



République Algérienne Démocratique  
Et Populaire

Université Saad Dahlab, Blida-1

Faculté De Technologie

Département Des Énergies Renouvelables

Spécialité De Conversion

Photovoltaïque

Mémoire Pour obtention du  
**Master en Énergies Renouvelables**

Thème :

**Etude de l'influence de la température et de  
l'éclairement sur les performances des centrales  
photovoltaïques au grand sud**

Réalisé par :

Bahri Mohamed  
Khelil Cherfi Yassine

Soutenu devant le jury composé par :

Monsieur T. Doumaz	Professeur	USDB	Président
Madame A. Bedia	Maitre de conférence B	USDB	Examineur
Dr. Nedjma Aouchiche	Maitre de recherche	CDER	Encadreur
Dr. Rachid Boukenoui	Maitre de conférence	USDB	Co-encadreur

Novembre 2021

## Résumé en arabe

يوفر إنتاج الكهرباء من الطاقات المتجددة حلا معاصرا لا يمكن إستغناء عنه، والذي يساهم في تقليل إنتاج طاقة أحفورية وتلوث بيئي.

في هذه الدراسة، قدمنا تحليل أداء المحطات الكهروضوئية المتصلة بالشبكة في جنوب الجزائر، بإختلاف اماكن وظروف المناخية وذلك بإستعانة بالبيانات إستطاعة و طاقة المولدة واحوال طقس لكل محطة شمسية.

الكلمات الدالة

الكهروضوئية، محطة، متصلة بالشبكة، حالة الطقس، إستطاعة، الطاقة.

## Résumé en français

La production d'électricité à partir d'énergies renouvelables apporte une solution incontournable et contemporaine, qui contribue à réduire la production d'énergie fossile et la pollution de l'environnement.

Dans cette étude, nous avons présenté une analyse de la performance des stations photovoltaïques connectées au réseau dans le sud de l'Algérie, dans différents endroits et conditions climatiques, en utilisant des données de la puissance et de l'énergie d'électricité et des conditions météorologiques pour chaque centrale solaire.

Mots clés

Photovoltaïque, centrale, raccordé au réseau, condition météorologique, énergie, puissance.

## Abstract

The production of electricity from renewable energies provides an indispensable and contemporary solution, which contributes to reducing fossil energy production and environmental pollution.

In this study, we presented an analysis of the performance of grid-connected photovoltaic stations in southern Algeria, in different places and climatic conditions, using data of energy and power generation and weather conditions for each solar station.

Key words

Photovoltaic, power station, connected to the network, weather condition, energy, power

**Dédicaces**

*À Nos parents*

*Nos familles*

*Nos amis*

## Remerciements

*Mes sincères remerciements vont :*

*↳ À Dieu*

*- à monsieur T. Doumaz*

*Pour avoir accepté de présider ce jury ;*

*- à notre promotrice, madame N. Aouchiche et*

*Monsieur Rachid Boukenoui*

*Pour toutes leurs orientations pertinentes et pour leur disponibilité ;*

## Nomenclature - Symboles-Acronymes

**AC** : le courant alternatif.

**C** : le Vitesse de propagation.

**DC** : le Courant direct.

**E<sub>ph</sub>** : l'Energie du photon.

**FF** : le Facteur de forme.

**G** : le flux incident et ( $I_m$ ,  $V_m$ ) les Coordonnées du point de fonctionnement maximale.

**G<sub>h</sub>** : l'Irradiation global sur un plan horizontal.

**GPV** : le générateur photovoltaïque.

**h** : la constante de Planck.

**I<sub>cc</sub>** : le Courant de court-circuit.

**I<sub>mp</sub>** : le Courant à la puissance maximale.

**MPP** : le Maximum Power Point.

**P<sub>c</sub>** : Puissance crête

**P<sub>i</sub>** : la puissance incidente.

**P<sub>max</sub>** : le Puissance maximale produit par le module.

**PV** : le Photovoltaïque.

**S<sub>eff</sub>** : la surface effective de la cellule solaire.

**v** : la Fréquence.

**V<sub>co</sub>** : le Tension en circuit ouvert.

**V<sub>mp</sub>** : le Tension à la puissance maximale.

**W<sub>c</sub>** : le Watts crête.

**λ** : la Longueur d'onde.

# Sommaire

<b>SOMMAIRE .....</b>	<b>6</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>2</b>
<b>CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES .....</b>	<b>4</b>
1.1. INTRODUCTION .....	4
1.2. CONTEXTE ENERGETIQUE MONDIALE .....	4
1.2.1. Evolution de la consommation des énergies renouvelables dans le monde.....	4
1.2.2. Impact de l'adhésion des énergies renouvelables dans la production énergétique mondiale ..	6
1.2.3. Evolution du marché mondial des installations PV raccordées au réseau.....	6
1.3. STATISTIQUES DE L'ESSOR DU SECTEUR ENERGETIQUE ALGERIEN .....	6
1.3.1. Evolution de la consommation des énergies renouvelables dans le monde.....	6
1.3.2. Contribution des énergies renouvelables dans secteur énergétique algérien .....	8
1.3.3. Bilan Développement des installations électriques du parc ER Algérien.....	9
1.4. CADRE LÉGISLATIF EN ALGÉRIE : UN DÉCRET ET UNE LOI POUR LA PROMOTION DES ÉNERGIES RENOUVELABLES .....	11
1.5. LES NORMES RELATIVES AUX INSTALLATIONS SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES .....	12
1.5.1. Les Normes internationales.....	12
1.5.2. Les Normes nationales (Normes algérienne NA) .....	12
1.5.3. Répartition des normes dans une installation Photovoltaïque.....	14
1.6. CONCLUSION.....	16
<b>CHAPITRE 2 : LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUE .....</b>	<b>18</b>
2.1. INTRODUCTION .....	18
2.2. ENERGIE SOLAIRE .....	18
2.3. LE RAYONNEMENT SOLAIRE.....	18
2.4. TYPES DE RAYONNEMENTS .....	19
2.4.1. Rayonnement global.....	19
2.4.2. Rayonnement direct.....	19
2.4.3. Rayonnement diffus.....	19
2.4.4. Rayonnement réfléchi : .....	19
2.5. LE POTENTIEL SOLAIRE EN ALGERIE : .....	20
2.6. GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE (PV) : .....	20
2.6.1. Cellule PV.....	20
2.6.2. Principe de fonctionnement de cellule solaire : .....	21
2.6.3. Différents types de cellules solaires .....	22
2.6.4. Circuit équivalent d'une cellule solaire idéale et réelle .....	23
2.7. ASSOCIATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUE.....	24
2.7.1. Association en série des cellules .....	24
2.7.2. Association en parallèle des cellules.....	25
2.8. MODULE PHOTOVOLTAÏQUE .....	25
2.8.1. Caractéristiques électriques des modules solaires : .....	26
2.8.2. Effet du niveau d'éclairement sur le module photovoltaïque.....	28
2.8.3. Effet du niveau de Température sur le module photovoltaïque.....	28
2.9. PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE : .....	29
2.10. LES DIFFERENTS TYPES DE SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES .....	30
2.10.1. Système autonome .....	30
2.10.2. Système hybride .....	32

2.10.3. Systèmes raccordés au réseau .....	33
2.11. CONCLUSION .....	34
<b>CHAPITRE 3 : LES SYSTEMES PV RACCORDES AU RESEAU .....</b>	<b>36</b>
3.1. INTRODUCTION .....	36
3.2. LE RESEAU ELECTRIQUE .....	36
3.3. ARCHITECTURE DU RESEAU ELECTRIQUE .....	36
3.3.1. Réseaux de transport et d'interconnexion .....	36
3.3.2. Réseaux de répartition .....	37
3.3.3. Réseaux de distribution .....	37
3.4. LES POSTES ELECTRIQUES .....	38
3.5. TYPE DE POSTE ELECTRIQUE .....	38
3.6. COMPOSANTS DES POSTES ELECTRIQUES .....	38
3.6.1. Le transformateur .....	38
3.6.2. Le disjoncteur .....	38
3.6.3. Le sectionneur .....	39
3.6.4. Surveillance et contrôle .....	39
3.7. SYSTEME PV RACCORDE AU RESEAU .....	39
3.7.1. Principe de raccordement .....	39
3.7.2. Centrale de production d'énergie photovoltaïque .....	39
3.7.3. Les onduleurs .....	40
3.7.4. Technologies des onduleurs couplés au réseau .....	40
3.7.5. Régulation et recherche du MPP : .....	41
3.8. INTERACTION ENTRE LE RESEAU DE DISTRIBUTION ET LES SYSTEMES PV .....	42
3.8.1. Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution : .....	42
3.8.2. Influence du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques : .....	43
3.9. CHOIX DE L'ONDULEUR : .....	44
3.10. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES SYSTEMES CONNECTES AU RESEAU .....	45
3.10.1. Avantages .....	45
3.10.2. Inconvénients .....	46
3.11. CONCLUSION .....	46
<b>CHAPITRE 4 : ANALYSE DES PERFORMANCES DES CENTRALES PV RACCORDEES AU RESEAU</b>	
<b>INSTALLEES DANS LE SUD ALGERIEN .....</b>	<b>48</b>
4.1. INTRODUCTION .....	48
4.2. DESCRIPTION DES CENTRALES PV .....	48
4.2.1. Kebertane .....	48
4.2.2. Kounta .....	48
4.2.3. Reggane .....	49
4.2.4. Timimoune .....	49
4.3. RESULTATS ET INTERPRETATION .....	51
4.3.1. Conditions météorologiques .....	51
4.3.2. Analyse de la performance de la Centrale PV .....	54
4.4. CONCLUSION .....	60
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>62</b>

## Liste des figures

### Chapitre 1

FIGURE 1- 1 : VARIATION ANNUELLE DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE PRIMAIRE .....	5
FIGURE 1- 2 : CONSOMMATION MONDIALE D'ENERGIE PRIMAIRE PAR SOURCE .....	5
FIGURE 1- 3 : CAPACITE D'ENERGIE RENOUEVELABLE DANS LE MONDE EN 2019 .....	6
FIGURE 1- 4 : CONSOMMATION D'ENERGIE ANNULEE PAR SOURCE EN ALGERIE.....	7
FIGURE 1- 5 : L'EVOLUTION DE LA POPULATION ET DE LA CONSOMMATION D'ELECTRICITE EN ALGERIE. ....	7
FIGURE 1- 6 : EVOLUTION DE LA PRODUCTION D'ELECTRICITE EN ALGERIE FOR DANS LA PERIOD 1980-2018. ....	8
FIGURE 1- 7 : PRODUCTION D'ELECTRICITE EN ALGERIE PAR ER DE 2014 A 2018.....	9
FIGURE 1- 8 : 8 EMPLACEMENTS DES STATIONS PHOTOVOLTAÏQUES EN ALGERIE .....	10
FIGURE 1- 9 : NORMES DES COMPOSANTS D'UNE INSTALLATION CONNECTEE AU RESEAU.....	14
FIGURE 1- 10 : PANNEAU DE TECHNOLOGIE Cd Te .....	14
FIGURE 1- 11 : PANNEAU DE TECHNOLOGIE MONOCRISTALLIN.....	14
FIGURE 1- 12 : PANNEAU DE TECHNOLOGIE POLYCRISTALLIN.....	14
FIGURE 1- 13 : CONNECTEUR MC4 PARALLELE 5 ENTREES .....	15
FIGURE 1- 14 : CONNECTEUR MC4 SERIE.....	15
FIGURE 1- 15 : CONNECTEUR PARALLELE A DEUX ENTREES .....	15

### Chapitre 2

FIGURE 2-1 : ANALYSE SPECTRALE DU RAYONNEMENT SOLAIRE .....	19
FIGURE 2-2 : CELLULE SOLAIRE .....	20
FIGURE 2-3 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE CELLULE SOLAIRE .....	21
FIGURE 2-4 : CLASSIFICATION DE LA TECHNOLOGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE .....	22
FIGURE 2-5 : CIRCUIT EQUIVALENT DE DIODE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE REELLE. ....	24
FIGURE 2-6 : SCHEMA DE 3 CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES ASSOCIEES EN SERIE.....	24
FIGURE 2-7 : CARACTERISTIQUE I-V DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES RACCORDEES EN SERIE .....	24
FIGURE 2-8 : SCHEMA DE 3 CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES ASSOCIEES EN PARALLELE .....	25
FIGURE 2-9 : CARACTERISTIQUE I-V DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES RACCORDEES EN PARALLELE .....	25
FIGURE 2-10 : MODULE DE MONOCRISTALLINE (GAUCHE), CABLAGE DES CELLULES DANS UN MODULE (DROITE) .....	26
FIGURE 2-11 : TENSION DE CIRCUIT OUVERT V <sub>CO</sub> (GAUCHE) ET COURANT DE COURT-CIRCUIT I <sub>CC</sub> (DROITE) .....	27
FIGURE 2-12 : CARACTÉRISTIQUES I(V) ET P(V) D'UN GÉNÉRATEUR PV .....	27
FIGURE 2-13 : INFLUENCE DE L'ÉCLAIREMENT SUR LA CARACTÉRISTIQUE I-V ET P-V. ....	28
FIGURE 2-14 : INFLUENCE DE TEMPERATURE SUR LA CARACTERISTIQUE I-V ET P-V .....	29
FIGURE 2-15 : ASSOCIATION DES MODULES EN SÉRIE ET ON PARALLÈLE. ....	29
FIGURE 2-16 : DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUE. ....	30
FIGURE 2-17 : SCHÉMA DE PRINCIPE D'UN SYSTÈME PV AUTONOME SANS STOCKAGE (POMPAGE AU FIL DU SOLEIL) .....	31
FIGURE 2-18 : SCHÉMA DE PRINCIPE D'UN SYSTÈME PV AUTONOME AVEC STOCKAGE .....	32
FIGURE 2-19 : SCHÉMA DE PRINCIPE D'UN SYSTÈME PV HYBRIDE .....	32
FIGURE 2-20 : SCHÉMA D'UN SYSTÈME PV RACCORDÉ AU RÉSEAU (INJECTION DE LA TOTALITÉ DE LA PRODUCTION) .....	33
FIGURE 2-21 : SCHÉMA DE PRINCIPE D'UN SYSTÈME PV RACCORDÉ AU RÉSEAU (INJECTION DU SURPLUS DE PRODUCTION) .....	34

### Chapitre 3

FIGURE 3-1 : SCHEMA GENERALE DE PRODUCTION, TRANSPORT ET DISTRIBUTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE .....	37
FIGURE 3-2 : CONFIGURATION D'UN SYSTEME PV AVEC UN ONDULEUR.....	40
FIGURE 3-3 : CONFIGURATION D'UN SYSTEME PV AVEC PLUSIEURS ONDULEURS.....	40
FIGURE 3-4 : CLASSIFICATION DES ONDULEURS PV CONNECTES AU RESEAU .....	41

### Chapitre 4

FIGURE 4-1 : LA POSITION GEOGRAPHIQUE DES 4 CENTRALES. ....	49
FIGURE 4-1 : PHOTOS CORRESPONDANTS DE LA CENTRALE PV KABERTANE 3 MW. ....	50
FIGURE 4-2 : PHOTOS CORRESPONDANTS DE LA CENTRALE PV KOUNTA 6 MW.....	50
FIGURE 4-3 : PHOTOS CORRESPONDANTS DE LA CENTRALE PV REGGANE 5 MW.....	50
FIGURE 4-4 : PHOTOS CORRESPONDANTS DE LA CENTRALE PV TIMIMOUNE 9 MW.....	50



FIGURE 4-5 : VARIATION D'ÉCLAIREMENT DE LA CENTRALE PV DE TIMIMOUNE DURANT 2017.....	51
FIGURE 4-6 : VARIATION D'ÉCLAIREMENT DE LA CENTRALE PV DE KABERTANE DURANT 2017.....	51
FIGURE 4-7 : VARIATION D'ÉCLAIREMENT DE LA CENTRALE PV DE KOUNTA DURANT 2017.....	51
FIGURE 4-8 : VARIATION D'ÉCLAIREMENT DE LA CENTRALE PV DE REGGANE DURANT 2017.....	51
FIGURE 4-9 : VARIATION DE LA TEMPERATURE DE ..... LA CENTRALE PV DE TIMIMOUNE DURANT 2017.....	52 52
FIGURE 4-10 : VARIATION DE LA TEMPERATURE DE ..... LA CENTRALE PV DE KABERTANE DURANT 2017.....	52 52
FIGURE 4-11 : VARIATION DE LA TEMPERATURE DE ..... LA CENTRALE PV DE KOUNTA DURANT 2017.....	52 52
FIGURE 4-12 : VARIATION DE LA TEMPERATURE DE ..... LA CENTRALE PV DE REGGANE DURANT 2017.....	52 52
FIGURE 4-13 : VARIATION DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE MOYENNE POUR LES 4 CENTRALES PV DURANT 2017.....	53
FIGURE 4-14 : VARIATION DE LA VITESSE DE VENT MOYENNE POUR LES 4 CENTRALES PV DURANT 2017.....	53
FIGURE 4-15 : VARIATION DE LA VITESSE DE VENT MOYENNE POUR LES 4 CENTRALES PV DURANT 2017.....	54
FIGURE 4-16 : VARIATION MENSUELLE DES VALEURS MESUREES DES ENERGIES ES ET EI DU CENTRALE PV DE KABERTANE DURANT 2017.....	55
FIGURE 4-17 : VARIATION MENSUELLE DES VALEURS MESUREES DES ENERGIES ES ET EI DU CENTRALE PV DE ..... KOUNTA DURANT 2017.....	55 55
FIGURE 4-18 : VARIATION MENSUELLE DES VALEURS MESUREES DES ENERGIES ES ET EI DU CENTRALE PV REGGANE DURANT 2017.....	55
FIGURE 4-19 : VARIATION MENSUELLE DES VALEURS MESUREES DES ENERGIES ES ET EI DU CENTRALE PV DE TIMIMOUNE DURANT 2017.....	55
FIGURE 4-20 : ALLURE DE LA REPONSE DE LA PUISSANCE..... DE LA CENTRALE PV KABERTANE DURANT 2017.....	56 56
FIGURE 4-21 : ALLURE DE LA REPONSE DE LA PUISSANCE..... DE LA CENTRALE PV KOUNTA DURANT 2017.....	56 56
FIGURE 4-22 : ALLURE DE LA REPONSE DE LA PUISSANCE..... DE LA CENTRALE PV REGGANE DURANT 2017.....	56 56
FIGURE 4-23 : ALLURE DE LA REPONSE DE LA PUISSANCE..... DE LA CENTRALE PV TIMIMOUNE DURANT 2017.....	56 56
FIGURE 4-24 : INFLUENCE DE LA VARIATION DE L'ÉCLAIREMENT SUR LA VALEUR EFFICACE DE LA PUISSANCE AC DE LA CENTRALE KABERTANE DURANT 2017.....	57
FIGURE 4-25 : INFLUENCE DE LA VARIATION DE L'ÉCLAIREMENT SUR LA VALEUR EFFICACE DE LA PUISSANCE AC DE LA CENTRALE KOUNTA DURANT 2017.....	57
FIGURE 4-26 : INFLUENCE DE LA VARIATION DE L'ÉCLAIREMENT SUR LA VALEUR EFFICACE DE LA PUISSANCE AC DE LA CENTRALE REGGANE DURANT 2017.....	58
FIGURE 4-27 : INFLUENCE DE LA VARIATION DE L'ÉCLAIREMENT SUR LA VALEUR EFFICACE DE LA PUISSANCE AC DE LA CENTRALE TIMIMOUNE DURANT 2017.....	58
FIGURE 4-28 : LA VARIATION DE LA PUISSANCE EN FONCTION D'ÉCLAIREMENT DURANT LES JOURNEES CHOISIS DANS LA CENTRALE DE KOUNTA.....	59
FIGURE 4-1 : LA VARIATION DE LA PUISSANCE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DURANT LES JOURNEES CHOISIS DANS LA CENTRALE DE KOUNTA.....	59
FIGURE 4-2 : LA VARIATION DE LA PUISSANCE EN FONCTION DU TEMPS DURANT LES JOURNEES CHOISIS DANS LA CENTRALE DE KOUNTA.....	60

## Liste des tableaux

### Chapitre 1

TABLEAU 1-1 : LES STATIONS PHOTOVOLTAÏQUES EN ALGERIE .....	10
TABLEAU 1-2 : LES NORMES NATIONALES ALGERIENNES.....	13

### Chapitre 2

TABLEAU 2-1 : LE POTENTIEL SOLAIRE EN ALGERIE. ....	20
TABLEAU 2-2 : LE RENDEMENT ET LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DE DEFERENTE TECHNOLOGIE DE CELLULES SOLAIRE .....	23

### Chapitre 3

TABLEAU 3-1 : LISTE DE QUELQUES ONDULEURS PHOTOVOLTAÏQUES DISPONIBLES SUR LE MARCHE. ....	45
---	----

### Chapitre 4

TABLEAU 4-1 : UN TABLEAU RECAPITULATIF DECRIVANT LES 4 CENTRALES .....	49
--	----

---

# **Introduction Générale**

## Introduction Générale

Les énergies renouvelables se manifestent comme une solution potentielle à la réduction de la pollution. Parmi les moyens de production prometteurs (éolien, hydraulique...), le photovoltaïque apparaît aujourd'hui comme le plus approprié et le plus abouti à la production d'électricité d'origine renouvelable pour l'habitat. Ajoutons à cela la libéralisation du marché de l'électricité qui introduit des changements majeurs dans le domaine de l'énergie en encourageant la multiplication des producteurs indépendants et des productions décentralisées.

Dans le système électrique actuel, la majorité de l'énergie est injectée à partir des centrales de grandes puissances sur le réseau et une exploitation centralisée permet d'optimiser et gérer la production pour le bénéfice des clients.

Les systèmes photovoltaïques constituent alors une option intéressante pour notre pays, d'où l'élaboration du programme national des énergies renouvelables, dans le cadre de porter une aide à la réalisation de ce programme par ce modeste travail qui consiste à analyser les performances des centrales PV raccordés au réseau installées dans le sud algérien.

Ce travail a pour but l'étude expérimentale des performances des systèmes PV connecté au réseau. Nous avons voulu analyser le comportement dynamique de ces systèmes installés au grand sud algérien. A cet effet, on a sélectionné quatre centrales PV qui sont situées respectivement à Kabertene, Reggane, Timimoune et Kounta. On a effectué une analyse comparative entre ces quatre centrales PV et sous différentes conditions climatiques.

La suite de de la thèse comprend **le chapitre 1** qui est consacré à l'état de l'art sur les énergies renouvelables à l'échelle mondiale et national. On parlera aussi dans ce chapitre du cadre législatif algérien et des normes internationales appliquées dans l'installations les systèmes PV connectés au réseau. Dans **le chapitre 2**, on donnera la définition de l'énergie solaire et ses caractéristiques, puis on présentera la construction des cellules photovoltaïques et leur principe de conversion ainsi que les différentes technologies des cellules PV, nous exposerons également les différentes configurations des systèmes PV et leurs composants. **Le Chapitre 3** passe en revue les informations sur le réseau électrique, les systèmes PV raccordés au réseau et les différents types des onduleurs et les critères de choix pour choisir ces onduleurs utilisés dans ces systèmes. **Le Chapitre 4** est dédié à l'analyse des performances des centrales PV raccordés au réseau dans le sud algérien, par l'étude des conditions météorologique, l'énergie et la puissance active de sortie de chaque centrale. La mémoire se termine par une conclusion générale qui discutera des objectifs de ce travail et récapitulera les résultats obtenus.

---

# **Chapitre 1 : Etat de l'art sur les énergies renouvelables**

# Chapitre 1 : Etat de l'art sur les énergies renouvelables

## 1.1. Introduction

L'utilisation de ressources énergétiques traditionnelles, telles que les combustibles fossiles, Le pétrole, le gaz naturel et le charbon sont les principales sources d'émissions de gaz à effet de serre et causent une pollution de l'environnement. La communauté scientifique a signalé que les ressources énergétiques renouvelables, qui sont respectueuses de l'environnement et disponibles dans presque toutes les régions du monde, sont la solution la plus fiable pour lutter contre les préoccupations du monde concernant la consommation d'énergie et le changement climatique. Par conséquent, de nombreux pays dans le monde depuis la dernière décennie ont investi et sécurisé des budgets énormes pour le développement de produits, la recherche et l'exploitation des énergies renouvelables.

Dans ce chapitre, nous présentons la tendance mondiale des énergies renouvelables et dans quelle échelle l'Algérie est appliquée cette énergie renouvelable.

## 1.2. Contexte énergétique mondiale

Le système énergétique mondial s'est développé rapidement depuis la révolution industrielle, et cette croissance s'est considérablement accélérée au cours des 50 dernières années. Les prochaines décennies pourraient voir des changements à grande échelle dans le système énergétique, en particulier à la lumière du changement climatique mondial. Cependant, l'ampleur et la direction de bon nombre de ces changements sont très incertaines.

### 1.2.1. Evolution de la consommation des énergies renouvelables dans le monde

Selon la Figure 1.1, La consommation mondiale d'énergie primaire a augmenté de 1,3 % en 2019. Ce taux dépasse le taux moyen obtenu sur 11 ans, qui est de 1,6 % par an, mais il reste inférieur à celui enregistré 2018 qui est égal à 2.8 %.

D'après la Figure 1.2, la croissance enregistrée en 2019 est due à l'utilisation des énergies renouvelables et du gaz naturel. Par contre, la consommation de charbon a connu une baisse considérable depuis 2003. Il est à noter que l'utilisation des énergies renouvelables a considérablement ralenti l'augmentation des émissions de carbone dont le taux abaissé de 0,5 % par rapport, au taux moyen enregistré sur les dernières 10 années [1].

