



## **4.2 Conclusion**

Dans ce chapitre , Suite à notre simulation et l'étude de la centrale PV raccordée au réseau électrique, ou on a présenter les résultats de la simulation pour les deux types de panneaux utilisées, tel que tous les graphes et les tableaux . Afin d'avoir l'évaluation technique ,économique, énergétique et l'impact envirennementale .

## **Conclusion générale**

Ce travail de simulation d'une centrale PV de 10 MW raccordée au réseau , avec mise en avant sur la comparaison entre les deux technologies de panneaux (l'une bifaciale et l'autre monofaciale ) , ce raccordement au reseau diminue le cout de la partie attribuée au stockage de l'énergie électrique .

Le logiciel PVSYST nous a permis de dimensionner le nombre et le type de modules PV de notre centrale , et d'observer leurs comportement tout au long de l'année, grace a des graphiques et tableaux détaillés.

La simulation nous a permis de faire la comparaison technique , énergétique , économique et environnementale entre les deux types de technologie de panneaux utilisés .

La centrale PV de 10MW dotée de panneaux bifaciales represente en gain en matière de superficie et de terrassement (5000m<sup>2</sup>) , un gain aussi en matiere de nombre de panneau installés par rapport a la technologie monofaciale , ainsi qu'a une durée de vie de 30 ans, 5 ans de plus que la technologie précédente .

En conclusion , on recommande vivement la technologie bifaciale pour les centrale PV raccordé au réseau , et ce pour ses nombreuses avantages .

Mon stage effectué au sein de SONATRACH m'a permis d'acquérir beaucoup de savoir sur la technique et le terrain , ainsi qu'a la maitrise des logiciels tel que PVSYST.

## References bibliographiques

- [1] **C. DJILI et K. FAREB** , PFE cycle de master «Etude d'impact d'une centrale photovoltaïque sur un réseau électrique», U.M.M.T.O (2017)
- [2] **Hamidi A et Bouzouaoui H** , PFE cycle de master «Etude et conception d'une centrale solaire photovoltaïque», Université de m'sila (2017)
- [3] **T. Ackermann et G. Andersson** , «Wind Energy: Renewable Energy and the Environment», (Vol. 42, No. 16, 2008)
- [4] **R. DiPippo** , «Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact », la revue Butterworth-Heinemann.
- [5] **Clarence SEMASSOU**, "AIDE A LA DECISION POUR LE CHOIX DE SITES ET SYSTEMES ENRGETIQUES ADAPTES AUX BESOINS DU BENIN", thèse de doctorat de l'université du BORDEAUX 1, 15 Décembre 2011.
- [6] **Gary D. Price** «Renewable Power and Energy», Volume II\_, Wind and Thermal Systems-Momentum Press (2018)
- [7] **H. Belmili, M. Ayad, E. Berkouk et M. Haddadi**, "Optimisation de dimensionnement des installations photovoltaïques autonomes – Exemples d'applications, éclairage et pompage au fil du soleil ,"Revue des énergies renouvelables, 2008.
- [8] **T. Tran-Quoc, C. Le Thi Minh, S. Bacha, C. Kieny**, "Behaviour of Grid-Connected Photovoltaic Inverters in Islanding Operation", IEEE Power Tech, Trondheim, Norvege (2011)
- [9] **A. Demirbas**, « Impacts politiques, économiques et environnementaux des biocarburants», revue Applied Energy, volume 86, numéro 1
- [10] site web : [www.connaissancedesenergies.org](http://www.connaissancedesenergies.org)
- [11] **Ahmed F. Zobaa** - Renewable Energy Technology - (2011, World Scientific Publishing Company)
- [12] **KHERCHI Mouhamed**, "Type d'onduleur dans une centrale photovoltaïque connectée au réseau électrique, Recherche et Développement, Alger 2014.

