الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



جامعة الدكتور يحي فارس بالمدية

Université Dahia Farès de Médéa



FACULTE´ DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

Projet de fin d'études présenté pour l'obtention du diplôme de :

MASTER EN ENERGIE RENOUVELABLE

Spécialité : ENERGIE RENOUVELABLES EN ELECTROTECHNIQUE

Thème :

ETUDE ET OPTIMISATION D'UNE CENTRALE PHOTOVOLTAIQUE RACCORDEE AU RESEAU 60 kV

Application sur la central PV de Ain El bel-Djelfa

Sous la direction de

Mr. MORSLI Abdkader

Mr. KHARKHACHE Mustapha

Prépare par :

FEKIRINI Ahmed

HARRAG Bachir

ANNEEN UNIVERSITAIRE 2017-2018

يقدم هذا البحث دراسة تجريبية حول محطة الطاقة الكهروضوئية عالية الجهد المتصلة بالشبكة والتي تم تركيبها في الجزائر في ولاية الجلفة بمنطقة عين الإبل، والتي تم وضعها حيز الخدمة منذ عام 2016. وتهدف الدراسة إلى إظهار القدرة الطاقوية الحقيقية للمحطة وكذا تأثير الظروف المناخية للموقع على الإنتاجية الكهربائية، كما تقدم الدراسة في الأخير بعض الاقتراحات بهدف تحسين إنتاجية المحطة وكذا ربطها بالشبكة.

كلمات مفتاحية: الكهروضوئية، محطة كهروضوئية، شبكة نقل الكهرباء، إمكانيات الطاقة الشمسية الجزائرية، دراسة تجريبية، العائد المرجعي، العائد النهائي، نسبة الأداء.

Ce travail présente une étude expérimentale sur une centrale photovoltaïque de grande échelle raccordé au réseau transport ; installer en Algérie au niveau de la willaya de Djelfa dans la région de Ain el bel et mise en services depuis 2016, l'étude a pour but de montré la capacité énergétique réel de la centrale ainsi que l'influence des conditions climatique du site sur la productivité électrique, comme elle propose également des préconisations pour optimiser la productivité de la centrale et son intégration au réseau

Mots clés : Photovoltaïque, centrale PV, réseau de transport d'électricité, potentiel solaire Algérienne, étude expérimentale, rendement de référence, rendement finale, ratio de performance.

This work presents an experimental study on a large-scale photovoltaic power plant connected to the transmission grid; installed in Algeria at the level of the Djelfa willaya in the Ain el Bel region and put into service since 2016, the study aims to show the real energy capacity of the plant as well as the influence of the site's climatic conditions on the electrical productivity, as well it also proposes recommendations to optimize the plant's productivity and its integration into the grid.

Key word: Photovoltaic, PV power plant, transmission grid, Algerian solar potential, reference yield, final yield, performance ratio

Dédicaces

Louanges à ALLAH le tout puissant de m'avoir donnée la force et le courage pour accomplir ce modeste travail. J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail à : A mes très chers parents, ma chere épouse et notre petite MERIEM qui m'ont soutenu et encouragé durant toute la période de mes études et à qui je souhaite une longue et heureuse vie, que dieu les protège et me donne la force pour que je puisse leur rendre un petit peu de leur bienfait et leur bonté. A mes très chers frères et mes très chères sœurs. A toute les personnes de ma famille. La famille FEKIRINI et La famille FERHAT Je remercie mon ami et binôme HARRAG Bachir.Á tous mes amis, et de prés ou de loin ceux et celles que je n'ait pas cité. A toute ma promotion de ÉNERGIES RENOUVELABLES

♡

AHMED

Dédicaces

Louanges à ALLAH le tout puissant de m'avoir donnée la force et le courage pour accomplir ce modeste travail. J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail à : A mes très chers parents, ma chere épouse et notres petits qui m'ont soutenu et encouragé durant toute la période de mes études et à qui je souhaite une longue et heureuse vie, que dieu les protège et me donne la force pour que je puisse leur rendre un petit peu de leur bienfait et leur bonté. A mes très chers frères et ma très chère sœur. A toute les personnes de ma famille. La famille HARRAG et La famille SEGHIR Je remercie mon ami et binôme FEKIRINI Ahmed.Ainsi que tous mes autres amis, LADEK MOUSSA, GUECHIDA MAHFOUD, AKAK Smain, et de prés ou de loin ceux et celles que je n'ait pas cité. A toute ma promotion de ÉNERGIES RENOUVELABLES

♡

BACHIR

REMERCIMENTS

Nous remercions notre dieu, le tout puissant, de nous avoir donné la santé et la volonté pour compléter ce modeste travail.

J'exprime mes remerciements en premier lieu à monsieur M. MORSLI professeur à l'université de Médéa, pour m'avoir accueilli tout au long de ce travail.

Je remercie monsieur KHARKHACHE Mustapha, chef de centrale PV de Ain El Bel qui nous a aidés tout au long de notre stage au sein de la société SKTM.

Un spécial remerciement à notre ami MOHAMED ABBACI pour son aide, pour son cœur, sa bonté, son sacrifice, tout au long de notre étude universitaire, Je le remercie du fond du cœur.

Je tiens à remercier : toute la commission du jury d'avoir répondu aimablement afin de juger ce travail.

Ces remerciements vont inévitablement aussi à mes enseignants et à mes collèges.

Grand remerciement à mes parents et à toute ma famille.

Je remercie tout ce qui ont, de près ou de loin, contribué à l'aboutissement de ce travail.

TABLE DES MATIERES

II. Introduction génerale 0

1. Energie solaire et conversion photovoltaique 2

1.1 Introduction 3

1.2 Énergie du soleil 3

1.2.1 Le soleil 3

1.2.2 Rayonnement solaire 5

1.3 Conversion photovoltaïque 10

1.3.1 Historique 10

1.3.2 Définition 10

1.3.3 Fonctionnement 11

1.3.4 Caractéristique de la cellule photovoltaïque 12

1.3.5 Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque 13

1.3.5.1 Le courant de court-circuit 14

1.3.5.2 La tension en circuit-ouvert 14

1.3.5.3 Le point de puissance maximum 14

1.3.5.4 Facteur de forme 14

1.4 Influence des différents paramètres sur la caractéristique I (V) 15

1.4.1 Influence de l'éclairement 15

1.4.2 Influence de la température 17

1.4.3 Influence des résistances série et shunt 18

1.5 Différentes technologies 19

1.5.1 Arséniure de gallium (GaAs) 19

1.5.2 Silicium monocristallin 19

1.5.3 Silicium poly (ou multi-) cristallin 21

1.5.4 Silicium amorphe 21

1.5.5 Tellure de cadmium (CdTe) 21
1.5.6 $CuInSe_2$ et CuInGaSe (CIGS) 22
1.6 Conclusion 22
2. Energie photovoltaique et integration au reseau transport algerienne 23
2.1 Introduction 24
2.2 Réseau de transport d'électricité 24
2.2.1 Architecture du réseau électrique 24
2.2.2 Réseau de transport Algérien 26
2.2.3 Protections des Lignes de Transport de l'Electricité 28
2.3 Productions décentralisées 31
2.4 Intégration de l'énergie photovoltaïque au réseau 33
2.4.1 Schéma du raccordement des centrales solaires PV 33
2.4.2 Interaction entre le réseau transport et les systèmes PV 34
2.4.3 Problèmes induits par l'intégration des PV dans le réseau de transport 38
2.5. Potentiel solaire de l'Algérie 43
2.6 Développement des énergies renouvelables en Algérie 47
2.6.1 Programme national de développement des énergies renouvelables 47
2.7 Etat de l'art 48
2.8 Conclusion 49
3. ANALYSE DES PERFORMANCES ET PRECONISATION 49
3.1 Introduction 50
3.2 Description de la société SKTM 50
3.2.1 Chiffres Clés 31 Décembre 2016 51
3.3 Description de central de Djelfa - Ain el bel 51
3.3.1 Localisation géographique : 53
3.3.2 Présentation du système 54
3.3.3 Caractéristiques du panneau solaire (YENGLI SOLAIRE) 56

3.3.4 Caractéristiques de l'onduleur (SUNGROW) 56
3.3.5 Caractéristiques des transformateurs 57
3.3.6 Système monitoring 58
3.3.7 Poste vis avis 58
3.4 L'étude de performances 59
3.4.1 Les conditions climatiques 59
3.4.2 La production électrique de la centrale et les conditions climatiques 64
3.4.3 Vitesse du vent et humidité 68
3.4.4 Présentation des coefficients et paramètres de performance 69
3.4.5 Interprétation des resultats 74
- Energie normée du système 74
- Energie de référence (YR) 74
- Rapport de Performance (PR) 74
- Rendement de la centrale 75
3.4.6 Optimisation du système PV et son intégration au réseau 76
3.5 Conclusion 79
III. CONCLUSION GENERALE 79

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 Image de soleil prise par la NASA 4
Figure 1-2 Coupe schématique du soleil 5
Figure 1-3 Composant du rayonnement du soleil parvenant à la surface 6
Figure 1-4 Spectre solaire des photopiles 7
Figure 1-5 Masse d'air 8
Figure 1-6 Rayonnement solaire au sol 9
Figure 1-7 Physique du photovoltaïque generations 11
Figure 1-8 Caractéristique électrique d'une cellule solaire 13
Figure 1-9 Courbe caractéristique typique d'un module PV 14
Figure 1-10 Courbes courant-tension pour différentes éclairement 16
Figure 1-11 Courbes puissance-tension pour différents éclairements 16
Figure 1-12 Courbes courant-tension pour différentes températures 17
Figure 1-13 Courbes puissance-tension pour différentes températures 17
Figure 1-14 Influences des résistances séries et shunt 18
Figure 2-1 Organisation schématique du réseau d'énergie. 26
Figure 2-2 Structure de réseau transport et production 2017. 27
Figure 2-3 Les zones de protection d'un réseau électrique. 29
Figure 2-4 Principe de base du fonctionnement. 30
Figure 2-5 Principe de la protection différentielle 30
Figure 2-6 Puissance PV installée dans le monde 32
Figure 2-7 Puissance PV installée en Algérie (2014-2017) 33
Figure 2-8 Schéma de raccordement : (a) au réseau de distribution (b) au réseau de transport 33
Figure 2-9 Exemple de domaine normal de fonctionnement d'une installation de production. 36
Figure 2-10 Réglage primaire de fréquence. 37
Figure 2-11 Schéma équivalent simplifié d'une ligne. 41
Figure 2-12 Cartographie sommaire permettant de visualiser la structure et les nœuds du réseau électrique du projet DESERTEC 44
Figure 2-13 l'irradiation globale reçu sur un plan horizontal GH 455
Figure 2-14 l'irradiation globale sur un plan incliné a latitude de lieu GH **lat** 46

Figure 2-15 Durée d'insolation mesuré SS 466
Figure 3-1 vue générale de la centrale Ain El Bel 52
Figure 3-2 Superficie de la centrale Ain El Bel par 53
Figure 3-3 Schéma unifilaire générale d'une centrale PV 54
Figure 3-4 Schéma unifilaire de la centrale An El Bel 55
Figure 3-5 Schéma unifilaire du poste 60/30Kv de Ain El Bel 58
Figure 3-6 L'irradiation moyenne journalière mois de mars (jour type) 59
Figure 3-7 Irradiation solaire du mois de mars 2018 60
Figure 3-8 Température du mois de mars 2018 61
Figure 3-9 a) L'irradiation solaire pendant l'hiver 62
Figure 3-10 a) L'irradiation solaire et la température ambiante pendant l'Eté 63
Figure 3-11 Puissance maximale atteinte par rapport à la température et l'éclairement pour un jour type 65
Figure 3-12 Puissance maximale atteinte par rapport à la température et l'éclairement pour le 27 mars 2018 65
Figure 3-13 Puissance maximale atteinte par rapport à la température et l'éclairement pour le mois de mars 2018 66
Figure 3-14 Energie journalière en fonction du totale irradiation journalière et la température ambiante 67
Figure 3-15 Energie totale produite et l'énergie consommée 67
Figure 3-16 Puissance maximale en fonction de l'irradiation, la température, vitesse du vent et l'humidité 68
Figure 3-17 L'énergie normée du système (YF) 71
Figure 3-18 L'énergie de référence (YR) 71
Figure 3-19 Le Rapport de Performance (PR) journalier 72
Figure 3-20 Le Rapport de Performance (PR) hebdomadaire 72
Figure 3-21 Le Rapport de Performance (PR) du groupe de dix jour 73
Figure 3-22 Rendement total (η) 73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 Comparatif des différentes technologies. 20
Tableau 2-1 Tableau des domaines de tension. 28
Tableau 2-2 Niveaux de tension de raccordement des installations en fonction de leur puissance. 34
Tableau 2-3 Plage de variation des tensions et Creux de tension 40
Tableau 2-4 Tarif d'achat garanti par tranche de puissance et selon le potentiel en DA / kWh Installations photovoltaïques au sol d'une capacité de > 5 MWC 43
Tableau 2-5 Ensoleillement de quelque wilaya nationale 45
Tableau 2-6 Programme national de développement des énergies renouvelables 48
Tableau 3-1 Caractéristiques du panneau solaire 56

LISTE DES ABREVIATIONS

h :est la constante de Planck

ν : la fréquence de lumière

C: la vitesse de la lumière

λ: langueur d'onde

A: la surface de la cellule

H**:** l'intensité de la lumière entrante

ε: le facteur de réponse

V**:** Tension de sortie de la cellule

R_s: Résistance série

I: Courant de sortie de la cellule

R_{sh}: Résistance parallèle

I_{ph}: Courant photo-généré ou photo-courant (A)

q : La charge électrique $1.6x10^{-19}$ (c)

I_0: Courant de saturation de la diode (A)

k: Constant de Boltzmann $1.38x10^{-23}$ (j/k)

T_c : Température absolue de fonctionnement de la jonction (K°)

Icc :le courant maximal fourni par le générateur photovoltaïque .

V_{co} : la tension maximale générée par le générateur photovoltaïque

E: l'éclairement (en W/m²)

FF: Facteur de forme

Idés : le courant déséquilibré

r: la résistance des conducteurs en Ω

x: la réactance de la ligne en Ω

P et **Q** respectivement les puissances active et réactive transitant dans la ligne

GH : l'irradiation globale reçue sur un plan horizontale.

EnR: énergies renouvelables

SKTM.spa: Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida,

Pmax: Puissance maximale (W)

η: Rendement du module (%)

ΔPmax: Tolérance de puissance (W)

Vmpp: Tension à Pmax (V)

Ampp: Courant à Pmax (A)

Voc: Tension circuit ouvert (V)

Isc: Courant de court-circuit (A)

YF :L'énergie normée du système

***YA* :**Energie normée du champ PV

YR: L'énergie de référence

P0:la puissance nominale

EA: l'énergie en sortie du champ

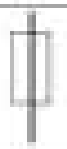
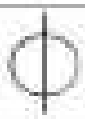
PR: Le Rapport de Performance

η : Le rendement énergétique du champ PV

E_A :l'électricité produite par le système

E_L; l'énergie solaire reçue à la surface des panneaux PV

LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Mot clé
	Ligne ou câble triphasé
	La terre
	Arrivée HTA
	Départ HTA ou BT
	Court-circuit
	Disjoncteur
	Interrupteur fusible
	Transformateur de puissance
	Fusible
	Transformateur de courant
	Transformateur de tension (potentiel)

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les réserves de combustibles fossiles de la planète se renouvellent bien plus lentement que leur vitesse de consommation actuelle, en effet, au rythme actuel l'humanité aura épuisé en moins de 200 ans les réserves accumulées pendant plusieurs centaines de millions d'années ce qui a laissé présager leur épuisement au cours des prochaines décennies. Ces quantités de consommation considérables est à l'origine d'une augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre et par voie de conséquence, entraîne des changements climatiques, dans ces conditions, la situation a forcé le monde entier à se rendre compte de sa dépendance vis-à-vis ces énergies fossiles. Aujourd'hui, une prise de conscience a montré que les énergies renouvelables pouvaient être une solution à ce problème. Cette solution solaire, semble être un bon compromis car la terre reçoit chaque jour, sous forme d'énergie solaire, l'équivalent de la consommation électrique de 5,9 milliards de personnes pendant 27ans.

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. La filière étudiée dans cette thèse est l'énergie solaire photovoltaïque. L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est en forte croissance depuis quelques années car c'est une source inépuisable, non polluante pour l'environnement, silencieuse et non dérangeante pour les riverains. En Algérie, le développement de l'énergie solaire PV est apparu progressivement sous forme d'installations de petites puissances pour le pompage d'eau ou raccordées au réseau à Basse Tension (BT), de même des PV de moyenne puissance raccordées au réseau isolé du sud jusqu'à des centrales solaires connectées directement au réseau à haute Tension (HTB).

Cependant, l'intégration des systèmes PV de grande échelle au réseau de transport peut avoir quelques impacts sur les réseaux électriques : sur le plan de tension, sur le plan de protection, sur la qualité de l'énergie ou sur la planification du réseau… D'un autre côté, les caractéristiques, le fonctionnement et les perturbations sur les réseaux peuvent influencer le fonctionnement des systèmes PV, malgré le taux de pénétration actuel qui reste au-delà de ces méfaits Le réseau de transport Algérien risque de ne pas être épargné par ce phénomène au future proche. En effet, Pour satisfaire aux objectifs de développement des énergies renouvelables, la puissance des énergies renouvelables installée en 2030 devrait atteindre 22 000 MW. Avec plus de 600 MW installés En ce moment.

L'utilisation à grande échelle des EnR surtout l'énergie PV a fait apparaître le besoin d'étudier ces systèmes afin de l'analysé, et par conséquence optimiser et développer l'exploitation de

cette nouvelle source d'énergie renouvelable propre, la norme de la commission électrotechnique internationale (norme IEC 61724) intervient pour définir les performances globale du système en ce qui concerne la production énergétique, la ressource solaire et l'effet global des pertes de système, Ils sont normalisés pour comparer les performances des systèmes PV suivant la situation géographique, la technologie et la conception [6][44]. Le présent travail est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre nous rappelons des généralités sur la source fondamentale de l'énergie photovoltaïque ; le soleil, son pouvoir énergétique et les propriétés de son rayonnement puis nous décrivons l'élément convertisseur ; la cellule solaire. Nous abordons sa structure, sa caractéristique électrique, son circuit électrique équivalent, les paramètres photovoltaïques, le mécanisme de la conversion photovoltaïque, l'influence de différents paramètres sur la caractéristique I (V) puis nous citons les différents types de cellules solaires.

Le deuxième chapitre traite le réseau électrique de transport dans son architecture et sa structure puis nous traitant le réseau électrique de transport Algérien par la présentation de son gestionnaire ; les niveaux de tension existant et les principes de base des protections utilisé pour sauvegarder et protégé son réseau. Nous présenterons les prescription technique relatives au raccordement des producteurs d'électricité au réseau transport Algérien, ainsi que les problème induit par l'intégration des PV. Nous présentons le grand potentiel solaire de notre pays le programme national pour le développement des EnR et les initiatives pris par l'état pour encouragé leur Prolifération.

Le troisième chapitre est dédié à la partie expérimentale de notre thèse. Il est axé sur la côté pratique de systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique et l'analyse de ses performances grâce au suivi de la norme internationale. Ce système de 53 MWc est installé sur le site de Ain el Bel (Djelfa) depuis 2016. Nous avons essayé de montrer l'influence réel pendant la période de mois de mars 2018 des conditions de température et de l'éclairement solaire ainsi que l'impact indirecte de la vitesse du vent et l'humidité sur la productivité de la centrale.

En fin, une conclusion générale couronne ce mémoire pour récapituler nos analyses, nos résultats et nos commentaires.

Chapitre 1

ENERGIE SOLAIRE ET CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE

1.1 Introduction

La terre baigne dans l'énergie solaire, gratuite, avec 1,56.1018 kWh/an, l'énergie solaire incidente représente plus de 10 000 fois la consommation mondiale d'énergie (environ 1,1.1014 kWh) et une production dans le monde de 1035,9 TWh soit 1.035.900.000.000 kWh d'électricité solaire photovoltaïque, soit une augmentation de 16.1% au niveau mondial par rapport à 2012.

Il s'agit donc d'une énergie abondante et renouvelable, qui pourrait parfaitement couvrir la totalité ou une grande part de nos besoins énergétiques futurs, comme elle le fait durant des milliers d'années. Le rayonnement solaire peut être converti en électricité par les cellules photovoltaïques qui constituent les éléments primaires des systèmes photovoltaïques **[1]**.

Ce chapitre présente une introduction au système photovoltaïque, il a pour but d'expliquer la conversion de la lumière en électricité, nous allons suivre cette lumière à partir de son origine le soleil et son rayonnement, ainsi que son spectre et sa relation avec la photopile, nous déterminons le rôle de l'atmosphère, et en fin on arrive à la cellule solaire.

Nous décrirons le principe de fonctionnement de la cellule solaire, ces caractéristiques électriques à travers son modèle mathématique et ses grandeurs principales, par suite nous allons décrire l'influence des paramètres externes, la température et l'éclairement et on finalise avec les différentes technologies.

1.2 Énergie du soleil

1.2.1 Le soleil

Le soleil est à l'origine de la vie sur terre et l'a perpétué par son apport incessant d'énergie ; cette énergie est considérable, elle nous arrive sous forme de rayonnement électromagnétique à travers l'espace qui nous éclaire, nous réchauffe et fait croître les plantes.