### Consommation mondiale annuelle d'énergie primaire (%)

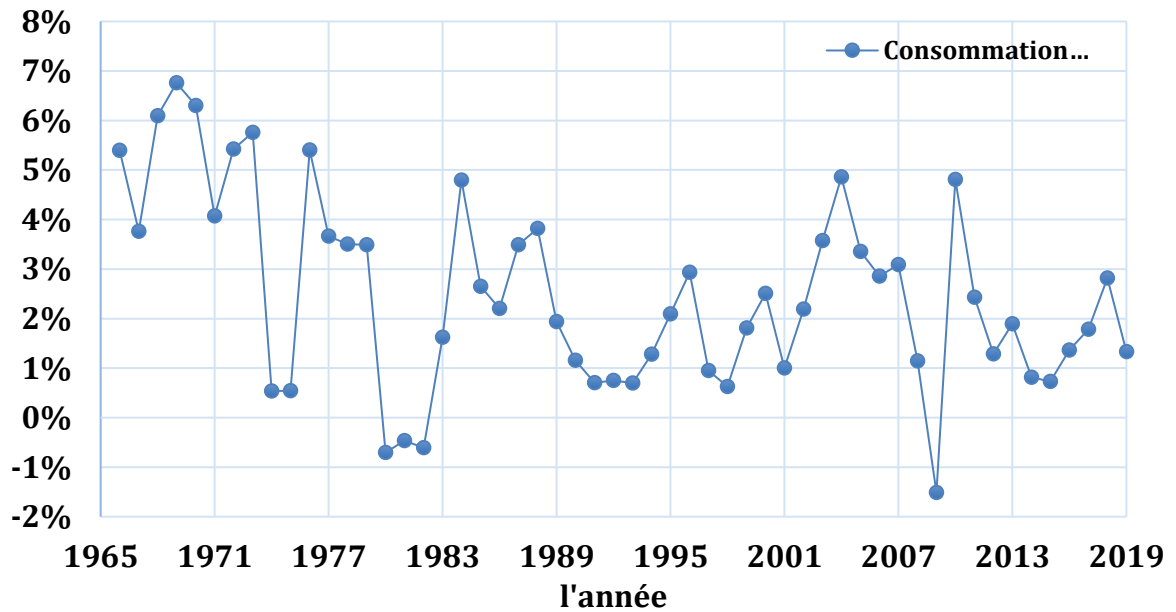


Figure 1- 1 : Variation annuelle de la consommation d'énergie primaire [2]

En 2019, les émissions mondiales de dioxyde de carbone liées à l'énergie n'ont pas augmenté au cours des deux dernières années bien que la demande finale d'énergie a augmenté. Cela est essentiellement dû à la baisse des émissions du secteur de l'énergie dans certains pays, qui est en étroite relation avec l'augmentation d'intégration des énergies renouvelables ainsi que l'amélioration de l'efficacité énergétique en adoptant certaines mesures telles que le passage du charbon au gaz [3].

### Consommation mondiale annuelle d'énergie primaire (TWh)

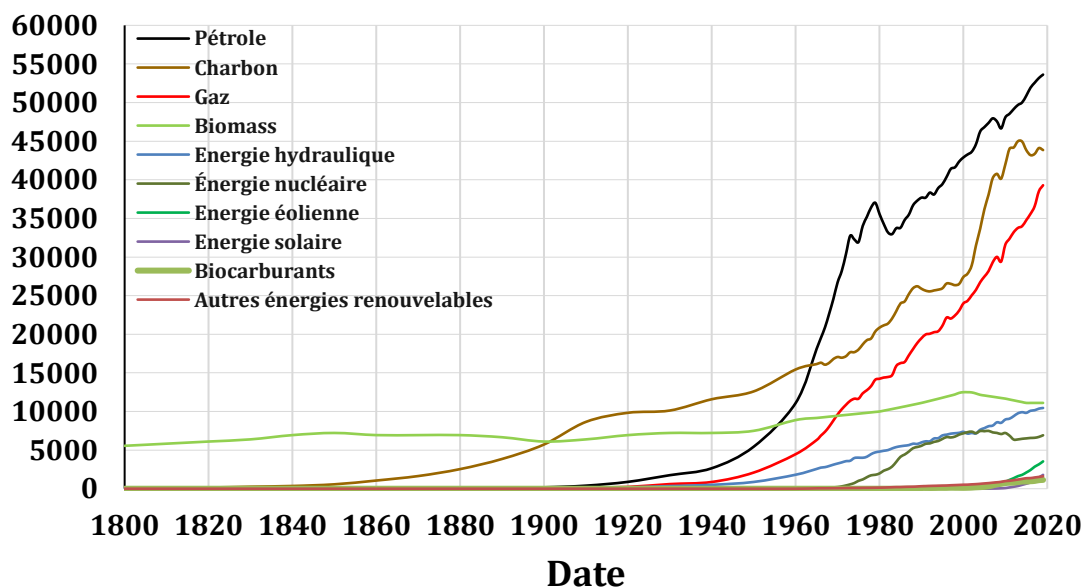


Figure 1- 2 : Consommation mondiale d'énergie primaire par source [2]

### 1.2.2. Impact de l'adhésion des énergies renouvelables dans la production énergétique mondiale

Les énergies renouvelables se sont imposées à l'échelle mondiale où fin 2018, plus de 90 pays avaient ont installé au moins 1 gigawatt de capacité de production, y compris l'hydroélectricité, tandis qu'au moins 30 une trentaine de pays avaient ont dépassé les 10 gigawatts de capacité.

D'après la Figure 1.3, la capacité hydraulique domine 47% de la génération d'électricité renouvelable dans le monde après avoir représenté plus de 60% dans les années précédentes. L'énergie éolienne vient à la seconde place avec un taux dépassant 23.5%, suivie de l'énergie photovoltaïque qui est passée à 22.8%. Cependant, la contribution de la géothermie et la biomasse à la production d'électricité renouvelable reste faible avec un taux de 1.2%.

D'après la Figure 1.3, la capacité hydraulique domine 47% de la génération d'électricité renouvelable dans le monde après avoir représenté plus de 60% dans les années précédentes. L'énergie éolienne vient à la seconde place avec un taux dépassant 23.5%, suivie de l'énergie photovoltaïque qui est passée à 22.8%. Cependant, la contribution de la géothermie et la biomasse à la production d'électricité renouvelable reste faible avec un taux de 1.2% [4].

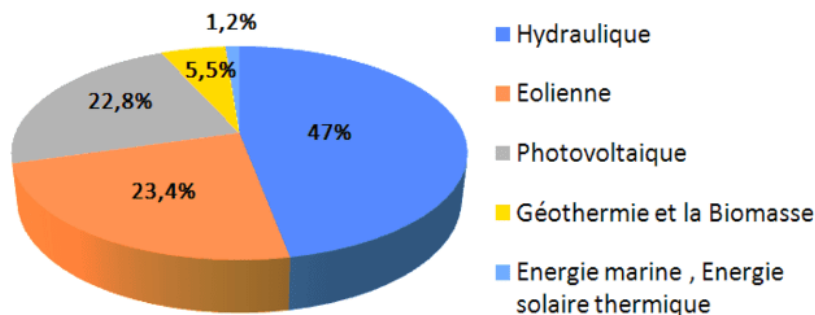


Figure 1- 3 : Capacité d'énergie renouvelable dans le monde en 2019

### 1.2.3. Evolution du marché mondial des installations PV raccordées au réseau

Le développement technologique dans le domaine PV a enregistré un taux remarquable en 2013, le marché PV global a augmenté de 40 GW pour aboutir à une performance de 116.9GW en 2019. En 2017, La Chine est le leader mondial en nombre d'installations PV cumulées (30%). Les USA occupent la seconde place (13%) suivie de l'Inde (8.8 %) et du Japon (7.0%). Tandis que les pays de tiers monde n'arrivent toujours pas à atteindre ce niveau de progrès dans le domaine PV.

## 1.3. Statistiques de l'essor du secteur énergétique algérien

### 1.3.1. Evolution de la consommation des énergies renouvelables dans le monde

L'Algérie est le 4ème pays africain avec 178,3 milliards de dollars de produit intérieur brut (PIB) par habitant. D'après la Figure 1.5, le pays dépend fortement de la production d'électricité à partir de combustibles fossiles tels que le gaz naturel et le pétrole. Ces sources ont des taux de contributions égaux respectivement à 64,84 % et 34,63 %. [5]



Consommation mondiale annuelle d'énergie primaire

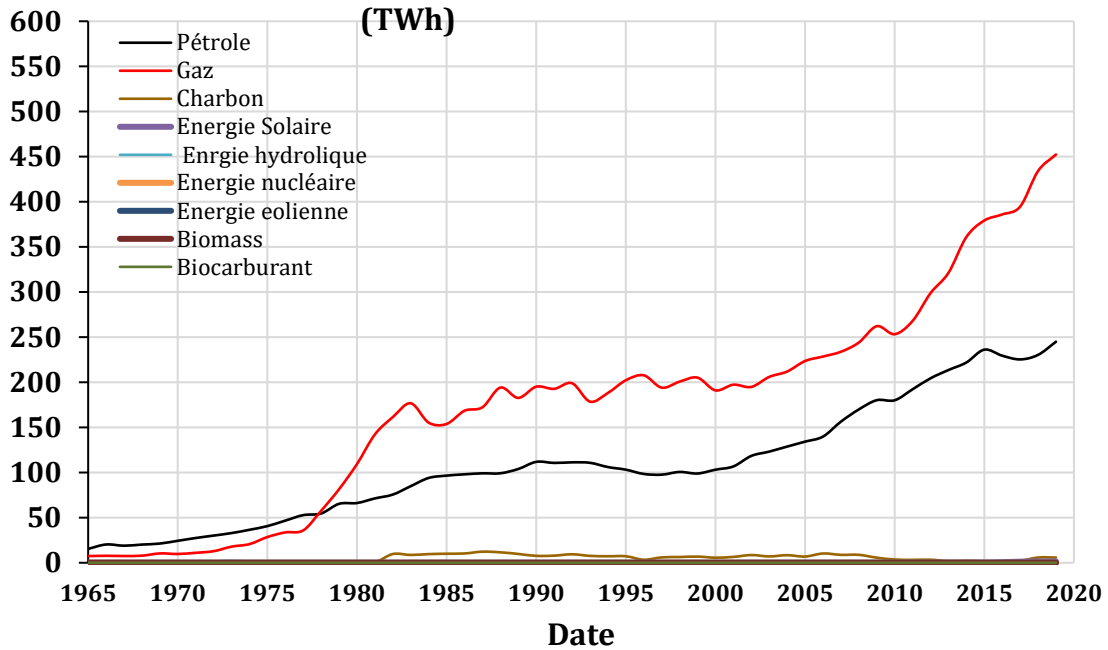


Figure 1- 4 : Consommation d'énergie annule par source en Algérie

Le gouvernement algérien à chercher à minimiser la dépendance énergétique aux en hydrocarbures. Il faut rappeler que cette source fossile, qui représente 99,47 % des ressources énergétiques du pays. Production d'électricité dans le cadre de la crise pétrolière. Comme le montre la Figure 1.4, L la production d'électricité est passée de 76,0 TWh en 2017 à 76,4 TWh en 2018, proportionnelle à la croissance démographique de près d'1 million de personnes. La demande de charge a augmenté de 7,4 % de 2007 à 2017. De plus, l'Algérie a pu exporter plus de 880 GWh d'électricité en 2017 vers les pays voisins comme la Tunisie et le Maroc. [6] [7] [8]

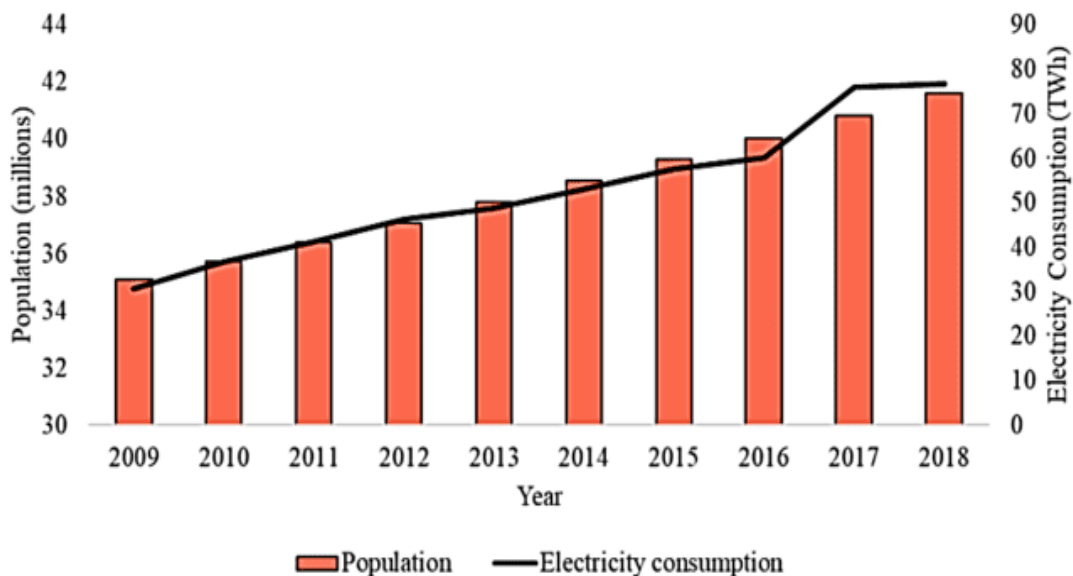


Figure 1- 5 : L'évolution de la population et de la consommation d'électricité en Algérie. [9]

Figure 1- 6 :

### 1.3.2. Contribution des énergies renouvelables dans secteur énergétique algérien

Le gouvernement a lancé des programmes de développement des ER depuis 1998. L'Algérie dispose de sources d'ER prometteuses telles que le photovoltaïque, l'hydroélectricité, l'éolien, la géothermie, la biomasse et le solaire en raison de sa situation géographique [15] [16]. D'après la Figure 1.6, les capacités de production d'électricité en Algérie, soit 20963 MW en 2019, sont plus destinées à satisfaire la Pointe Maximale Appelée (PMA) de la demande qui a atteint 15 656 MW, que pour répondre à une charge moyenne autour de 9000 MW sur une grande partie de l'année [4].

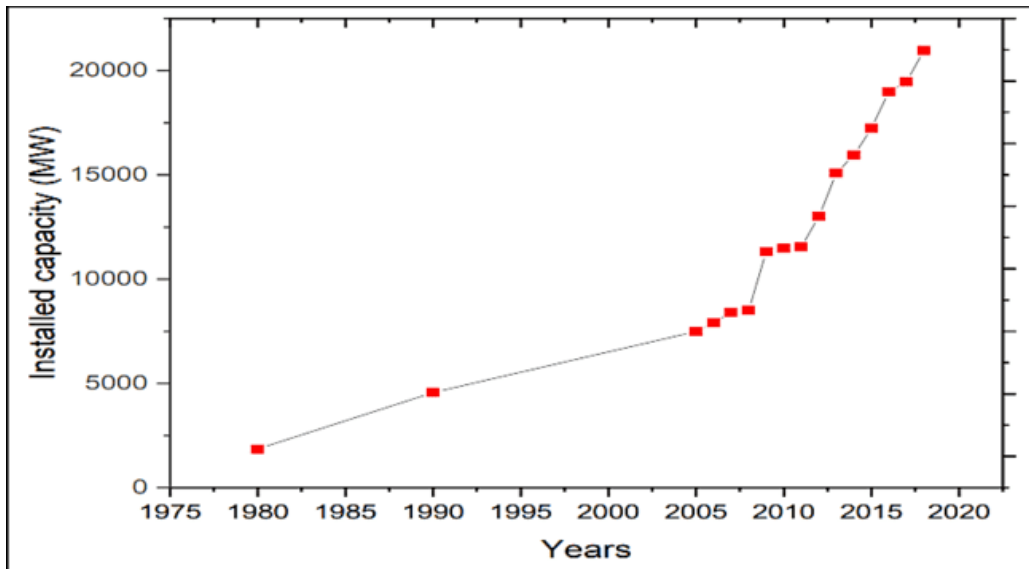


Figure 1- 7 : Evolution de la production d'électricité en Algérie for dans la période 1980-2018. [10]

Des efforts importants ont été faits par la société nationale de production d'électricité Sonelgaz et ses filiales pour augmenter la capacité de production nationale globale, qui a montré ces dernières années une évolution considérable de la capacité de production électrique installée. Il est passé de 7492 MW en 2005 à 20963 MW en 2018 [10].

Le plan directeur des énergies renouvelables en Algérie se concentre sur le développement de l'énergie solaire, avec un total de 13 500 MW de production solaire photovoltaïque prévue pour 2030. La plupart des installations photovoltaïques installées dans le pays visent à fournir de l'électricité aux zones rurales ayant des difficultés à étendre le réseau [9].

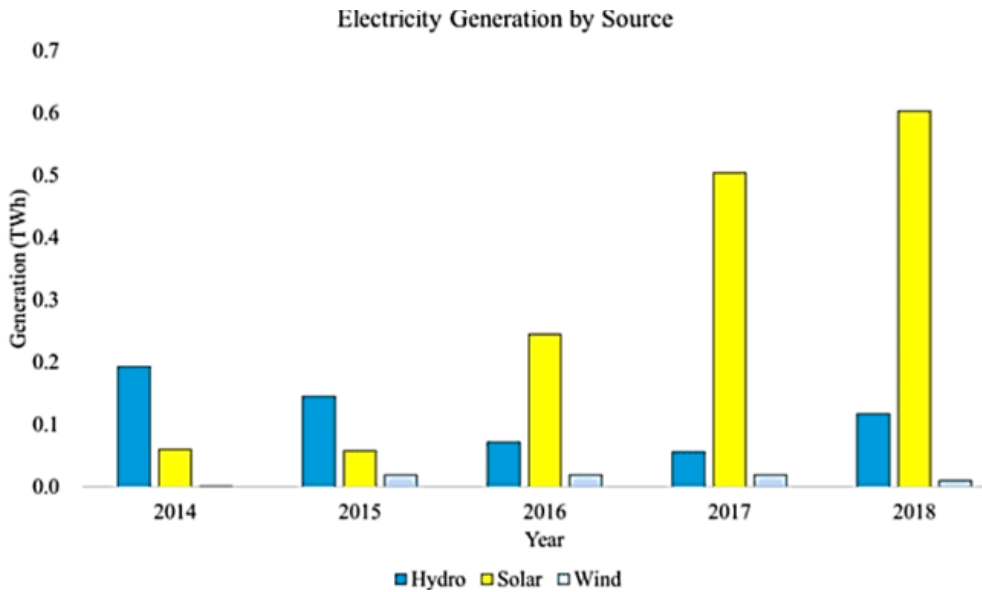


Figure 1- 8 : Production d'électricité en Algérie par ER de 2014 à 2018[6]

### 1.3.3. Bilan Développement des installations électriques du parc ER Algérien

Première centrale solaire du pays installée en 2011, et 22 centrales disponibles pour une capacité totale de 423 MW à fin 2019 (22 centrales solaires PV de 343 MWc plus une centrale pilote PV de 1.1 MWc, réalisées par SKTM/Sonelgaz, plus une centrale PV de 10 MWc réalisée par Sonatrach), soit sept fois moins que l'objectif de 3 000 MW d'ici 2020. Selon l'objectif initial, un total de 60 projets de centrales photovoltaïques étaient prévus pour la période 2011 à 2020. Au cours des dernières années, le pays s'est appuyé sur des modules solaires importés de pays tels que la France, l'Espagne et la Chine, ce qui a conduit à des projets solaires coûteux. Le gouvernement soutient l'entreprise de fabrication de modules solaires en exigeant des modules et systèmes photovoltaïques locaux dans l'appel d'offres pour les grands projets solaires. Par conséquent, plusieurs usines de modules solaires ont été développées en Algérie par des sociétés telles que Condor, ALPV, Aures Solaire et ENIE pour servir à des projets solaires nationaux. [11][12]

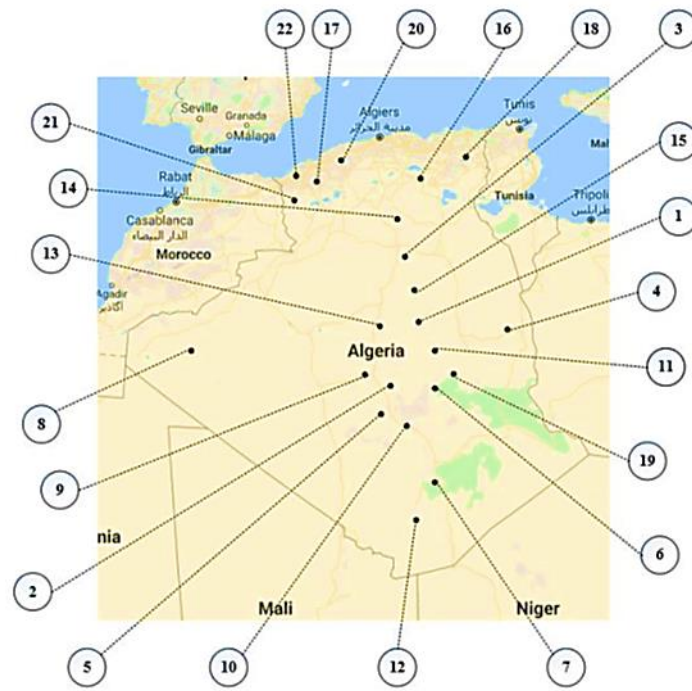


Figure 1- 9 : 8 Emplacements des stations photovoltaïques en Algérie [9]

	Station	Location	Capacité (MW)
1	SPP1	Hassi R'mel	25
2	SPE	Adrar	10
3	Ghardaïa	Ghardaïa	11
4	Djanet	Illizi	3
5	Adrar	Adrar	20
6	Kabertene	Adrar	13
7	Tamanrasset	Tamanrasset	13
8	Tindouf	Tindouf	9
9	Z.Kounta	Adrar	6
10	Timimoun	Adrar	9
11	Reggane	Adrar	5

12	In-salah	Tamanrasset	5
13	Aoulef	Adrar	5
14	Ain EL-Lbel	Djelfa	20
15	Khang	Lghouat	20
16	Oued EL-Kebrit	Souk Ahras	15
17	Sedrate Leghzal	Naama	20
18	Ain EL-Melh	M'sila	20
19	EL-Hadjira	Tougourt	10
20	Ain Shouna	Saida	30
21	E.B.S Chikh	El Bayadh	24
22	Telga	Telemcene	12

Tableau 1-1 : Les Stations photovoltaïques en Algérie [9]

## 1.4. Cadre législatif en Algérie : un décret et une loi pour la promotion des Energies Renouvelables

La liste des textes législatifs et réglementaires relatifs à l'introduction, à la généralisation et à l'intégration des énergies renouvelables en Algérie sont :

- La loi 99-09 du 28 juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie.
- La loi 01-20 du 12 décembre 2001 relative à l'aménagement et au développement durable du territoire.
- La loi 02-01 du 5 février 2002 relative à l'électricité et à la distribution du gaz par canalisation (articles 9, 21, 26, 28, 95, 97, 98, 128 et 178).
- La loi 03-10 du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.
- Le décret exécutif 04-92 du 25 mars 2004 relatif aux coûts de diversification de la production d'électricité.
- Finalement, le projet de loi tant attendu, relatif à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable, introduit par le ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, approuvé en conseil du gouvernement et en Conseil des ministres le 30 novembre 2003, et signé le 14 août 2004.

Le texte réglementaire majeur défini par la loi n°02-01 du 5 février 2002 relative à l'électricité et à la distribution du gaz par canalisation dans son article 26 précise que « en application de la politique énergétique, la commission de régulation de l'électricité et du gaz peut prendre des mesures d'organisation du marché, à un prix minimal d'un volume minimal d'électricité produite à partir de sources d'énergies renouvelables ou de systèmes de cogénération ».

Le décret exécutif 04-92 du 25 mars 2004 relatif aux coûts de diversification de la production d'électricité stipule la prise en charge des surcoûts découlant de la production d'électricité à partir des énergies renouvelables.

Il est attribué aux producteurs d'électricité à partir de ces sources une prime pour chaque KWh produit, commercialisé ou consommé. Selon les sources des énergies renouvelables exploitées et leur puissance, cette prime varie de 100 à 300% et est de 300% pour le photovoltaïque.

Ce projet de loi va normalement constituer une base juridique pour l'établissement d'une batterie de textes d'applications et amener la commission de régulation de l'électricité et du gaz (CREG), à rédiger des textes fixant les conditions d'accès au réseau.

Autrement dit il s'agirait de rédiger un document définissant les conditions de raccordement et relations contractuelles avec le gestionnaire de réseau (contrat d'accès et convention d'exploitation) ainsi que les prescriptions techniques de raccordement.

Bien que la réglementation instaurée en matière de généralisation et d'intégration des énergies renouvelables en Algérie soit assez complète et détaillée, elle reste, cependant, inefficace sur le terrain pour plusieurs raisons :

- il faudrait que la prime de 300% soit explicitée par la CREG : allouée avant ou après installation de la centrale et sous quelles formes.
- manque de procédures spécifiques d'application : exonération des frais de douane des équipements solaires...
- contraintes d'ordre social liées à la prise de mesures environnementales.
- manque de sensibilisation des décideurs et des acteurs sociaux pour la généralisation de « toits solaires » de petites puissances (<15kWc). [19]

## 1.5. Les normes relatives aux installations solaires photovoltaïques

Une installation photovoltaïque produit de l'électricité. Le dimensionnement, le fonctionnement et l'exploitation de cette dernière font appel à deux concepts :

- La performance de l'installation. La sécurité électrique.
- Ce processus consiste alors à réaliser des choix techniques afin de respecter ces deux critères, en conformité avec les normes en vigueur.

Pour ce faire, des normes ont été amendées pour que les installations photovoltaïques fassent partie des installations électriques rentrant dans son champ d'application en précisant que les installations photovoltaïques sont traitées dans différents guides.

Ces guides, dans leurs différentes versions, ont été rédigés par des Commissions Techniques de l'Électricité telle que (UTE) constituée d'experts en génie électrique et en sécurité.

### 1.5.1. Les Normes internationales

La CEI (international) : publications et recommandations

- Le CENELEC (européen) : documents d'harmonisation (HD) ou normes européennes (EN)
- L'UTE (français) : normes homologuées, guides et publications.

Les normes françaises de réalisation :

- NF C 15-100 : installations électriques à basse tension NF C 13 100 : postes de livraison
- NF C 14 100 : installations de branchement (basse tension).