- [13] **Sylvain Brigand**, “Dimensionnement installation et mise en œuvre maintenance“, Installations solaires photovoltaïques, 2011.
- [14] site web : <https://sonatrach.com/exploration-production>
- [15] site web : [www.pv-magazine.com](http://www.pv-magazine.com)
- [16] **N.Y El HAMZAOUI** , «Intégration des Stations Photovoltaïques dans les Systèmes Electriques», Université d’Adrar Ahmed Draïa (2017)
- [17] **C. Le Thi Minh, T. Tran-Quoc, S. Bacha, C. Kieny, P. Cabanac, D. Goulielmakis, C.Duvauchelle** “Behaviors of photovoltaic systems connected to MV network during faults”, 26th EUPVSEC, Humburg, Germany (2011)
- [18] **B. EQUER**. Energie solaire photovoltaïque. Volume I – Physique et technologie de la conversion photovoltaïque. CNRS. Edition ellipses, 1993.
- [19] **F. Lasnier**, T. G. Ang, « Photovoltaic Engineering Handbook », IOP Publishing Ltd.1980.ISBN 0-85274-311-4.
- [20] **A.Labouret , M.Villoz** , Energie solaire photovoltaïque , 3eme edition dunod, paris,2006.
- [21] **F. Bouchtouche cherfa** «Etude et réalisation d’une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT». Mémoire de magister, Ecole National Polytechnique Elharach, 2004. [22] [www.hisour.com/](http://www.hisour.com/)
- [ 23] **Juan Bisquert** - The Physics of Solar Cells\_ Perovskites, Organics, and Photovoltaic Fundamentals-CRC Press (2018)
- [24] **H.Yotto** « Etude et conception d’une mini centrale PV » mémoire fin d’études Master 2 IE Bénin 2011
- [25] **Pierre VANGELUWE** «Solaire photovoltaïque » Power green- solaire développement durable, Génie électrique, 2005.
- [26] **Freundlich, Alexandre\_ Reinders, Angèle\_ Sark, Wilfried van\_ Verlinden, Pierre** - Photovoltaic solar energy \_ from fundamentals to applications (2017)
- [27] **M. BURESCH**. Photovoltaic energy systems. McGraw-Hill U.S.A, 1983.

- [28] **Michaël Bressan**. Développement d'un outil de supervision et de contrôle pour une installation solaire photovoltaïque. Electronique. Université de Perpignan, 2014.
- [29] **AMARA .K**, PFE cycle master «Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension.», UMMTO (2015)
- [30] : **M .BELHADJ** ; Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome Mémoire de Magister ; Centre Universitaire De Bechar ; 2008.
- [31]: <https://mypower.engie.fr>
- [32] : **R. Chenni, M. Makhlouf, T. Kerbache, A. Bouzid**, "A detailed modeling method for photovoltaic cells", Energy Volume 32, Issue 9, September 2007, Page(s): 1724– 1730
- [33] : Pompage photovoltaïque «guide à l'intention des ingénieurs et techniciens, Institut de L'énergie et de l'environnement de la francophonie » ; Université d'OTTAWA.
- [34] **IDRISS HADJ MAHAMMED** « Modalisation du générateur photovoltaïque » thèse de magister en électronique *ENP*, 2002.
- [35] : [www.pvsyst.com/fr](http://www.pvsyst.com/fr)
- [36] **M. Amarouyache**, « Contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque ». Université Canstantine 1, 2014.
- [37] : <https://www.academia.edu>
- [38] : <https://espace.etsmtl.ca>
- [39] : <https://knowledge-center.solaredge.com/>
- [40] : [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)
- [41] : **KADRI. M ,M. Boumaza,M. Semaï Farouq-** Évaluation quantitative et qualitative d'un réservoir Cas du réservoir TAGI – SIF Fatima Bassin de Berkine
- [42] :<https://dualsun.com>
- [43] : <https://www.un.org>
- [44] : **Trevor M. Letcher, Vasilis M. Fthenakis** - A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems\_ With Special Focus on Photovoltaic Systems-Elsevier (2018)

[45] : <https://www.monkitsolaire.fr>

[46] : <https://www.revolution-energetique.com>