Il est composé chimiquement de 70 % d'hydrogène et d'environ 28 % d'hélium et le 2 % restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus.

La distance terre-soleil est égale approximativement à 150 $\times 10^6$ Km ; cette distance est si grande que sa lumière nous parvient 8 minutes après avoir était émise **[2]**.

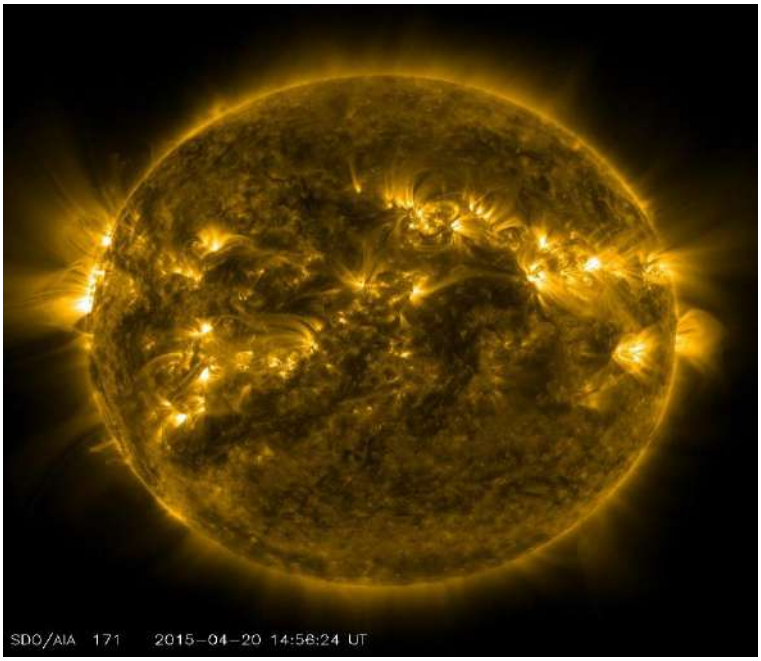


Figure 1-1 Image de soleil prise par la NASA

[Source : site officiel de la NASA]

On distingue quatre zones particulières dans la structure du soleil : le noyau, la photosphère, la chromosphère et la couronne. Et sont schématisées sur la figure (1.2).

- ✓ **Le noyau** : est le cœur du soleil, présente une température qui est très élevée (15×10^6 K), une pression de (2×10^{11} bars) et une densité de (~ 105 Kg m^{-3}). L'énergie produite au sein du noyau se propage par diffusion radiative puis par convection turbulente jusqu'à la photosphère d'où elle s'échappe sous forme de rayonnement électromagnétique vers l'espace.
- ✓ **La photosphère** : est une couche d'environ 300 Km d'épaisseur avec une température de 5770 K, elle donne l'image visible du soleil
- ✓ **La chromosphère** : est l'atmosphère du soleil, elle a une épaisseur d'environ 8 000 Km et une température de 20 000 K environ. **[3]**

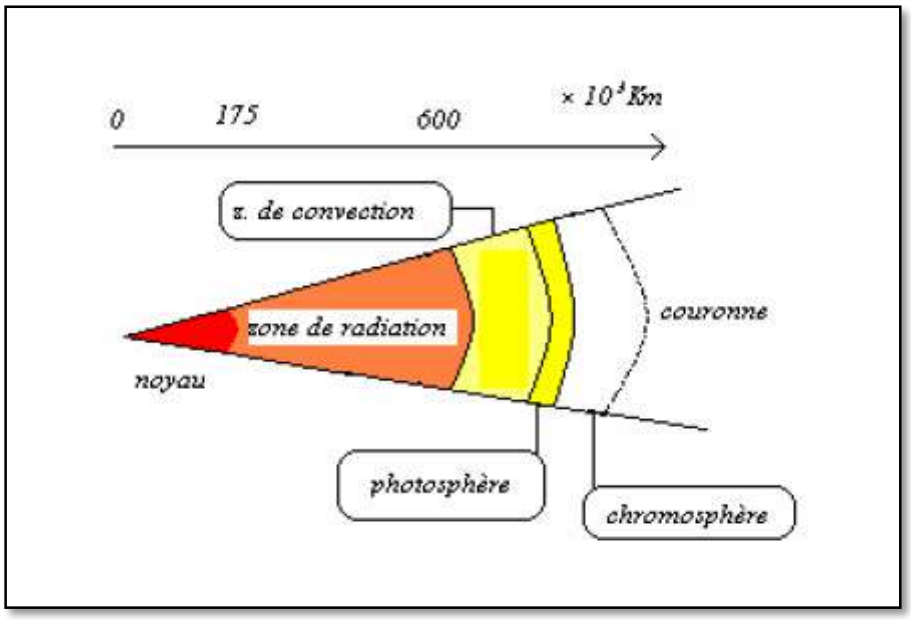


Figure 1-2 Coupe schématique du soleil **[4]**

L'énergie solaire est la source d'énergie renouvelable la plus disponible et la plus importante, cependant, l'énergie solaire reçue par la terre représente par an près de 15 000 fois la totalité de la consommation énergétique mondiale actuelle, deux utilisations de l'énergie solaire sont offertes par le soleil : la première étant de générer de la chaleur (le solaire thermique), la seconde étant de produire de l'électricité à partir de la lumière (le solaire photovoltaïque).

L'énergie du soleil est produite par les réactions de fusion thermonucléaire : les noyaux d'hydrogène (protons) s'assemblent en noyaux d'hélium (2 protons+2 neutrons). Cette énergie est émise dans l'espace par la surface du soleil notamment sous forme d'ondes électromagnétiques (lumière) [2][5].

1.2.2 Rayonnement solaire

La répartition spectrale du rayonnement solaire est déterminée par la température de sa surface, à savoir 5900 K. La figure (1.3) donne l'allure de la répartition spectrale du rayonnement solaire réelle hors atmosphère (l'éclairement spectral est définie comme une puissance reçue par une surface pour une longueur d'onde donnée il s'exprime en (W/m^2) comparé à celle du corps noir à 5900 K (le soleil se comporte approximativement comme un corps noir) [6].

Un faisceau lumineux est un déplacement de petits corps porteurs d'énergie, ou photons, comme l'a décrit EINSTEIN en 1905, pour expliquer l'effet photoélectrique [2].

Depuis l'équivalence onde-corpuscule mise en évidence par louise de Broglie en 1924, la lumière est décrite également comme une onde électromagnétique, comme les rayons X ou les ondes radiofréquences. Tout est une question de longueur d'onde, ou de fréquence, pour ces oscillations qui traversent l'espace et parfois la matière, Chaque photon porte une quantité d'énergie directement liée à sa longueur d'onde par la relation [5] :

$$E = hv = -\frac{hc}{\lambda} \qquad (1.1)$$

Où :

h est la constante de Planck ;

v la fréquence ;

C la vitesse de la lumière ;

λ langueur d'onde.

Le rayonnement du soleil parvenant à la surface de la terre se compose de :

- ✓ L'infrarouge qui procure de la chaleur ;
- ✓ le visible qui est nécessaire à la croissance des plantes et des animaux (dont nous faisons partie) ;
- ✓ l'ultra-violet brunit la peau et tue les bactéries ;
- ✓ Le spectre du soleil s'étend de 200nm à 3 µm [7].

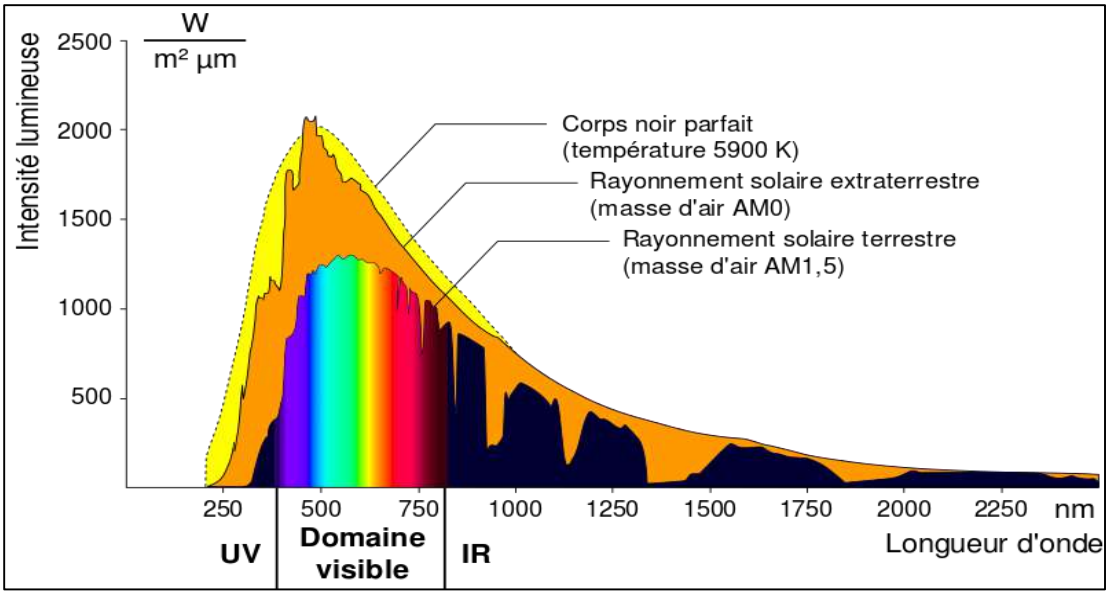


Figure 1-3 Composant du rayonnement du soleil parvenant à la surface

1.2.2.1 Spectre solaire et photopile

Puisque la photopile a pour vocation de fournir de l'électricité dans le monde ou nous vivons, elle est conçue pour convertir les longueurs d'onde disponibles dans notre environnement, et propres au développement de la vie.

Nous décrirons plus tard dans ce chapitre les différents types de photopiles, mais précisons dès à présent qu'elles se différentient par leur sensibilité spectrale, ou capacité à convertir certaines longueurs d'ondes.

Comme nous démontre la figure (1.4), les photopiles au silicium amorphe ont une sensibilité spectrale très proche de celle de l'œil. Ainsi, le silicium amorphe est particulièrement bien adapté en éclairement intérieur car les tubes néon et fluorescent ont un spectre d'émission qui est prévu pour l'œil humain.

Les photopiles au silicium sont destinées à usage extérieur sous fort ensoleillement, à cause de leur sensibilité plus grande au proche infrarouge et de leur médiocre comportement dans le bleu [8][9].

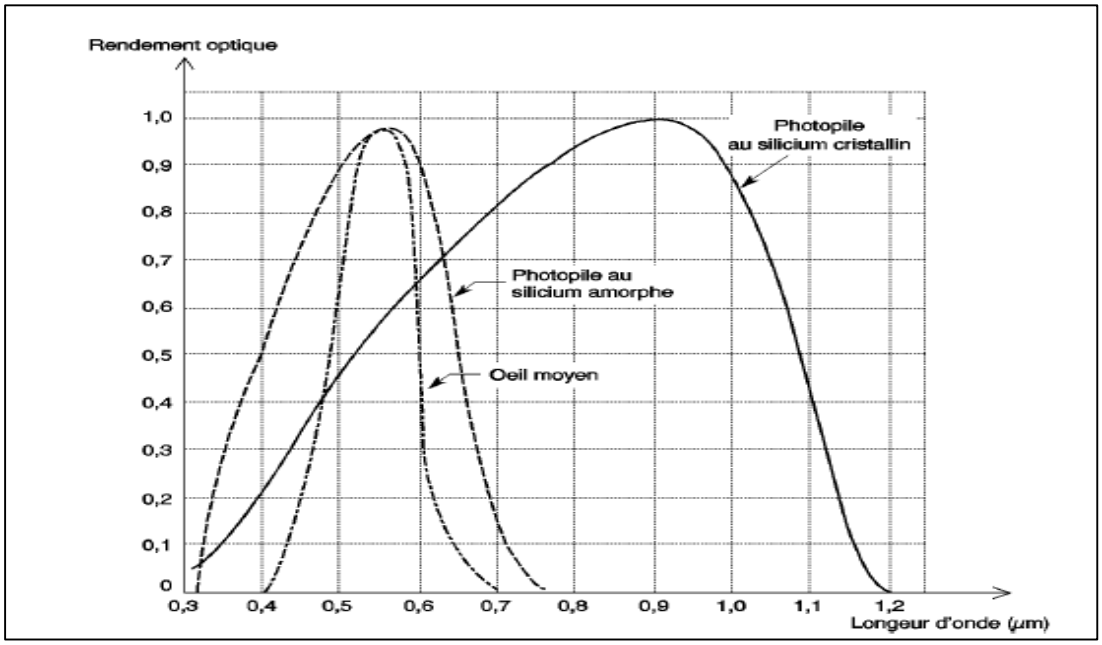


Figure 1-4 Spectre solaire des photopiles [10]

1.2.2.2 Rôle de l'atmosphère

Le rayonnement reçu par l'atmosphère terrestre en incidence normal est constant et voisin de 1353 W/m² [1]. Le rayonnement solaire reçu au sol traversant les différentes couches

atmosphériques ; l'atmosphère modifie ce spectre énergétique du rayonnement solaire à travers trois mécanismes principaux :

- L'absorption par les différentes molécules gazeuses entrant dans sa composition ;
- La diffusion moléculaire de Rayleigh (diffusion due aux molécules de gaz constituant l'atmosphère et dont la taille est inférieure à la longueur d'onde de la lumière) ;
- La diffusion due aux particules qu'elle contient : aérosols, poussière et les nuages.

Par conséquent, le flux énergétique solaire optimal reçu au sol se réduit alors à 1000 W/m², il se diffère également à la surface de la terre en fonction du lieu, on le caractérise de façon globale par le nombre de masse d'air [6].

1.2.2.2.a Masse d'air

On appelle masse d'air le rapport entre l'épaisseur atmosphérique traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu (**figure 1.5**). Cela dépend surtout de la hauteur angulaire du soleil h [10].

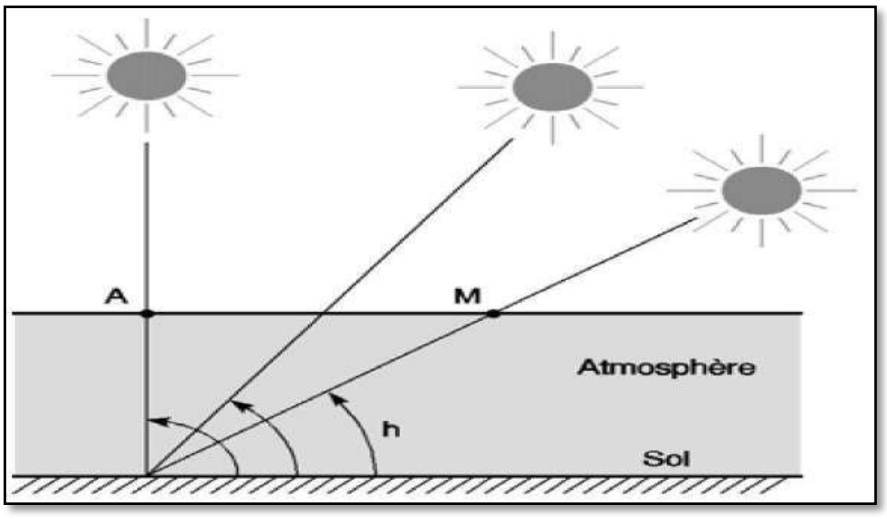


Figure 1-5 Masse d'air [2]

À l'aide des points O, A, M et l'angle h représentés dans la (figure 1.5), on écrit la longueur du trajet du soleil à travers l'atmosphère [**2**] :

$$\sin \mathbf{h} = \frac{\mathbf{OA}}{\mathbf{OM}} \Rightarrow \frac{\mathbf{OM}}{\mathbf{OA}} = \frac{\mathbf{1}}{\sin \mathbf{h}} \quad (1.2)$$

Citons, à titre d'exemple :

- AM1 : position du Soleil au zénith ; h=90° (au niveau de la mer) ;
- AM2 : le Soleil à 30° ;
- AM1, 5 : le Soleil à 41.8° [**2**].

1.2.2.2.b Rayonnement direct diffus et global

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, On distingue plusieurs composantes :

- **Le rayonnement direct** : est reçu directement du soleil sans diffusion par l'atmosphère, ces rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.
- **Le rayonnement diffus :** est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions.

Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet « éclatement » des rayons du soleil, cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.

- **L'albédo** : est la partie réfléchie par le sol, il dépend de l'environnement du site.

La neige, par exemple, renvoie énormément de rayons lumineux alors qu'un asphalte (mélange noirâtre naturel e calcaire, de silice et de bitume) n'en renvoie pratiquement aucun. Il faudra en retenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés.

- **Le rayonnement global** est tout simplement la somme de ces diverses contributions [5-10].

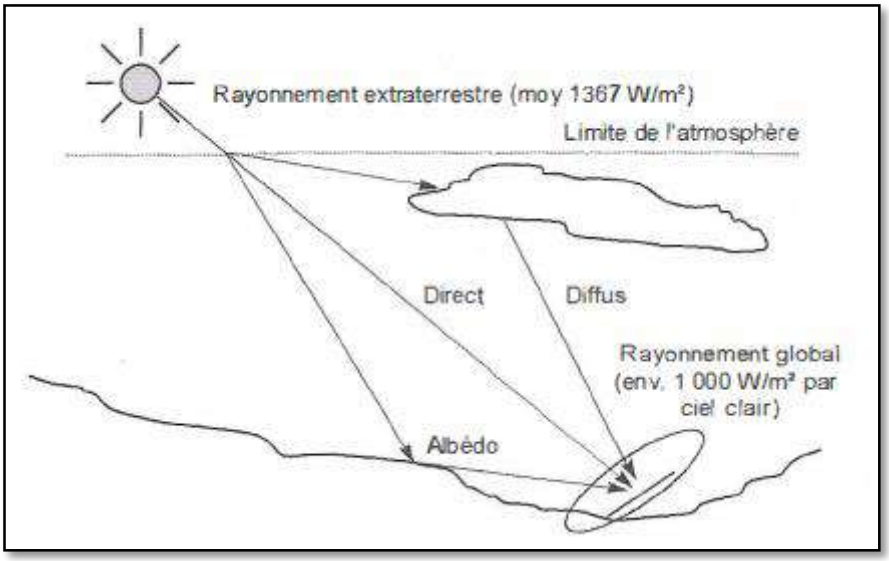


Figure 1-6 Rayonnement solaire au sol [5]

1.3 Conversion photovoltaïque

1.3.1 Historique

Découverte en 1839 par Antoine Becquerel, et représentait désormais une réalité scientifique, cependant, il existait déjà à cette époque de nombreuse forme de production d'énergie, 50 ans avant la première cellule photovoltaïque, la dynamo et les turbines produisaient déjà de l'électricité, le premier panneau solaire avait un taux de conversion d'à peine 1%, les premières applications pratiques pour l'énergie solaire ont été faites au cours de la course à l'espace lors de la guerre froide, le défi que devait relever les scientifiques était de savoir comment fournir de l'électricité aux appareils électroniques dans l'espace, là où les restrictions de charge et de place constituent un problème majeur. Pour faire fonctionner leurs appareils, les scientifiques avaient besoin de quelque chose qui n'ajouterait que très peu de poids aux engins spatiaux et satellites lors du décollage La seule chose à leur disposition dans l'espace était la lumière du soleil.

Au début des années 1990, le premier obstacle était de trouver une méthode efficace pour stocker et transférer l'électricité, parce qu'un panneau solaire produit du courant continu, et nos maisons fonctionnent avec du courant alternatif. Les batteries au lithium-ion fournirent une méthode de stockage viable, en plaçant les batteries avant l'onduleur dans le système, elles stock le courant continu qui ne sera convertit qu'une seule fois par la suite (perte de puissance de 10% à chaque conversion) par contre, les panneaux solaires n'étaient pas encore rentables pour les particuliers [11].

1.3.2 Définition

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau.

Le principe photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839 et a été expliqué par Albert Einstein en 1905 (et a reçu le prix Nobel de Physique en 1921).
Le préfixe Photo vient du grec **«** PHOS **»** qui signifie lumière et « VOLT » vient du patronyme du physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité ; Alessandro Volta (1745-1827). Le photovoltaïque signifie donc littéralement électricité lumineuse [10].

- **Les cellules photovoltaïques**

C'est l'élément de base qui grâce à lui la conservation est faite par l'assemblage de plusieurs cellules, on peut atteindre la puissance que l'on veut.

Les photopiles ou cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs ayant des propriétés intermédiaires entre conducteurs et isolants. Le matériau de base est dans la plupart des cas le silicium**.** Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, poly-cristalline ou monocristalline, et d'autres matériaux sont aussi utilisables comme l'Arséniure de Gallium (AsGa), et tellurure de cadmium (CdTe) [8].

1.3.3 Fonctionnement

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénomme comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possédant un champ magnétique permanent). Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque [8][12].