Les normes françaises de conception :

- NF C 15-100 : classification des degrés de protection
- NF C 20 030 : protection contre les chocs électriques

### 1.5.2. Les Normes nationales (Normes algérienne NA)

Certaines normes algériennes sont adaptées aux normes internationales (ex : CEI 60904-3 est relative à la norme NA 10453 algérienne).

Code de la norme	Année	Titre
NA 10357	2001	Champs de modules photovoltaïques (PV) au silicium cristallin – Mesure sur site des caractéristiques (IV)
NA 10451	2007	Dispositifs photovoltaïques – Mesure des caractéristiques courant-tension des dispositifs photovoltaïques
NA CEI 60904-3 (NA 10453)	2009	Dispositifs photovoltaïques – Principes de mesure des dispositifs solaires (PV) à usage terrestre incluant les données de l'éclairement spectral de référence
NA 10454	2007	Modules photovoltaïques (PV) au silicium cristallin pour application terrestre – Qualification de la conception et homologation
NA CEI 61727 (NA 16559)	2012	Systèmes photovoltaïques (PV) - Caractéristiques de l'interface de raccordement au réseau
NA CEI 61701 (NA 16560)	2012	Essai de corrosion au brouillard salin des modules photovoltaïques (PV)
NA 16562	2007	Qualification pour la sûreté de fonctionnement des modules photovoltaïques (PV) - Exigences pour la construction
NA CEI 61646 (NA 16563)	2011	Modules photovoltaïques (PV) en couches minces pour application terrestre – Qualification de la conception et homologation
NA 16565	2007	Qualification pour la sûreté de fonctionnement des modules photovoltaïques (PV) - Exigences pour les essais
NA CEI 61853-1 (NA 16579)	2013	Essais de performance et caractéristiques assignées d'énergie des modules photovoltaïques (PV) – Mesures de performance en fonction de l'éclairement et de la température, et caractéristiques de puissance

Tableau 1-2 : Les Normes nationales algériennes

Correspondance aux normes algériennes :

Pour l'adoption des normes algériennes, L'IANOR (Institut Algérien de Normalisation EPIC créée par Décret Exécutif n° 98-69 du 21 Février 1998) a mis en place 63 Comités Techniques Nationaux (CTN) composés de représentants des institutions et organismes publics, des opérateurs économiques ainsi que des associations de protection du consommateur. Plus de 25 normes internationales CEI (Commission Électrotechnique International) ont été adoptées en normes algériennes.

### 1.5.3. Répartition des normes dans une installation Photovoltaïque

Une installation Photovoltaïque normalisée est une installation soumise à des normes nationales ou internationales qui diffèrent d'un composant à un autre.

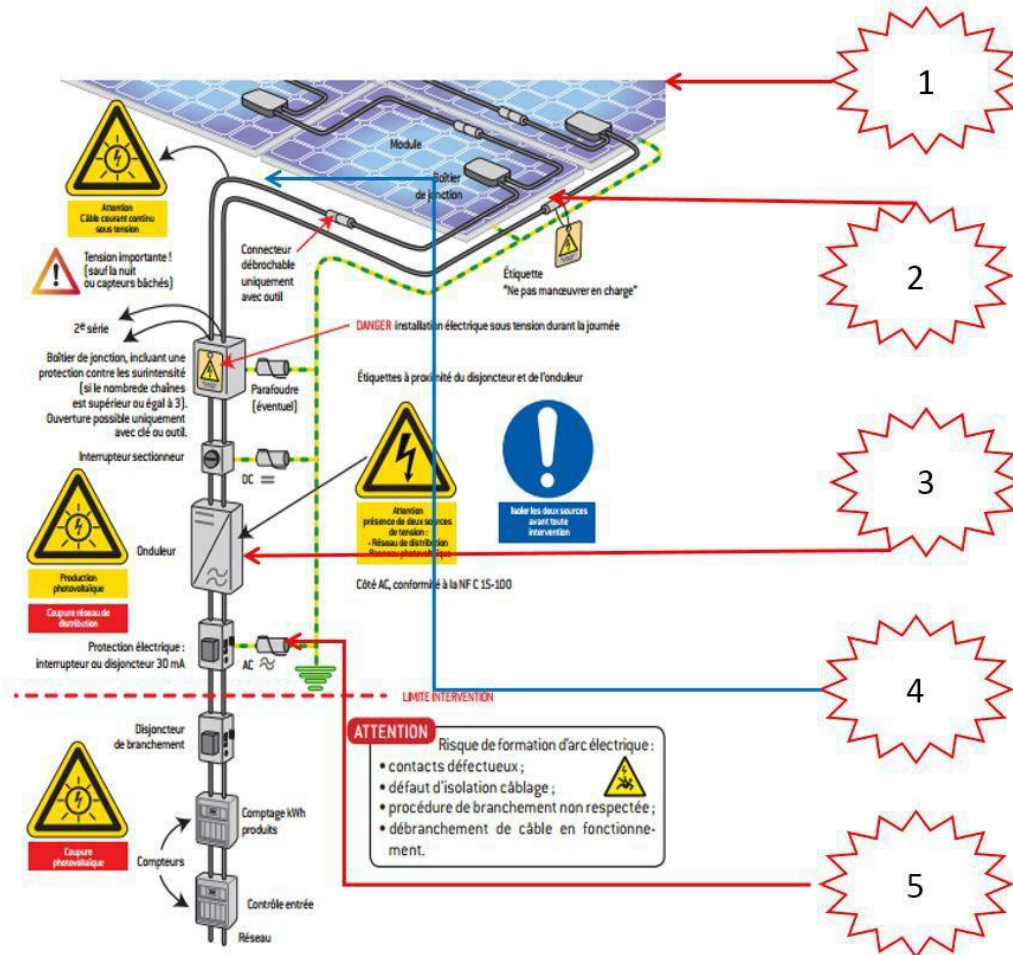


Figure 1- 10 : Normes des composants d'une installation connectée au réseau

1

**Modules** : Les modules doivent être conformes aux normes de la série NF EN 61730 et la 61215 (pour les panneaux monocristallin et poly cristallin), 61646 (pour la technologie Cd-Te).

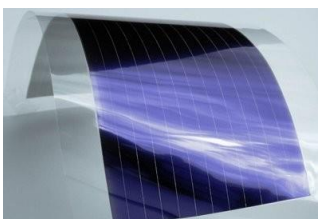


Figure 1- 11 : Panneau de technologie Cd Te

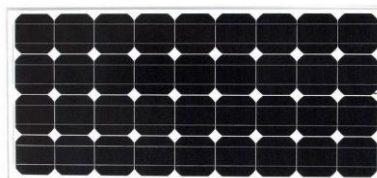


Figure 1- 12 : Panneau de technologie monocristallin



Figure 1- 13 : Panneau de technologie polycristallin



2

**Câble et connecteur :** Choisir un câble solaire qui est un câble unipolaire double isolation, résistant aux UV et non propagateur de flamme telqu'indiqué dans la norme CEI 60502-1.

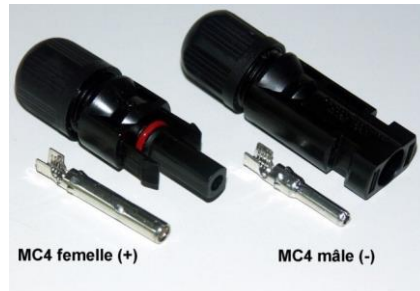


Figure 1- 14 : Connecteur MC4 parallèle 5 entrées

Figure 1- 15 : Connecteur MC4 série

Figure 1- 16 : Connecteur parallèle à deux entrées

3

**L'onduleur:** L'onduleur doit être conçu spécifiquement pour le raccordement au réseau. Il doit être conforme aux normes :CEI61727 (pour l'interface réseau) :

- CEI61727 (pour l'interface réseau)
- DIN VDE 012-1-1 (pour la protection de découplage) EN 55014 (comptabilité électromagnétique)
- CEI 61000-3-2 (harmonique)
- EN 60950, CEI 62109 (sécurité).

4

**Chemin des câbles :** Le cheminement des câbles doit être conçu de manière à :

- Pouvoir séparer les câble AC et DC.
- Ne pas créer une boucle électromagnétique.
- Rendre accessible les boite de jonction et les connecteurs.
- Empêcher les câbles de pendre.

5

**Protection contre les chocs électriques par contact direct :**

**Cotés DC :**

Mettre toutes les carcasses métalliques à la terre (Utiliser les composants de classe II ou équivalent) sur tout le matériel utilisé (module PV, câbles, boîte de jonction, etc.)

**Cotés AC :**

Prévoir des disjoncteurs différentiels pour la protection de l'utilisateur et des équipements contre les défauts d'isolement. [20]

## **1.6. Conclusion**

Dans ce chapitre, on a donné un aperçu de la production et de la consommation des ERs ainsi que le développement du marché PV mondial. Ensuite, on a présenté l'état des lieux de l'intégration des ERs dans le secteur énergétique algérien. Aussi on a donné le cadre législatif algérien les normes internationales pour les installations et les systèmes PV.

---

## **Chapitre 2 : Les systèmes photovoltaïques**

## Chapitre 2 : Les systèmes photovoltaïques

### 2.1. Introduction

Notre pays occupe une position géographique stratégique, favorisant l'épanouissement et l'utilisation des énergies renouvelables et particulièrement l'énergie solaire. Dans ce chapitre nous allons définir certaines grandeurs solaires ainsi que les différentes notions sur le système photovoltaïque et leurs caractéristiques principales.

### 2.2. Energie solaire

Le soleil est une étoile est composé de 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% de carbone et d'autres éléments. Le soleil est un réacteur nucléaire géant, car il tire son énergie des réactions de fusion thermonucléaire, car il convertit 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium chaque seconde, alors que la température de surface de cette étoile atteint 5800 degrés, tandis que 4 millions de tonnes sont dissipées sous forme d'énergie, où Cela représente une valeur énergétique totale de 36.1022 kilowatts, et il atteint la Terre à partir de 1.8.1017 kilowatts de cette énergie pendant une seconde, ce qui représente 20% de l'énergie totale, car la Terre reçoit chaque heure de plus d'énergie solaire que le monde n'en consomme en une année entière. [21] [22] [23]

### 2.3. Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est composé des ondes électromagnétiques qui sont constituées de particules appelées photons. Ces particules ont des longueurs d'onde différentes de 0,22 à 10 micromètres, où les rayons ultraviolets représentent 9% (<0,4 m), les rayons visibles représentent 47% (0,4 à 0,8 m) et les rayons ultraviolets Infrarouge 44% (>0,8 μm) du rayonnement solaire L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde où plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est élevée, [24] [25] comme l'équation 1.1 suivante montre :

$$E_{ph} = h (c/\lambda) = h\nu \quad (2.1)$$

$E_{ph}$  : l'énergie du photon.

$h$  : constante de Planck =  $6,62 \cdot 10^{-34}$  [J.s].

$C$  : vitesse de lumière  $3 \cdot 10^8$  [m/s].

$\lambda$  : Longueur d'onde [m].

$\nu$  : Fréquence ( $s^{-1}$ ).

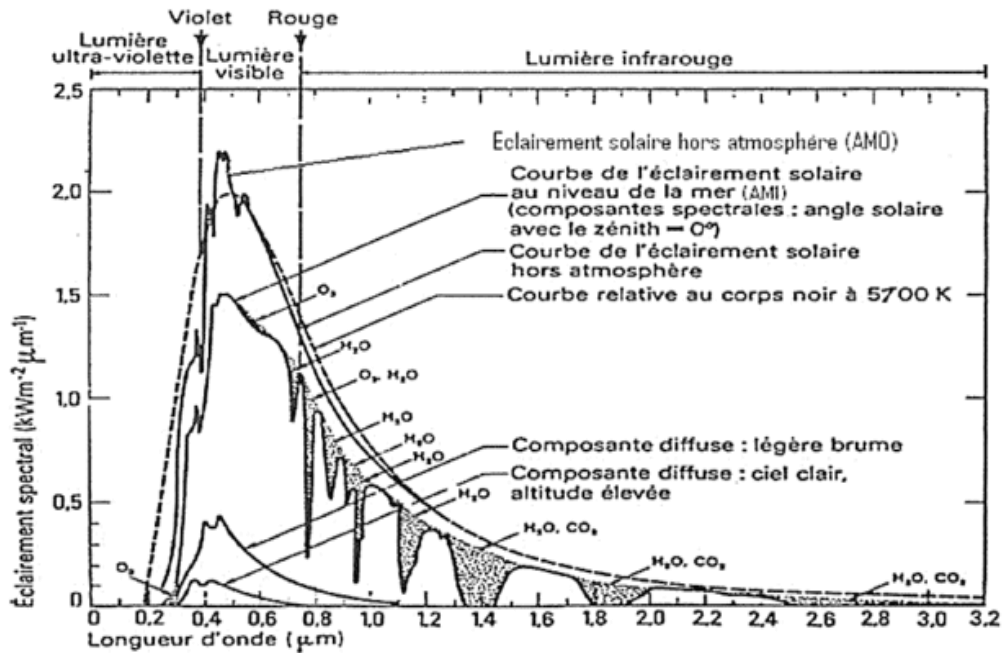


Figure 2-1 : Analyse spectrale du rayonnement solaire [26]

Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à une inclinaison de  $90^\circ$ ) atteint jusqu'à  $1000 \text{ W/m}^2$  en raison de l'absorption atmosphérique (AM1). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport à la Terre. Plus l'angle de pénétration est petit, plus l'atmosphère que les rayons doivent traverser est épaisse, ce qui entraîne la perte d'énergie qui en résulte. Par exemple, l'énergie directe que le rayonnement solaire transporte vers la Terre à un angle de  $48$  degrés est d'environ  $833 \text{ W/m}^2$  (AM1.5). [27]

## 2.4. Types de rayonnements

### 2.4.1. Rayonnement global

C'est le rayonnement qui provient du disque solaire. Lorsqu'il traverse l'atmosphère, une partie de rayonnement sera absorbé, l'autre réfléchi et le reste est diffusé sous forme de rayonnement direct, rayonnement diffus et rayonnement réfléchi. Ce rayonnement est un paramètre déterminant l'efficacité de la cellule. [28]

### 2.4.2. Rayonnement direct

Il fait partie du rayonnement issu du soleil, car il atteint la Terre sans être affecté par l'atmosphère, les rayons de ce rayonnement sont parallèles. [25]

### 2.4.3. Rayonnement diffus

C'est rayonnement qui provient du disque solaire, où lorsqu'il traverse une atmosphère, il se heurte à des obstacles et est diffusé par l'atmosphère, les nuages, la poussière, l'eau et les gaz, et lorsqu'il est diffusé, il n'aura pas de direction et peut être dispersé dans toutes les directions dans le ciel [25].

### 2.4.4. Rayonnement réfléchi :

Partie du rayonnement qui provient du disque solaire, mais qui est réfléchi par la surface de la Terre ou des objets à sa surface (tels que l'eau, la neige et le sable). Il est caractérisé par un coefficient de la nature de la corrélation appelé albédo (albédo variée entre  $0 \leq \epsilon \leq 1$ ). [29]

## 2.5. Le Potentiel Solaire en Algérie :

L'Algérie possède l'un des gisements d'énergie solaire les plus élevés au monde, la durée moyenne d'ensoleillement dans le désert algérien est de 3500 heures dans l'année. Ce potentiel est un facteur important pour le développement durable de cette région, s'il est exploité adéquatement. Le Tableau 4 montre : le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie, de par sa situation géographique, La durée des coups de chaleur sur l'ensemble du territoire national dépasse près de 2000 heures par an et atteint 3900 heures (haut plateaux et désert). L'énergie reçue par jour sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, environ 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an au nord et 2263 kWh/m<sup>2</sup>/an au sud du pays. L'Algérie représente le plus grand potentiel d'énergie solaire de tout le bassin méditerranéen, soit 169000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque, et le potentiel solaire de l'Algérie équivaut à 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient pu être découverts à Hassi le sable [30] [31] [32].

Le tableau 2.1 montre la répartition de l'énergie solaire par zone climatique au niveau du sol algérien. Ces statistiques garantissent qu'il convient aux applications d'énergie solaire telles que les cellules photovoltaïques (connectées au réseau, l'électricité des villages, l'eau pompée) ou l'énergie solaire concentrée (CSP). [31] [32]

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Surface (%)	4	10	86
Régions (km <sup>2</sup> )	95.27	238.174	2.048297
Durée d'ensoleillement quotidienne moyenne (h)	7.26	8.22	9.59
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650
Densité d'énergie solaire journalière (kWh/m <sup>2</sup> )	4.66	21	7.26

Tableau 2-1 : Le Potentiel Solaire en Algérie. [32]

## 2.6. Générateur photovoltaïque (PV) :

### 2.6.1. Cellule PV

La cellule PV est une composant électronique de base d'un system photovoltaïque elle est constituée dans la plupart des cas de silicium. Ces cellules sont issues de matériaux semi-conducteurs. La cellule PV absorbe l'énergie solaire et la transforme directement en courant électrique direct.



Figure 2-2 : Cellule Solaire [36].

Ce phénomène physique appelé effet photovoltaïque, la première cellule PV a été découverte par E. Becquerel en 1839. [33] [34] [24]

La puissance générée par la cellule est typiquement entre 1 à 3W et la tension générée peut varier entre 0.3V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé, de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule. [35]

### 2.6.2. Principe de fonctionnement de cellule solaire :

La cellule PV est une diode qui se compose d'une jonction p-n. Ceci est asymétriquement dopé, au fond est la base p et en haut l'émetteur n + fortement dopé. Les termes basent et émetteur proviennent des temps de départ des transistors bipolaires et ont été repris pour les cellules solaires. Si la lumière pénètre la cellule, alors chaque photon absorbé, dont l'énergie est supérieure ou égale à son énergie de gap, génère une paire électron-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, les électrons traversant l'émetteur vers les contacts avant. Ce sont de petites bandes métalliques qui transportent les électrons générés vers le collecteur de courant Rail (jeu de barres). Si une charge est reliée aux deux pôles de la cellule solaire, cela peut générer une énergie électrique. En résumé, la conversion de l'énergie lumineuse provenant du Soleil en énergie électrique se fait en trois étapes :

- Absorption des photons de la lumière solaire.
- Conversion de l'énergie reçue par les photons en énergie électrique (particules électriques libres).
- Collecte les particules dans un circuit électrique externe. [37] [38]

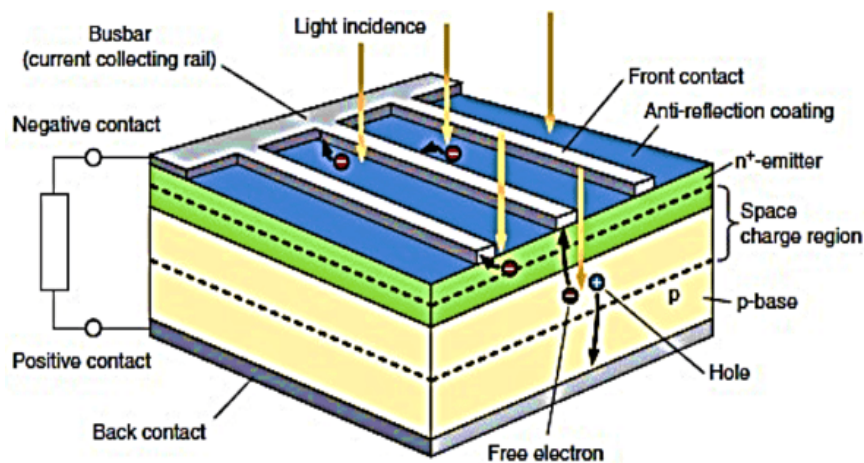


Figure 2-3 : Principe de fonctionnement de cellule solaire [34]

### 2.6.3. Différents types de cellules solaires

Les différents types de matériaux appliqués pour les cellules PV sont essentiellement basé sur le silicium le tellure de cadmium, le séléniure de cuivre-indium-gallium et le sulfure de cuivre-indium-gallium. Les cellules PV sont classées en différentes classes comme le montre la Figure 2 et le Tableau 2.2 qui donne les avantages et les inconvénients de chaque type.

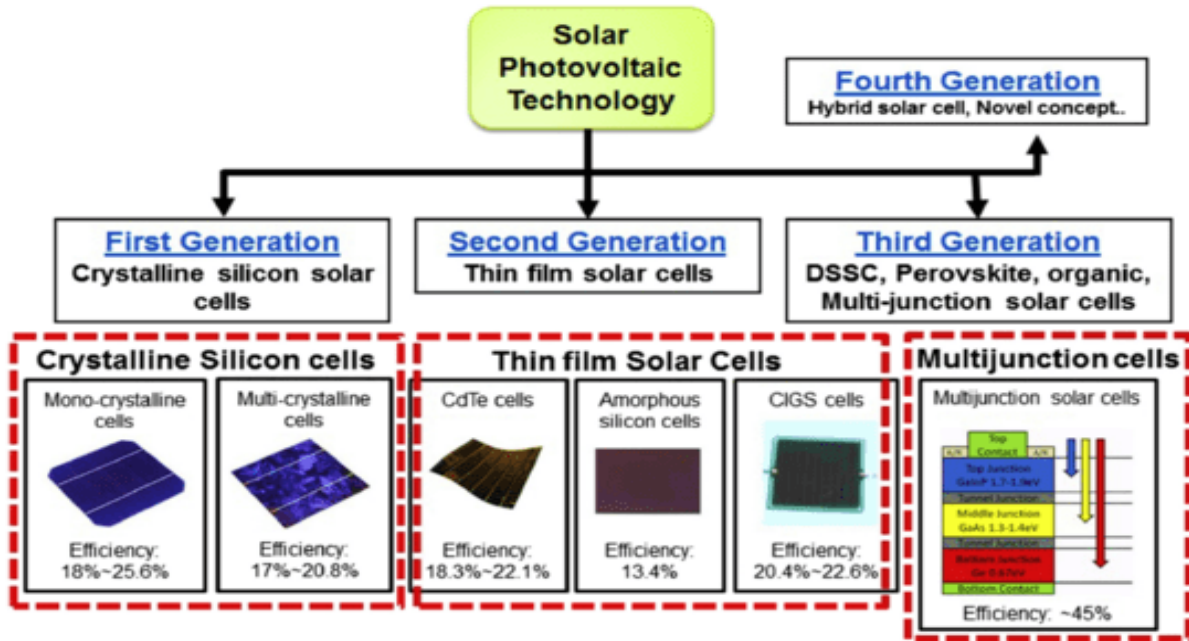


Figure 2-4 : Classification de la technologie solaire photovoltaïque [39]



Technologie cellule	Rendement en 2019 (%)	Avantages	Désavantages
<b>Monocristallin</b>	26.7	1-Long durée de vie 2-faible coût d'installation 3-Non dangereux	1-Coût élevé 2-Fragilité 3-Le silicium est gaspillé dans le processus de production
<b>Polycristallin</b>	22.3	1-Processus de production simple 2-Plus tolérant à la chaleur que les panneaux à base de silicium	1-Efficacité de conversion inférieure à celle du monocristallin 2-Efficacité de l'espace réduite
<b>CIGS</b>	23.4	1- Utilise peu ou pas de matière toxique contrairement au CdTe 2. Avoir une meilleure résistance à la chaleur que les panneaux à base de silicium	1. Moins efficace que les panneaux monocristallins
<b>CdTe</b>	21	1. Absorbe la lumière du soleil à une longueur d'onde plus courte 2. Coût inférieur à la fabrication en raison de l'abondance de matériau de cadmium	1-Le cadmium est très toxique 2-L'élimination des vieux panneaux CdTe est une préoccupation 3. Moins efficace que le C-Si
<b>Silicium amorphe</b>	13.4	1- Capacité de l'appareil multijonction. 2. Fabrication facile 3. Coefficient d'absorption optique élevé. 4. Matériau moins toxique que CIGS et CdTe. 5. Flexible et moins sensible aux fissures.	Faible efficacité
<b>DSSC</b>	11.1	1. Nécessite moins de coûts 2. Fonctionne dans la pénombre et à des angles plus larges 3. Longue durée de vie	1-Le liquide électrolytique comprend des solvants organiques volatils 2-Ne peut pas être appliqué lorsque les cas à grande échelle nécessitant un coût 3-Faible efficacité
<b>PSC</b>	20.9	1. Fabrication rentable 2. Pas cher à mettre à l'échelle 3. Moins d'espace requis pour l'installation 4. Haute efficacité	1. Les matériaux se décomposent rapidement en raison de l'exposition à la chaleur, à l'humidité et à la neige. 2. Le matériau est de nature toxique
<b>Polymère</b>	3-8	1. Léger et flexible 2. Facilité de stockage et de transport 3. De nature organique, donc respectueuse de l'environnement.	Efficacité très faible

Tableau 2-2 : Le rendement et les avantages et les inconvénients de déférente technologie de cellules solaire [39]

#### 2.6.4. Circuit équivalent d'une cellule solaire idéale et réelle

Une cellule PV est génératrice de courant qui produit un photo-courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à jonction transition p-n de la cellule PV. Si l'on connecte une charge résistive aux bornes du générateur photovoltaïque, ce dernier y débite une part de courant  $I_{pv}$  et le reste, le courant  $I_d$ , dans la diode. Dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuites, On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série  $R_s$  et les courants de fuite par une résistance en parallèle  $R_{sh}$ . [41]

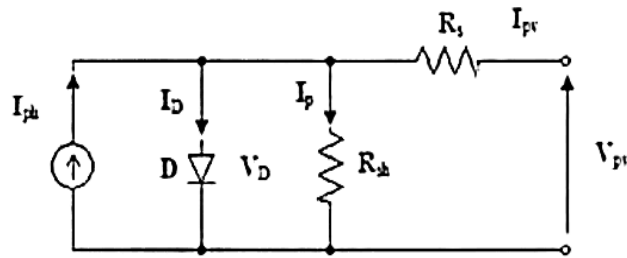


Figure 2-5 : Circuit équivalent de diode d'une cellule photovoltaïque réelle. [40]

## 2.7. Association des cellules photovoltaïque

La puissance disponible aux bornes d'une cellule unitaire est très faible. Il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle des générateurs photovoltaïques pour augmenter la puissance et rendre la puissance compatible avec l'équipement électrique usuel. En fait l'association des cellules PV est analogue à l'association de générateurs de courant, en série ; leurs tensions s'ajoutent, En parallèle ; leurs courants s'ajoutent. Afin d'augmenter la puissance des générateurs photovoltaïques. [41]

### 2.7.1. Association en série des cellules

Les cellules photovoltaïques peuvent se connecter en série. Les tensions de toutes les cellules s'ajoutent et le courant est le même que celui d'une seule cellule. [41]

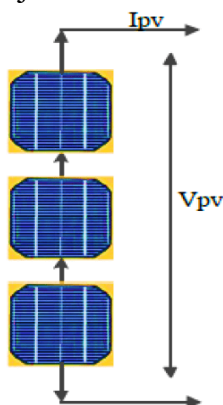


Figure 2-6 : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série

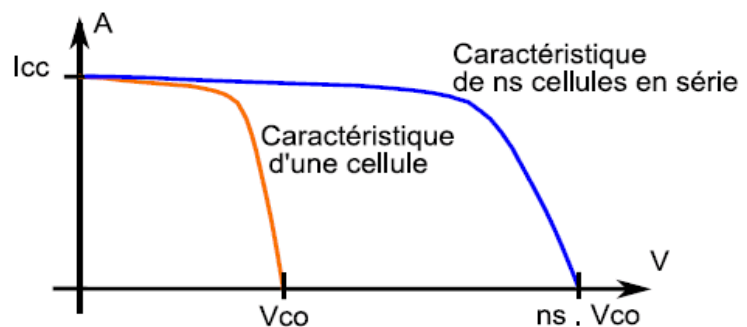


Figure 2-7 : Caractéristique I-V des cellules photovoltaïques raccordées en série [42]

L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association série de ( $N_s$ ) cellules :

$$V_{coNS} = N_s \times V_{co} \quad (2.2)$$

$$I_{cc} = I_{cc}N_s \quad (2.3)$$

$V_{co}N_s$  : la somme des tensions en circuit ouvert de  $N_s$  cellules en série.