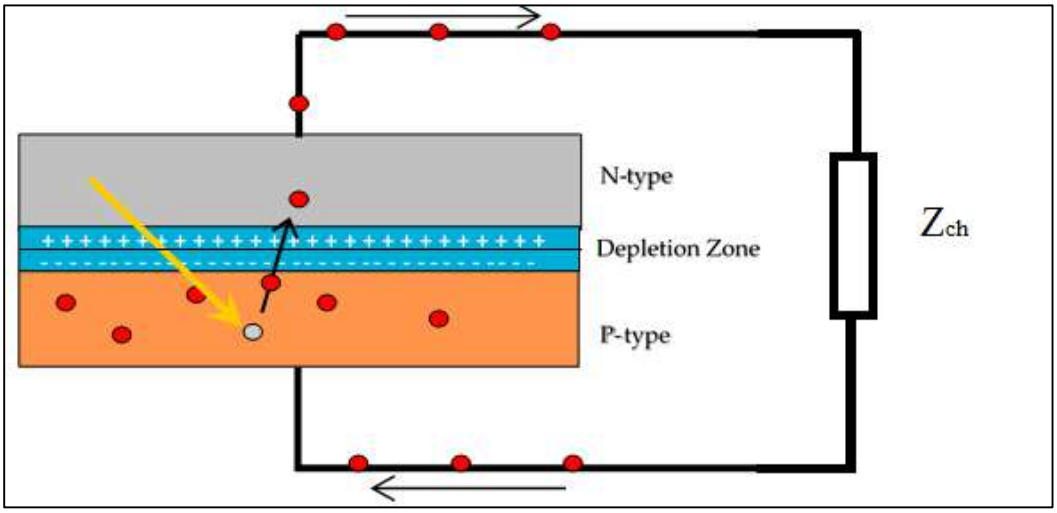


Figure 1-7 Physique du photovoltaïque générations

Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre

le trou de la face antérieure, les faces supérieure et inférieure sont équipées d'électrodes pour récolter les électrons.

La quantité de photons pénétrant la cellule photovoltaïque dépendant fortement de la réflectivité (elle est définie comme le rapport entre le flux réfléchi et le flux incident de sa surface). La réflectivité caractérise la quantité de photons réfléchie par la surface, soit une perte de rayonnement incident. Afin de minimiser la réflexion de la lumière en surface, cette dernière est traitée pour forcer le rayonnement à pénétrer dans le semi-conducteur ; couramment par une couche anti-réfléchissante (CAR) obtenue par dépôt d'une couche d'oxyde sur le semi-conducteur. L'effet d'interférence obtenu au sein des couches d'oxyde permet de piéger le rayonnement incident [8].

1.3.4 Caractéristique de la cellule photovoltaïque

Les caractéristiques électriques d'une cellule solaire peuvent être décrites par un circuit électrique avec quatre composants (**Figure 1.8).**

- Source de courant (G) : c'est la source du photo-courant et s'exprime avec la relation suivant :

$$\mathbf{I_{ph} = A_{cel}\, H\, \varepsilon} \qquad (1.3)$$

Avec la surface de la cellule **A**, l'intensité de la lumière entrante **H**, et le facteur de réponse **ε.**

- La diode (D) : modélise la jonction P-N.
- La résistance série Rs : modélise les pertes résistives au sein de la photopile (les métallisations). Elle est liée à l'impédance des électrodes et du matériau ; il en résulte que la tension V aux bornes de la cellule est différente de la tension Vj aux bornes de la jonction p-n.

  Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.
- La résistance parallèle R_{sh} (résistance shunt R_p) : correspond à une résistance de fuite entre les deux zones n et p de la jonction ; il en résulte qu'une partie du courant I_{ph} sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge, cette résistance devra être la plus élevée possible [**5**].

D'après la **Figure** (**1.8)** le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension est donné par [**13**] :

$$\mathbf{I = I_{ph} - I_d - \frac{V+IR_s}{R_{sh}}} \quad (1.4)$$

Avec

$$\mathbf{I_d = I_0\left(exp\left[\frac{q(V+IR_s)}{n\,k\,T_c}\right] - 1\right)} \quad (1.5)$$

$$\mathbf{I = I_{ph} - I_0\left[exp\left(\frac{q(V+IR_s)}{n\,k\,T_c}\right) - 1\right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}}} \quad (1.6)$$

Où :

V : Tension de sortie de la cellule ;

I : Courant de sortie de la cellule ;

I_{ph} : Courant photo-généré ou photo-courant (A) ;

I_0 : Courant de saturation de la diode (A) ;

T_c : Température absolue de fonctionnement de la jonction (K°) ;

n : Facteur d'idéalité de la diode (m ∈ [1, 2]**,** la valeur typique de m est 1.3.

R_s : Résistance série

R_{sh}: Résistance parallèle

q : La charge électrique $1.6x10^{-19}$ (c)

k : Constant de Boltzmann $1.38x10^{-23}$ (j/k)

G : générateur PV ;

U : tension aux bornes de la charge ;

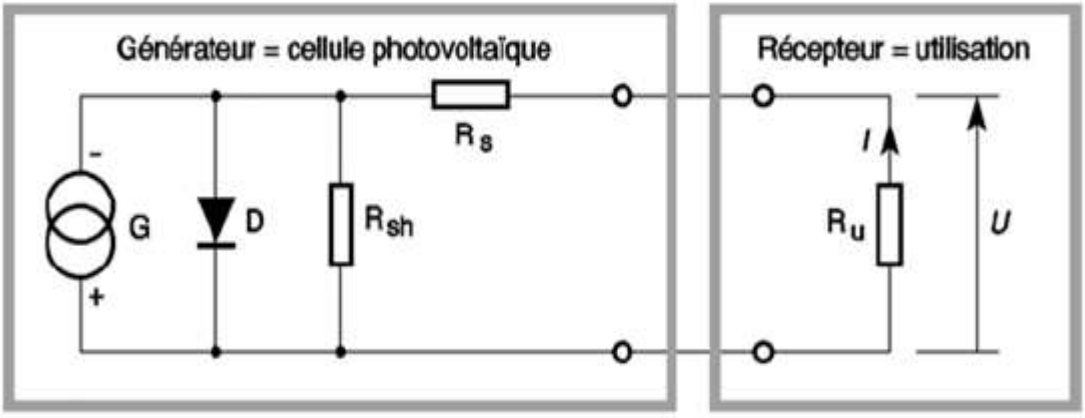
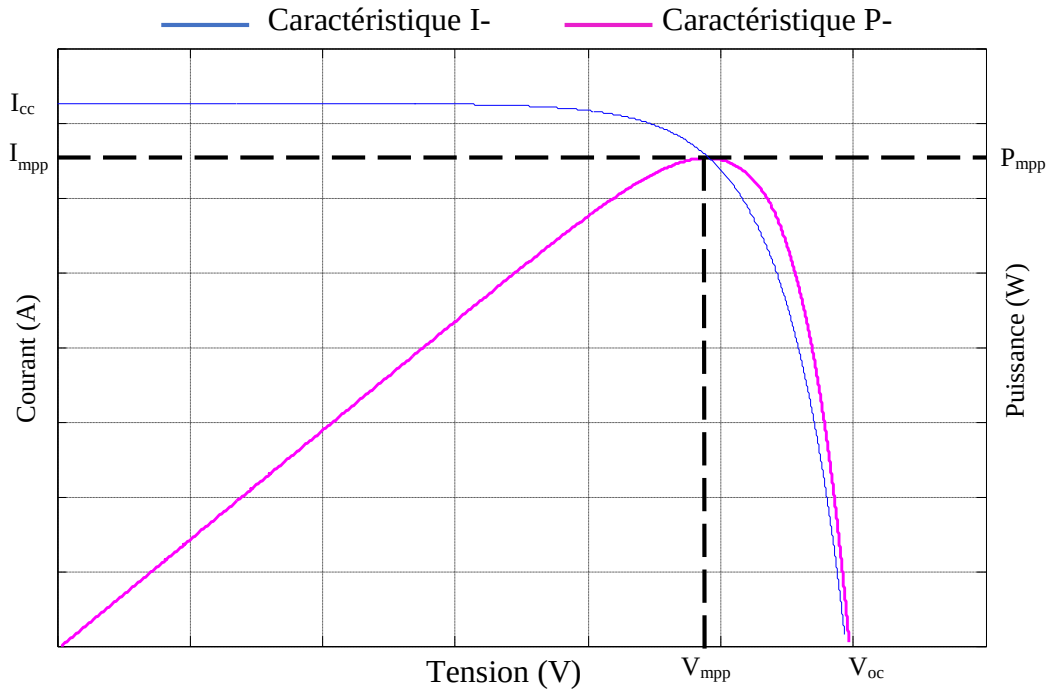


Figure 1-8 Caractéristique électrique d'une cellule solaire

1.3.5 Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque

À partir des caractéristique I-V et P-V sous éclairement illustrée au-dessus dans la figure (1.9), on constate que le comportement d'une cellule solaire peut être étudié à travers quatre principales grandeurs **:**



1.3.5.1 Le courant de court-circuit (Icc)

Correspond au courant maximal fourni par le générateur photovoltaïque quand il est placé en courant-circuit.

1.3.5.2 La tension en circuit-ouvert **(V_{co})**

Correspond à la tension maximale générée par le générateur photovoltaïque.

1.3.5.3 Le point de puissance maximum **(P_m, V_m, I_m)**

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est les grandeurs essentielles pour évaluer sa performance ; elle est donnée par la relation :

$$\mathbf{P_m = V_m \, x \, I_m} \qquad (1.7)$$

Figure 1-9 Courbe caractéristique typique d'un module PV

1.3.5.4 Facteur de forme **(FF)**

C'est une donnée calculée qui permet de rendre compte du degré d'idéalité de la courbe c'est à dire la qualité du générateur photovoltaïque. Ce facteur est donné par la relation :

$$\mathbf{FF = {P_{mpp}}/{V_{co} x \, I_{cc}}} \qquad (1.8)$$

Ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en %, et qualifie la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique I-V de la cellule solaire.

Si celle-ci était carrée le facteur de forme serait égale à 1, la puissance Pm sera égale à (I_{cc} x V_{co}), Mais, généralement le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 et 0.85.

1.3.5.5 Rendement (η)

On note que ces quatre grandeurs caractéristiques sont sommables dans un seul paramètre qui s'appelle le rendement **η**.

Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule.

Si **S** est la surface de la cellule (en m²) et **E** est l'éclairement (en W/m²) le rendement énergétique s'écrit [6] :

$$\eta = {P_m}/{E \times S} \quad (1.9)$$

Ou d'après (1.8) : $$P_{mpp} = FF x I_{cc} x V_{co} \quad (1.10)$$

$$\eta = \frac{FF x I_{cc} x V_{co}}{E \times S} \quad (1.11)$$

1.4 Influence des différents paramètres sur la caractéristique I (V)

1.4.1 Influence de l'éclairement

Les figures ci-dessous (figure 1.10, 1.11) montrent l'effet d'un éclairement variable sur la caractéristique P-V et de I-V de la cellule solaire sous une température constante (298 K).

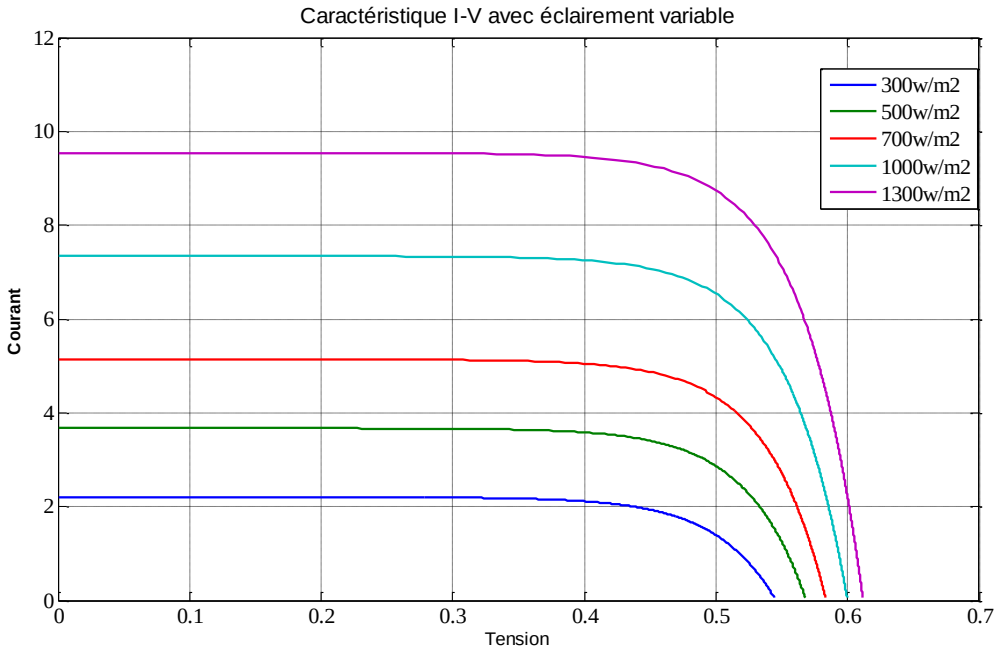


Figure 1-10 Courbes courant-tension pour différentes éclairement

On remarque que la valeur du courant du court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement, la figure (1.11) présente un exemple des courbes. Puissance-tension pour différents niveaux de rayonnements.

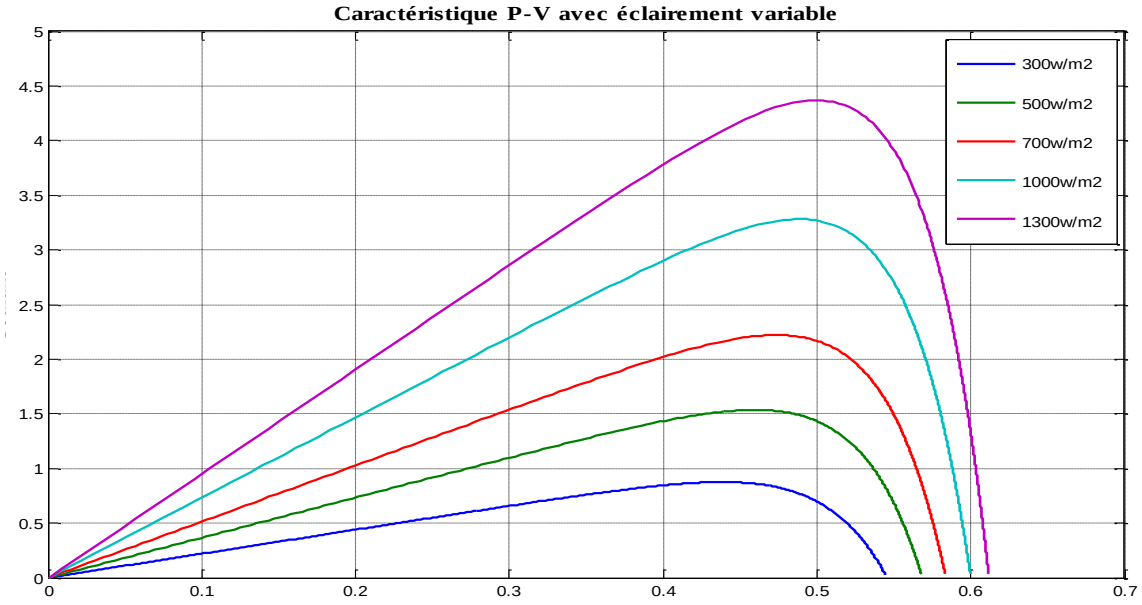


Figure 1-11 Courbes puissance-tension pour différents éclairements

1.4.2 Influence de la température

La figure (1.12) représente des courbes courant-tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule PV.

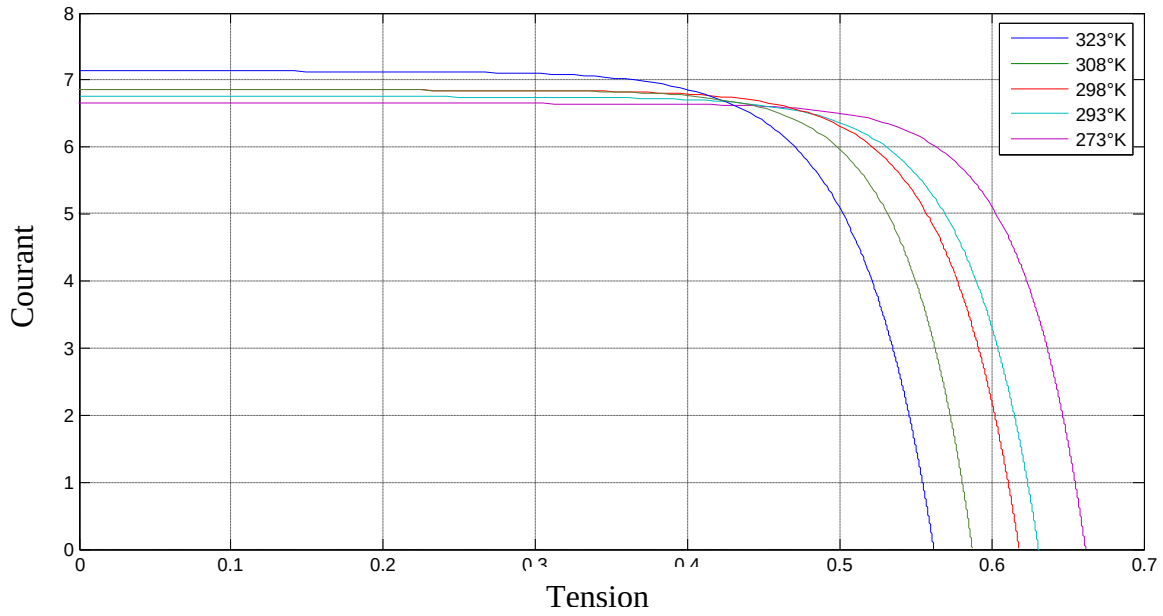


Figure 1-12 Courbes courant-tension pour différentes températures

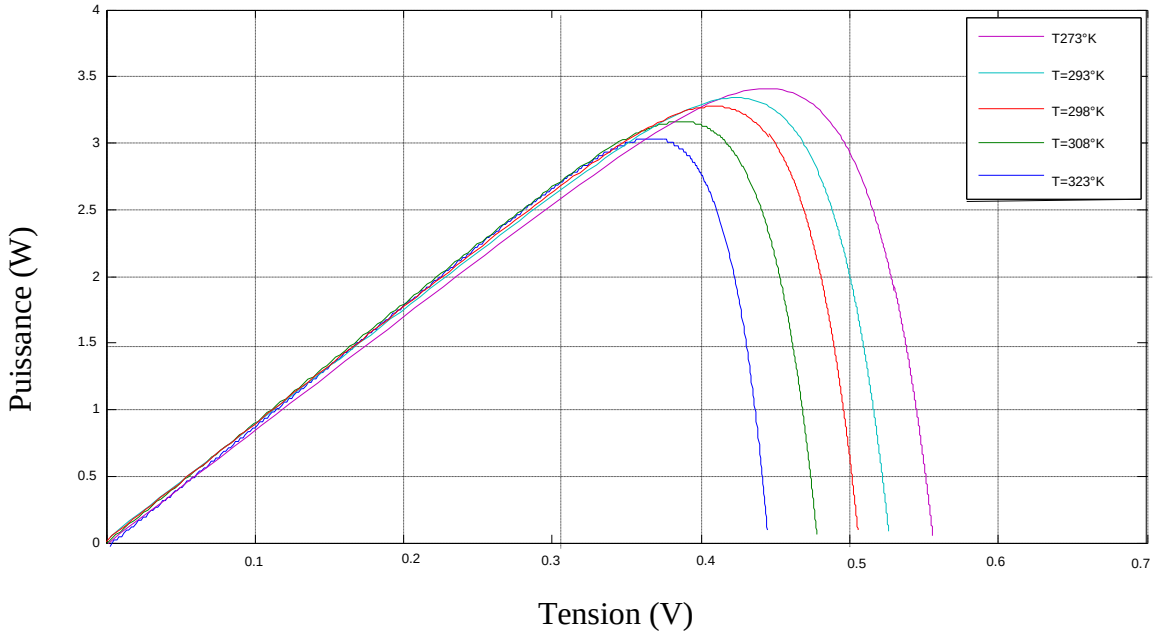


Figure 1-13 Courbes puissance-tension pour différentes températures

La figure (1.13) présente des courbes puissance-tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule PV.

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la

température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site devra être prise en compte. Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue d'environ 0,5% par degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25 °C.

1.4.3 Influence des résistances série et shunt

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible. La figure (1.14.a) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique I = f (V) de la cellule. La courbe en pointillés correspond à une valeur non nulle de Rs. Cette influence est traduite par une diminution de la pente de la courbe I = f (V) dans la zone où la cellule fonctionne comme source de tension. La chute de tension correspondante est liée au courant généré par la cellule.

Quant à la résistance shunt, elle est liée directement au processus de fabrication, et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs de courant. La figure (1.14.b) montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme source de courant. Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo-courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée [14].

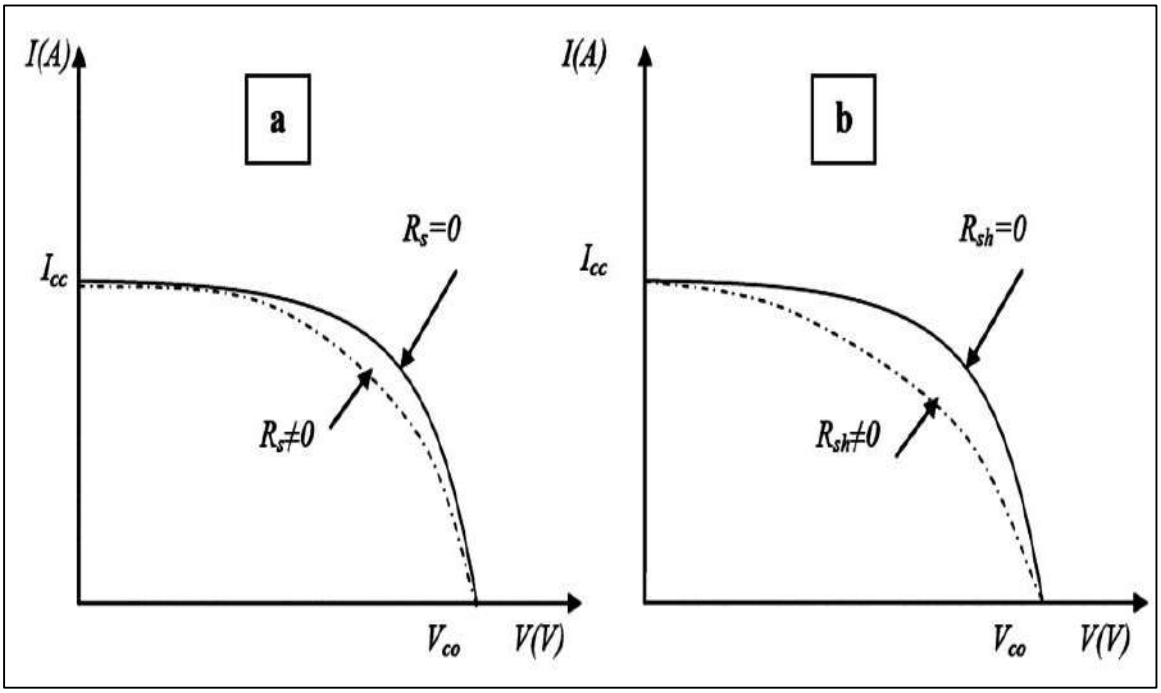


Figure 1-14 Influences des résistances séries et shunt [14]

1.5 Différentes technologies

Nous résumons ici les propriétés des différents types de photo-générateurs. Le silicium cristallin et le silicium amorphe ont déjà été évoqués, ils représentent à eux seuls plus de 80 % du marché mondial des applications terrestres (par opposition aux spatiales le soleil est à l'origine de la vie sur terre et la perpétue par son apport incessant d'énergie). Mais d'autres matériaux semi-conducteurs sont également employés pour la fabrication des photo-générateurs : le CuInSe2 (en abrégé CIS et son dérivé le CIGS), le CdTe (tellurure de cadmium) et le GaAs (arséniure de gallium).

1.5.1 Arséniure de gallium (GaAs)

Ce matériau a très haut rendement est un cas à part : très onéreux du fait des éléments utilisés, il n'est employé que pour des panneaux solaires de satellites ou sur des systèmes à concentration.

Dans ces applications, le rendement et le poids sont les critères de sélection et non le prix !

- Rendement électrique (STC, rubrique Puissance-crête /rendement) : 28.8 % [16].
- Usage : satellites, concentreurs ;
- Particularité : prix très élevé.

1.5.2 Silicium monocristallin

Matériau le plus répandu, présentant un bon rendement à fort et moyen éclairement, il est à la base des panneaux « terrestres » les plus performantes après ceux à l'arséniure de gallium.

- Rendement électrique des panneaux : 26.7 % STC [16] ;
- Puissance des panneaux : 5 à 300 W_C ;
- Gamme d'éclairement : 100 à 1000 w/ m².
- Usage : tous usages en extérieur de forte et moyenne puissance : télécoms, habitat, centrales et toits solaires.

Tableau 1-1 Comparatif des différentes technologies [15][16].

Matériau	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisation
Silicium mono Cristallin	15 à 20 % STC (26,7% en laboratoire)	20 à 30 ans	• Très performant. • Stabilité de production d'W. • Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, Modules pour toits, façades,…
Silicium poly Cristallin	12 à 17 % STC (21,9 % en laboratoire)	20 à 30 ans	• Adapté à la production à grande échelle. • Stabilité de production d'W. • Plus de 50% du marché mondial.	Modules pour toits, façades, générateurs…
Amorphe	5 à 10 % STC (13% en laboratoire)		• Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. • Fonctionnement si faible luminosité. • Fonctionnement par temps couvert. • Fonctionnement si ombrage partiel • La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareils électroniques (montres, calculatrices…), intégration dans le bâtiment
Composite Mono cristallin (GaAs)	25-28.8 % STC (30 % en laboratoire)		• Lourd, fissure facilement.	Systèmes de concentrateurs Aérospatiale (satellites)
Composite poly Cristallin (CdS, CdTe, CulnGaSe2,	10 à 16 % (21% en laboratoire)		• Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes	Appareils électroniques (montres, calculatrices…), intégration dans le bâtiment

1.5.3 Silicium poly (ou multi-) cristallin

Cousin germain du précédent (composé de multi cristaux), il est un peu moins performant, essentiellement aux éclairements modérés, et également moins onéreux.

- Rendement électrique des panneaux : 21.9 % STC [16] ;
- Puissance des panneaux : 5 à 300 W_C ;
- Gamme d'éclairement : 200 à 1000 w/ m² ;
- Usage : id. silicium cristallin.

1.5.4 Silicium amorphe

Nettement moins puissant au soleil comparé au deux précédents, ce silicium en couche très mince répond par contre à tous les éclairements, extérieur et intérieur. Sa technologie de fabrication est théoriquement moins onéreuse (mais la production n'a pas atteint des niveaux comparables) et permet de réaliser des petits formats, grâce à la mise en série intégrées et la simplicité de découpe.

- Rendement électrique des panneaux 10.2 % STC (jusqu'à 12 % pour les multi-jonctions) [16] ;
- Puissance de photopiles intérieures : 0 à 1 $W_{C.}$
- Puissance des panneaux extérieurs : 0,5 à 90 W_C.
- Gamme d'éclairement : 20 lux (en intérieur) à 1000 W/m² (en extérieur).
- Usage : électronique professionnelle et grand public (montres, calculettes…), électronique de faible consommation en extérieur, baies vitrées semi-transparentes, centrales au sol.

1.5.5 Tellure de cadmium (CdTe)

Intéressant surtout pour son cout de fabrication devenu très bas ces dernières années, ce matériau, qui a longtemps souffert de problèmes de stabilité et de maitrise des procèdes industriels, est aujourd'hui le leader incontesté des couches minces. En termes de performances, il se situe au niveau des meilleures multifonctions silicium amorphe. Cependant il risque de souffrir de problèmes de pénurie (le tellure est un élément rare) et il contient un élément potentiellement dangereux déjà interdit dans de nombreux pays (le cadmium).

- Rendement énergétique des panneaux : 21 % [16] ;
- Puissance des panneaux : 70 à 90 W_c ;

- Gamme d'éclairement : extérieur ;
- Usage : centrales solaires principalement.

1.5.6 $CuInSe_2$ et CuInGaSe (CIGS)

Les photopiles utilisant ces matériaux sont produites en couche mince par des méthodes chimiques ou de dépôt sous vide, sur une sous-couche de CdS (sulfure de cadmium) elles ont d'assez bonnes propriétés électroniques. De plus, elles bénéficient des mêmes commodités de fabrication que le silicium amorphe (mise en série et découpe simple), mais cette technologie est assez peu commercialisée dans le monde, sans doute à cause des difficultés d'industrialisation et de tenue climatique, mais surtout en raison du cadmium qu'elles contiennent (elle pourrait souffrir de directives européennes sur l'exclusion des matériaux dangereux.

- Rendement des panneaux : 15.6 % [16] ;
- Puissance des panneaux : 5 à 150 W_c ;
- Usage : alimentations de faible et moyenne puissance en extérieur, habitat raccordé au réseau.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur le soleil, son pouvoir énergétique et les propriétés de son rayonnement. Nous avons ensuite décrit les convertisseurs photovoltaïques, leur caractéristique I-V, leur circuit électrique équivalant et leurs principales grandeurs caractéristiques, le mécanisme de la conversion photovoltaïque ainsi que l'étude de l'influence des divers paramètres (l'éclairement, la température, les résistances parasites série et parallèle) sur leur caractéristique puis nous avons cité les différents types de cellules solaires.

Chapitre 2

ENERGIE PHOTOVOLTAIQUE ET INTEGRATION AU RESEAU TRANSPORT ALGERIENNE

2.1 Introduction

Colonne vertébrale du système électrique, le réseau de transport d'électricité est un atout central pour une transition vers des modes de production et de consommation répondant à des objectifs de durabilité, de sobriété et de performance économique. La vocation du réseau de transport d'électricité a toujours été de s'adapter aux moyens de production et aux besoins de consommation. Les grands flux d'électricité d'origine renouvelable et l'indispensable solidarité entre les territoires constituent les principaux vecteurs d'évolution du réseau en Algérie et au monde. La forte pénétration des énergies renouvelables (EnR) et variables, principalement photovoltaïque et éolienne, dans le bouquet électrique pose de nouveaux défis aux gestionnaires de réseau de de transport [17].

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

2.2 Réseau de transport d'électricité [18] [19] [20]

2.2.1 Architecture du réseau électrique

Le système électrique est structuré en plusieurs niveaux, assurant des fonctions spécifiques propres, et caractérisés par des tensions adaptées à ces fonctions. Il est fractionné en quatre principales subdivisions à savoir le réseau de transport, d'interconnexion, de répartition et de distribution. Une notion de frontière peut être définie entre les niveaux de tension du réseau électrique, ces frontières étant définies par les postes sources et les transformateurs.

Ils permettent de connecter les centres de production aux consommateurs, d'assurer une redondance dans l'alimentation en cas d'incident et ils assurent les échanges d'énergie avec nos voisins. La figure 1 schématise l'organisation du réseau, hiérarchisé en :

2.2.1.1 Réseau de transport à haute tension (400kV)

Pour limiter les pertes joule ; les puissances transportées s'échelonnent entre 100 et 1000MW, ce réseau s'étend sur environ 2 547 km. Pour des distances de transport supérieures à 300km, la tension peut s'accroître jusqu'à 750kV et il peut alors économiquement rentable d'effectuer au future le transport en courant continu à haute tension (HVDC), de façon à limiter la consommation d'énergie réactive de la ligne.

2.2.1.2 Réseau d'interconnexion haute tension (220kV)

Qui assure le maillage entre les points de production et les points de consommation, ainsi que les échanges avec l'étranger ; on notera qu'à l'inverse des réseaux de transport et de distribution, les flux de puissance peuvent être bidirectionnels sur ce réseau. Ces lignes acheminent de 10 à 100MW, elles contribuent à optimiser économiquement la disponibilité de l'électricité : le coût en investissement pour 1MW produit est égal au coût pour le transport sur 10000 km de ce même MW ; il est donc plus intéressant économiquement de minimiser le nombre de sites de production si on peut facilement les interconnecter aux consommateurs.

Les grandeurs électriques sont équilibrées sur le réseau de transport, par contre la tension peut subir des fluctuations significatives aux différents points de connexion. Les lignes sont majoritairement aériennes pour des raisons de moindre coût d'isolement [18] [20].

2.2.1.3 Réseau de répartition (63 kV)

Pour les gros consommateurs les centres régionaux de consommation, les flux d'énergie sont bidirectionnels de l'ordre de 10 à 100MW.

2.2.1.4 Réseau de distribution pour les gros consommateurs industriels (30kV) et les particuliers (400V)

Les réseaux de distribution sont les réseaux d'alimentation de l'ensemble de la clientèle, a l'exception de quelques gros clients industriels alimentés directement par les réseaux HTB et HTA. On distingue deux sous niveaux : les réseaux en moyenne tension (30 kV) et les réseaux à basse tension (400 V). Les réseaux de distribution moyenne tension transportent l'énergie vers les réseaux à basse tension et permettent d'alimenter directement des clients industriels, qui représentent 15-20% de l'ensemble du secteur industriel. Les réseaux à basse tension sont destinés à alimenter des clients à faible demande d'énergie : petits commerces, établissements de service, clients domestiques, etc. Sa tension est plus stable (230V+/-10%, norme européenne), les courants peuvent être déséquilibrés [21] [22].

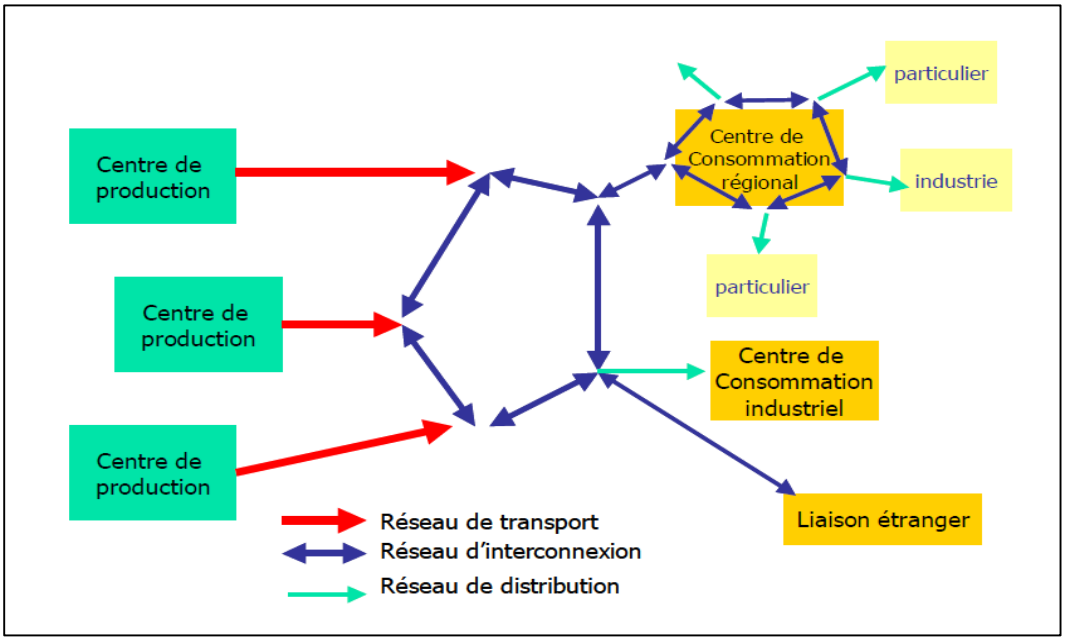


Figure 2-1 Organisation schématique du réseau d'énergie

2.2.2 Réseau de transport Algérien [23]

Géré par le Gestionnaire du Réseau de Transport de l'Electricité, dénommée GRTE.Spa, filiale du Groupe SONELGAZ.

GRTE assure ses activités à travers des directions centrales et cinq directions de régions transport de l'électricité : Alger, Oran, Sétif, Annaba, Hassi Messaoud. Ces régions, à travers 24 services de transport répartis sur le territoire national assurent une maintenance de proximité et la relation directe avec les clients.

Le réseau national de transport est un ensemble d'ouvrages lignes et postes haute tension (60, 90, 150, 220 et 400 kV) équipé d'un réseau de télécommunication pour la surveillance, le contrôle et la télécommande des équipements.

Il est constitué d'un réseau interconnecté au nord du pays, avec des interconnexions internationales (Tunisie et Maroc) et d'un réseau isolé au sud.

Les utilisateurs du réseau sont les centrales électriques, les sociétés de distributions de l'électricité et clients HT ainsi que pour les échanges internationaux à travers les interconnexions.

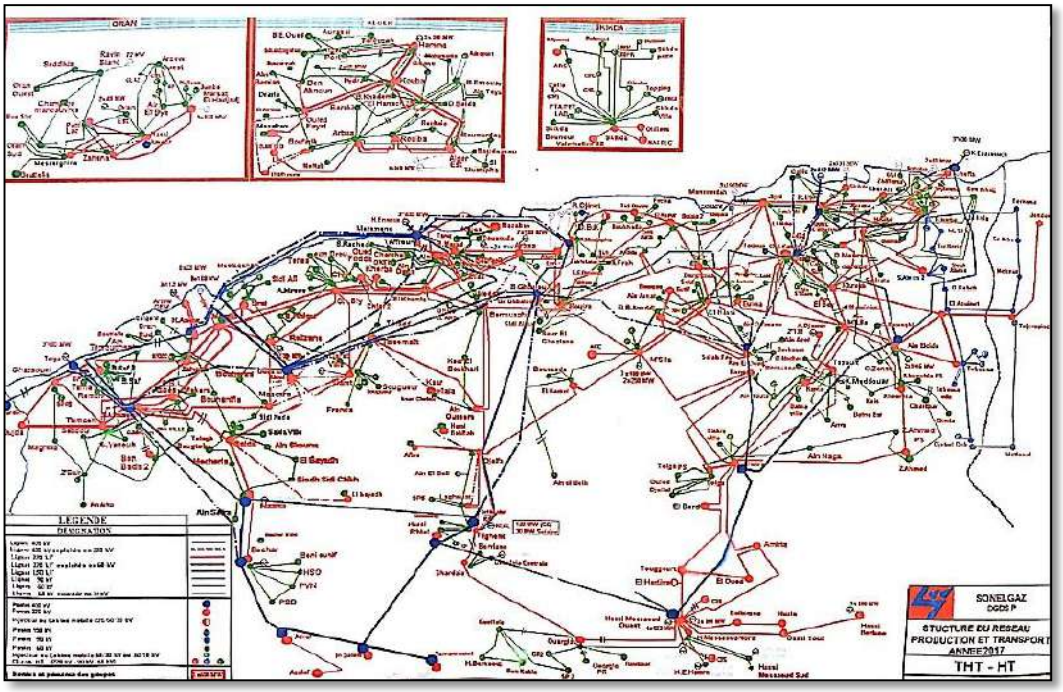


Figure 2-2 Structure de réseau transport et production 2017 [24]

Le réseau est composé de :

- 27 284 km de lignes dont 3 919 km en 400 kV, 13 114 Km en 220 Kv avec augmentation de 7,9% par rapport au 2014 ;
- 300 postes (dont 14 en 400 KV) dotés d'une capacité de transformation de 52 235MVA à travers 836 transformateurs et cabines mobiles ;
- Un réseau de fibre optique de 16 095,7 km. GRTE assure le transit pour les quatre Sociétés de distribution d'électricité (y compris les clients industriels qui sont clients de ces sociétés de distribution).

2.2.2.1 Nouveau Domaines de Tension [25].

Le choix du niveau de tension et de la fréquence dépendent du résultat techno-économique et des considérations historiques. Ce qui fait chaque pays a ses différents niveaux de tensions et aussi ses fréquences.

La nouvelle norme en vigueur en Algérie (SONELGAZ) définit les niveaux de tension en courant alternatif et continu comme suit :

Tableau 2-1 Tableau des domaines de tension.

Domaine de Tension		**Valeur de la Tension Nominale (Un en Volts)**	
		Courant Alternatif	**Courant Continu**
Très Basse Tension (TBT)		Un ≤ 50	Un ≤ 120
Basse Tension (BT)	**BTA**	50 < Un ≤ 500	120 < Un ≤ 750
	BTB	500 < Un ≤ 1000	750 < Un ≤ 1500
Haute Tension (HT)	**HTA**	1000 < Un ≤ 50000	1500 < Un ≤ 75000
	HTB	Un > 50000	Un > 75000

2.2.3 Protections des Lignes de transport de l'électricité

Les lignes de transport de l'électricité sont principalement protégées par des protections de distance, parfois aussi appelés protection à minimum d'impédance associées à des protections différentielles lignes et des protections à maximum de courant.

Les défauts du type court-circuit sur les lignes de transport de l'électricité sont relativement fréquents, ils sont causés par : des coups de foudre, des arbres mal élagués, des grues et des engins de grande hauteur travaillant au voisinage, vent, pollution…etc. [26].

2.2.3.1 Définition de la zone de protection

En plus des performances que doivent avoir les relais, il faut savoir les placer correctement pour les rendre plus efficaces. Pour atteindre cet objectif, on découpe le réseau industriel en zones délimitées par les positions des organes de coupure.

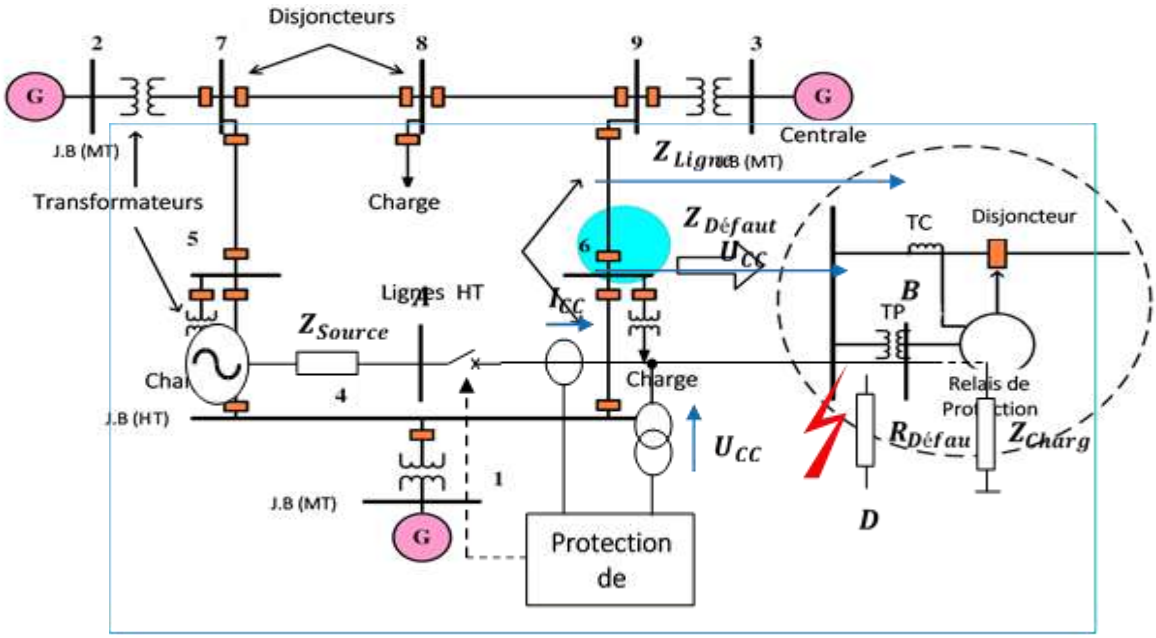


Figure 2-3 Les zones de protection d'un réseau électrique.