$I_{cc}N_s$  : courant de court circuit de  $N_s$  cellules en série.

Si l'une d'elles était plus faible en courant, elle imposerait son courant à toute la série ce qui pénaliserait le module complet.

### 2.7.2. Association en parallèle des cellules

La mise en parallèle des cellules photovoltaïques permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Donc, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique électrique résultante du groupement est obtenue par addition des courants. [40]

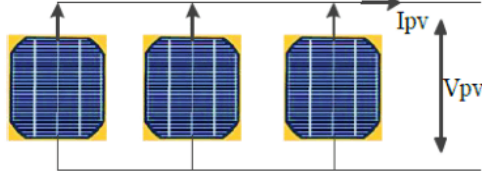


Figure 2-8 : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle [41]

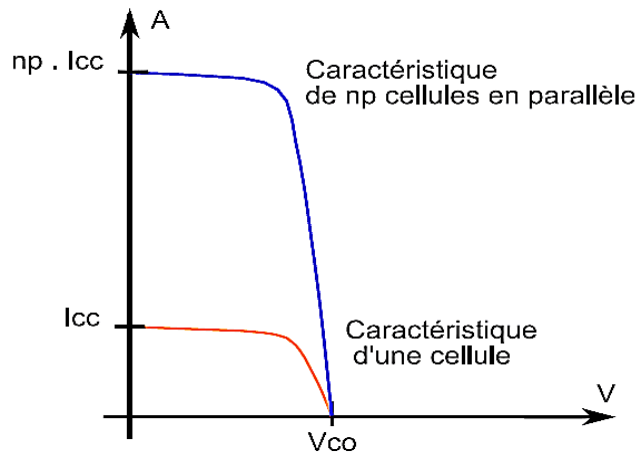


Figure 2-9 : Caractéristique I-V des cellules photovoltaïques raccordées en parallèle [42]

Les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants :

$$I_{ccNP} = NP \times I_{cc} \quad (2.4)$$

$$V_{co} = V_{coNP} \quad (2.5)$$

$I_{cc}NP$  : La somme des courants de court circuit de ( $NP$ ) cellule en parallèle.

$V_{co}NP$  : Tension du circuit ouvert de ( $N_p$ ) cellules en parallèle.

## 2.8. Module photovoltaïque

Le premier module photovoltaïque, d'une puissance de 14 Watt crête est commercialisé à un coût de 1700 dollar/watt est créé en 1958, le générateur ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïque élémentaires montées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge, Les modules actuels sont généralement composés de 36 cellules (18 V) ou 72 cellules PV en série (36 V). [34]

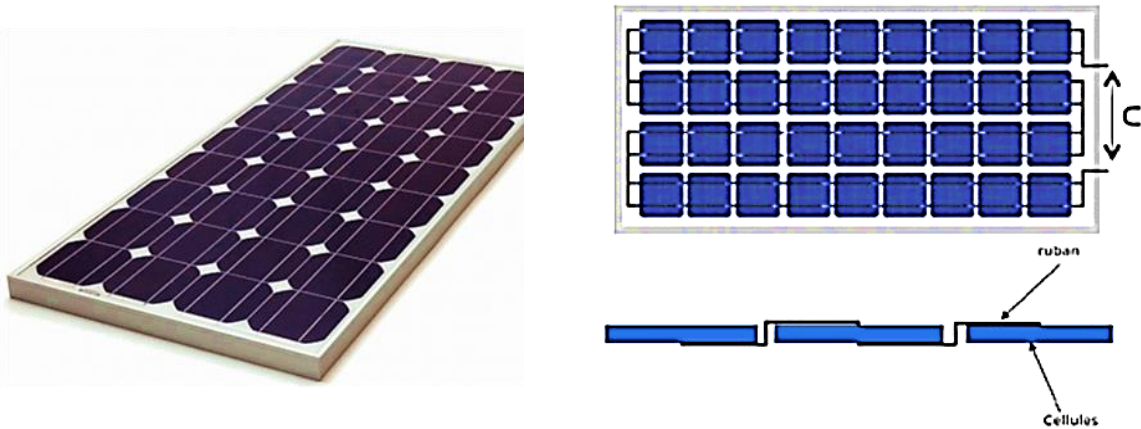


Figure 2-10 : Module de monocristalline (Gauche), Câblage des cellules dans un module (Droite) [34]

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente. La puissance des modules photovoltaïques s'exprime en Watts-Crête. Cette dernière représente la puissance que peut fournir à un module lorsqu'il est fermé sur sa charge nominale (optimale), sous un éclairement de  $1000\text{W/m}^2$  et à une température  $25^\circ\text{C}$ . [43] [44]

### 2.8.1. Caractéristiques électriques des modules solaires :

- **Puissance de crête  $P_c$  :**

C'est la Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards ( $25^\circ\text{C}$  et un éclairement de  $1000\text{W/m}^2$ ), Ceci correspond approximativement à une exposition perpendiculaire aux rayons du soleil le midi par temps clair, Il s'agit donc de conditions idéales conventionnelles qui sont très rarement remplies dans la pratique. La puissance crête sera proportionnelle à la surface du module. [45]

- **Tension à vide  $V_{co}$  :**

C'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. [41]

- **Courant de court-circuit  $I_{cc}$  :**

C'est la plus grande valeur de courant générée par la cellule sous les conditions de court-circuit où la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. (Pratiquement  $I_{cc} = I_{ph}$ ). [40]

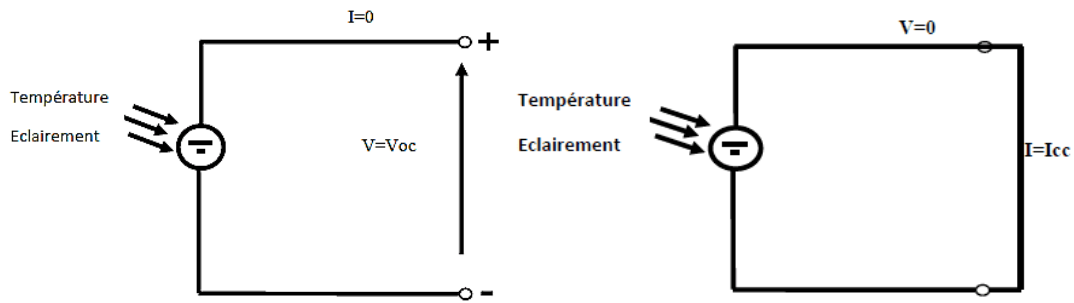


Figure 2-11 : Tension de circuit ouvert  $V_{co}$  (gauche) et Courant de court-circuit  $I_{cc}$  (Droite) [43]

- **Point de fonctionnement optimum ( $V_m, I_m$ ) :**

Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil :

$$P_m = U_m \cdot I_m \quad (2.6)$$

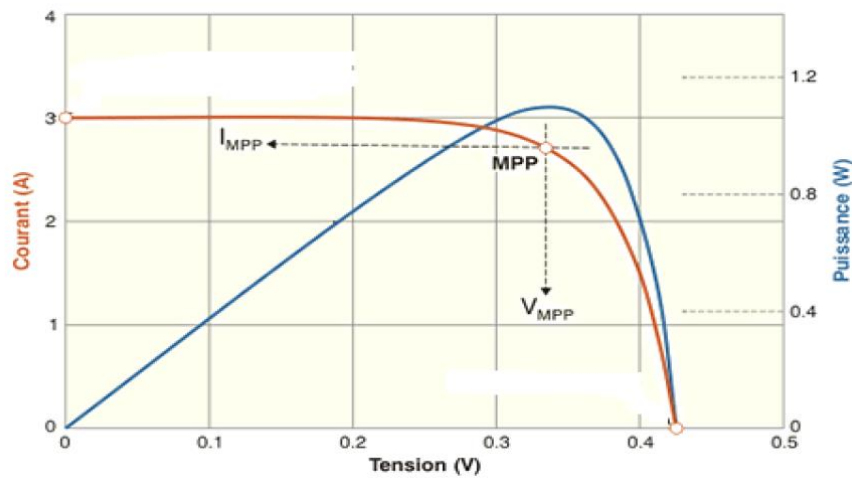


Figure 2-12 : Caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  d'un générateur PV [45]

- **Rendement :**

Ce rendement  $\eta$  désigne le rendement en puissance. La connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule, Rendement de module est le rapport de la puissance maximale de module et la puissance de la radiation incidente à la température de référence. [41]

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{I_m V_m}{S_{eff} G} \quad (2.7)$$

$P_i$  : la puissance incidente.

$S_{eff}$  : la surface effective de la cellule solaire.

$G$  : le flux incident et  $(I_m, V_m)$  les Coordonnées du point de fonctionnement maximale.

- **Facteur de forme :**

On appelle facteur de forme FF (En anglais : filling factor), rapport entre la puissance maximale  $P_m$  pouvant être extraite ( $I_m \cdot V_m$ ) de la photopile sous les conditions de mesures standardisées et la puissance maximale que peut avoir la cellule ( $V_{co} \cdot I_{cc}$ ). [46]

La qualité électrique de la cellule est déterminée par le facteur de forme FF, donné par l'équation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc}.V_{co}} = \frac{I_m.V_m}{I_{cc}.V_{co}} \quad (2.8)$$

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70 %.

### 2.8.2. Effet du niveau d'éclairement sur le module photovoltaïque

Pour une installation photovoltaïque, L'éclairement varie au cours de la journée entre 0 et 1000 W/m<sup>2</sup> (valeur maximum), la dégradation de 50 % de l'éclairement ou de la charge induit une dégradation de la puissance fournie par le générateur PV de l'ordre de 50 % Pour différents niveaux d'éclairement et le courant est directement proportionnel à l'irradiation à ces niveaux d'éclairement. La tension par contre n'est pas très dégradée lorsque l'irradiation baisse. [48] [49]

Donc le courant produit par la photopile (I<sub>ph</sub>) est pratiquement proportionnel au flux lumineux (ϕ). Par contre, la tension (V) aux bornes de la jonction varie peu car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction N-P du matériau lui-même. La tension de circuit ouvert ne diminuera que légèrement avec le flux lumineux. Ceci implique donc que :

- la puissance optimale de la cellule (P<sub>m</sub>) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension, L'augmentation du flux lumineux se traduit d'augmentation de courant I<sub>cc</sub>. [25]

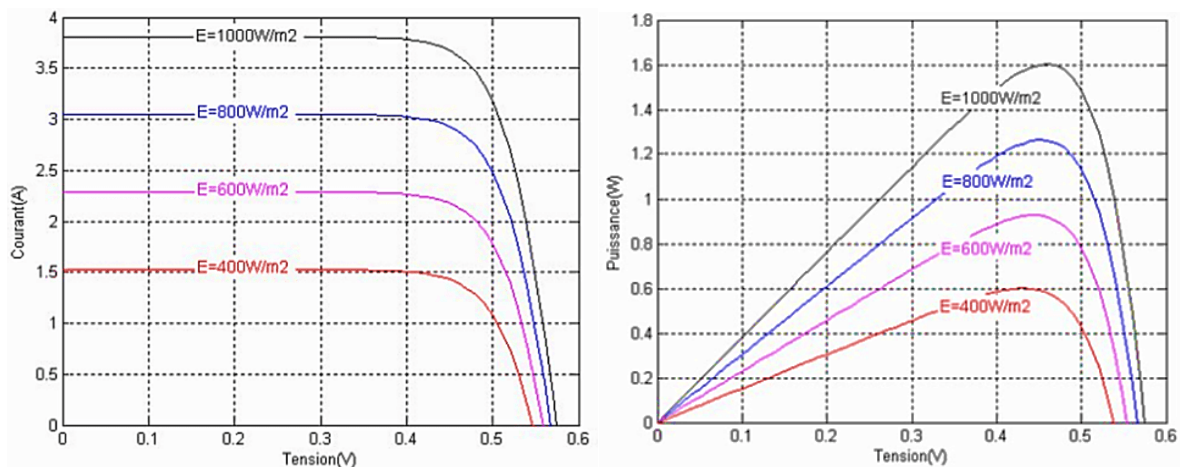


Figure 2-13 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V et P-V. [49]

### 2.8.3. Effet du niveau de Température sur le module photovoltaïque

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules solaires vu que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température. L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant/tension d'un semi-conducteur. Pour le silicium, lorsque la température augmente, le courant augmente d'environ 0,025 mA/cm<sup>2</sup>/°C alors que la tension décroît de 2,2 mV/°C/cellule. Cela se traduit par une baisse de puissance d'environ 0,4%/ °C. Cette influence devra être prise en compte lors du dimensionnement du générateur photovoltaïque. [46] [25]

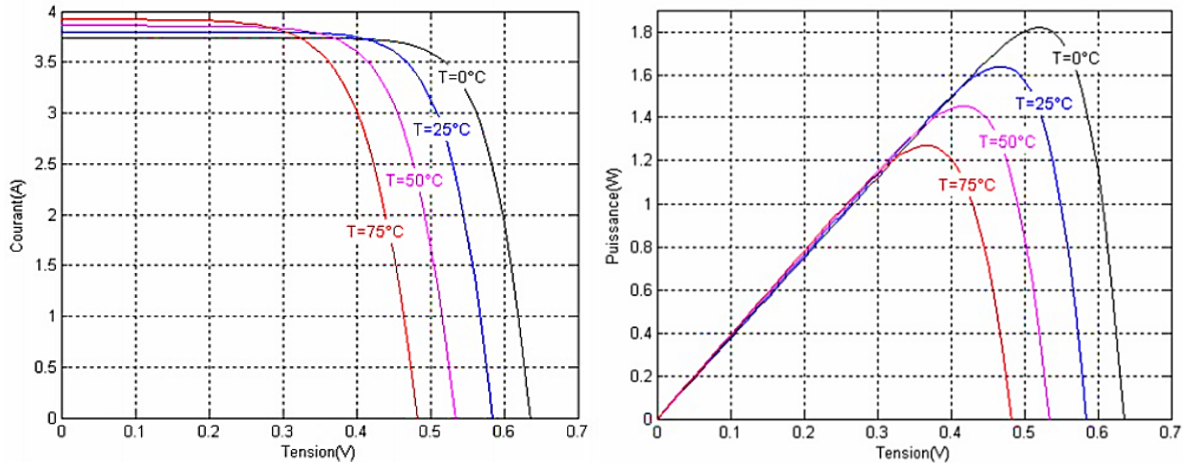


Figure 2-14 : Influence de Température sur la caractéristique I-V et P-V [48]

On remarque l'importance des variations de la tension et le courant gagne un petit peu d'intensité lorsque la température augmente, ceci peut être expliqué par une meilleure absorption de la lumière ou le gap baissant lorsque la température augmente. [49]

## 2.9. Panneau photovoltaïque :

Pour constituer un panneau photovoltaïque (champ solaire) il faut câbler plusieurs modules photovoltaïques en série et/ou bien en parallèle, montés sur une armature métallique avec un angle d'inclinaison spécifique, Afin d'obtenir des puissances de quelques KW à quelques MW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en série (en augmentant la tension) et en parallèle (en accroissant le courant). [34]

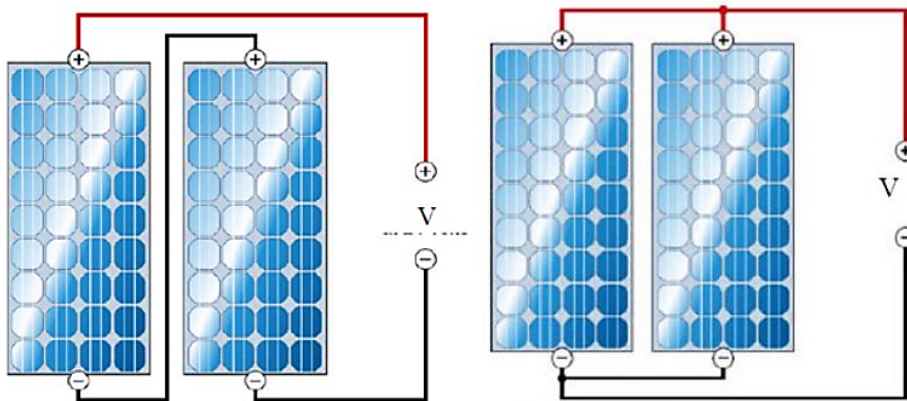


Figure 2-15 : Association des modules en série et on parallèle. [34]



Figure 2-16 : Des Panneaux photovoltaïque. [49]

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants du panneau PV dépend :

- Des besoins en électricité.
- De la taille du panneau.
- De l'ensoleillement du lieu d'utilisation.
- De la saison d'utilisation.

## 2.10. Les différents types de systèmes photovoltaïques

### 2.10.1. Système autonome

L'installation photovoltaïque est dite autonome, ou isolée, quand elle n'est pas reliée à un réseau de distribution. Le système photovoltaïque autonome permet de fournir du courant électrique à des endroits où il n'y a pas de réseau, il se révèle particulièrement adapté pour des applications comme une pompe dans le jardin, installations publicitaires, l'éclairage en zone isolée, l'alimentation de bornes téléphoniques, le long de l'autoroute... etc. Pour ces applications il n'est pas toujours possible de mettre en place un réseau d'alimentation classique, soit à cause de contraintes techniques, soit pour des raisons économiques [50].

Les installations photovoltaïques autonomes sont des installations composées de modules photovoltaïques, régulateur et un système de stockage qui garantit une énergie électrique même en cas de faible éclairage ou d'obscurité et d'un onduleur qui est nécessaire dans le cas où l'on utiliserait des charges alternatives (AC). Ces installations sont adaptées pour les sites isolés loin du réseau électrique [50].

#### I. Système autonome sans stockage

C'est le système le plus simple puisque l'énergie photovoltaïque est utilisée directement à partir des panneaux. Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairage solaire suffisant pour son démarrage. C'est important pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de l'éclairage solaire. Mais il faut bien dimensionner le générateur photovoltaïque de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairage le plus faible. [51].



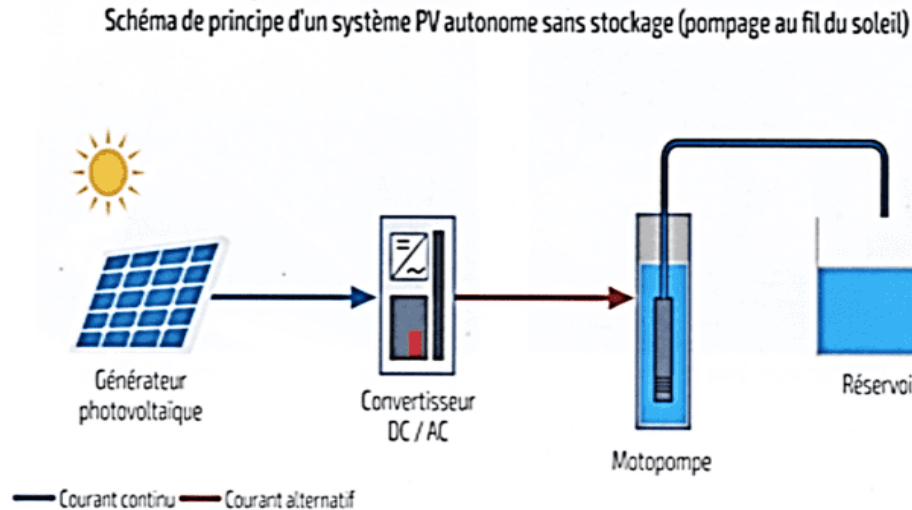


Figure 2-17 : Schéma de principe d'un système PV autonome sans stockage (pompage au fil du soleil) [54]

Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de systèmes autonomes où le stockage de l'eau dans un réservoir est généralement le plus adopté par rapport au stockage électrochimique. La pompe solaire est branchée directement sur le générateur photovoltaïque par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC ou DC/AC selon que nous utilisons respectivement un moteur à courant continu ou un moteur à courant alternatif. Le débit d'arrivée d'eau dans le réservoir est donc variable et en fonction du rayonnement solaire. L'inconvénient de ce système, c'est qu'on ne profite pas toujours de l'éclairement plus élevés, pas de stockage donc pas de récupération des surplus d'énergie solaire. [50] [51].

## II. Système autonome avec stockage

C'est la configuration la plus courante des systèmes PV autonomes on parlera de système Stand-Alone (SAPV Systems : Stand-alone PV system). Ces systèmes comportent des éléments de stockage afin d'adapter la production photovoltaïque à la demande. Le système de stockage représente une partie très importante du coût de l'installation, et ces conditions de fonctionnement sont très contraignantes. Par conséquent, les systèmes de gestion de l'énergie ont été développés afin d'optimiser la durée de vie du système de stockage et de réduire les coûts de fonctionnement [51].

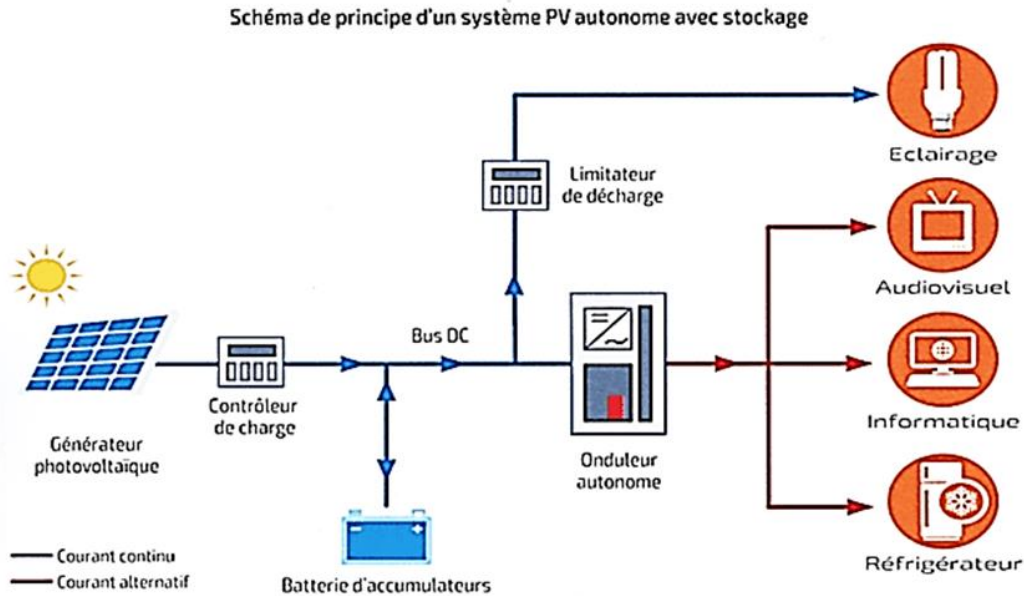


Figure 2-18 : Schéma de principe d'un système PV autonome avec stockage [52]

### 2.10.2. Système hybride

Les systèmes hybrides sont généralement des systèmes photovoltaïques couplés à d'autres sources, par exemple une éolienne (association PV éolien) ou un groupe électrogène. Le rôle du second producteur d'énergie est de palier aux insuffisances de la production photovoltaïque. [55]

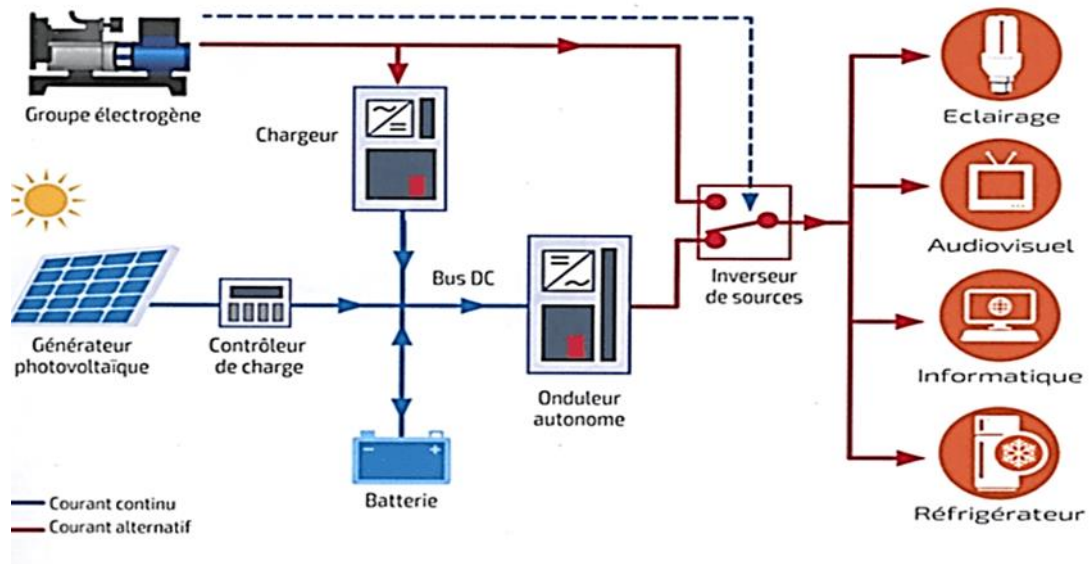


Figure 2-19 : Schéma de principe d'un système PV hybride [52]

Dans le cas d'un système hybride avec éolienne, l'énergie produite par celle-ci (qui possède son propre contrôleur) vient compléter la charge des batteries. Sa production étant plus aléatoire que celle des panneaux solaires, elle complète efficacement un générateur photovoltaïque pour des applications particulièrement gourmandes en électricité, qui ne nécessitent pas de fonctionner de façon régulière, mais au gré du vent.