La Figure **(2.3)** montre une disposition caractéristique des zones de protection, correspondant respectivement à des sections de ligne, des jeux de barres, des transformateurs des machines. Ces zones se recouvrent pour ne laisser aucun point de l'installation sans protection[27].

2.2.3.2 Protection par relais à maximum de courant

Elle a pour fonction de détecter les surintensités monophasées, biphasées ou triphasées. La protection est activée si les courants mesurés dépassent la consigne correspondant au seuil de réglage appelé aussi seuil de fonctionnement. [28].

2.2.3.3 Protection de distance

Une protection de distance a la capacité de détecter un défaut à une distance prédéfinie sur une ligne de transmission ou un câble d'alimentation depuis son emplacement.

Chaque ligne électrique a une résistance et une réactance par kilomètre en fonction de sa conception et de sa construction ; ainsi, son impédance totale sera une fonction de longueur ou de la distance. Une protection de distance observe donc le courant et la tension et compare ces deux quantités en s'appuyant sur la loi d'Ohm **(Figure 2.4)** [29].

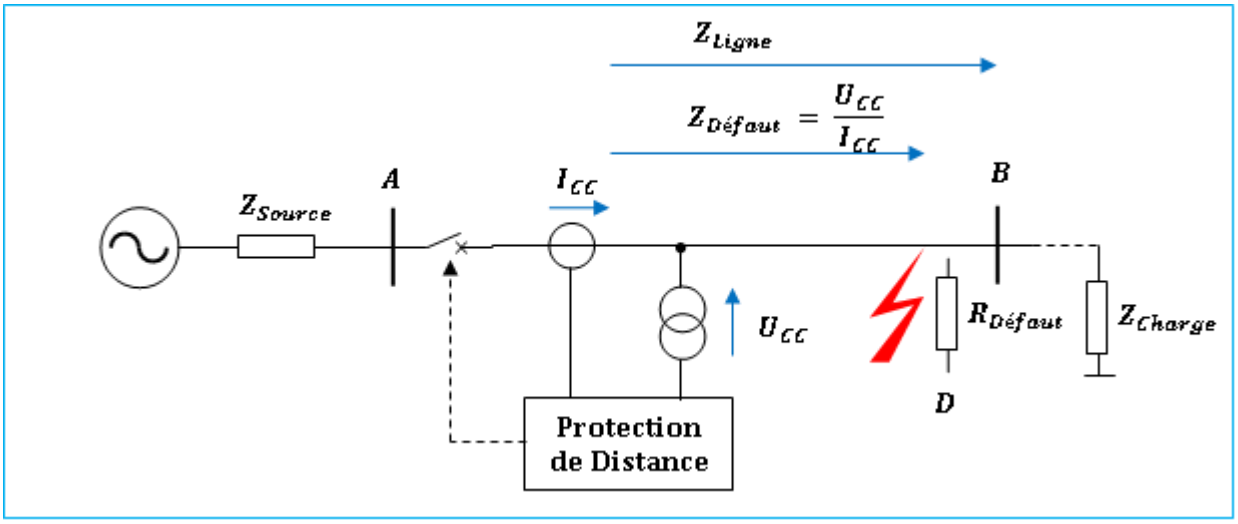


Figure 2-4 Principe de base du fonctionnement.

2.2.3.4 Protection différentielle

Ce type de relais est, généralement, basé sur la mesure de la différence géométrique de deux courants, elle utilise le principe de comparaison des courants d'entrée et de sortie de l'élément à protéger ; dans notre cas la ligne de transport.

Pour effectuer cette protection, on installe des deux côtés de la ligne des transformateurs de courant (TC) dont on fait la connexion de leurs enroulements de tel sorte que les courants secondaires $\boldsymbol{I_A}$ et $\boldsymbol{I_B}$ soient égaux et coïncident en phase Figure (2.5).

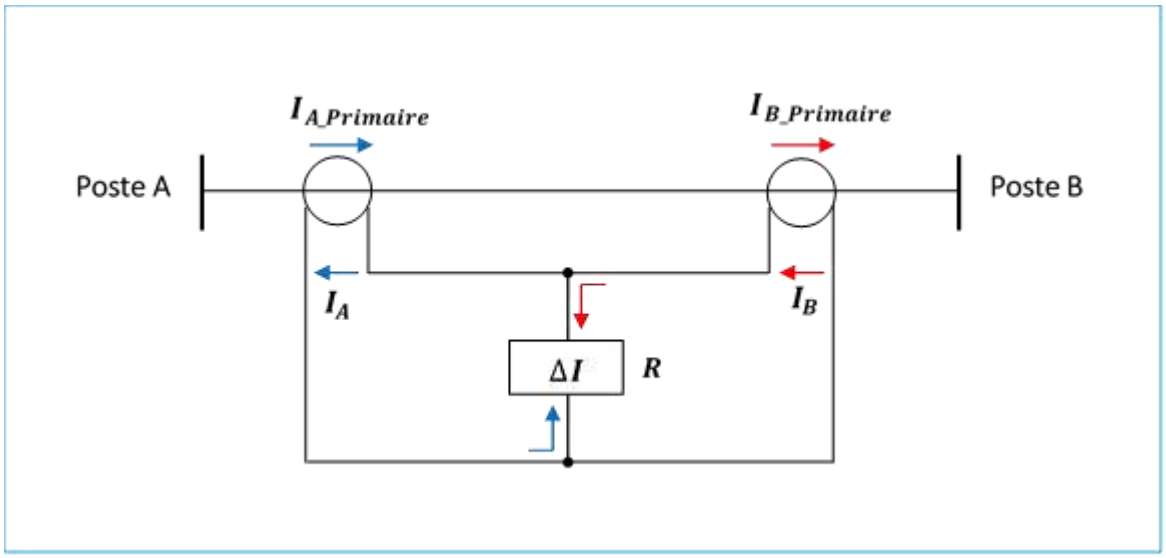


Figure 2-5 Principe de la protection différentielle

Lors du régime normal et des court-circuit extérieurs, le courant déséquilibré $\boldsymbol{I_{dés}}$circulera à travers l'enroulement du relais et est :

$$\boldsymbol{I_{dés} = I_A - I_B = I_{Relais}} \quad (2.1)$$

Quand un court-circuit se produit dans la ligne à protéger, le point de défaut sera alimenté par les deux côtés, donc, l'un des deux courants mesurés par les transformateurs du courant a changé de direction, et par conséquent, le relais sera traversé par la somme vectorielle des deux courants.

$$\boldsymbol{I_{Relais} = I_A + I_B > I_F} \quad (2.2)$$

La protection fonctionne en envoyant le signal de déclenchement aux disjoncteurs.

2.3 Productions décentralisées [30].

Depuis quelques décennies, plusieurs pays se focalisent sur la recherche et le développement de sources d'énergies renouvelables afin de remplacer en partie les sources d'énergies conventionnel ;

- **Eolien** : l'énergie cinétique du vent est convertie en énergie électrique grâce aux turbines aérogénérateurs ;
- **Photovoltaïque** : les panneaux photovoltaïques transforment directement l'énergie solaire en énergie électrique ;
- **Solaire thermique** : le principe consiste à capter le rayonnement solaire et à le stocker dans le cas des systèmes passifs (véranda, serre, façade vitrée) ou, s'il s'agit de système actif, à redistribuer cette énergie par le biais d'un fluide caloporteur qui peut être de l'eau, un liquide antigel ou même de l'air.
- **Biomasse et déchets** : certaines centrales thermiques à flamme utilisent comme source primaire des combustibles issus de la biomasse (bois, biogaz, paille, déchets organiques, etc.) ou de déchets industriels et domestiques.
- **Petites centrales hydrauliques**
- **Hydrolienne** : utilise l'énergie cinétique des courants marins, comme une éolienne utilise l'énergie cinétique de l'air. Notre objet d'étude concerne les systèmes photovoltaïques (PV) ; on remarque que la part de l'énergie solaire photovoltaïque (PV) est en forte

croissance depuis quelques années car c'est une source inépuisable, non polluante pour l'environnement, silencieux et non dérangeantes pour les riverains voisins.

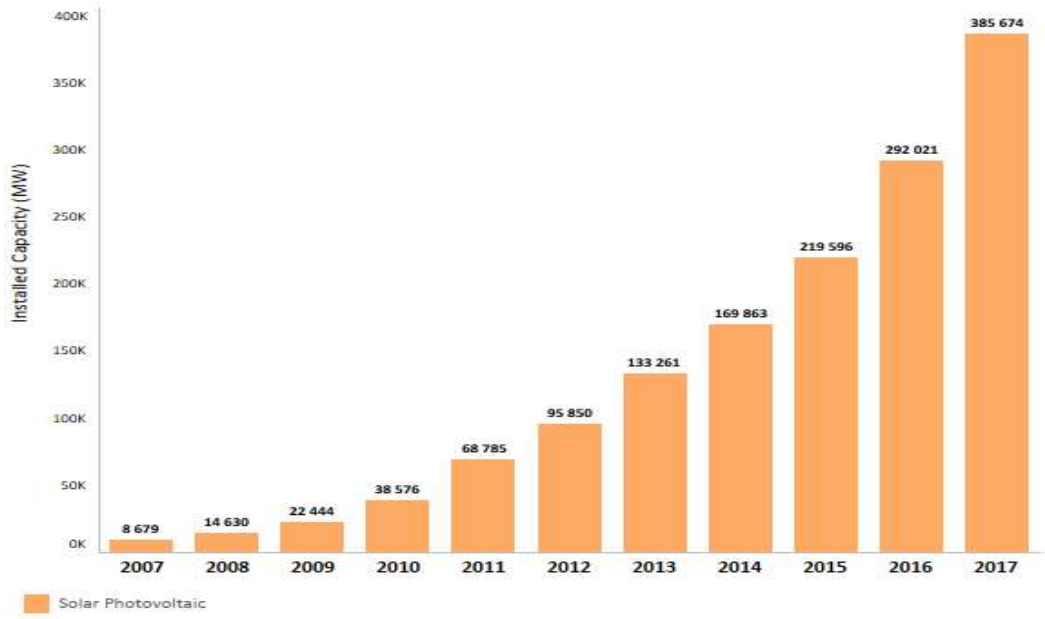


Figure 2-6 Puissance PV installée dans le monde [31].

La Figure **2.6** présente l'évolution de la puissance installée cumulée des installations PV dans le monde de 2007 à 2017, Cette figure montre la forte progression des installations PV raccordées au réseau. A la fin de 2011, cette puissance installée approchait 69 GW, et en 2015 près de 220 GW étaient installés qui produisent environ 243 TWh d'électricité sur une base annuelle. Quatre pays ayant la capacité installée cumulée des systèmes PV plus de 40 GW sont : la chine (130 GW), le Japon (48 GW) l'Allemagne (42 GW), et les Etats-Unis (41 GW). Ces pays représentent près de 80% de la capacité installée mondiale. D'autres pays (France, UK, Inde, Italie, Corée et le (Australie) sont en train d'accélérer du a la nouvelle politique et au plan de soutien économique [30] [31].

Pour notre pays la situation géographique favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation des énergies renouvelables, notamment pour les applications solaires et éoliennes. En effet, vu l'importance de l'intensité du rayonnement solaire reçu au sol, mais la production issue de cette énergie reste très faible (figure **2.7)** à cause du prix moins chère de KWh par rapport au cout d'investissement de Wc, afin d'atteindre l'évolution mondiale l'état est obligé d'investir dans un projet à long terme dans les grand PV connecté au réseau

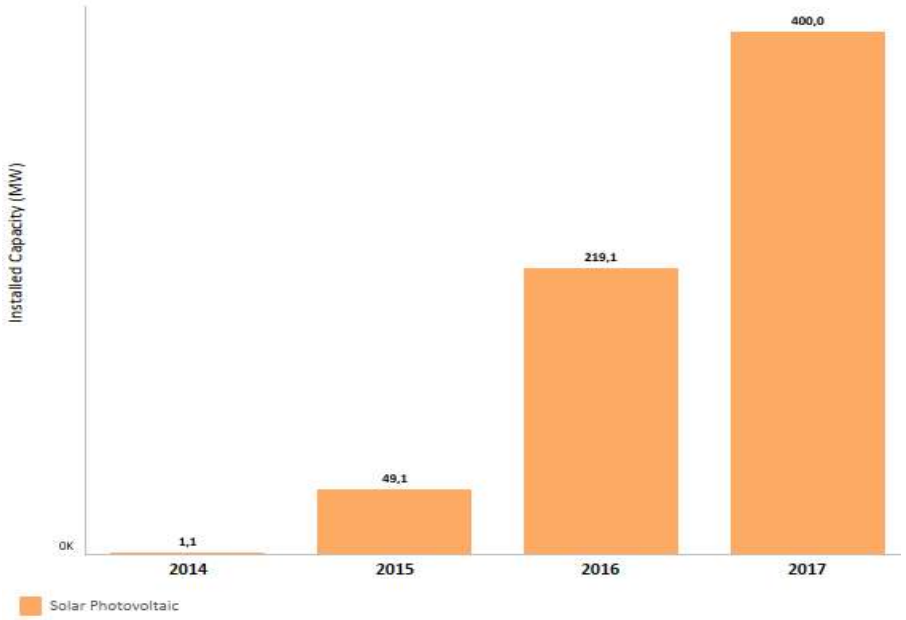


Figure 2-7 Puissance PV installée en Algérie (2014-2017) IRENA

2.4 Intégration de l'énergie photovoltaïque au réseau

2.4.1 Schéma du raccordement des centrales solaires PV

Les études de raccordement des centrale PV ont pour objet de déterminer la meilleure façon d'injecter la puissance au réseau de sorte de minimiser les investissements, tout en respectant les critères de sécurité et la qualité de services. Le raccordement d'une centrale PV dépend principalement de l'architecture électrique du réseau (réseau de transport au de distribution), donc le niveau de tension le plus proche de l'installation PV. En effet pour le cas de l'Algérie, deux configurations de raccordement sont envisagées, comme le montre la figure (2.8) [32].

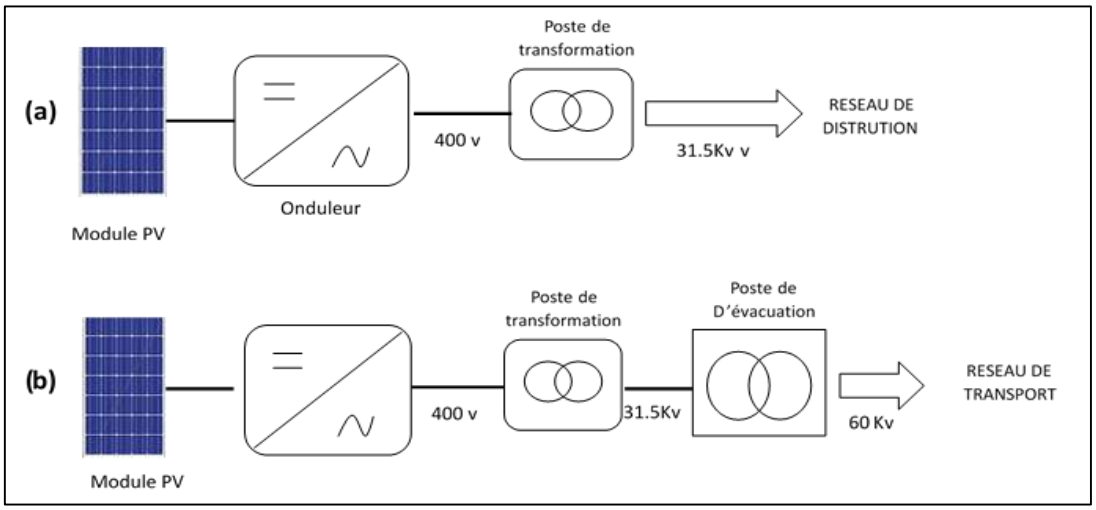


Figure 2-8 Schéma de raccordement : (a) au réseau de distribution (b) au réseau de transport

2.4.2 Interaction entre le réseau transport et les systèmes PV [30].

L'installation de centrales photovoltaïques à grande échelle connectées au niveau réseau électrique de transport a augmenté au cours des dernières années. Il y a quelques défis que ces centrales électriques doivent surmonter concernant l'opération et le contrôle tout en traitant de la variabilité et de l'incertitude de l'énergie solaire.

Les problèmes induits par l'intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique sont causés par :

- Leur production aléatoire et difficilement prévisible ;
- Une absence de réglage puissance - fréquence ;
- Une participation au réglage de la tension limitée ;
- Une sensibilité élevée aux creux de tension et aux variations de fréquence pour certaines technologies ;
- La sensibilité faible aux variations rapides de la source (l'ensoleillement dans le cas du système PV).

Les modalités de raccordement au réseau électrique des installations renouvelables sont définies par des décrets et arrêtés, Le tableau **2.2** donne les niveaux de tension de raccordement des installations en fonction de leur puissance.

Tableau 2-2 Niveaux de tension de raccordement des installations en fonction de leur puissance[32].

Type de réseau	**Plage de tension**	**Niveaux de tension**	**Puissance**
BTA	BT monophasé	230 V	S ≤ 18 kVA
BTA	BT triphasé	400V	S ≤ 250 kVA
HTA	1 kV <U≤ 50 kV	15 kV, 30 kV	P ≤ 10 MW
HTB	50 kV <U≤ 130 kV	kV 63 kV, 90 kV	P ≤ 50 MW
HTB	130 kV <U≤ 350 kV	150 kV, 225 kV	P ≤ 250 MW
HTB	350 kV <U≤ 500 kV	kV 400 kV	P > 250 MW

Les installations d'une puissance maximale de 10 MW sont connectées au réseau de distribution, généralement de moyenne tension (30Kv - HTA). Normalement les installations d'une puissance supérieure à 20 MW sont connectées au réseau de transport (HTB).

A l'origine, le réseau HTA était en principe conçu pour accueillir des consommateurs ; l'intégration progressive de productions dans ce réseau peut conduire jusqu'à une inversion des flux de puissance au niveau des postes HTA-HTB. En fonction du taux de pénétration, ceci peut influencer avant tout la gestion de la tension, mais peut aussi conduire à des révisions du plan de protection et à des modifications de structure en raison de courants de court-circuit trop élevés.

2.4.2.1 Prescriptions techniques relatives au raccordement au réseau de transport

Les prescriptions techniques relatives au raccordement au réseau de transport d'une installation de production d'énergie électrique sont précisées dans le décret [34]. Au sens du décret, la qualité de l'électricité se vérifie par le maintien dans les plages contractuelles, réglementaires ou normatives :

- Des paramètres caractéristiques des ondes de tension et de courant du réseau électrique ;
- De la continuité et de la fiabilité de l'alimentation des utilisateurs.

Ce deuxième critère de continuité et de fiabilité dépend essentiellement de la disponibilité de la source amont, l'irradiation solaire, ce qui par nature pose évidemment problème. La qualité des ondes de tension et courant au point de connexion des PV au réseau dépend fortement de la technologie de ces PV et essentiellement la technologie de ces onduleurs.

Ces prescriptions techniques présentent quelques considérations générales sur les contraintes relatives au raccordement au réseau de transport d'une installation de production d'énergie électrique :

- En fonction de leur type, de leur puissance et de leur tension de raccordement, les installations de production doivent être conçues pour pouvoir contribuer, pour des durées limitées, au soutien du système électrique lorsqu'il est en régime exceptionnel ou en situation de défaut d'isolement.
- En fonction de leur type, de leur puissance et de leur tension de raccordement, les installations de production doivent avoir des capacités constructives de fourniture de services auxiliaires nécessaires pour que le fonctionnement du système électrique soit sûr.

Ces services comprennent :

- Les réglages primaires et secondaires de la tension ;
- Les réglages primaires et secondaires de la fréquence ;
- Le fonctionnement en réseau séparé ;
- le renvoi de tension et la participation à la reconstitution du réseau.

- les installations de production doivent être équipées d'un dispositif qui permet de les coupler au réseau public de transport. Les installations doivent en outre être conçues pour que la stabilité de leur fonctionnement soit assurée compte tenu des caractéristiques de leur raccordement au réseau et doivent être équipées des régulations de tension et de fréquence qui sont nécessaires pour atteindre cet objectif. Des pertes de stabilité ne doivent pas être à l'origine d'une dégradation de la qualité de l'électricité sur le réseau public de transport ou de la perturbation des conditions de son exploitation.
- Les installations de production doivent être capables de recevoir et d'exécuter, dans les délais appropriés précisés dans la convention d'exploitation, les ordres de conduite et de sauvegarde en provenance du gestionnaire du réseau de transport.

L'arrêté [35] dans son annexe précise ces contraintes de raccordement en fonction du type d'installation. Sans prétendre être exhaustifs, nous allons évoquer quelques-unes de ces contraintes dans la suite de cette section.

2.4.2.1.a Réglage de la tension [33] [34] [35].

Toutes les unités de production, y compris les PV, doivent pouvoir fonctionner dans un domaine de fonctionnement déterminé par un graphique avec en ordonnée la tension (U) et en abscisse le rapport entre la puissance réactive et la puissance active maximale (Q/P_{max}). Un exemple du domaine de fonctionnement dénommé trapèze [U, Q] est représenté à la Figure (**2.9)**.

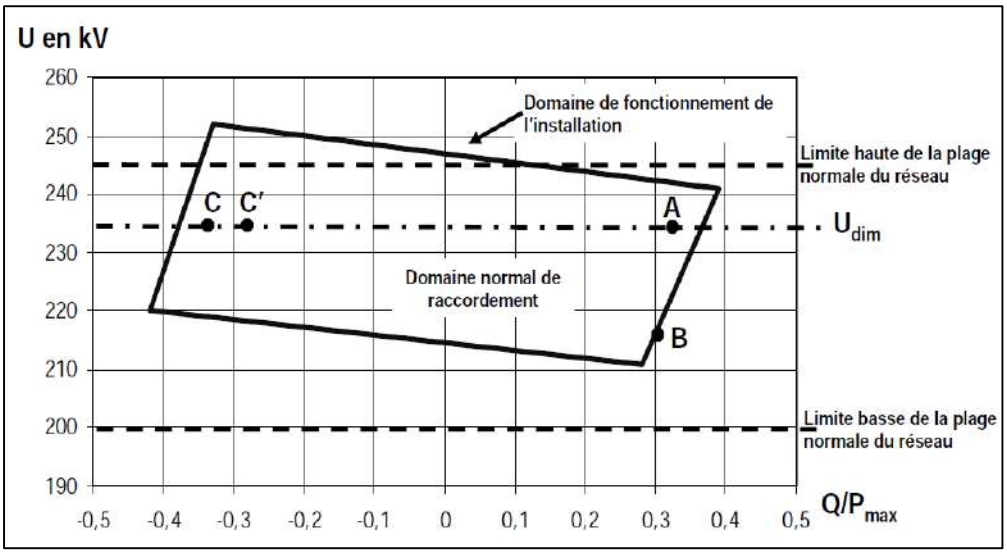


Figure 2-9 Exemple de domaine normal de fonctionnement d'une installation de production.

Les unités de production doivent assurer un contrôle de la tension et de la puissance réactive au point de livraison.

Trois types de réglages primaires sont possibles :

- **Type 1** : réglage à puissance réactive constante ;
- **Type 2** : réglage de la tension à une valeur variant linéairement en fonction de la puissance réactive avec une pente ajustable ;
- **Type 3** : réglage de la tension selon une consigne asservie aux ordres provenant du réglage secondaire de la tension.

Les installations raccordées aux réseaux HTB (150 kV, 225 kV) et HTB (400 kV) doivent pouvoir participer au réglage secondaire de la tension de leur zone, si le gestionnaire du réseau le demande. Ces installations doivent disposer d'un réglage primaire de la tension de type 2 ou 3.

2.4.2.1.b Réglage de la fréquence [33] [34] [35].

Dans les prescriptions techniques relatives au raccordement au réseau de transport Algérien, les installations de production de l'électricité doivent être conçues pour contribuer au maintien en permanence de la fréquence de ce réseau à une consigne de 50 ±0,2Hz, et doivent avoir la capacité constructive pour fonctionner normalement dans la plage de fréquence entre 48 Hz et 52 Hz, aussi, ils doivent permettre un fonctionnement exceptionnel pour des durées limitées dans les plages de fréquence (46Hz - 48Hz) et (52 -53Hz), pour les installations de production de puissance supérieure ou égale à 50 MW, participent au réglage primaire de fréquence.

Le réglage primaire de la fréquence est basé sur le constat qu'un déséquilibre entre la production et la consommation qui induit une variation de fréquence due à la variation de la vitesse des groupes alternateurs classiques. Le réglage primaire de la fréquence est réalisé automatiquement au niveau des groupes de production, il assure une correction rapide, en quelques secondes, et décentralisée des écarts offre-demande. Ce réglage suit une relation linéaire ente la fréquence (imposée par la vitesse des groupes tournants) et la puissance (Figure 2.10).

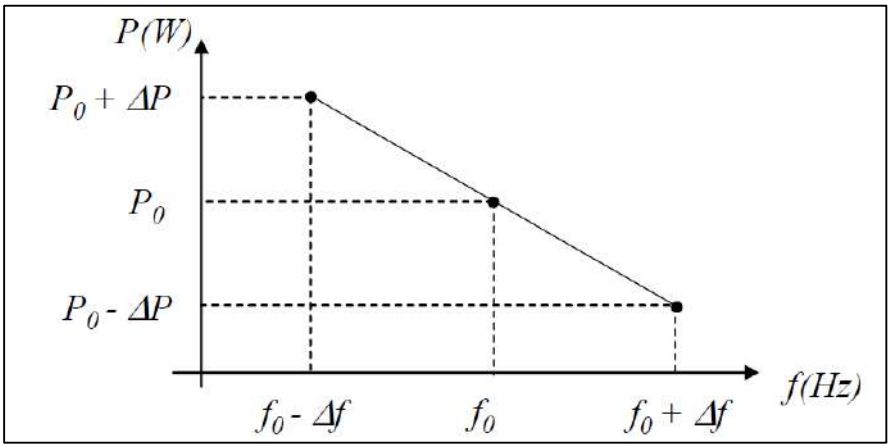


Figure 2-10 Réglage primaire de fréquence.

La participation au réglage de la fréquence n'est pas exigée pour des installations de production mettant en œuvre de l'énergie fatale telles que les champs PV. Le fait de ne pas participer au réglage de fréquence limitera à terme le taux de pénétration de ces énergies, car ce réglage est reporté sur les groupes traditionnels. En cas de forte pénétration de l'éolien, les exigences en terme de participation au réglage de fréquence de l'éolien pourraient donc évoluer.

2.4.2.1.c Aptitude à fonctionner en ilotage

Les installations de production de l'électricité doivent être équipées d'automates fiables leur permettant de faire fonctionner l'installation en îlotage suite aux défauts électriques survenus sur le réseau de transport de l'électricité et ce pour une durée d'une heure permettant ainsi le recouplage rapide de l'installation au réseau de transport de l'électricité après l'élimination du défaut.

Les auxiliaires des groupes de production doivent pouvoir fonctionner en toute sécurité jusqu'à la limite du minimum de tension admissible par les groupes [32].

2.4.2.1.d Aptitude à fonctionner en réseau séparé

Des parties plus importantes du réseau de transport de l'électricité peuvent aussi, suite à des situations exceptionnelles d'exploitation, se trouver séparées du réseau de transport de l'électricité interconnecté pour des durées plus ou moins longues. Elles constituent alors un réseau de transport de l'électricité séparé de taille étendue [32].

Les installations de production doivent être conçues de façon à fonctionner en réseau séparé ou par zones de production reliées à travers des ouvrages du réseau de transport de l'électricité.

2.4.3 Problèmes induits par l'intégration des PV dans le réseau de transport

Le gestionnaire du réseau doit veiller à éviter la surcharge thermique des lignes et la rupture de synchronisme, assurer la stabilité de la fréquence (c'est-à-dire assurer l'équilibre production - consommation) et la stabilité de la tension, afin d'assurer sa sécurité.

2.4.3.1.Prévision de la production

Les problèmes majeurs des PV sont surtout la difficulté de prévoir leur production (précisément plusieurs heures à l'avance), mais aussi la grande variabilité de cette dernière. L'expérience allemande montre que des prévisions à 72 h sont impossibles, et que l'erreur sur des prévisions à 24 h est en moyenne de 10 % de la capacité installée et peut atteindre parfois 50 %. [36] [37].

Dans des exemples de mauvaises prévisions concernant le Danemark, les erreurs de prévisions à 24 h peuvent atteindre des valeurs de plus de 50% en négatif (sous-production) ou en

positif (surproduction) avec des changements de signe rapide en cours de journée. Des capacités de production de réserves contrôlables sont alors nécessaires pour pallier ces incertitudes, en particulier pour satisfaire la demande en période de pointe [38].

Il se pose aussi la question d'une adéquation entre la consommation et la puissance PV disponible. En général, il y a plus d'ensoleillement en été qu'en hiver, durant le jour seulement, ce qui correspond aux tendances de la consommation en Algérie où le pic de l'été peut atteindre plus de 13 881 MW (30 juillet 2017), tandis que le pic hivernal peut atteindre plus de 10 000 MW. Cependant, il apparaît que durant les périodes de grandes chaleurs ou de grands froids, la puissance solaire est faible, la multiplicité des installations PV sur un vaste territoire est néanmoins favorable à une corrélation entre la consommation et la production PV.

2.4.3.2 La non-participation au réglage tension – fréquence

Le fait de ne pas participer aux services système (réglage de la tension, de la fréquence, démarrage en autonome ou black-Start, possibilité de fonctionner en îlotage) amène les systèmes PV à se comporter comme des générateurs passifs du point de vue électrique, le réglage de la tension et de la fréquence est dès lors reporté sur les alternateurs classiques donc le taux de pénétration du PV, c'est-à-dire la puissance que génèrent les PV par rapport à la puissance totale consommée, doit alors être limité afin de pouvoir garantir la stabilité du réseau dans des conditions acceptables.

Certains retours d'expériences indiquent que, pour des taux de pénétration supérieurs à 20 ou 30%, des problèmes de stabilité peuvent apparaître [38]

Une solution évidente pour l'opérateur système consiste alors à « augmenter » les capacités classiques de réglage reposant sur des groupes rapides (Turbines à gaz, groupes diesels), ce qui va à l'encontre des motivations écologiques visant au développement de la production solaire.

2.4.3.3 Capacité d'accueil du réseau

La capacité des lignes et des postes est limitée. Cette limitation peut constituer dans le cas des PV un problème aigu, car les lieux de production (**sites ensoleillés**) sont souvent éloignés des lieux de consommation.

La capacité d'accueil de la production dépend :

- Du niveau de tension concerné ;
- De la capacité du transit des lignes aériennes ou souterraines et des transformateurs ;
- D'autres installations de production préexistantes en état de fonctionnement simultané ou non ;
- Du niveau de consommation régionale.

L'adaptation et le renforcement des postes peuvent concerner les postes HTB/HTA suite au développement des PV dans le réseau (modification des protections, augmentation de la puissance de court-circuit), et afin d'éviter la congestion des lignes de transport et d'assurer la sécurité du réseau, de nouvelles lignes devraient être construites entre les réseaux proches de ces centrales[39].

2.4.3.4 Déconnexions intempestives [33] [34] [35].

Les générateurs PV, tout comme la majorité des générateurs décentralisés, sont très sensibles aux perturbations du réseau et ont tendance à se déconnecter rapidement lors d'un creux de tension (dès que la valeur de la tension est inférieure à 80% de la tension nominale) ou lors d'une variation de la fréquence, ce qui entraîne souvent une déconnexion de la production lors des incidents sur le réseau. Cette déconnexion peut aggraver un déséquilibre production - consommation et par effet Domino accélérer l'avènement d'un incident majeur dans le réseau.

Afin d'éviter un déclenchement simultané de toute ou d'une partie de la production PV sur un défaut normalement éliminé, il est demandé aux installations de production de l'électricité de pouvoir rester connectées au réseau en cas de baisse de tension et de variation de fréquence suivant des contraintes.

Le tableau ci-dessous nous montre les plages de variation des tensions en régime exceptionnel et les creux de tension auxquels les installations peuvent être soumises.

Tableau 2-3 Plage de variation des tensions et Creux de tension[34] [35].

Plage de variation (kV)	Max	Min	Creux de tension	T(ms)
400	440	340	100%	120 ms
220	245	187	100%	120 ms
150	170	138	100%	120 ms
90	100	83	100%	200 ms
60	72.5	55	100%	200 ms

Pour le réseau national, il est demandé aux producteurs PV de rester sur une plage inferieure (62-58Kv) et, de rester connectée au réseau lors des creux de tension de 100% pendant 200ms. [40].

2.4.3.5 Qualité de l'électricité

A) La tension :

Pour le cas très simple d'une charge alimentée à travers une ligne par une source de tension constante (Figure 2.11), on peut écrire de façon approchée que la chute de tension dans la ligne (ΔV= V1-V2) est égale à

$$\Delta V = \frac{rP + xQ}{V_2} \tag{2.3}$$

Avec r la résistance des conducteurs en Ω, x la réactance de la ligne en Ω, P et Q respectivement les puissances active et réactive transitant dans la ligne.

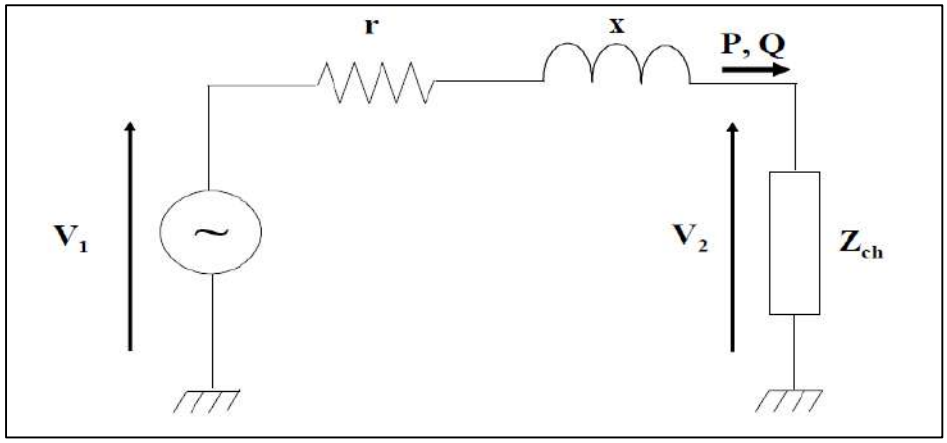


Figure 2-11 Schéma équivalent simplifié d'une ligne.

Pour les lignes de Très Haute tension (THT), $x \geq 10\ r$; l'expression (2.3) peut donc se simplifier :

$$\Delta V = \frac{xQ}{V_2} \tag{2.4}$$

La puissance active générée par les PV est par nature fluctuante, ce qui tend d'après l'expression (2.3) à induire des fluctuations de tension dans la zone du réseau proche du point de connexion de ces PV. Dans le réseau de transport constitué de ligne HT et THT (ou HTB), l'expression (2.4) montre que les variations de tension sont essentiellement induites par les transits de puissance réactive, contrairement aux réseaux de distribution. C'est pourquoi, il est demandé aux PV actuellement connectées au réseau de transport de participer au réglage de la tension via un réglage de la puissance réactive. Ce réglage est possible via des nouveaux convertisseurs d'électronique de puissance, Les exigences de l'Allemagne par exemple en matière d'onduleurs intelligents, établies il y a trois ans, ont résolu le problème de l'instabilité de la tension en obligeant les onduleurs à commencer à soustraire la puissance réactive lorsque

la sortie de leurs réseaux PV dépasse 50% de la capacité. Cela contrebalance l'impact de la production d'énergie solaire sur la tension [33].

B) La fréquence

Un déséquilibre entre la production et la consommation induit une variation de fréquence due à la variation de vitesse des groupes alternateurs classiques ce qui entraine le réglage primaire de fréquence réalisé automatiquement au niveau de ces groupes

De plus, comme la fréquence est commune aux réseaux interconnectés, ce réglage provoque des variations de transit entre les régions. Ceux – ci sont l'expression de la « solidarité » entre réseaux pour contenir les aléas (perte de groupe de production). Le rôle du réglage secondaire est alors, en quelques minutes (15 minutes), de ramener la Fréquence à sa valeur nominale et de ramener les échanges entre régions à leurs valeurs standardisées.

Les variations rapides de la puissance générée par les PV (pouvant atteindre quelques centaines de kW en quelques dizaines de seconde), tout comme les variations de charge, peuvent donc induire des fluctuations de la fréquence du réseau et activer le réglage primaire des groupes tournants, cependant, tant que le taux de pénétration de PV reste faible, cette influence peut être considérée comme négligeable.

Dans le cas contraire, afin d'assurer la stabilité du réseau, une participation au réglage primaire des PV sera à envisager avec des solutions qui restent à imaginer. Déjà actuellement, lorsque la production est supérieure à la consommation, donc lorsque la fréquence est supérieure à 50Hz, il peut être demandé aux PV de réduire leur production [33].

2.4.4 Les tarifs d'achat garantis en Algérie [35]

Les tarifs d'achat garantis pour l'électricité produite à partir des installations utilisant la filière solaire photovoltaïque ainsi que les conditions de leur application ont été fixés par un arrêté ministériel publié dans le journal officiel du 2 février 2014.

Le Contrat d'achat d'électricité conclu entre le producteur d'électricité titulaire d'une décision d'octroi du bénéfice du tarif d'achat garanti et le distributeur concerné. Les tarifs d'achat garantis pour la vente de l'électricité produite par les installations utilisant la filière solaire photovoltaïque sont fixés par tranche de capacité et en fonction du potentiel solaire. Le potentiel solaire est exprimé en nombre d'heures équivalent de fonctionnement à pleine charge de l'installation par année.

Le contrat d'achat est conclu pour une durée de vingt (20) ans à compter de la date de mise en service du raccordement. Pendant cette durée, le producteur bénéficie, dans une première phase, qui correspond aux cinq premières années de cette période, du tarif d'achat unique fixé et calculé sur la base d'un potentiel de référence estimé à 1500 heures de fonctionnement à pleine charge. Dans une deuxième phase, et pour la durée restante du contrat, ce tarif unique peut être réajusté, en fonction du potentiel réel du site.

Tableau 2-4 Tarif d'achat garanti par tranche de puissance et selon le potentiel en DA / kWh
Installations photovoltaïques au sol d'une capacité de > 5 MWC.

LIMITE REGLEMENTAIRE D'AJUSTEMENT	**NOMBRE D'HEURES DE FONCTIONNEMENT (kWh/kW/an)**	**TARIF D'ACHAT GARANTI PHASE I (DA/kWh)**	**TARIF D'ACHAT GARANTI PHASE II (DA/kWh)**
-15%	1275-1349	12,75	20.08
	1350-1424		18.83
	1425-1499		17.45
Potentiel de référence	**1500 – 1574**		15.94
+15%	1575-1649		14.43
	1650-1724		13.06
	≥1725		11.80

2.5. Potentiel solaire de l'Algérie

L'Algérie possède un gisement solaire parmi les plus élevé dans le monde, la durée moyenne d'ensoleillement dans le Sahara algérien est de 4500 heures, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable dans cette région et pour le pays, s'il est l'Algérie mais pour la région et même pour l'Europe.

Ce potentiel qui a été le sujet d'étude pour le projet eco-énergétique de grande envergure DESERTEC (Figure 2.12), menu par le centre aérospatial allemand (DLR)**,** l'Institut de Thermodynamique technique , et le Département de l'analyse des systèmes et de l'évaluation des technologies, qui prévoit l'exploitation du potentiel énergétique des déserts d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient afin d'approvisionner durablement les régions avoisinantes (en particulier l'Europe) en électricité verte , le rapport finale a constaté que chaque km^2 de désert reçoit annuellement « une énergie solaire équivalent à 1,5 million de barils de pétrole ».

La surface totale des déserts de la région MENA en particulier l'Algérie fournirait plusieurs fois l'énergie utilisée actuellement dans le MENA-EUROPE [41].