Le cas d'un système hybride avec groupe électrogène, est différent par rapport avec celui d'éolienne. Ce type de configuration est adapté aux applications très consommatrices d'électricité mais qui ne fonctionnent qu'une, deux ou trois heures par jour. Il peut aussi être utilisé comme secours permettant de limiter la taille du parc de batteries pour les jours sans soleil, à son démarrage le groupe électrogène devient une source principale afin de fournir l'électricité pour tous les appareils dans la maison tout en complétant la charge des batteries au travers du convertisseur-charge lorsque le groupe s'arrêtera, le système basculera automatiquement sur les batteries. [53]

### 2.10.3. Systèmes raccordés au réseau

On peut installer un système photovoltaïque sur un site raccordé au réseau de distribution électrique généralement sur les habitations ou les entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable qui bénéficie d'un bon ensoleillement. Les systèmes photovoltaïques couplés au réseau injectent l'énergie issue des modules sur le réseau de distribution [56]. On distingue deux types d'installations :

#### I. Injection de la totalité de la production

L'énergie produite par les modules est directement injectée sur le réseau électrique, les périodes d'injection sur le réseau correspondent aux périodes de production photovoltaïque.

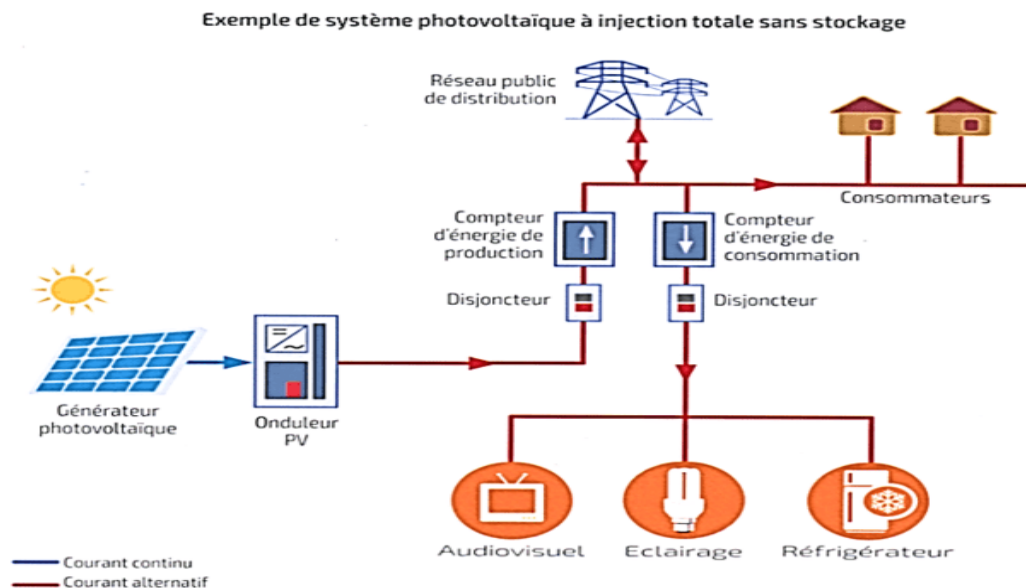


Figure 2-20 : Schéma d'un système PV raccordé au réseau (Injection de la totalité de la production) [52]

#### II. Injection du surplus de production

L'énergie produite par les modules est directement consommée sur place par les charges. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation instantanée sur le réseau. L'énorme avantage de cette solution est l'absence de batterie, on ne stocke plus l'énergie lorsqu'il y a un plus on l'injecte directement au réseau locale ou national, il y a un compteur qui tourne dans un sens pour la consommation et un autre dans l'autre sens pour la production. Mais il faut tout de même convertir le courant continu des panneaux en alternatif par le biais d'un onduleur, et celui-ci doit être homologué par la compagnie d'électricité qui va recevoir

ce courant (il doit respecter des normes sur sa qualité sinusoïdale). Dans certain cas on ajoute au système une batterie de secours pour les coupures de courte durée [54].

Exemple de système photovoltaïque avec autoconsommation sans stockage

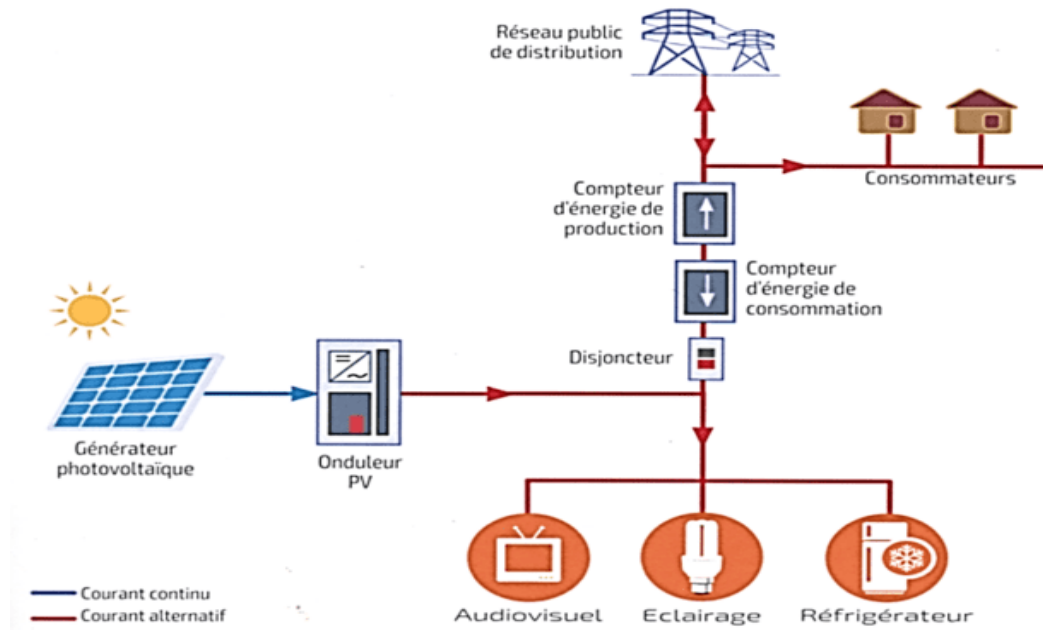


Figure 2-21 : Schéma de principe d'un système PV raccordé au réseau (Injection du surplus de production) [52]

## 2.11. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté quelques généralités rayonnement solaire et ces différents types et généralités sur les cellules et modules photovoltaïques, à savoir la description des principaux composants constituant un système photovoltaïque, ainsi que leurs modes de fonctionnement, et les types de systèmes photovoltaïque.

---

## **Chapitre 3 : Les systèmes PV raccordés au réseau**

## Chapitre 3 : Les systèmes PV raccordés au réseau

### 3.1. Introduction

Actuellement, les systèmes PV connectés au réseau sont proposés comme une importante solution auxiliaire complétant la production conventionnelle d'électricité. En effet, grâce aux résultats encourageants qui sont obtenus de plusieurs projets réalisés à travers le monde, ce type de systèmes PV sont devenus viables dans le développement économique. L'intégration des installations PV raccordées au réseau dans la génération d'énergie de grande échelle est augmentée grâce à la volonté politique qui encourage la communauté scientifique à lancer d'importants travaux de recherche. Les résultats de ces recherches ont donné naissance au développement technologique qui vise à protéger l'environnement tout en réduisant la dépendance aux sources d'énergie fossiles.

### 3.2. Le réseau électrique

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité.

Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'un type de tension à l'autre grâce aux transformateurs.

Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble de la production, du transport et de la consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble.

Le réseau électrique peut être facilement comparé à un réseau routier, il a ses autoroutes, ses voies nationales et départementales. Une fois produites, l'électricité doit être transportée et distribuée jusqu'au consommateur. Pour cela, on distingue le réseau de transport et le réseau de distribution.

### 3.3. Architecture du réseau électrique

Les réseaux électriques sont répartis en trois catégories :

#### 3.3.1. Réseaux de transport et d'interconnexion

Les réseaux de transport à très haute tension. C'est à ce niveau de tension que sont assurées les interconnexions entre les régions au niveau national et les échanges (importation/exportation) d'énergie électrique au niveau international.

Les réseaux de transport et d'interconnexion ont principalement pour mission :

De collecter l'électricité produite par les centrales importantes et de l'acheminer par grand flux vers les zones de consommation (fonction transport) ;

De permettre une exploitation économique et sûre des moyens de production en assurant une compensation des différents aléas (fonction interconnexion) ;

- La tension est 150 kV, 220 kV et dernièrement 420 kV ;
- Neutre directement mis à la terre,
- Réseau maillé. [53]

### 3.3.2. Réseaux de répartition

Les réseaux de répartition ou réseaux à Haute Tension ont pour rôle de répartir, au niveau régional, l'énergie issue du réseau de transport. Leur tension est supérieure à 63 kV selon les régions.

Ces réseaux sont, en grande partie, constitués de lignes aériennes, dont chacune peut transiter plus de 60 MVA sur des distances de quelques dizaines de kilomètres. Leur structure est, soit en boucle fermée, soit le plus souvent en boucle ouverte, mais peut aussi se terminer en antenne au niveau de certains postes de transformation.

En zone urbaine dense, ces réseaux peuvent être souterrains sur des longueurs n'excédant pas quelques kilomètres.

Ces réseaux alimentent d'une part les réseaux de distribution à travers des postes de transformation HT/MT et, d'autre part, les utilisateurs industriels dont la taille (supérieure à 60 MVA) nécessite un raccordement à cette tension.

- La tension est 90 kV ou 63 kV ;
- Neutre à la terre par réactance ou transformateur de point neutre ;
- Limitation courant neutre à 1500 A pour le 90 kV ;
- Limitation courant neutre à 1000 A pour le 63 kV ;
- Réseaux en boucle ouverte ou fermée. [53]

### 3.3.3. Réseaux de distribution

Les réseaux de distribution commencent à partir des tensions inférieures à 63 kV et des postes de transformation HTB/HTA avec l'aide des lignes ou des câbles moyenne tension jusqu'aux postes de répartition HTA/BTA.

Le poste de transformation HTA/BTA constitue le dernier maillon de la chaîne de distribution et concerne tous les usages du courant électrique.

#### ▪ Réseaux de distribution à moyenne tension :

- HTA (30 et 10 kV le plus répandu) ;
- Neutre à la terre par une résistance ;
- Limitation à 300 A pour les réseaux aériens ;
- Limitation à 1000 A pour les réseaux souterrains ;
- Réseaux souterrains en boucle ouverte.

#### ▪ Réseaux de distribution à basse tension :

- BTA (230 / 400 V) ;
- Neutre directement à la terre ;
- Réseaux de type radial, maillés et bouclés. [53]

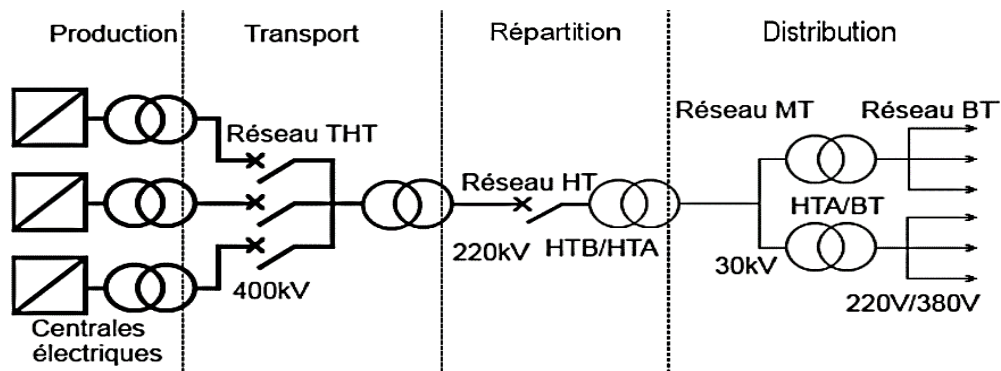


Figure 3-1 : Schéma générale de production, transport et distribution de l'énergie électrique [53]

### 3.4. Les postes électriques

Un poste électrique est la partie d'un réseau électrique, située en un même lieu, comprenant principalement les extrémités des lignes de transport ou de distribution, de l'appareillage électrique, des bâtiments, et, éventuellement, des transformateurs.

Un poste électrique est donc un élément du réseau électrique servant à la fois à la transmission et à la distribution d'électricité. Il permet d'élever la tension électrique pour sa transmission, puis de la redescendre en vue de sa consommation par les utilisateurs (particuliers ou industriels).

Les postes électriques se trouvent donc aux extrémités des lignes de transmission ou de distribution. On parle généralement de sous-station.

### 3.5. Type de poste électrique

Il existe plusieurs types de postes électriques :

#### I. Postes de sortie de centrale

Le but de ces postes est de raccorder une centrale de production de l'énergie au réseau.

#### II. Postes d'interconnexion

Le but est d'interconnecter plusieurs lignes électriques HT.

#### III. Postes élévateurs

Le but est de monter le niveau de tension, à l'aide d'un transformateur.

#### IV. Postes de distribution

Le but est d'abaisser le niveau de tension pour distribuer l'énergie électrique aux clients résidentiels ou industriels. [56]

### 3.6. Composants des postes électriques

#### 3.6.1. Le transformateur

Un transformateur est une machine statique destinée à transformer un courant alternatif donné en un autre courant alternatif de même fréquence, mais de tension en général différente. Ces appareils sont très utilisés sur le réseau de transport où ils servent à convertir à des tensions différentes l'énergie électrique transitée.

Le transformateur est l'équipement le plus important dans un poste de transport. Son coût est extrêmement élevé et son immobilisation en cas d'incident est toujours très longue.

Pour cette raison, il doit être envisagé de sorte à réduire au maximum l'effet des éventuels incidents. Ceci peut s'effectuer via un système de protection très sophistiqué. [54]

#### 3.6.2. Le disjoncteur

Situé à l'intérieur d'un poste électrique, le disjoncteur est un appareil destiné à protéger les circuits et les installations contre une éventuelle surcharge de courant due à un court-circuit (provoqué par la foudre ou par un contact entre le conducteur et la terre). Il permet aussi l'exploitation du réseau en interrompant ou en rétablissant le passage du courant dans une portion du circuit.



### 3.6.3. Le sectionneur

Situé dans un poste électrique, le sectionneur assure une coupure visible du circuit électrique. Cette coupure certaine est primordiale car elle permet d'intervenir pour l'entretien ou la réparation des appareils en toute sécurité. En mettant hors tension ou sous tension certains circuits du poste. Il assure la fonction d'aiguillage en répartissant les transits d'énergie entre les lignes électriques raccordées au poste. La commande du sectionneur peut être électrique ou manuelle.

### 3.6.4. Surveillance et contrôle

Les postes hébergent des systèmes de surveillance et de contrôle du réseau dans des bâtiments de relaiage.

Ils permettent d'envoyer des informations vers des centres distants qui les analysent et détectent les éventuelles anomalies.

Ces centres envoient en retour des ordres télécommandés (ouverture ou fermeture des disjoncteurs et sectionneurs) permettant de répartir le courant sur les différentes lignes ou corriger une anomalie sur le réseau. [54]

## 3.7. Système PV raccordé au réseau

### 3.7.1. Principe de raccordement

Dans les pays disposant déjà d'un réseau de distribution électrique, une nouvelle pratique a vu le jour dans le courant des années 80. Elle consiste à compenser les différences entre la production et la consommation grâce à un échange d'énergie avec le réseau. De cette façon, les installations photovoltaïques peuvent se dispenser d'un système de stockage par batteries et injecter dans le réseau tous les surplus d'énergie produits. Toute injection dans le réseau se traduit par une diminution de la demande sur les centrales hydroélectriques, et donc par une "réserve" d'eau qui pourra être mise à profit pendant la nuit, ou lors de périodes de faible insolation. Plusieurs centaines d'installations de ce type sont maintenant en service, dont certaines depuis une dizaine d'années, apportant la preuve de la parfaite compatibilité avec le réseau, et de la haute fiabilité de la production d'énergie. [55]

La mise en service de centrales photovoltaïques dans un réseau de distribution électrique élargit le rôle du distributeur. En plus de sa fonction traditionnelle de répartiteur de l'énergie produite par les gros producteurs, le distributeur assure maintenant le rôle de compensateur Conclusion générale 40 entre les excédents et les insuffisances de la production d'électricité d'origine solaire.

### 3.7.2. Centrale de production d'énergie photovoltaïque

Avec les applications photovoltaïques connectées au réseau d'électricité national, il y a un fort potentiel de diffusion dans les pays industrialisés. Des centrales de production photovoltaïque sont expérimentées depuis quelques années en Europe, aux Etats-Unis et au Japon, mais elles sont encore au stade pilote. Seules les centrales photovoltaïques de moyenne et faible puissances (0,1 à 0,5 MW) semblent avoir une rentabilité économique. Elles seront vraisemblablement destinées à compléter le réseau en différents points critiques.

Un système de puissance PV qui génère la puissance instantanément alimente le réseau à travers un ou plusieurs onduleurs et transformateurs. La plupart des systèmes utilisent des redresseurs qui fonctionnent en régime onduleur équipés par un poursuiveur de point de puissance maximale comme il est montré sur la (Figure 3.2, 3.3).

A cet effet, il peut être économique de placer un système PV pour assister avec un réseau local durant les périodes de demande de pic pour fonctionner en parallèle, plus au moins que construire une nouvelle station de puissance.

Aux extrémités d'un réseau, la qualité de la puissance se détériore lorsque la demande en électricité augmente. Une centrale photovoltaïque placée en bout de ligne permet de redresser la tension et d'améliorer la puissance. [56]

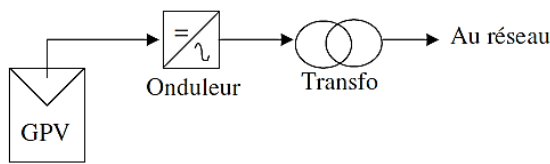


Figure 3-2 : Configuration d'un système PV avec un onduleur [56]

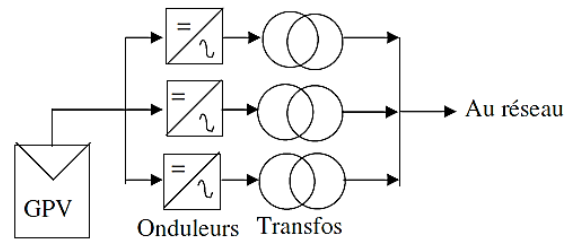


Figure 3-3 : Configuration d'un système PV avec plusieurs onduleurs [56]

### 3.7.3. Les onduleurs

La transformation du courant photovoltaïque, de nature essentiellement continue, en courant alternatif usuel 230 V / 50 Hz est effectuée par des appareils électroniques appelés convertisseurs statiques, ou onduleurs.

Les onduleurs qui assurent la connexion au réseau, ont une puissance nominale d'environ 100 W à plusieurs centaines de kW. Jusqu'à 5 kW, ils fonctionnent en général en 230 V monophasé, alors qu'au-dessus, ils doivent être triphasés (basse ou moyenne tension).

Les signaux de tension et de courant issus du champ PV sont variables en fonction des conditions d'ensoleillement et de température ambiante. L'une des fonctions importantes de l'onduleur réseau est donc la recherche du point de puissance maximum (Maximum Power Point Tracking (MPPT)), c'est-à-dire une adaptation permanente de l'impédance d'entrée afin d'optimiser, à chaque instant, le produit  $P = U \cdot I$  sur la caractéristique du champ PV. L'onduleur doit ensuite construire une (ou trois) tension(s) sinusoïdale(s) correspondant aux normes requises par le réseau. [57]

### 3.7.4. Technologies des onduleurs couplés au réseau

#### I. Onduleurs modulaires (module inverter)

Suivant ce concept, chaque module solaire disposé d'un onduleur individuel, pour les installations plus importantes, tous les onduleurs sont connectés en parallèle côté courant alternatif. Les onduleurs modulaires sont montés à proximité immédiate du module solaire correspondant.

#### II. Onduleurs centralisés (central inverter)

Un onduleur centralisé de forte puissance transforme l'ensemble du courant continu produit par un champ de cellules solaires en courant alternatif.

Le champ de cellules solaires est en règle générale constitué de plusieurs rangées connectées en parallèle.

Chaque rangée est elle-même constituée de plusieurs modules solaires connectés en série. Pour éviter les pertes dans les câbles et obtenir un rendement élevé, on connecte le plus possible de modules en série.

### III. Onduleurs "String" ou "de Rangée"

L'onduleur String est le plus utilisé. Le plus souvent, huit (ou plus) modules solaires sont connectés en série. Comme une seule connexion série est nécessaire, les coûts d'installation sont réduits. Il est important de noter qu'en cas d'ombrage partiel des modules solaires, il n'y a pas de perte, l'emploi de diodes de by-pass est fortement recommandé.

Les installations jusqu'à 3 Kilowatt de puissance sont fréquemment réalisées avec un onduleur String. Pour une puissance plus élevée, il est possible de connecter plusieurs onduleurs String en parallèle, côté courant alternatif. L'intérêt dans ce concept est d'utiliser un plus grand nombre d'onduleurs du même type. Cela réduit les coûts de production et apporte un intérêt supplémentaire : si un onduleur tombe en panne, seule la production de la rangée concernée est défaillante. [58]

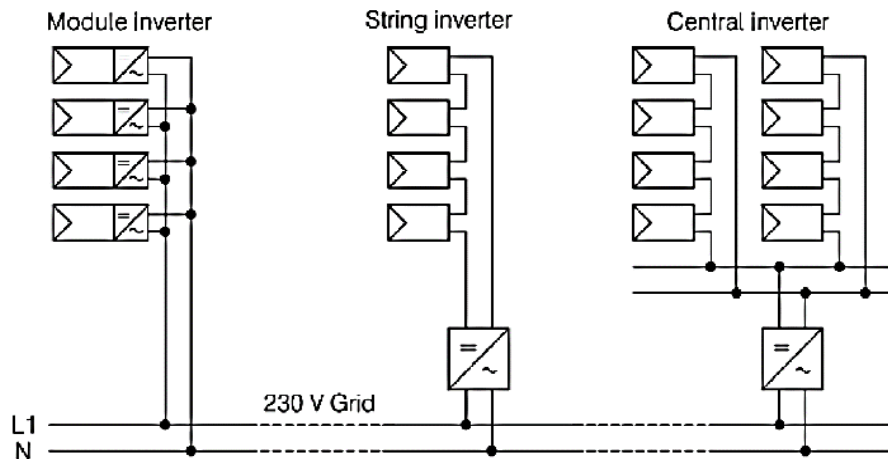


Figure 3-4 : Classification des onduleurs PV connectés au réseau

#### 3.7.5. Régulation et recherche du MPP :

Dans tous les appareils à PWM décrits ci-dessus, la commande de largeur des impulsions doit assurer les deux fonctions suivantes :

- la génération des demi-sinusoïdes qui seront ensuite alternées par l'étage de sortie ;
- l'adaptation de l'impédance d'entrée du convertisseur de manière à suivre, à tout instant, le point de puissance maximum du champ.

Cette régulation est habituellement gérée en temps réel par un microprocesseur.

La recherche du point de puissance maximum s'exécute par approximations successives : à partir de la tension à vide, l'onduleur « prélève » sur le condensateur (dont le rôle est de stocker l'énergie du champ durant une demi-période), la quantité d'énergie correspondant au maintien d'une tension donnée, et calcule la puissance moyenne obtenue durant un pas de temps donné. Pour le pas suivant, elle compare la puissance du dernier pas avec l'avant dernier, et incrémente ou décrémente son prélèvement selon que l'énergie a augmenté ou diminué. La recherche du MPP implique donc une perpétuelle oscillation autour de la valeur optimale réelle.

Sa constante de temps peut être de quelques secondes ou dizaines de secondes, et la précision est en général de l'ordre du pour-cent.

### 3.8. Interaction entre le réseau de distribution et les systèmes PV

La filière photovoltaïque, dont le développement est soutenu par les pouvoirs publics (lutte contre le changement climatique, augmentation de la part des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique, soutien de la filière industrielle, ...) possède des caractéristiques spécifiques :

- La puissance de production des installations varie de quelques kW à plusieurs MW.
- Le nombre de producteurs peut devenir à terme très important,
- La plupart des raccordements sont réalisés sur la partie basse-tension du réseau public de distribution
- Les installations comportent des convertisseurs statiques (pas de machines tournantes)
- Les équipements (onduleurs et modules) disponibles sur le marché sont variés,
- La production d'énergie est naturellement intermittente,

#### 3.8.1. Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution :

Dans le passé, les réseaux de distribution se comportaient comme des éléments passifs dans lesquels les flux de puissance s'écoulaient de manière unidirectionnelle du poste source vers les consommateurs finaux. Du fait de l'insertion des productions décentralisées, les flux de puissance et les tensions sont impactés non seulement par les charges mais aussi par les sources. Par suite de ces spécificités techniques des installations photovoltaïques, le raccordement des systèmes PV au réseau peut avoir des impacts importants sur son fonctionnement. Les influences les plus significatives des systèmes PV sur le réseau de distribution sont les suivantes :

##### I. Influence sur le plan de tension :

La présence de générateurs PV a une influence sur le plan de tension et sur les dispositifs de réglage du réseau. La tension varie en fonction des injections de puissances active et réactive sur le réseau. En particulier pendant une période de fort ensoleillement et de faible consommation, la tension de certains nœuds du réseau peut dépasser le seuil admissible.