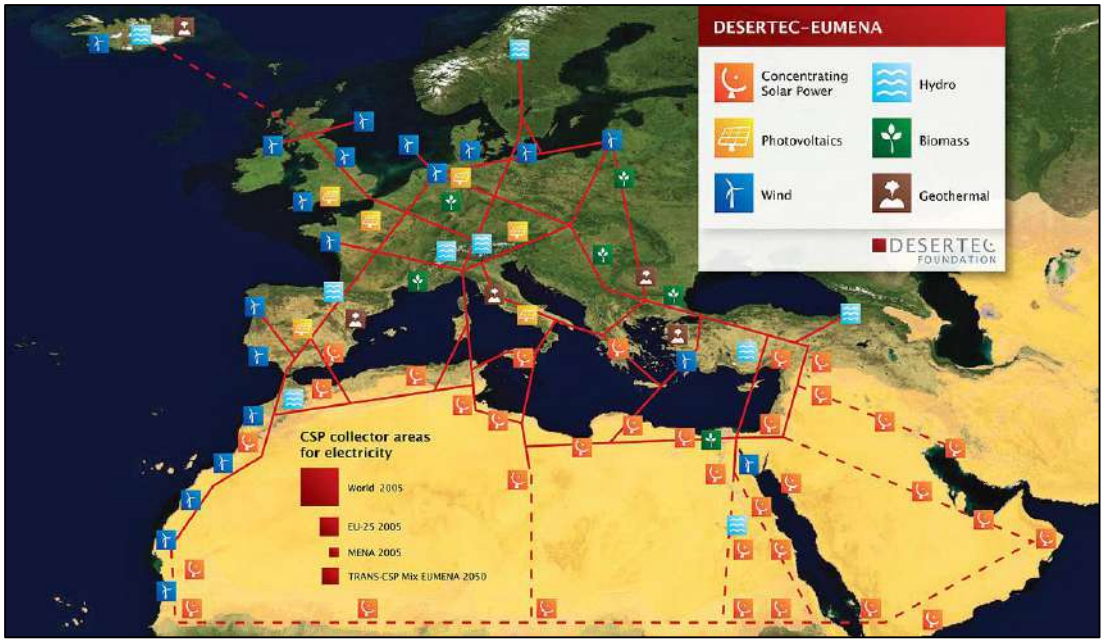


Figure 2-12 Cartographie sommaire permettant de visualiser la structure et les nœuds du réseau électrique du projet DESERTEC **(**wikipedia.org)

D'autre par L'ATLAS solaire algérien réalisé par Le centre de développement des énergie renouvelable (CDER), qui s'est basé sur des donné récolté par l'ONM (Office National de la Météorologie **)** sur 48 site repartit uniformément sur le territoire national relative à la durée de 10 ans (1992-2002) , Les données décrites précédemment ont été utilisées pour générer des cartes montrant la moyenne de l'irradiation globale reçu sur un plan horizontale et incliné a latitude de lieu cas d'un ciel totalement claire figure (2.13) et (2.14) ainsi la durée d'insolation mesuré figure 2.15 pour chaque partie de ce pays.

Le tableau suivant indique l'ensoleillement globale reçu sur un plan horizontal GH et l'ensoleillement globale reçu sur un plan incliné a latitude de lieu cas d'un ciel totalement clair pour quelque willaya de l'Algérie par rapport à sa situation géographique (altitude, longitude, latitude).

Tableau 2-5 Ensoleillement de quelque wilaya nationale [42].

Wilaya	Latitude	Longitude	SS_0(h)	SS(h)	GH (Wh/m²/an)	GH lat (Wh/m²/an)
Djelfa	34.33	3.38	11.76	8.46	5585	6872
Médéa	36.28	2.73	11.76	8.01	5196	6511
Biskra	35.82	5.33	11.77	9.32	5545	6871
Illizi (Djanet)	24.27	9.47	11.85	9.99	7108	7980
Adrar	27.80	-0.18	11.83	9.40	6020	6936
Tamanrasset	22.80	5.43	11.86	9.32	6872	7614
Alger	36.38	3.22	11.75	8.00	4876	6039
Annaba	36.83	7.80	11.75	7.87	4859	6025

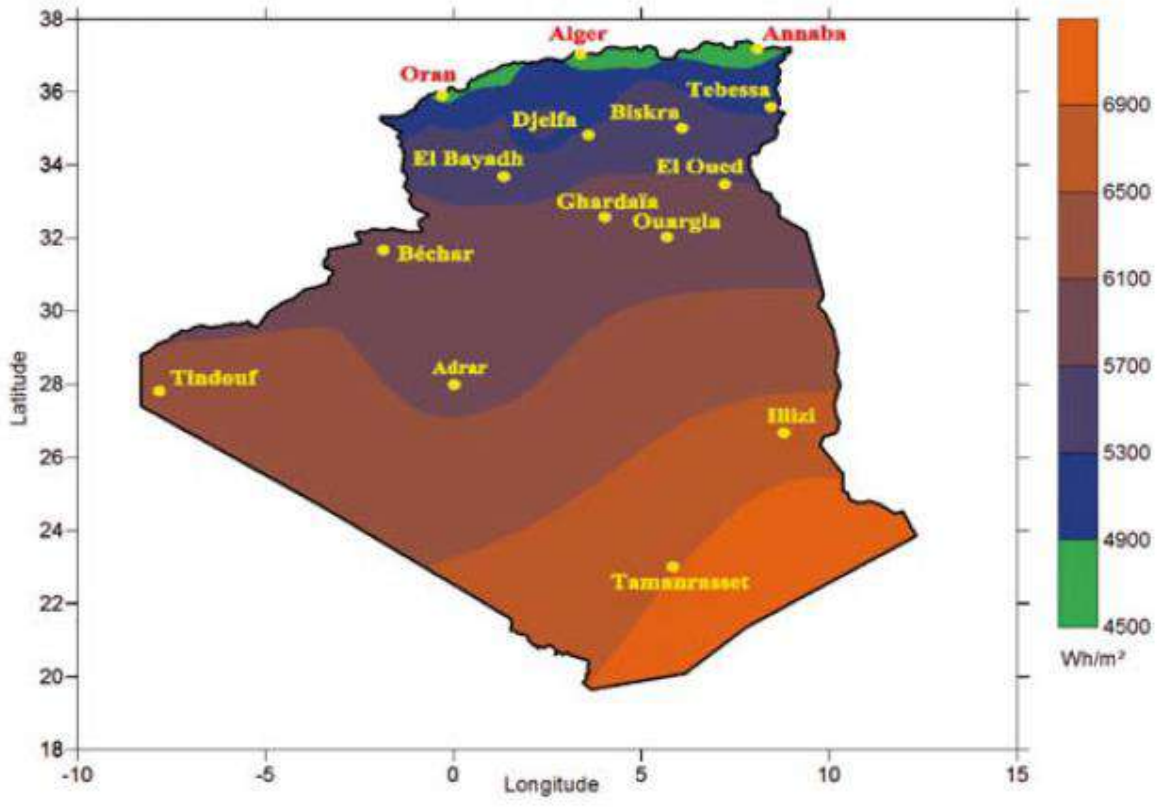


Figure 2-13 l'irradiation globale reçu sur un plan horizontal GH [42].

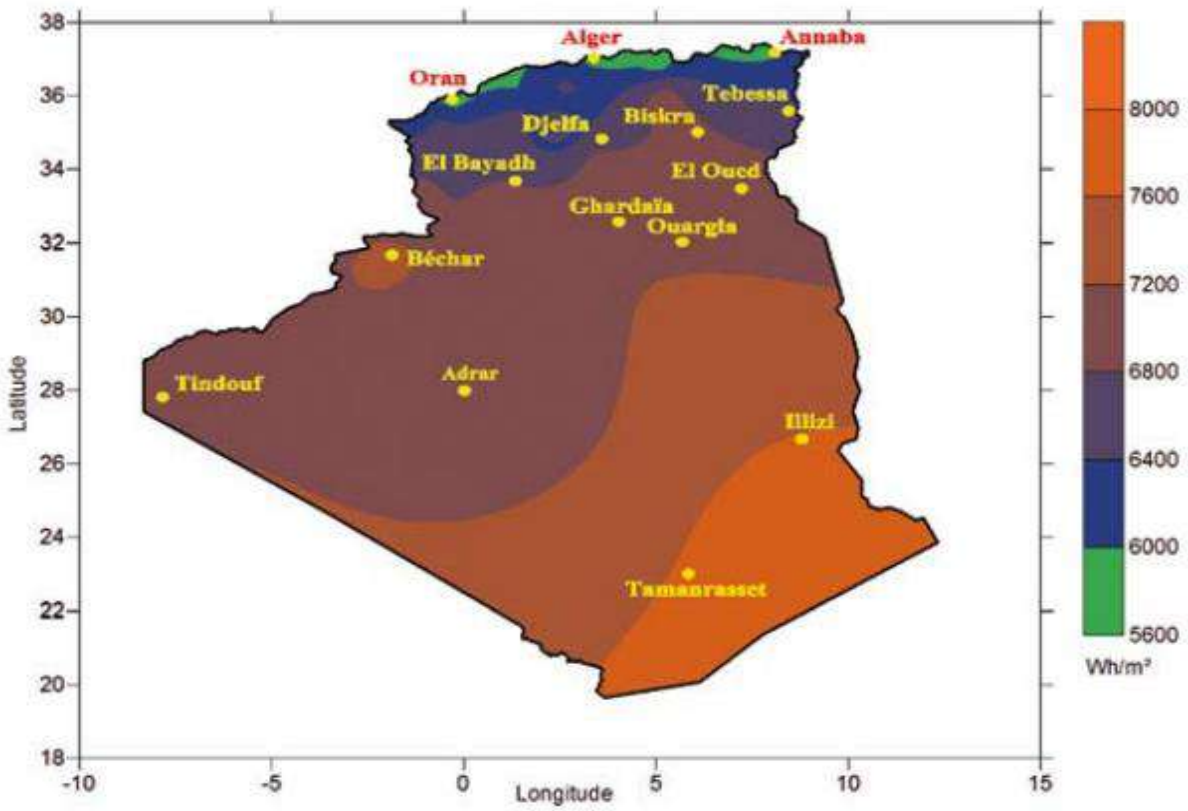


Figure 2-14 l'irradiation globale sur un plan incliné a latitude de lieu GH **lat** [42].

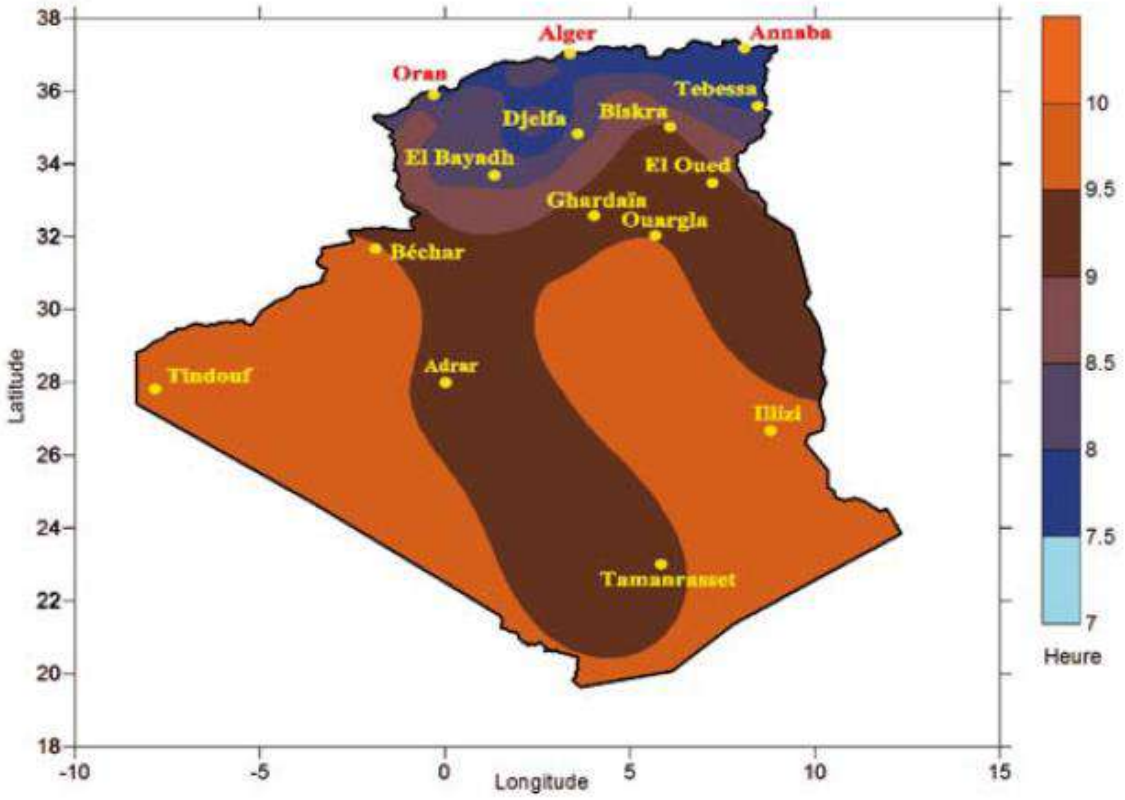


Figure 2-15 Durée d'insolation mesurée SS [42].

Selon les cartes ci-dessus nous pouvons diviser l'Algérie en trois régions solaire ; région côtière, haut plateau et saharienne.

Pour la région côtière (superficie de 4%) qui représente le plus faible potentiel avec une moyenne annuelle de l'irradiation globale reçu sur un plan horizontale GH supérieure à 4000 Wh/m^2/an ainsi pour l'irradiation globale reçu sur un plan incliné a latitude de lieu GH lat supérieure à 5000 Wh/m^2/an et une durée moyen mesurée de 8 heures par jour

Dans les haut plateaux (superficie de 10%) de l'irradiation globale reçue sur un plan horizontale GH et sur un plan incliné à latitude de lieu sont supérieur à 6500 Wh/m^2/an et une durée moyenne de 9 heures par jour.

La région saharienne avec une superficie de 86% de l'Algérie presque totalement non exploitée présente un potentiel solaire parmi le plus élevé dans le monde entier, l'irradiation globale reçu sur un plan horizontale GH supérieure à 6900 Wh/m^2/an ainsi pour l'irradiation sur un plan incliné à latitude de lieu GH lat supérieure à 7600 Wh/m^2/an et une durée moyen mesurée presque de 10 heures par jour

2.6 Développement des énergies renouvelables en Algérie

L'Algérie s'est engagée sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile à travers le lancement d'un programme ambitieux pour le développement des énergies renouvelables qui a été adopté par le Gouvernement en février 2011 et révisée en mai 2015.

L'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable. Le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent.

2.6.1 Programme national de développement des énergies renouvelables [43]

A travers ce programme d'énergies renouvelables, l'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir des filières photovoltaïque et éolienne en intégrant la biomasse, la cogénération, la géothermie et au-delà de 2021, le solaire thermique. Ces filières énergétiques seront les moteurs d'un développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de croissance économique.

Tableau 2-6 Programme national de développement des énergies renouvelables

37 % de la capacité installée d'ici 2030 et 27 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale, seront d'origine renouvelable. Le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, La stratégie de l'Algérie en la matière vise à développer une véritable industrie des énergies renouvelables associée à un programme de

Unité : MW	**1er phase 2015-2020**	**2eme phase 2021-2030**	**Total**
Photovoltaïque	3000	10575	13575
Eolien	1010	4000	5010
CSP	-	2000	2000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1000
Géothermie	05	10	15
Total	4525	17475	22000

formation et de capitalisation des connaissances, qui permettra à terme, d'employer le génie local algérien, notamment en matière d'engineering et de management de projets.

2.7 Etat de l'art [44]

Dans le cadre du 1er programme (projet pilote : raccordement au réseau électrique) , l'Algérie a déjà mis en service en 2010 , a Hassi R'mel une centrale à cycle combiné à d'énergie solaire thermique et du gaz naturel , d'une capacité de 150 MW , dont 25MW en solaire thermique par la suite une ferme éolienne de 10.2 MW , située dans la localité de Kebertane à été mise en exploitation en 2014 , parallèlement , une mini centrale solaire expérimentale pédagogique de 1.1MW a été inaugurée à Ghardaïa .

Depuis la fin 2010 et jusqu'à 2016, dix-neuf (19) centrales PV sont déjà mises en service et injectent sur les réseaux 30KV et 60KV, totalisant une puissance installée de 268MWc. La première centrale mise en service est celle de Djanet, le 19 février 2015, d'une puissance de 03MWc. Cinq (05) centrales totalisant une puissance de 48MWc ont été raccordées au réseau durant l'année 2015, à savoir Djanet, Adrar, Kabertène, Tindouf et Tamanrasset. L'année 2016 a été marquée par le raccordement de quatorze (14) centrales totalisant une puissance de 220MWc, lesquelles : Timimoune, Aoulef, Reggane, In Salah, Zouyet Kounta, El Bayodh, Naâma, Sidi Belabes, Saida, Ouargla, M'sila, Souk Ahras, Laghouat et Djalfa .

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une idée de base sur le réseau algérien aussi bien que le réseau transport dans sa structure, gamme de tension ainsi que les protections utilisé pour sauvegarder et maintenir la stabilité et la qualité d'énergie de ce réseau. Par ailleurs, les énergies renouvelables (production décentralisé) qui bénéficient d'un accès Intéressant mais avec des impacts dans son intégration qui nécessite des prospections spécifiques et fiables que nous avons détaillées dans ce chapitre.

Nous avons présenté aussi le fort potentiel algérien en énergie solaire photovoltaïque et le programme nationale développé pour les énergies renouvelables.

Chapitre 3

ANALYSE DES PERFORMANCES ET PRECONISATION

3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons étudié quels pouvaient être les impacts et l'intérêt de l'intégration d'unités photovoltaïques sur le réseau électrique de transport. Nous avons ensuite centré nos travaux sur le côté expérimentale avec un objectif bien spécifique qui concernait la rentabilité de systèmes photovoltaïques. Ce dernier chapitre porte sur l'étude et l'analyse des performances d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique sur le site de Ain El Bel.

L'intérêt de cette étude est de fournir des informations précises sur les performances du Système PV connecté au réseau électrique Algérien de transport, ce système PV installer en 2016. A partir de notre présence sur site, et des données mesurées et des caractéristiques du système, nous allons évaluer le choix du site, les conditions climatiques, le rendement du champ photovoltaïque, ainsi que le rendement global [6][45].

Nous pencherons également sur les réserves générales trouvées sur le système ainsi que son intégration et nous nous attacherons à donner des recommandations concernant l'optimisation des performances de celui-ci ainsi que l'intégration des centrale PV en Algérie

3.2 Description de la société SKTM [44]

Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida, SKTM.spa, est une société de production d'électricité, dont le capital est souscrit entièrement par la holding Sonelgaz. Créée le 07 avril 2013, par scission de la société SPE. Spa, son siège social est basé à Ghardaïa.

La société est née dans un contexte de prise de conscience généralisée des incertitudes énergétiques et de la nécessité de lutter contre le réchauffement climatique, un recours massif à l'énergie solaire sous toutes ses formes, directes (photovoltaïque, thermique) ou indirectes (éolien, biomasse) doit s'imposer comme une priorité, une évidence.

En plus des enjeux liés au réchauffement climatique, l'épuisement des ressources énergétiques traditionnelles, le pétrole, le gaz naturel entre autres, le recours aux énergies propres, n'est plus une question de choix mais beaucoup plus une question de devenir des nations. D'autant plus que l'Algérie jouie d'un potentiel solaire des plus importants de par le monde, et d'un potentiel éolien également non négligeable, ajoutés à l'étendue de son territoire, lui permettant d'implanter les ouvrages de production d'électricité par les procédés renouvelables sans encombre.

SKTM a été créée pour répondre à des enjeux stratégiques de l'heure. Il s'agit :

- Concrétiser l'ambitieux programme national de développement des Energies Renouvelables, en mettant en valeur les potentialités énormes dont dispose notre pays, notamment l'étendue de son territoire et la durée d'ensoleillement.

- Des spécificités qui caractérisent la gestion du parc de production Diesel des RIS (Réseaux Isolés du Sud).
- De satisfaire aux meilleures conditions de continuité et de qualité de service fourni aux populations des régions du sud du pays.

3.2.1 Chiffres Clés 31 Décembre 2016 [44]

- Nombre de centrales classiques : 26 ;
- Nombre de centrales Photovoltaïques : 19 ;
- Nombre de centrales éoliennes : 01 ;
- Puissance installée : 278,3 MW (dont 268,10 MWc en photovoltaïque et 10,2 MW en éolien) ;
- Energie produite : 224,01 GWh (dont 204,70 GWh par les centrales photovoltaïques et 19,35 GWh par la centrale éolienne) ;
- Indisponibilité Hors Entretien Programmé (HEP) : 10,19% ;
- Indisponibilité pour Entretien Programmé (EP) : 1,64% ;
- Chiffre d'Affaire : 14 512 635 KDA ;
- Effectif : 1 374 agents.

3.3 Description de la central de Djelfa - Ain el bel

Notre centrale entre en service le 09 avril 2016 avec 20MWc raccordé au niveau du réseau HTA (30 KV), le 04 juin 2017 s'est raccordé au réseau HTB (60KV) avec la totalité de puissance (53MWc), la centrale entre dans le cadre du projet des 343MWc, qui constitue un extrait de la première phase de déploiement du programme national des énergies renouvelables, qui constitue un cas d'école, non seulement pour la société SKTM, mais également à l'ensemble des intervenants dans le processus, gestionnaire du réseau de transport, les sociétés de distribution, l'opérateur du système électrique, les autorités locale…etc., pour ne citer que ceux-là. Et qui commencent à appréhender les problématiques liées aux énergies renouvelables.



Figure 3-1 vue générale de la centrale Ain El Bel

Dans le cadre technique, ce projet (projet 343MWc) constitue un projet pilote avec des centrales repartie sur le territoire national selon un plan bien étudié avec divers types des EnR (Photovoltaïque, solaire thermique et éolienne) et différentes possibilités de raccordements au réseau (isolé, Transport 60Kv et distribution 30Kv) pour après constater réellement le potentiel énergétique de chaque région selon le type des énergies renouvelables adéquat et ainsi étudier les performances techniques et économiques.