##### II. Influence sur le plan de protection :

La contribution des systèmes PV au courant de défaut dans le réseau de distribution a des conséquences faibles sur le plan de protection.

Mais la sélectivité et la sensibilité des protections du réseau peuvent être affectées et provoquer le déclenchement intempestif du départ sain ou l'aveuglement de la protection du départ en défaut.

##### III. Influence sur la qualité de l'énergie :

###### i. Injection d'harmoniques de courant :

La présence d'interfaces électronique de puissance peut injecter des harmoniques de découpage au réseau si les onduleurs ne sont pas munis de filtres efficaces. Les onduleurs actuels contribuent tout de même à l'augmentation des harmoniques de courant car ils fonctionnent le plus souvent à puissance réduite (un appareil fonctionnant à puissance réduite ne peut fournir la même qualité de courant qu'à puissance nominale), ainsi les THD sont plus importants. Les conséquences de ces harmoniques peuvent être instantanées sur certains appareils électroniques : troubles fonctionnels (synchronisation, commutation), disjonctions intempestives, erreurs de mesure sur des compteurs d'énergie.

**ii. Injection de courant continu au réseau :**

Une étude montre que les onduleurs actuels (avec transformateur haute fréquence et avec ou sans transformateur basse fréquence) injectent une composante continue dans le réseau. La présence de courants DC dans les réseaux de distribution peut affecter le bon fonctionnement des dispositifs de coupure différentiels, créer des erreurs sur les compteurs d'énergie, affecter la durée de vie des composants du réseau, notamment à travers une augmentation de leur corrosion et enfin contribuer à une saturation des transformateurs.

**iii. Déséquilibre entre phases :**

L'insertion des systèmes PV engendre un déséquilibre entre phases en cas d'utilisation d'onduleurs monophasés. Si la puissance produite n'est pas correctement répartie entre les 3 phases d'un même système PV triphasé, alors ce système va contribuer à déséquilibrer le réseau BT.

**3.8.2. Influence du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques :**

Les caractéristiques, le fonctionnement et les perturbations des réseaux de distribution peuvent influencer le fonctionnement normal des systèmes PV. Ceci provient généralement, soit des caractéristiques intrinsèques des réseaux de distribution, soit de la qualité de tension dégradée par d'autres utilisateurs du réseau, soit d'une association de ces deux causes. Ces effets entraînent généralement des découplages injustifiés des onduleurs.

Les influences du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques peuvent se résumer comme suit :

**I. Régime de neutre et courants de fuite :**

Le régime de neutre utilisé en basse tension est de type TT. Avec ce régime de neutre, la protection des personnes s'effectue à l'aide de disjoncteurs ou d'interrupteurs différentiels qui ont pour fonction de s'ouvrir en cas de fuite de courant. Les installations PV peuvent produire des courants de fuite du fait des caractéristiques capacitatives des panneaux, et des onduleurs (capacités des filtres EMC).

Ces capacités en présence d'une composante alternative sur le circuit à courant continu engendrent des courants de fuite dans la liaison de mise à la terre. Ces courants de fuite peuvent être d'amplitude importante et devenir potentiellement dangereux pour les personnes en cas de contact direct avec le fil de terre. De plus, ils peuvent provoquer le déclenchement intempestif des disjoncteurs différentiels. [59]

**II. Niveau de tension du réseau :**

Le niveau initial (hors PV) de tension du réseau est un paramètre clé vis-à-vis du dimensionnement et du fonctionnement des installations PV et les types de protection de découplage.

**III. Creux de tension et tenue des systèmes PV :**

Les creux de tension sont considérés comme les plus graves perturbations de la qualité de service en raison de leurs effets sur les processus sensibles. Il s'agit d'une baisse brutale de la tension

en un point d'un réseau électrique, a une valeur comprise entre 10% et 90% suivie d'un rétablissement de la tension après un court laps de temps allant de 10ms à quelques secondes. [59]

#### IV. Présence de composante continue et d'harmoniques de tension :

Les onduleurs pour systèmes photovoltaïques hachent le courant continu issu des modules photovoltaïques en modulation à largeur d'impulsion (MLI ou PWM pour "Pulse Width Modulation") pour le convertir en courant alternatif sinusoïdal. Le fonctionnement des onduleurs sans transformateur peut être affecté par une asymétrie des tensions du réseau (déformation de la sinusoïde par addition d'harmoniques paires), par exemple en présence d'harmoniques issues de charges non-linéaires, qui se traduirait par l'ajout d'une composante DC dans la tension injectée par l'onduleur.

#### V. Inter harmoniques :

Les inter-harmoniques (fréquences qui ne sont pas un multiple entier de la fréquence du réseau) sont produits par des variations rapides des charges, ou la saturation des transformateurs. [59]

### 3.9. . Choix de l'onduleur

Les critères de compatibilité de l'onduleur avec le réseau sont :

- Caractéristiques en entrée (DC) :
- Enclenchement et déclenchement automatiques avec un seuil d'irradiation faible.
- Qualité et précision de la recherche du point de puissance maximale du champ PV (MPPT).
- Large plage de tension d'entrée (ex : 120 à 500 V).
- Protection en surtensions.
- Protection des personnes (ex : contrôle d'isolement DC).
- Caractéristiques en sortie (AC) :
- Parfaite synchronisation avec le réseau.
- Déphasage nul ou faible (facteur de puissance = 1).
- Découplage automatique du réseau si hors tolérance en tension et fréquence.
- Protection des personnes (ex : contrôle d'isolement AC).
- Caractéristiques en général :
- Rendement élevé au niveau de puissance usuelle de l'installation (ex : 92% à 98%).
- Faible consommation avec un niveau sonore réduit.
- Faibles perturbations électromagnétiques et un taux d'harmoniques petit.
- Bonne fiabilité. [60]

Le (tableau 3.1) présente quelques onduleurs photovoltaïques de technologies différentes. On peut les classer selon les critères suivant :

La présence ou non d'une isolation galvanique entre les modules et le réseau, qui peut se faire à haute fréquence ou à la fréquence du réseau.

Le nombre d'étages de conversion distinguant deux types possibles : soit la conversion directe du courant continu en un courant alternatif. Ou bien le passage par un étage DC/DC pour augmenter la tension avant de la transformer en tension alternative.

Le nombre de phases monophasé ou triphasé.

Type	Fabricant	Vendeur	Technologie	Puissance AC	Transfo	Effic. max.	Tension d'entrée	Affich. mesures	Liaison PC
<b>Onduleurs monophasés</b>									
ECOVERTER 1000	Victron (Hollande)	Total-Energie	PWM + IGBT	1 kVA	HF	93 %	50 - 90 V	Non	Non
POLYCON 2200 S, 3300 S	Studer (CH)	Studer (fin 94)	IGBT et MOSFET	2.2 kVA 3.3 kVA	Sans	97 %	100 - 750 V !	Oui	RS232
PV WR 1800	SMA (D)	Holinger, FlachGlas	Thyristors+ IGBT	1.8 kVA	HF	89 %	80 - 130 V	Oui	PV-DATA
SI-3000	Photoelectric inc., (USA)	Fabrimex	MOSFET, IGBT	3 kVA	HF	91 %	40 - 60 V 48 V nom.	Oui	Non
Siemens 1.5 kW	Siemens (D)	Fabrimex		1.5 kVA	BF	89 %	90 V nom.		
SOLARMAX S	Sputnik Eng. (CH)	Tritec	PWM, IGBT	3.3 kVA	HF	95 %	400 - 750 V	Oui	RS232, Modem, soft
SOLCON 3300/3400 HE	Hardmeier (CH)	Hardmeier	PWM+ MOSFET	3.3 kVA 3.4 kVA	HF	92 % 91,3%	80 - 120 V 70 - 140 V	Oui	RS232, SOLTALK
Sunking 5000	SMA	Holinger	PWM, IGBT	5.0 kVA	HF	93 %	240 - 400 V	Oui	RS232, Modem, soft
TOPCLASS 2500 Grid II 4000 Grid II	ASP-(CH,D)	Fabrimex, Flachglas	PWM+ MOSFET	2.2 kVA 3.3 kVA	BF	93% 94,3%	48 - 100 V 72 - 145 V 72 - 145 V	Oui	RS232
<b>Onduleurs triphasés</b>									
AEG - Telefunken	AEG - Telefunken			12 ... 150 kVA	BF	89-92 %	420 V		
ECOPOWER	Invertomatic (CH)	Invertomatic	PWM + IGBT	15 kVA .. 100 kVA	BF (option)	95 %	± 380 V nom 1000 V max	Oui	Oui, Modem Surv. fabricant
POLYCON 10000 S ... 60000 S	Studer (CH)	Studer	PWM, IGBT et/ou MOSFET	10.. 60 kVA	Sans	97 %	100 - 750 V !	Oui	RS232
Siemens	Siemens (D)	Fabrimex		3 - 5 kVA 10-100 K	BF BF	88 % > 90 %	192 V nom. 400 V nom.		
SMA	SMA (D)	Holinger		10 ... 200 kVA	BF	> 90 %	300 V nom		RS232, Modem, soft
SOLARMAX 20	Sputnik Eng. (CH)	Tritec	PWM + IGBT	12 kVA à 100 kVA	HF	93 %	450 - 800 V 550 V nom.	Oui	RS232, Modem

Tableau 3-1 : Liste de quelques onduleurs photovoltaïques disponibles sur le marché. [60]

### 3.10. Avantages et inconvénients des systèmes connectés au réseau

#### 3.10.1. Avantages

- n'ont pas besoin de stockage d'énergie et éliminent donc le maillon le plus problématique (et plus cher) d'une installation autonome. C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie.
- Pas de gaspillage - tout excédent est livré au réseau - particulièrement intéressant pendant les périodes d'absence de son domicile, pendant le week-end, pendant les vacances quand les modules continuent à travailler. On évite les pertes d'énergie associées au stockage en batterie lorsque la batterie est complètement chargée par exemple.
- On n'est pas obligé de calculer méticuleusement ses besoins en électricité, et de prévoir des niveaux de demande exceptionnellement très élevés, même si très rares.
- On peut commencer petit et agrandir par la suite sans problèmes de dimensionnement compliqués.
- On peut satisfaire à une partie ou à la totalité de ses besoins.

### 3.10.2. Inconvénients

C'est vraiment la voie royale qui permettra au photovoltaïque de faire sa percée dans nos vies. Cependant...

- La consommation risque de redevenir relativement "invisible," et on pourrait retomber dans le piège de la consommation irréfléchie.

- Les contraintes électriques imposées par les sociétés d'électricité peuvent être rigoureuses, et les onduleurs synchrones doivent répondre aux exigences techniques des compagnies de production et de transport d'énergie. Par exemple, il faut un mécanisme de coupure automatique du courant au réseau dans l'éventualité d'une panne pour éliminer tout risque à ceux qui font les travaux de réparation. Mais le plus important, c'est la question du prix payé pour les kWh livrés au réseau...

Il est difficile de dire combien de temps il faudra pour atteindre un niveau de prix où le kWh photovoltaïque sera compétitif avec le kWh conventionnel, issu de combustibles fossiles (pétrole, gaz ou charbon) ou fissile (nucléaire). Il est évident que ce choix n'est aujourd'hui économiquement viable qu'avec un soutien de fonds publics significatifs, et c'est ce que ce passe dans la plupart des pays européens. Mais ce concept est tellement séduisant que de plus en plus de personnes sont intéressés et souhaitant participer à la démonstration qu'il est possible de produire soi-même d'électricité. Au-delà des arguments rationnels, l'envie de devenir son propre producteur d'électricité et une motivation forte. Avec notre toit solaire, nous pourrions subvenir à une partie de nos besoins en ayant recourt au soleil, une source d'énergie abondante et renouvelable.

### 3.11. Conclusion

Le fonctionnement du générateur photovoltaïque et le récepteur à leur rendement optimal, nécessitent l'insertion des convertisseurs statiques entre le générateur et le récepteur.

Dans la littérature, plusieurs travaux se sont intéressés à l'étude des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique. Ce chapitre a été consacré à l'introduction de quelques notions et définitions relatives aux réseaux et les composants d'un système photovoltaïque raccordé au réseau, les différents types des onduleurs utilisés, l'influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution, afin de situer les avantages et les inconvénients de ce type de système.



---

# **Chapitre 4 : Analyse des performances des centrales PV raccordées au réseau installées dans le sud algérien**

## Chapitre 4 : Analyse des performances des centrales PV raccordées au réseau installées dans le sud algérien

### 4.1. Introduction

Le développement de l'énergie solaire peut constituer une alternative ou un complément de valeur confirmée d'autant plus que l'Algérie dispose d'un gisement solaire le plus élevé de la région MENA et d'un des plus importants au monde (Productible CSP est de 169440 TWh/an et le productible photovoltaïque (PV) est de 14 TWh/an).

A cet effet, l'état algérien déploie de grands efforts dans ce cadre afin d'agir à la fois sur la réduction et la disponibilité des sources fossiles d'énergie (réseau, tarifs) ainsi que sur l'introduction des nouvelles sources d'énergie, particulièrement l'énergie PV. L'Algérie compte 24 centrales installées dont 23 centrales PV et 01 centrale Eolienne). La puissance installée est 354,3 MW (344,1 MW PV et 10,2 MW Eolien). L'énergie produite depuis la mise en service est égale à 470,318GWh (418,739GWh PV et 51,579GWh Eolien).

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à 4 centrales PV raccordées au réseau électrique, de Kebertane, Kounta, Reggane, Timimoune. Ces centrales photovoltaïques ont été intégrées au réseau électrique national dans le cadre du programme national de développement des énergies renouvelables, en but de diversifier les ressources énergétiques, d'épargner la réserve du gaz naturel, de développer les moyens de production d'énergie renouvelables et de préserver l'environnement à travers une réduction des gaz à effets de serre.

### 4.2. Description des centrales PV

#### 4.2.1. Kebertane

La centrale PV de Kebertane se situe au sud algérien dans la wilaya d'ADRAR (Figure 4.1). Cette centrale de 3MW a atteint une production d'énergie égale à 9.584 GWH en juin 2017. La centrale est essentiellement constituée :

- Modules PV en Silicium Poly cristallin.
- Onduleurs de 500 KW.
- Transformateurs 0.4/30kV, 1MW.
- Poste d'évacuation de 30kV.

#### 4.2.2. Kounta

La centrale PV de Reggane se situe au sud algérien dans la wilaya d'ADRAR (Figure 4.1). Cette centrale de 6MW a atteint une production d'énergie égale 15.213 GWH en juin 2017. La centrale est essentiellement constituée :

- Modules PV en Silicium Poly cristallin.
- Onduleurs de 500 KW.
- Transformateurs 0.4/30kV, 1MW.
- Poste d'évacuation de 30kV.

### 4.2.3. Reggane

La centrale PV de Reggane se situe au sud algérien dans la wilaya d'ADRAR (Figure 4.1). Cette centrale de 5MW a atteint une production d'énergie égale à 12.221 GWH en juin 2017. La centrale est essentiellement constituée :

- Modules PV en Silicium Poly cristallin de type YL245P-29b.
- Onduleurs de 500 KW.
- Transformateurs 0.4/30kV, 1MW.
- Poste d'évacuation de 30kV.

### 4.2.4. Timimoune

La centrale PV de Reggane se situe au sud algérien dans la wilaya d'ADRAR (Figure 4.1). Cette centrale de 9MW a atteint une production d'énergie égale à 32.822 GWH en juin 2017. La centrale est essentiellement constituée :

- Modules PV en Silicium Poly cristallin.
- Onduleurs de 500 KW.
- Transformateurs 0.4/30kV, 1MW.
- Poste d'évacuation de 30kV.

centrale	Wilaya	Puissance active de sortie (MW)	Surface du champ (Km <sup>2</sup> )	Energie atteint en juin 2017 (GW h)	Type de modules PV
Kabertane	Adrar	3	0.06	9.584	Poly cristallin
Kounta	Adrar	6	0.12	15.213	Poly cristallin
Reggane	Adrar	5	0.1	12.221	Poly cristallin
Timimoune	Adrar	9	0.18	32.822	Poly cristallin

Tableau 4-1 : Un tableau récapitulatif décrivant les 4 centrales [61]

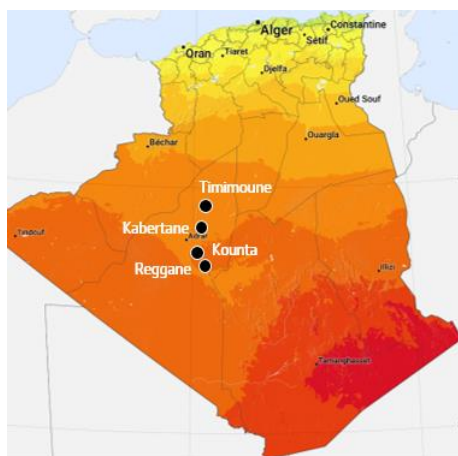


Figure 4-1 : La position géographique des 4 centrales.



Figure 4-1 : Photos correspondants de la centrale PV Kabertane 3 MW.



Figure 4-2 : Photos correspondants de la centrale PV Kounta 6 MW.



Figure 4-3 : Photos correspondants de la centrale PV Reggane 5 MW.



Figure 4-4 : Photos correspondants de la centrale PV Timimoune 9 MW.

### 4.3. Résultats et interprétation

Le but de ce travail est d'effectuer une analyse expérimentale des différents paramètres mesurés afin de vérifier le bon fonctionnement de chacune des centrales proposées à l'étude au cours de l'année 2017.

#### 4.3.1. Conditions météorologiques

##### I. Eclairage

Pour déterminer la puissance produite par la centrale photovoltaïque, la connaissance du profil d'ensoleillement au cours de l'année est obligatoire. Les Figures (4.5-8) montre la fluctuation de l'éclairage durant l'année 217 pour les 4 sites proposés. Comme nous pouvons le voir, l'intensité du rayonnement est restée élevée au cours de l'année. On observe que la valeur maximale de l'éclairage est atteinte en mars. Quant à la valeur minimale d'éclairage, elle est enregistrée en juin. Les conditions climatiques du site de chaque centrale sont les suivantes : fort potentiel d'ensoleillement et le ciel est généralement dégagé durant toute l'année.

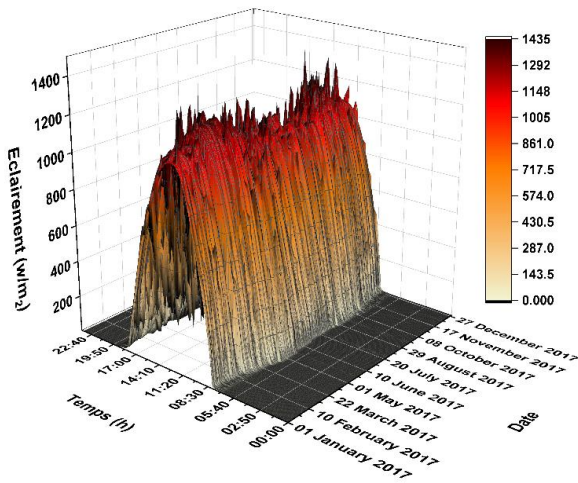


Figure 4-5 : Variation d'éclairage de la centrale PV de Timimoune durant 2017.

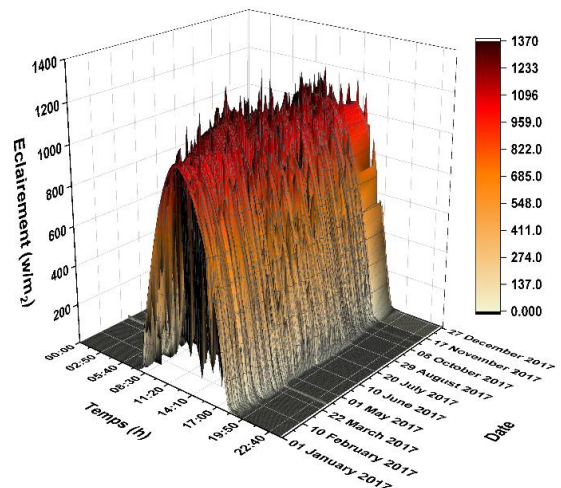


Figure 4-6 : Variation d'éclairage de la centrale PV de Kabertene durant 2017.

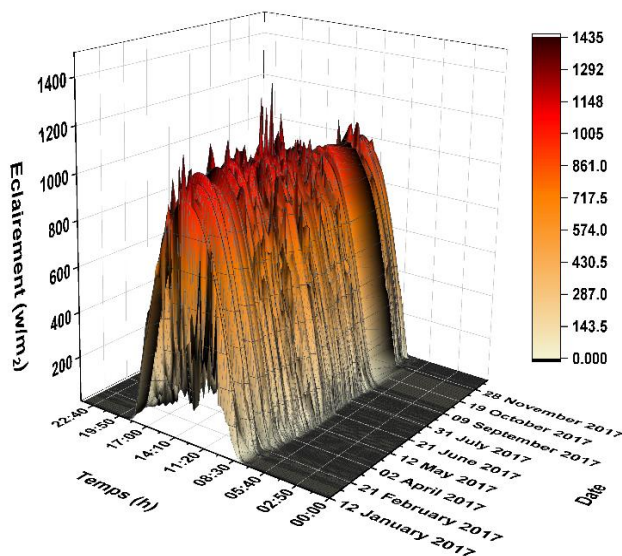


Figure 4-7 : Variation d'éclairage de la centrale PV de Kounta durant 2017.

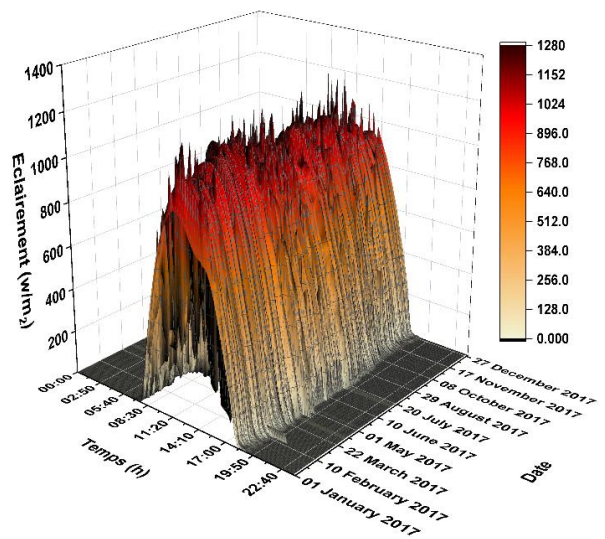


Figure 4-8 : Variation d'éclairage de la centrale PV de Reggane durant 2017.

## II. Température

Les Figures (4.9-12) représentent les températures mesurées dans les 4 centrales, on constate que les 4 centrales ont les mêmes valeurs de changement de température durant l'année 2017, on note aussi que la température devient plus importante dans l'été par rapport aux autres saisons.

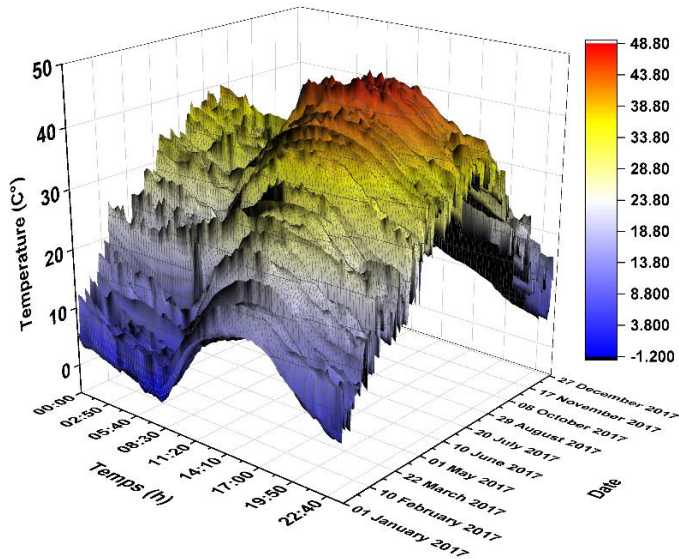


Figure 4-9 : Variation de la température de La centrale PV de Timimoune durant 2017.

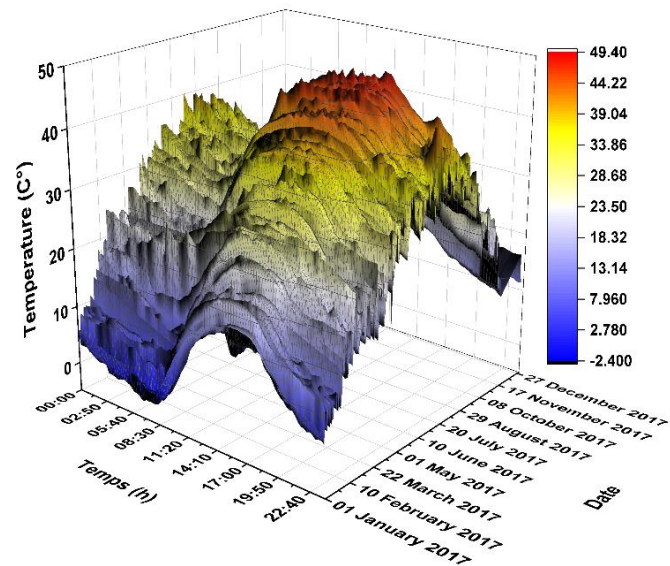


Figure 4-10 : Variation de la température de La centrale PV de Kabertane durant 2017.

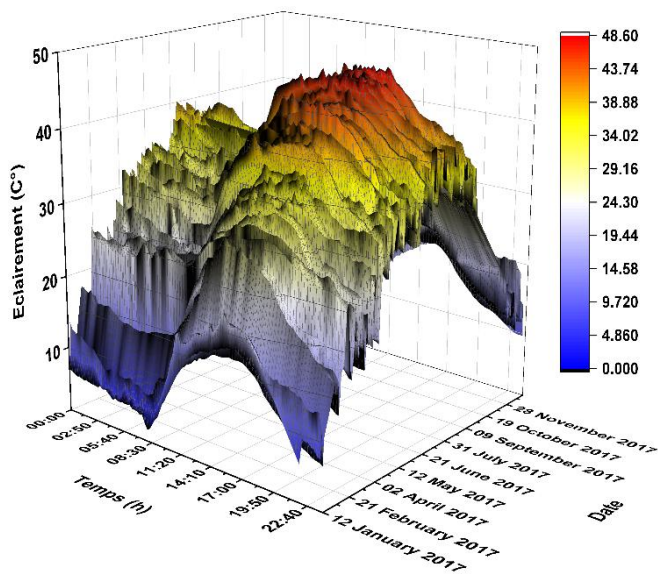


Figure 4-11 : Variation de la température de la centrale PV de Kounta durant 2017.

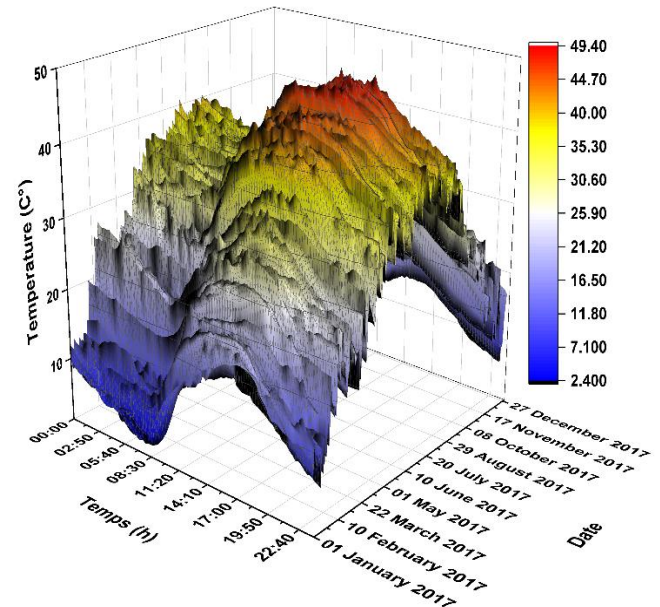


Figure 4-12 : Variation de la température de La centrale PV de Reggane durant 2017.

### III. Pression

La pression atmosphérique correspond à la pression générée par une colonne d'air en un point donné, qui est mesurée par le baromètre. La Figure 4.13 affiche la variation de la pression atmosphérique moyenne pour les 4 centrales.

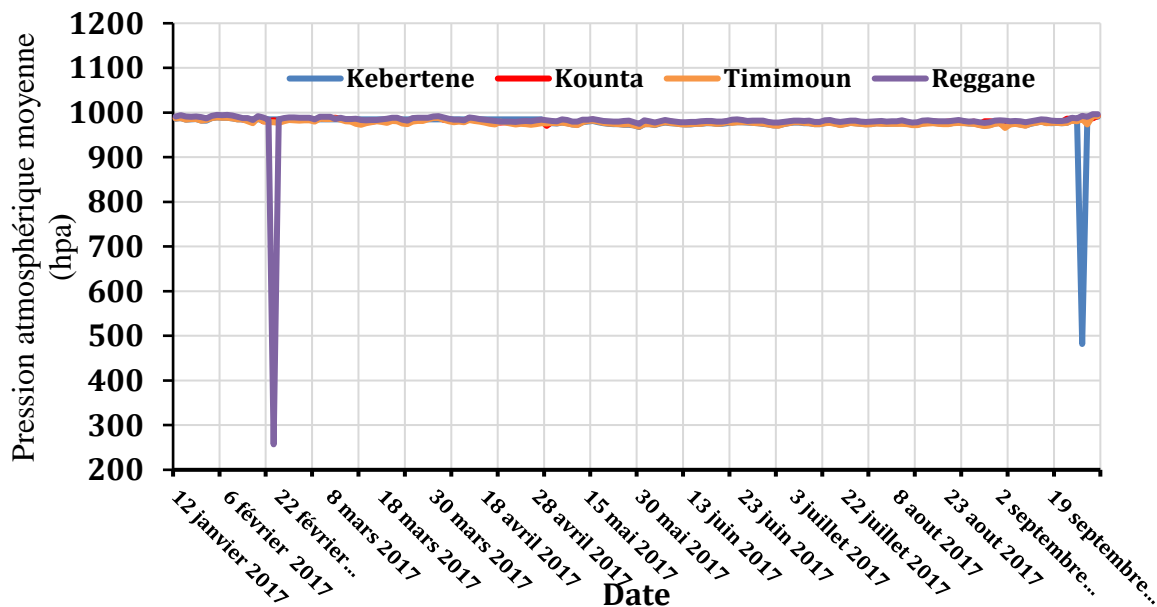


Figure 4-13 : Variation de la Pression atmosphérique moyenne pour les 4 centrales PV durant 2017.

### IV. Vitesse du vent

La vitesse du vent, est une quantité atmosphérique fondamentale causée par le déplacement de l'air de haute à basse pression, on la mesure par l'anémomètre. La Figure 4.11 montre les changements de la vitesse du vent pour les 4 sites durant l'année 2017.

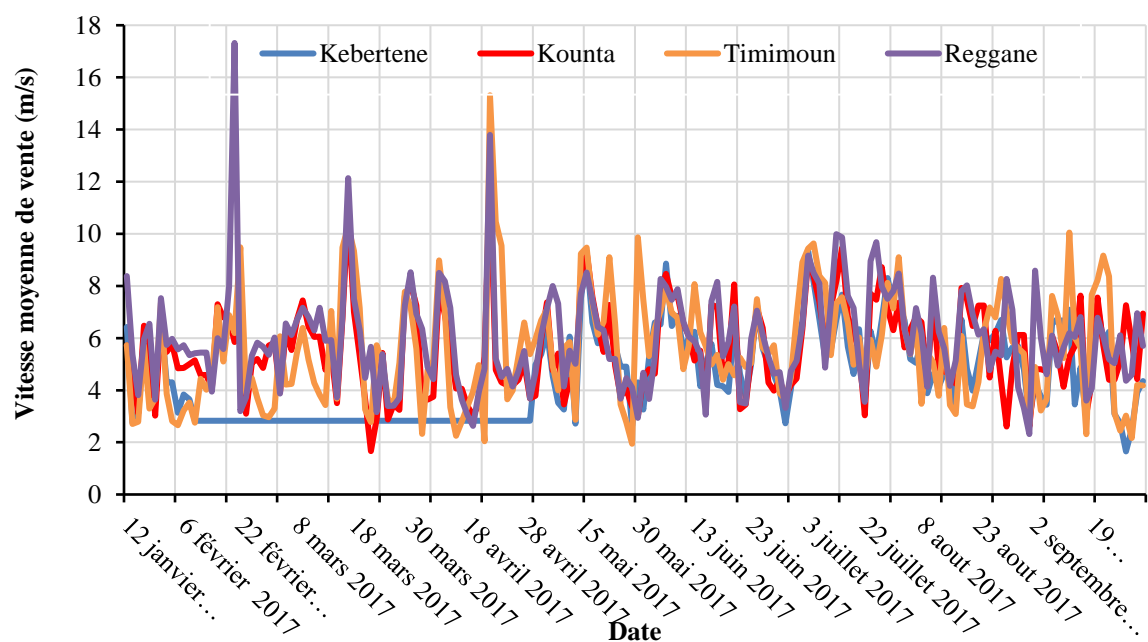


Figure 4-14 : Variation de la vitesse de vent moyenne pour les 4 centrales PV durant 2017.

## V. Humidité

L'humidité décrit la quantité de vapeur d'eau dans l'air. Elle est mesurée par l'hygromètre. La Figure 4.12 montre la variation de pression humidité moyenne pour les 4 centrales. On constate que la pression et l'humidité ont des petites valeurs dans les 4 sites durant l'année 2017, cela est dû au climat saharien.

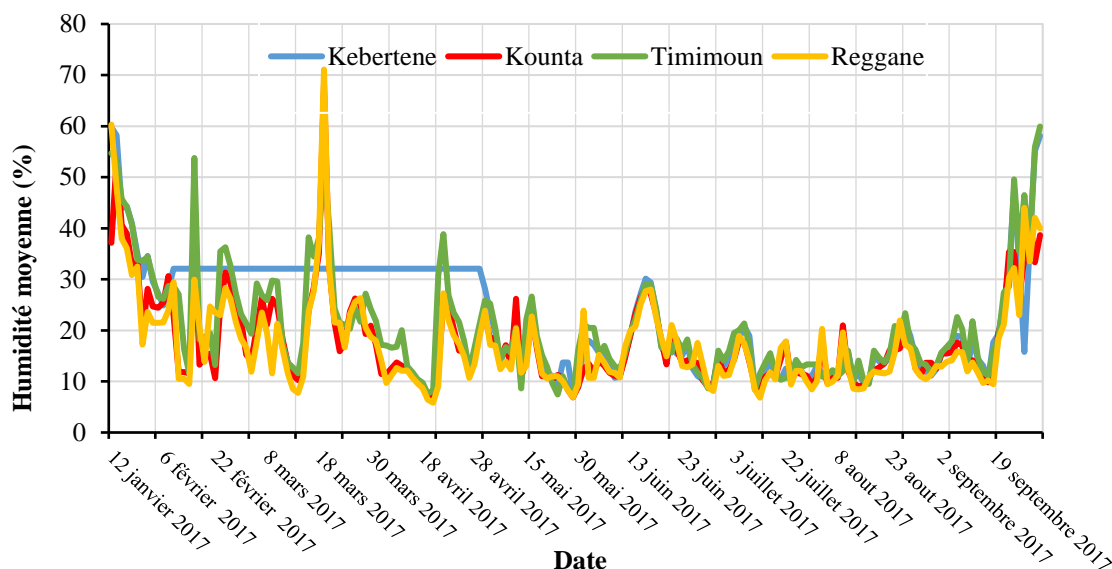


Figure 4-15 : Variation de la vitesse de vent moyenne pour les 4 centrales PV durant 2017.

### 4.3.2. Analyse de la performance de la Centrale PV

#### I. Variation mensuelle des valeurs mesurées des énergies ES et EI durant 2017

Selon les Figure (4.16-19), les champs PV des 4 centrale connectées au réseau délivrent à ses sorties l'énergie ES mesurée quotidiennement. Les figures montrent la variation de l'énergie injectée EI dans le réseau. Les valeurs d'ES et EI sont des valeurs d'énergie quotidiennes maximales de chaque mois. ES et EI varient selon les saisons proportionnellement au l'éclairément. La différence entre les deux histogrammes donne l'approximation de l'énergie consommée par les charges.

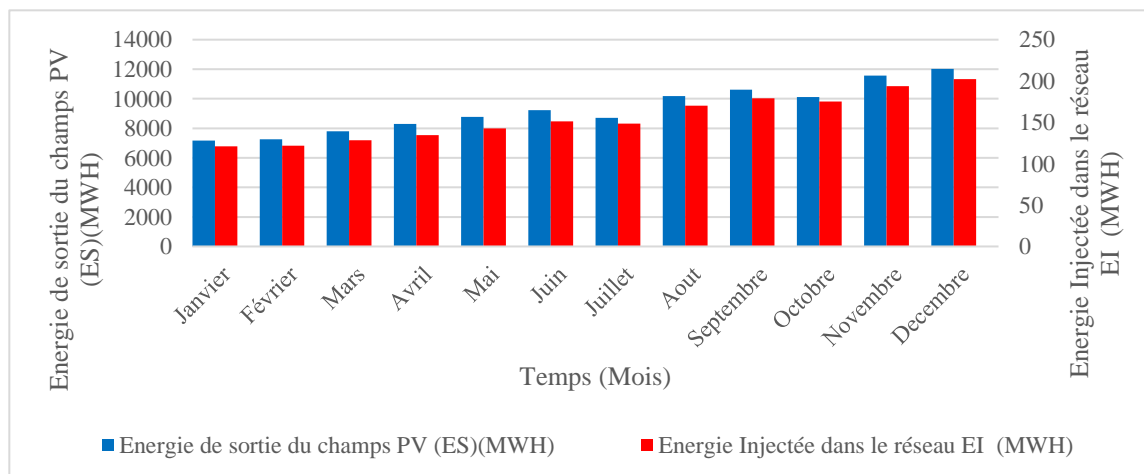




Figure 4-16 : Variation mensuelle des valeurs mesurées des énergies ES et EI du centrale PV de Kabertane durant 2017.

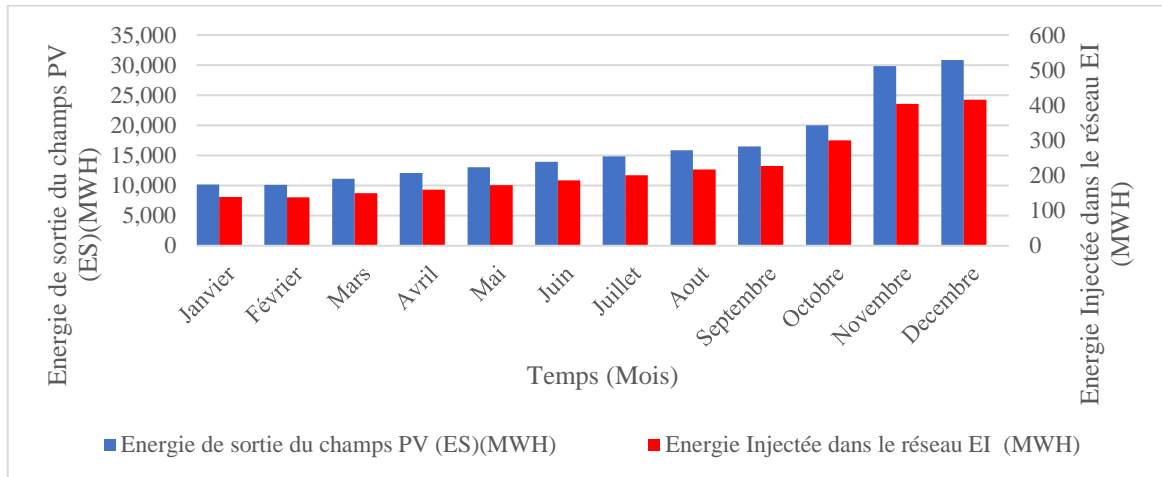


Figure 4-17 : Variation mensuelle des valeurs mesurées des énergies ES et EI du centrale PV de Kounta durant 2017.

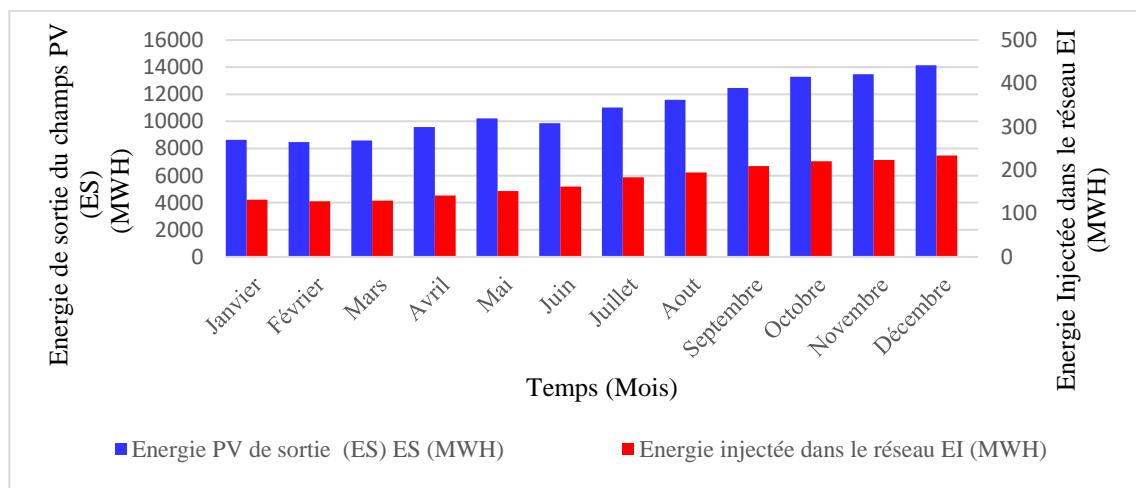


Figure 4-18 : Variation mensuelle des valeurs mesurées des énergies ES et EI du centrale PV Reggane durant 2017.

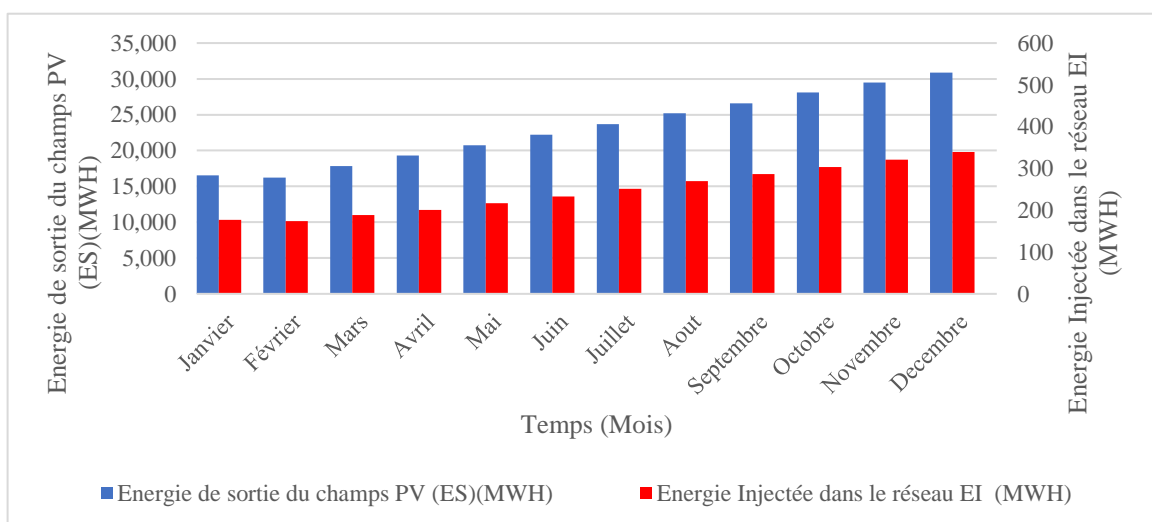


Figure 4-19 : Variation mensuelle des valeurs mesurées des énergies ES et EI du centrale PV de Timimoune durant 2017.

## II. Allure de la réponse de la puissance durant 2017

Les figures 4.20-23 se représentent l'allure de la réponse de la puissance de les 4 centrales PV durant l'année 2017.

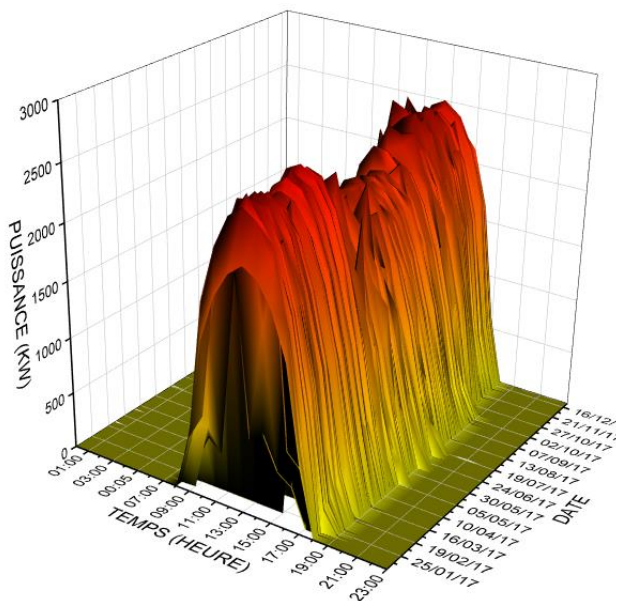


Figure 4-20 : Allure de la réponse de la puissance de la centrale PV Kabertane durant 2017

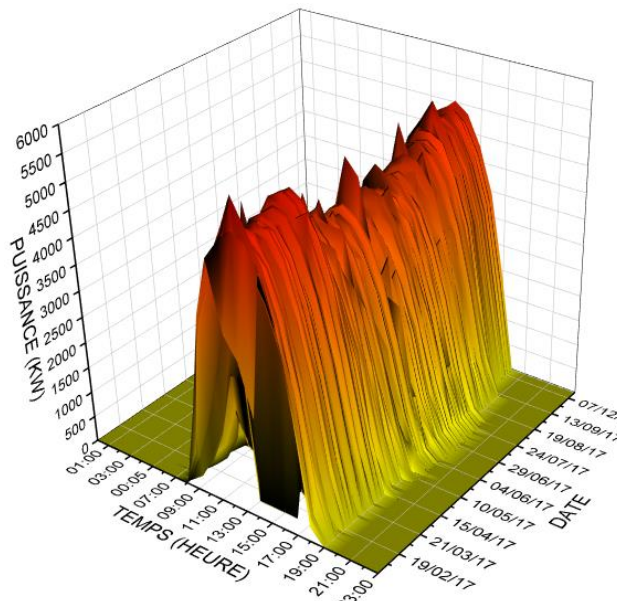


Figure 4-21 : Allure de la réponse de la puissance de la centrale PV Kounta durant 2017

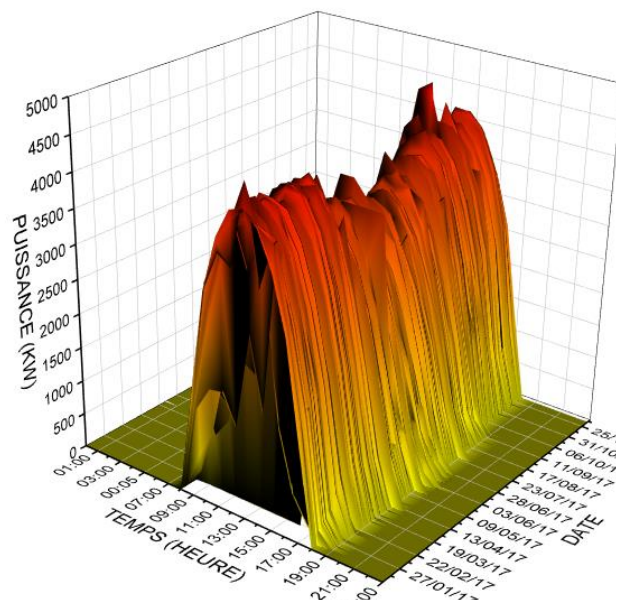


Figure 4-22 : Allure de la réponse de la puissance de la centrale PV Reggane durant 2017

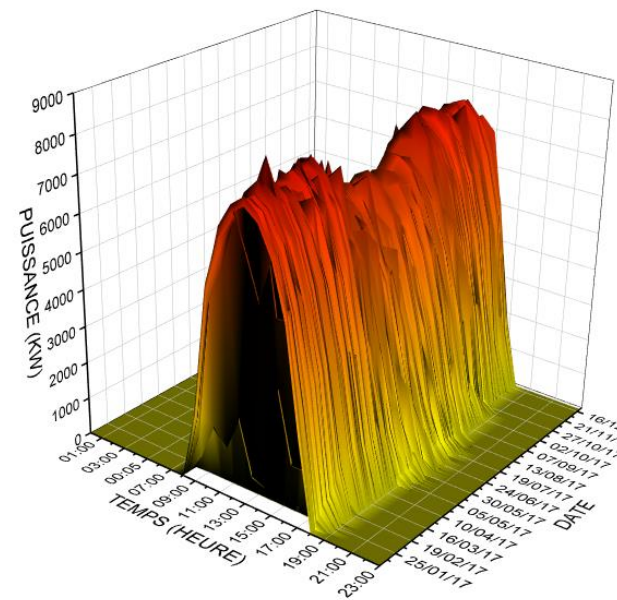


Figure 4-23 : Allure de la réponse de la puissance De la centrale PV Timimoune durant 2017

### III. Influence de la variation de l'éclairement sur la valeur efficace de la puissance AC

D'après les Figure (4.24-27), la courbe Puissance(KW) représente la puissance AC efficace injectée au réseau. Les figures montrent l'évolution de la puissance AC par rapport à la variation de l'éclairement, tout au long de la l'année 2017 qui a été choisie comme une année type. On peut déduire que les onduleurs arrivent rapidement à traquer le point de puissance maximale (MPPT) et avec une grande efficacité. Donc les résultats révèlent que le système PV est robuste, stable et efficace face aux changements climatiques.

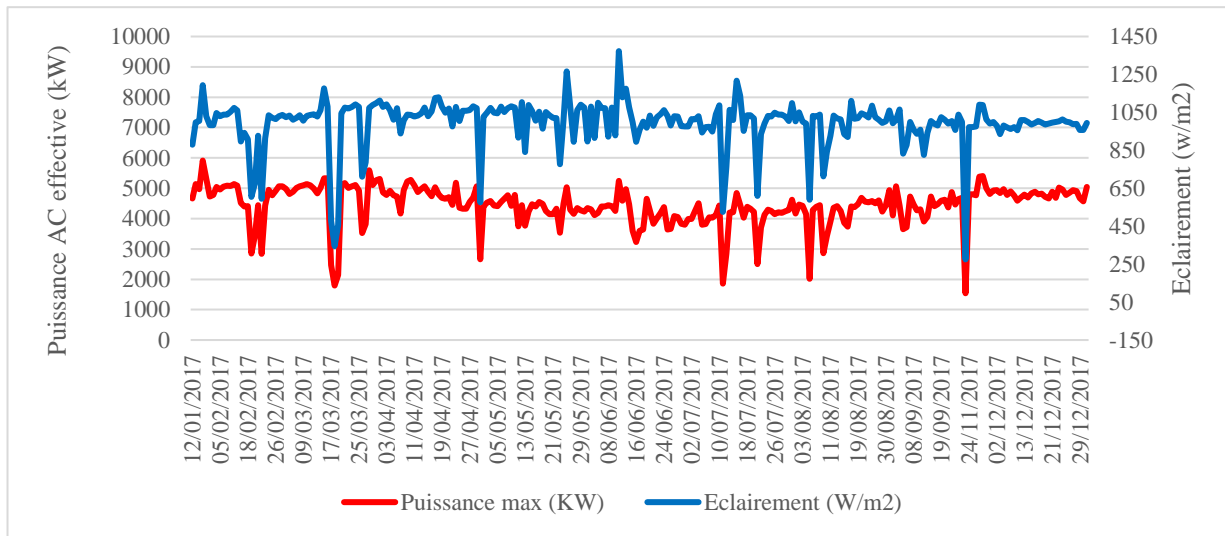


Figure 4-24 : Influence de la variation de l'éclairement sur la valeur efficace de la puissance AC de la centrale Kabertane durant 2017.

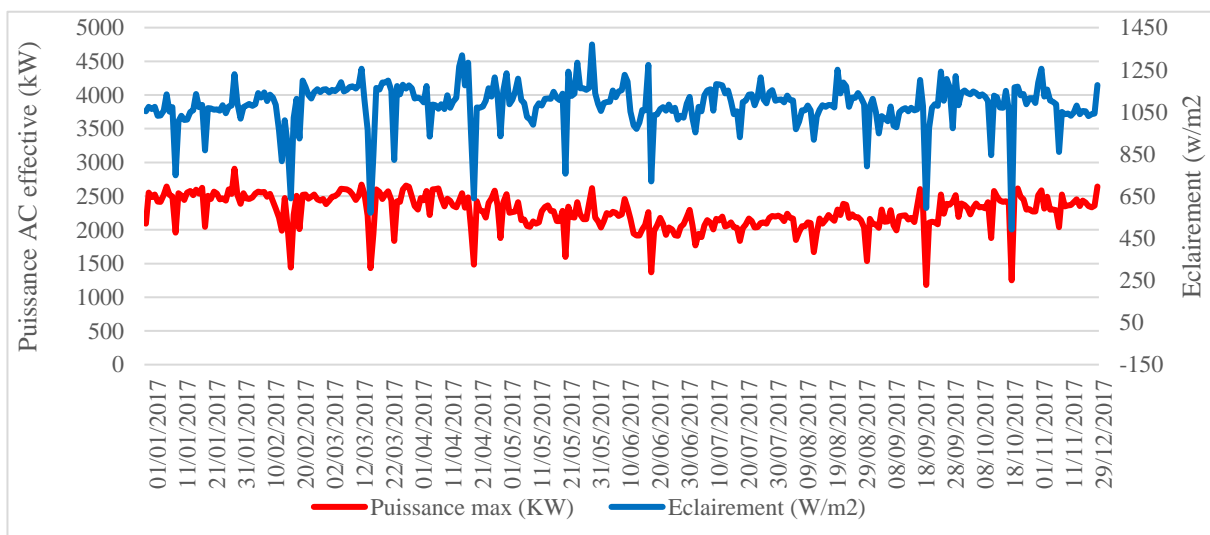


Figure 4-25 : Influence de la variation de l'éclairement sur la valeur efficace de la puissance AC de la centrale Kounta durant 2017.

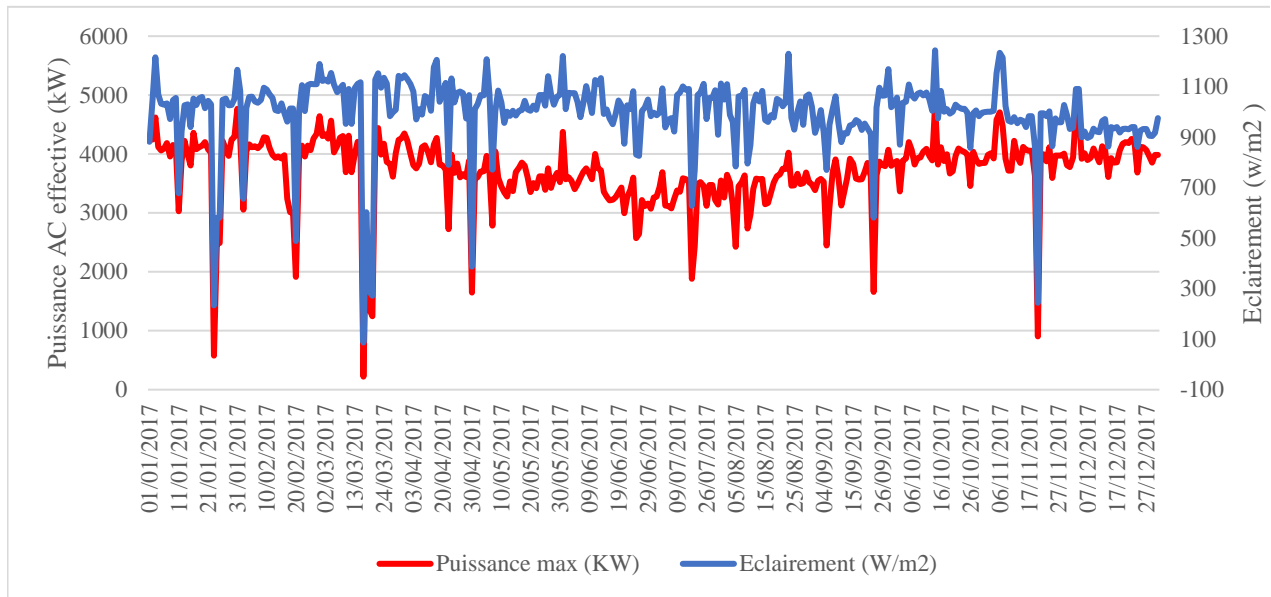


Figure 4-26 : Influence de la variation de l'éclairement sur la valeur efficace de la puissance AC de la centrale Reggane durant 2017.

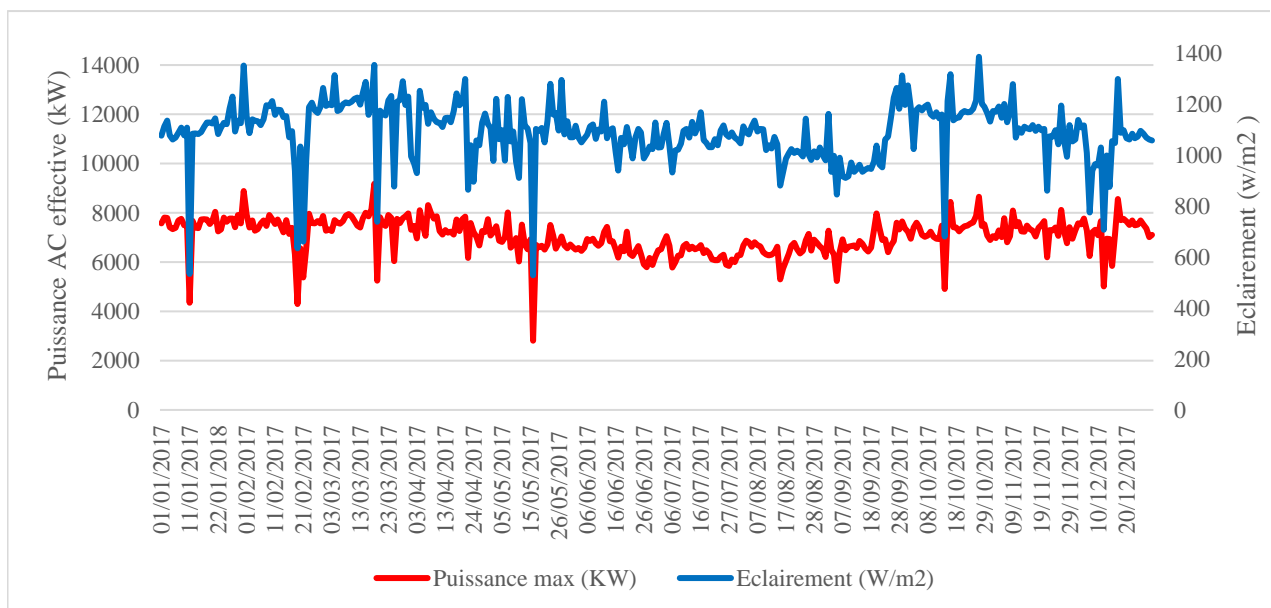


Figure 4-27 : Influence de la variation de l'éclairement sur la valeur efficace de la puissance AC de la centrale Timimoune durant 2017.

#### IV. Sélection d'une journée de chaque saison afin de d'effectuer une étude comparative en termes de puissance active de sortie

Dans cette étude, on a choisi la centrale PV Kounta, afin de d'effectuer une analyse comparative en termes de puissance active de sortie en fonction d'éclairement et de la température et de temps. On a sélectionné un jour de chaque saison afin d'étudier la réponse dynamique de la puissance de sortie. On constate que la plus importante valeur de la puissance est enregistrée le 13 Avril, et cela est dû à l'éclairement qu'est aussi les plus élevé dans ce jour. Bien que les valeurs enregistrées d'éclairement dans le jour de 06 juillet et le jour de 24 Novembre presque les mêmes, la valeur de la puissance du premier jour est moins importante que le deuxième, et cela est dû l'influence de la température qu'est très importante dans le premier jour.

On constate aussi qu'il y a une perturbation au cours de la journée de 12 janvier qu'est causé par la perturbation des conditions météorologique.

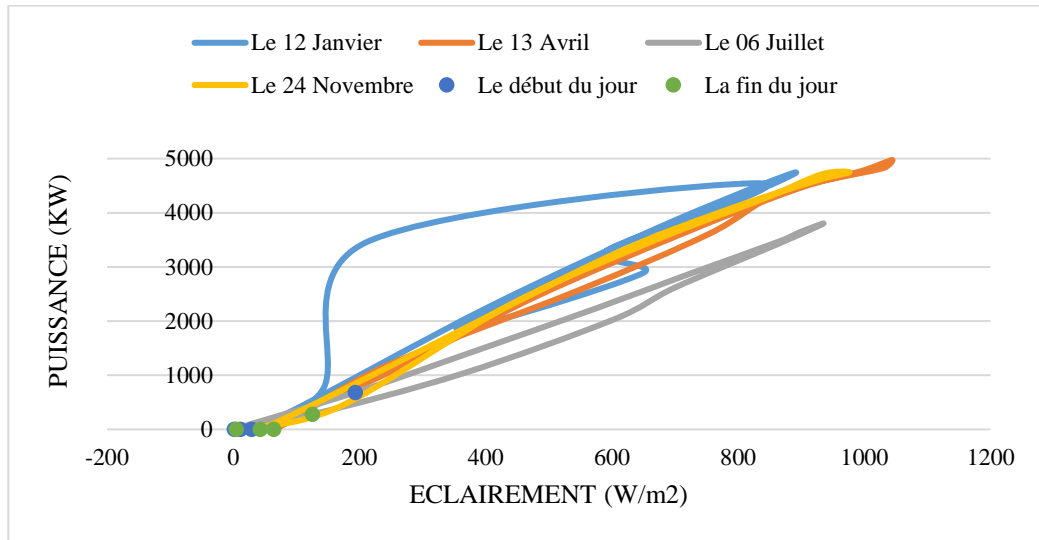


Figure 4-28 : La variation de la puissance en fonction d'éclairement durant les journées choisies dans la centrale de Kounta.

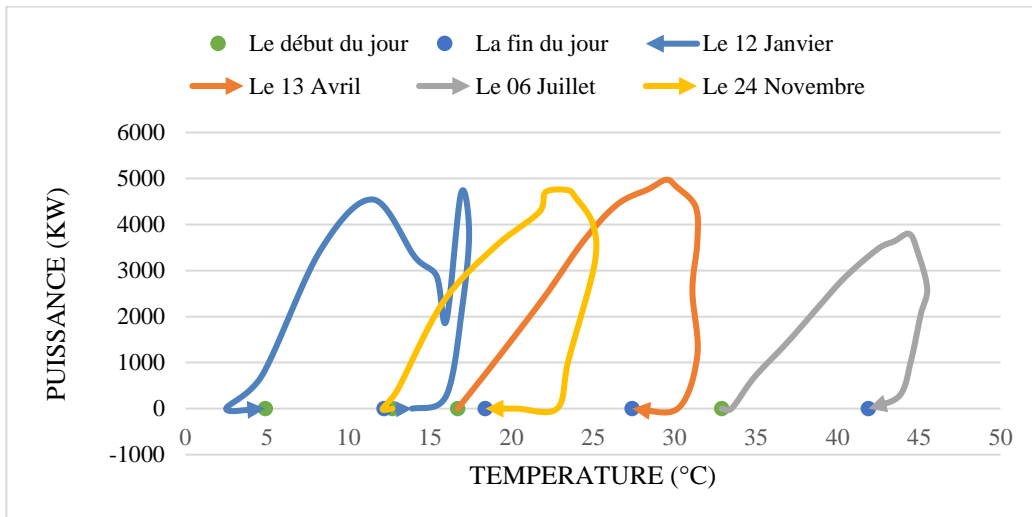


Figure 4-1 : La variation de la puissance en fonction de la température durant les journées choisies dans la centrale de Kounta.

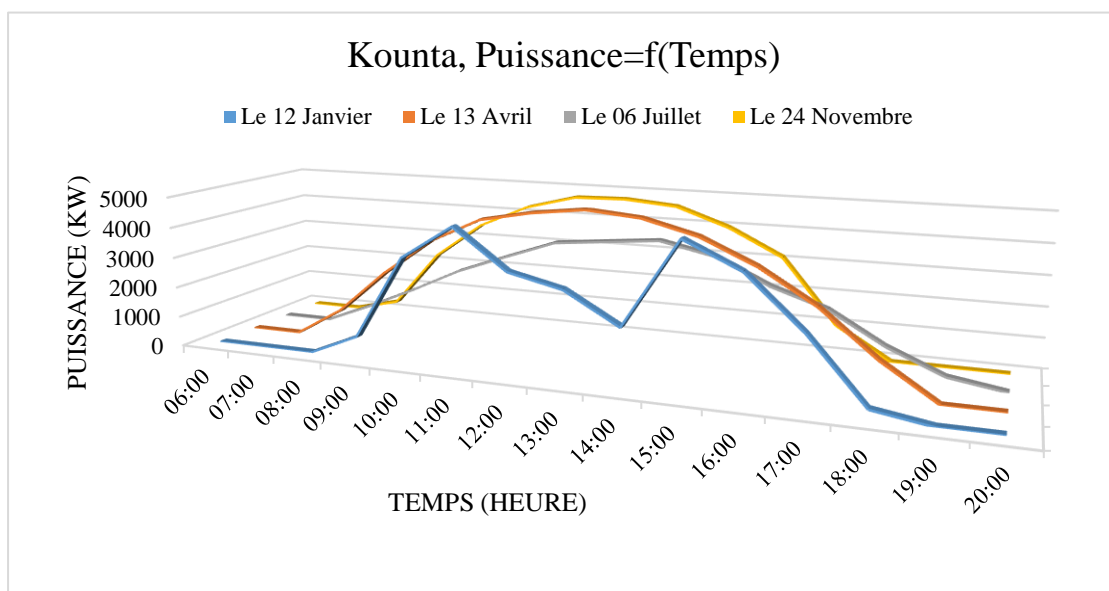


Figure 4-2 : La variation de la puissance en fonction du temps durant les journées choisies dans la centrale de Kounta.

#### 4.4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté une étude expérimentale qui pour but d'observer le comportement du 4 centrales PV connectées au réseau (Kabertane, Kounta, Reggane et Timimoune) dans des conditions climatiques spécifiques. L'objectif est d'évaluer les performances de la centrale à partir des différents paramètres mesurés tels que l'énergie de sortie du champ PV, énergie injectée et la puissance AC efficace. En globalité, l'analyse des performances des centrales proposées a montré qu'il n'y a pas eu dysfonctionnement durant 2017. On a noté que les performances des modules en conditions réelles de fonctionnement varient correctement en comparaison avec leurs performances sous les STC. En exploitant les données enregistrées en 2017, nous avons pu vérifier la qualité de la puissance AC injectée quotidiennement au réseau. Cette analyse nous a permis de voir dans des conditions réelles les effets de la température et de l'éclairement sur le comportement dynamique de ces centrales. Les résultats indiquent que la puissance produite par les centrales PV connectées au réseau répond aux spécifications requises pour ces systèmes par rapport aux normes internationales.

---

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Dans ce mémoire nous avons analysé 4 centrales Photovoltaïques raccordées au réseau, Kabertane, Kounta, Reggane et Timioune, qui sont installées dans le sud algérien, exactement à Adrar.

Dans cette étude, nous avons étudié l'état de l'art des énergies renouvelables. Ensuite, nous avons donné des généralités sur le gisement solaire et sur la conversion photovoltaïque. Puis, nous avons présenté les différents composants nécessaires d'un système PV connecté au réseau. Enfin, nous avons présenté l'analyse expérimentale des performances des centrales PV proposées à l'aide des données des conditions météorologiques et les énergies d'entrée et de sortie de chaque centrale et leur puissance active de sortie.

Prochainement et toujours dans ce même axe de recherche, Il serait également intéressant compléter ce travail par une étude économique qui permettra d'évaluer le rendement de chaque centrale PV proposée à l'étude.



## Bibliographie et Webographie

- [1] Bp “Statistical Review of World Energy 2020”, livre, London, 2020.
- [2] Our World in Data “www.OurWorldinData.com.” Web site, 2020.
- [3] Ren21 “RENEWABLES 2020”, Rapport, France, 2020
- [4] Ember “Global Electricity Review “, Rapport, mars 2020.
- [5] Administration USEI. « Pétrole et gaz de schiste techniquement récupérables Resources » « <https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/Pdf/OverviewPdf> 2013 ». « <https://doi.org/www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/> ».
- [10] Administration USEI. Country Analysis Executive Summary: Iran 2019; 2016:1–6.
- [6] Dudley B, others. BP statistical review of world energy 2019. BP Stat Rev London, UK 2019 ; 7 :2019.
- [7] Ministère de l'énergie. Energies Nouvelles, Renouvelables et Maitrise de l'Energie. Ministère de l'énergie 2016:1–25.
- [8] Creg.dz. « Commission for Regulation of Electricity and Gas ». Program indicative of the requirements for means of production of electricity (2008-2017).
- [9] Younes Zahraoui , M. Rezasudin Basir Khan , Ibrahim Al Hamrouni , Saad Mekhilef , and Mahrous AhmedCurrent , “Status, Scenario, and Prospective of Renewable Energy in Algeria: A Review”, Article , 9 mars 2021.
- [10] Himri Y, Malik AS, Boudghene Stambouli A, Himri S, Draoui B. Review and use of the Algerian renewable energy for sustainable development. Renew Sustain Energy Rev 2009; 13:1584–91.
- [11] Africa Energy Series. Algeria Special Report. 2020.
- [12] Hill J. Another solar module factory in Algeria. PV-Magazine 2020
- [13] Association IH, others. Hydropower status report 2015. Int Hydropower Assoc London, UK 2015.
- [14] International Hydropower Association. Hydropower status report 2019.
- [15] Laouari A. Hydropower in Algeria: Current status and future opportunities. International J Hydropower Dams 2017; 24.
- [16] Algeria’s solar and wind power industries grow. Oxford Bus Gr 2019. <https://oxfordbusinessgroup.com/> (accessed June 12, 2020).
- [17] Bouznit M, Pablo-Romero M del P, Sánchez-Braza A. Measures to Promote Renewable Energy for Electricity Generation in Algeria. Sustainability 2020; 12:1468.
- [18] Himri Y, Merzouk M, Merzouk] N [Kasbadji, Himri S. Potential and economic feasibility of wind energy in south West region of Algeria. Sustain Energy Technol Assessments 2020.
- [19] Farida BOUKHTOUCHE CHERFA, Performances de la centrale Photovoltaïque connectée au Réseau BT installée au CDER et cadre législatif Algérien, CDER.
- [20] Installation et maintenance, IFEG, Blida.
- [21] Néji AMAIMIA and Rachid EL MOKNI « Installation et maintenance des systèmespv ». Formation sur les systèmes photovoltaïques, Chambre syndicale nationale des énergies renouvelables, 2011.
- [22] LAROUSSE, « Le Petit LAROUSSE Illustré », Edition 2007.
- [23] Yves JANNOT, « Solaire thermique », Octobre 2003.
- [24] M. Belhadj Mohammed « Modélisation d’un système de captage photovoltaïque Autonome » Mémoire de Magister, centre universitaire de Bechar, 2008.

- [25] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sada, *Le pompage photovoltaïque : Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens*, Université de Ottawa, 1998.
- [26] Helali Kamelia, « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative », Mémoire de Magister en électrotechnique Option Machines Electriques, Université Mouloud Les références bibliographiques Mammeri de Tizi ousou, 2012.
- [27] M. PETIBON Stéphane. Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques. Thèse de Doctorat. Université de Toulouse, 2009.
- [28] Chadlia Hanene Baghana Chems Edine, « Installation D'une Centrale Photovoltaïque Dans Le Réseau Isole D'Adrar (P.I.A.T) », Mémoire De Master De Université Badji Mokhtar-Annaba, juin 2019.
- [29] SLAMA FATEH. Modélisation d'un système multi générateur photovoltaïque interconnecté au système électrique, Mémoire de Magister \_ université FARHET ABBES SETIF.
- [30] Ministère de l'Énergie et des Mines Algérie, Guide des Énergies Renouvelables, Édition 2007.
- [31] Wahiba BELAID. Analyse des pertes thermiques de l'utilisation des matériaux sélectifs des convertisseurs de l'énergie solaire. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2014.
- [32] Ahmed Bouraiou, Ammar Neçaibia, Nadir Boutasseta, Saad Mekhilef, Rachid Dabou, AbderrezzaqZiane, Nordine Sahouane, Issam Attoui, Mohammed Mostefaoui, Oussama Touaba, « Status of Renewable Energy Potential and Utilization in Algeria », article, 21 October 2019.
- [33] AkassewaTchapo SINGO, Système d'alimentation photovoltaïque avec. Stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [34] Nardjes Yasmine El HAMZAOUI « Intégration des Stations Photovoltaïques dans les Systèmes Electriques », mémoire de master de Université d'Adrar Ahmed Draïa Faculté des Sciences et des technologies Département des sciences de la matière, 2017.
- [35] Angel Cid Pastor « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », thèse de doctorat. Institut National Des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [36] Sadi Mohammed El Amine, Hamlat Zohra « L'impact Des Energies Renouvelables Sur Le Réseau Electrique Ouest Algérien 220Kv », 2014.
- [37] Mertens KONRAD. Photovoltaics: Fundamentals, Technology and Practice. John Wiley& Sons, 2013.
- [38] JJ PIREAUX. Physique et énergie travail sur les panneaux photovoltaïques. Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix, Namur–Année académique, 2007, 2006.
- [39] Maehlum, M.A. (2015) Energy Informative the Homeowner's Guide to Solar Panels, Best Thin Film Solar Panels Amorphous, Cadmium Telluride or CIGS? Last updated 6 April 2015.
- [40] Barale Clara, Canehan Camille, Merzouk Anaïs, Sahrane Emilia, « solar-lum », 2019.
- [41] Meziane Aoues, Rachid Zirmi, Mustapha Zaouia, Nabil Benyahia « Etude d'impact d'une centrale photovoltaïque sur un réseau électrique », mémoire de master Faculté Du Génie Electrique Et D'informatique Département D'électrotechnique, 17 juillet 2017.
- [42] Stéphane Vighetti, « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion », mémoire de doctorat de l'université de Grenoble délivré par l'institut polytechnique de Grenoble ,24 septembre 2010.
- [43] Tarek Bouguerra, « Optimisation d'un système photovoltaïque : Application en continu et en alternatif », Mémoire de Magister en Electrotechnique de Université Mentouri de Constantine 1, 30 juin 2014.
- [44] Ibrahim Tahraoui, Amine Halil « Dimensionnement et Etude d'une installation Photovoltaïque pour une habitation domestique », Mémoire De Master de Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 28 Juin 2017.

- [45] Belmeliani Mohammed Réda, Youcef Wahiba « Modélisation d'un système photovoltaïque relié au réseau : Contrôle des puissances active et réactive »
- [46] Aboub Hania « Commande D'un Onduleur Neuf Niveaux, Destiné Aux Fortes Puissances PV », Mémoire Magister En Electrotechnique Université Hadj Lakhdar – Batna, 28 Juin 2014.
- [47] K. Kassmi, M. Hamdaoui et F. Olivié, « Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique », Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°4 (2007) 451 –462.
- [48] Nouar Aoun. Etude et modélisation des différents modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales. Thèse de doctorat, Université de Constantine. Algérie, 2010.
- [49] Salim Arab, Dalila Toudert « Etude d'un Système Photovoltaïque », Mémoire de Master de Génie Electrique de Universite Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 25 Septembre 2017.
- [50] 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.
- [51] AMARA Karima, « Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension », Mémoire de master d'Universite Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2015.
- [52] Moine Gérard « L'énergie solaire photovoltaïque (PV) : une filière compétitive en site isolé », article, octobre 2016.
- [53] M. ZELLAGUI Mohamed. Etude des protections des réseaux électriques MT. Mémoire de magister. UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE, 2010.
- [54] Sofiane FELLOUAH, Siham MESBAHI, « MATERIAUX ET DISPOSITIFS ELECTRONIQUES ET PHOTOVOLTAIQUES », Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE, TIZI-OUZOU.
- [55] Abbassen –lyse « Etude de la connexion au réseau électrique d'un centrale Photovoltaïque » Mémoire de Magister univ-tizi ouzou 5 -2011
- [56] Zidane Achref eddine, Sahtout Mehdi, « LES SYSTEMS PHOTOVOLTAIQUES CONNECTES AU RESAU », MEMOIRE DE MASTER, Annaba.
- [57] Polytech' Savoie 5eme année, Alain Ricaud, Oct 2011.
- [58] Gamni Abdelkader, « Etude et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique (étude de cas réseau d'Adrar) », », MEMOIRE DE MASTER, Adrar.
- [59] TKOUTI NACIRA, « Optimisation des Systèmes Photovoltaïques Connectés au Réseau par la Logique Floue », MEMOIRE DE MAGISTER, Biskra.
- [60] PACER. Centrale photovoltaïque, Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets, 1996.
- [61] Tekai Eddine Khalil Zidane, Mohd Rafi Adzman, Optimal Design of Photovoltaic Power Plant Using Hybrid Optimisation: A Case of South Algeria, juin 2020.