Le projet contient 23 centrales photovoltaïques [44]

- **Les lots hauts plateaux** est (Batna, Souk Ahras, Setif, Bourdj Bouararidj et Mila), centre (M'sila, Djalfa, Laghouat et Ouargla),et le lot hauts plateaux ouest (Sidi Belabes, Saida, Nâama et El Bayodh ;
- **Le pôle sud** In Salah-Adrar-Timimoun (Adrar, Kabertène, Aoulef, Reggane, Zaouyet Kounta, In Salah et Timimoun) ;
- **Le pôle sud RIS** (Réseaux Isolés du Sud) implantées à Tindouf, Djanet et Tamanrasset.

3.3.1 Localisation géographique

Tableau 3-1 La centrale se situe dans la commune de Ain El bel 33 Km au sud de wilaya de Djelfa.

Informations géographique concernant la centrale de Ain El bel.	
Coordonnées géographiques	Latitude: 34.343630, Longitude: 3.166571 34° 21′ 17″ Nord, 3° 13′ 22″ Est
Superficie	125.66 hectares 1.26 km²
Altitude	1 036 m
Climat	Climat semi-aride sec et froid (Classification de Köppen: BSk)
L'ensoleillement globale reçu sur un plan horizontal GH	5585 (Wh/m^2/an)
L'ensoleillement globale reçu sur un plan incliné a latitude de lieu GH lat	6872 (Wh/m^2/an)



Figure 3-2 Superficie de la centrale Ain El Bel par (Google Earth)

En plus des raisons mentionnées précédemment dans le cadre du plan général de développement des énergies renouvelables, qui recommande la répartition des projets dans différentes zones nationales, le tableau précédent ajoute de nouvelles informations concernant les critères de choix de ce terrain.

Le site est caractérisé par des zones semi-désertiques qui sont presque impossibles à cultiver avec une altitude de 1036 m, ce qui le distingue par une atmosphère fraîche en général, de plus il se caractérise aussi par un rayonnement solaire et une durée moyenne journalière parmi le plus favorable en Algérie. La centrale et se situe aussi à environ 3.5 Km d'un poste électrique 60/30Kv interconnecté avec Djelfa d'une coté et Laghouat de l'autre côté.

3.3.2 Présentation du système

Une centrale PV est composée par différent ouvrage, installés pour assurer une conversation fiable et sure de l'énergie solaire vers l'énergie électrique. Le schéma unifilaire général d'une centrale PV est représenté par la figure 3.3.

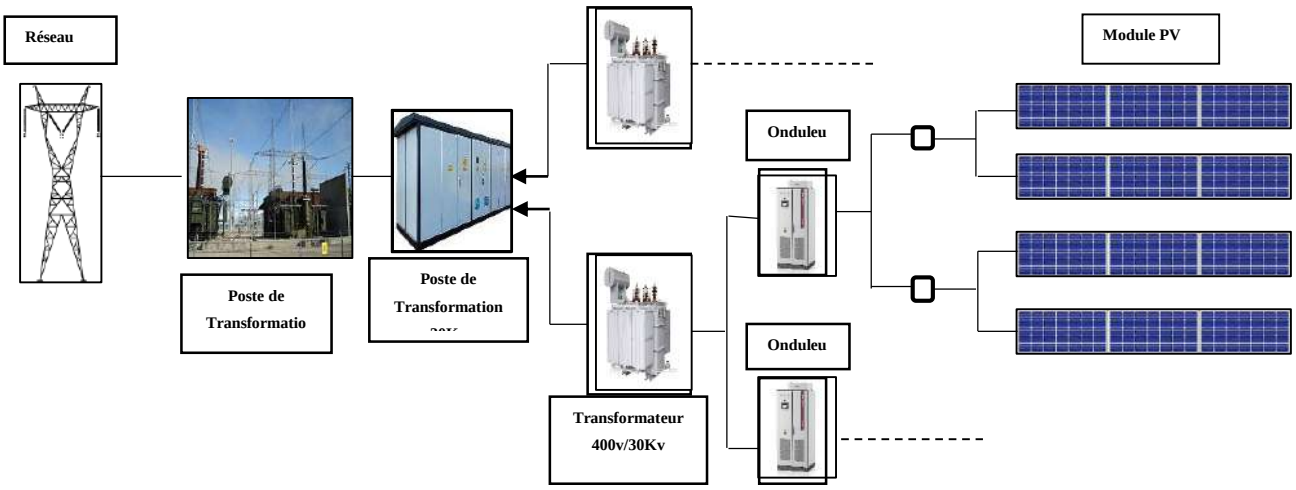


Figure 3-3 Schéma unifilaire générale d'une centrale PV

La centrale PV de Ain el bel raccordée au réseau de transport 60Kv. A une puissance de crête de 53 MWc, la centrale est devisée en trois sous centrale, deux avec 20 MWc et la troisième avec 13 MWc, chacune est composée de sous-champs standardisés de 1MWc.

-Le sous champ de 1MW comporte :

- 4004 panneaux devisé en strings chaque 22 panneaux son relier en série ;
- Un poste de conversion avec deux onduleurs de 500Kw chacun ;
- Un transformateur (30Kv).

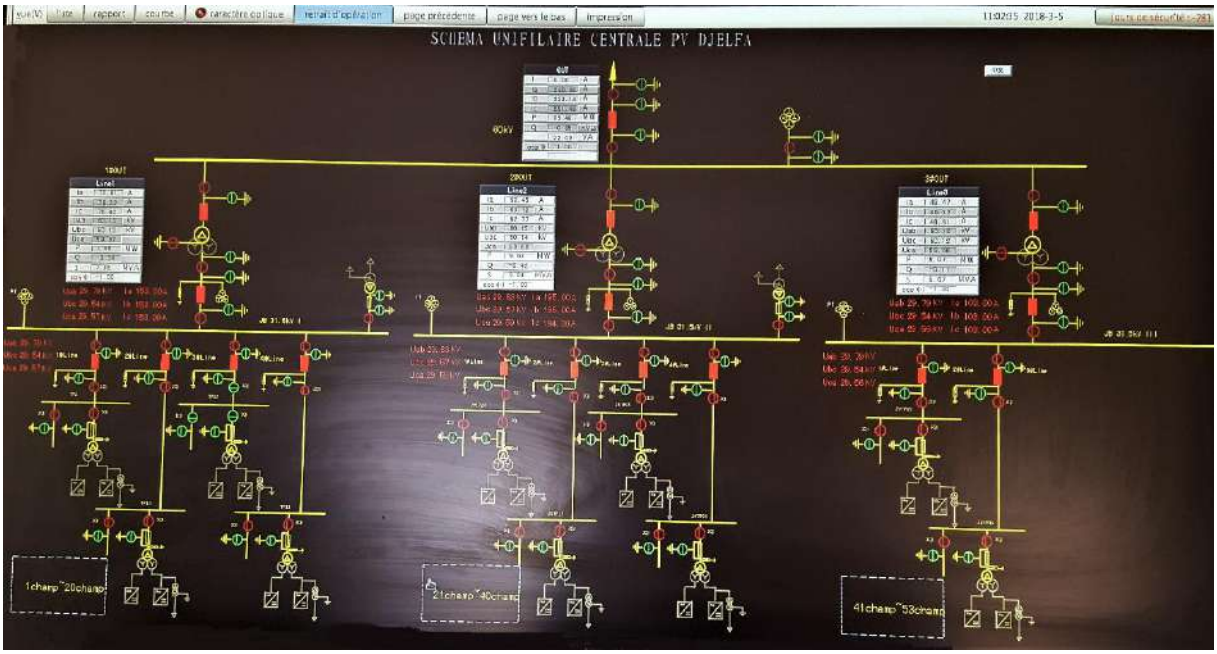


Figure 3-4 Schéma unifilaire de la centrale An El Bel

Un avant-poste d'évacuation constitué des principaux équipements suivants :

- 3 transformateur 60KV/30KV, 2x20MVA et 16MVA ;
- Disjoncteurs d'arrivé ;
- Sectionneurs de barres et d'isolement ;
- Des Transformateurs de courant et de tension ;
- Jeu de barres.

La centrale est équipée aussi d'une station météorologique qui comporte :

- Pyranomètre : mesure le rayonnement reçu sur une surface horizontale ;
- Héliographe : mesure le rayonnement solaire direct et la durée d'ensoleillement ;
- Baromètre : mesure la pression atmosphérique ;
- Anémomètre : mesure la vitesse du vent ainsi que sa direction ;
- Pluviomètre : mesure la quantité de précipitations ;
- Hygromètre : mesure l'humidité ;
- 5 éléments : mesure la pression atmosphérique, l'humidité, la vitesse et la direction du vent, la température.

3.3.3 Caractéristiques du panneau solaire (YENGLI SOLAIRE)

Tableau 3-1 Caractéristiques du panneau solaire

Référence du module	YL255P-29b	
Puissance maximale (W)	Pmax	255
Tolérance de puissance (W)	ΔPmax	0 / + 5
Rendement du module (%)	η	15.7
Tension à Pmax (V)	Vmpp	30.0
Courant à Pmax (A)	Ampp	8.49
Tension circuit ouvert (V)	Voc	37.7
Courant de court-circuit (A)	Isc	9.01

3.3.4 Caractéristiques de l'onduleur (SUNGROW)

Chaque poste de conversion comprend deux onduleurs (SUNGROW, type SG500MX), ayant les caractéristiques suivantes :

- Puissance apparente nominal : 550 KVA ;
- Puissance active nominale : 500 KW ;
- Tension AC nominale : 315 V ;
- Plage de tension MPP nominale : 460-850 V ;
- THD-I : < 3 % ;
- Plage de tension AC : 252-362 V ;
- Plage de la fréquence : 47-52 Hz ;
- Facteur de puissance : > 0.99/0.8 arrière-0.8 avant ;
- Rendement : 98.7 % ;
- L'onduleur s'adapte aux conditions environnementales difficiles une plage large de la température de -40°C à 55° C pour un fonctionnement continu à pleine charge ;
- L'onduleur dispose d'une large marge de tension MPPT (500V-850V), peut être atteint en fonctionnement pleine charge, la tension maximale d'entrée côté DC est limitée à 1000V ;
- Avec le contrôleur de la puissance active (0-100%) le mode de réglage du facteur de puissance, repend pleinement aux besoins de la planification du réseau.

3.3.5 Caractéristiques des transformateurs

Caractéristiques	**Transformateur 30 KV SUNTEN**	**Transformateur 60 KV TEBA**
Type	A sec SCLB-1250/31.5/2x0.315 (2014)	A l'huile –SPZ 20000/60 (2015)
Capacité nominale	1250 KVA	20000 KVA
Tension nominale Coté primaire : coté secondaire :	 31.5 (KV) 315/315 (V)	 60(KV) ± 8x1.25 % ; 31.5(KV)
Courant nominale Coté primaire : coté secondaire :	 22.9(A) 1146/1146 (A)	 293.26(A) 139.96 ;171.07 (A)
Niveau d'isolation	borne de ligne HT LI/AC 170/70KV ; BT LI/AC 20/10KV	borne de ligne Hv LI/AC 325/140KV ; Iv LI/AC 170/70KV
Fréquence	50Hz	50Hz
Repère du groupe d'accouplement	Dy11y11	YNd11
Mode de refroidissement	AN/AF	ONAF
Indice de protection	IP00	/
Régleur en charge	/	17 prise

La centrale comporte aussi un bâtiment avec un poste de transformation HTA (30Kv), un bâtiment des annexes qui contient des appareils de protection et de télécommunication de dernière génération et un poste de contrôle et commande doter d'un système monitoring sophistiqué. Elle est presque 100% en énergie solaire avec l'éclairage interne qui est presque autonome, chaque poteau comporte deux panneau solaire de puissance adéquate qui charge deux batterie alimentant la lampe à LED durant la nuit et un chauffe-eau solaire thermique pour les utilisations quotidiennes.

3.3.6 Système monitoring

La station de surveillance météorologique commune située à l'intérieur de la centrale enregistre la vitesse du vent, la température ambiante et les données sur le rayonnement solaire est la transmit au serveur dédié avec le principe du contrôle de supervision et de l'acquisition de données (NARI) pour l'évaluation des données surveillées est également présent. Le serveur enregistre les données de tension, courant, facteur de puissance, puissance de sortie des onduleurs pour chaque minute. Il enregistre également les données météorologiques automatiquement. Le serveur collecte les données des capteurs de mesure et du côté sortant des onduleurs via le bus. Il transfère les fichiers de données périodiquement et le serveur récupère les données. Serveur avec le logiciel NARI est situé dans une salle de contrôle. Poste vis avis

3.3.7 Poste vis-à-vis

La centrale est raccordée au réseau nationale du nord à travers le poste 60/30KV de Ain El Bel via une ligne courte de 3 Km protéger par une protection distance (normalement protection différentiel)

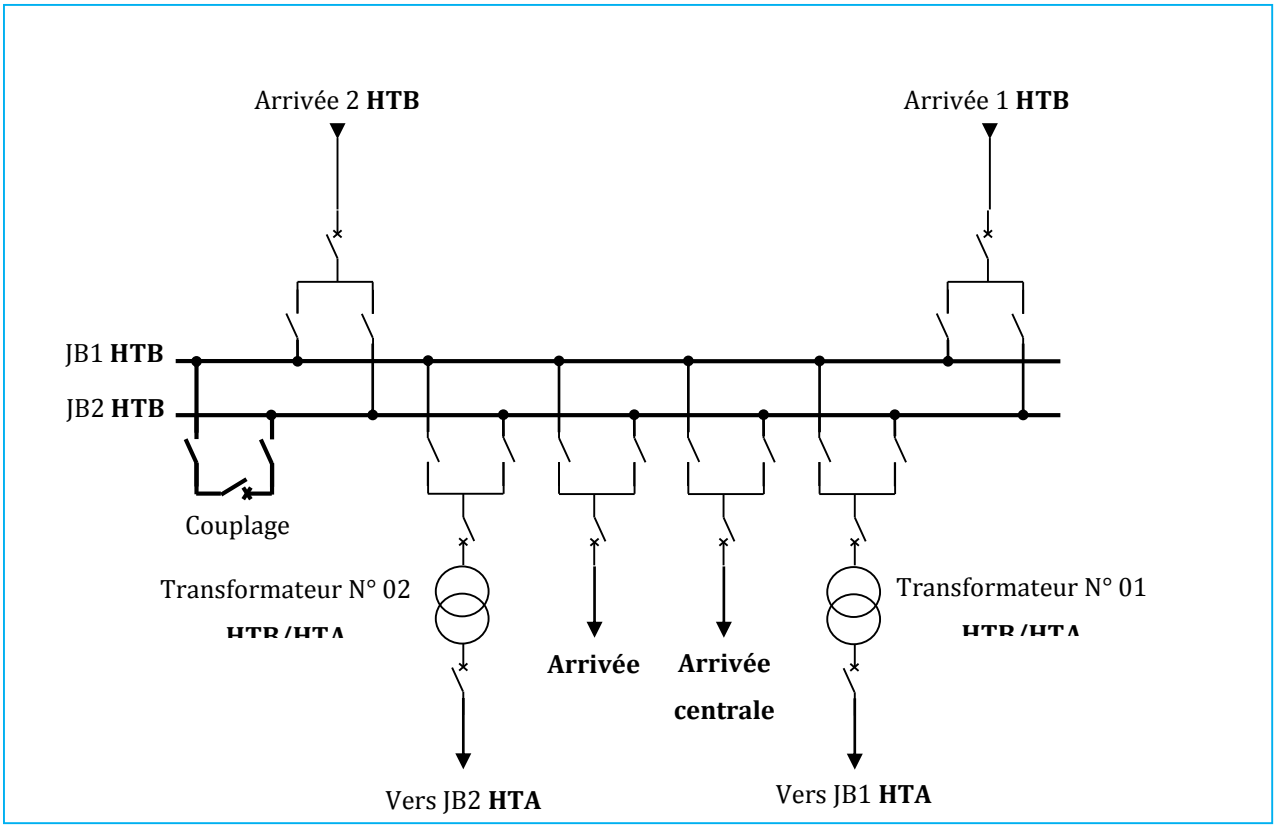


Figure 3-5 Schéma unifilaire du poste 60/30Kv de Ain El Bel

Le poste contient 5 travée plus la travée de la centrale, dont deux travée transformateur d'une capacité 40MVA chacun, qui alimentant un poste 30Kv avec 8 départ destiner pour alimenter la ville de Ain el Bel et ces enivrants, l'expérience à prouver que la centrale satisfait généralement le besoin du poste et de temps en temps transmit le surplus pour un notre région.

3.4 L'étude de performances

Les paramètres étudiés sont les suivants :

- Les conditions climatiques du site (température et l'éclairement)
- L'impact des conditions climatiques sur la production électrique
- La puissance et L'énergie électrique produite par le champ PV (MW).
- Etude de performances du système PV sur la période.

3.4.1 Les conditions climatiques

Les conditions climatiques font que Djelfa bénéficie d'un climat sec et aride, caractérisé par un ensoleillement exceptionnel, vu sa localisation géographique et son éloignement de la côte méditerranéenne. Le plus souvent, Djelfa (cite de Ain El bel) a un taux d'insolation très important (75% en moyenne) et la moyenne annuelle de l'irradiation globale mesurée sur un plan horizontal dépasse les 6500 Wh/m^2. Sa couverture solaire est de plus de 3000 heures/an, ce qui favorise l'utilisation de l'énergie solaire dans divers domaines tels que : la bioclimatique, la production d'eau chaude sanitaire, le séchage agroalimentaire, et bien sûr la production d'électricité, de ce fait les conditions météorologiques réel qui variaient généralement de jour en jour et encore davantage en fonction des saisons jouent un rôle primordial pour cette production.

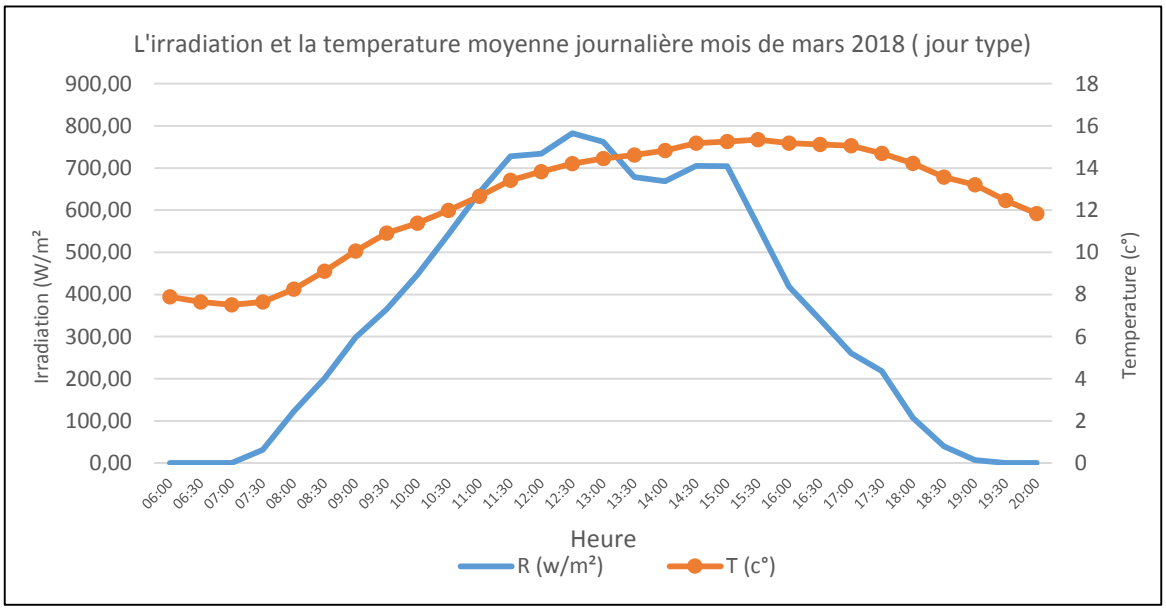


Figure 3-6 L'irradiation moyenne journalière mois de mars (jour type)

Ces irradiations Figure (3.6) ont étés calculés par la moyenne des irradiations solaire reçus de chaque heure pendant le mois de mars 2018, On constate tout d'abord que le mois de mars se distinguer par un lever de soleil à 07h16 qui correspond à un ensoleillement très faible d'une moyenne de 31.75 w/m² et ensuite il augmente au fur à mesure du temps pour arriver à la plage forte de 11h00 à 16h00 avec un ensoleillement qui dépasse 600w/m² et un point maximal qui dépasse généralement 750 w/m², Enfin, on peut voir que le graphe des irradiation suit une tendance décroissante jusqu'à le coucher de soleil à 19h00.

Pour la température Figure (3.6) en remarque qu'elle suit la même logique mais avec une baisse pendant la nuit et au Matin, inférieur à 8°C, Puis et d'après le graphe on voit un net redressement au cours de la journée, et une hausse température qui varie entre 10-16 °C presque dans la même plage de temps mais qui reste tans mieux inferieur a la température standardisée de 25°C, Enfin on remarque un affaiblissement léger à la fin de journée.

Pour tout le mois de mars (le mois de notre étude), on peut observer du graphe (Figure 3.8) que d'irradiation maximale atteinte dans une journée ont des valeurs entre 400 et 1100 (Wh/m2), avec une moyenne qui dépasse les 400 w/m² dans l'ensemble, enfin en analysant dans le détail du graphique on se rend compte que les valeurs de la courbe minimale sont très faible entre 30-100w/m² a couse des heures du cocher et lever du soleil, l'ensoleillements a été affectés généralement par plusieurs condition comme les nuages les et les orages et surtout par les tempêtes de sable.

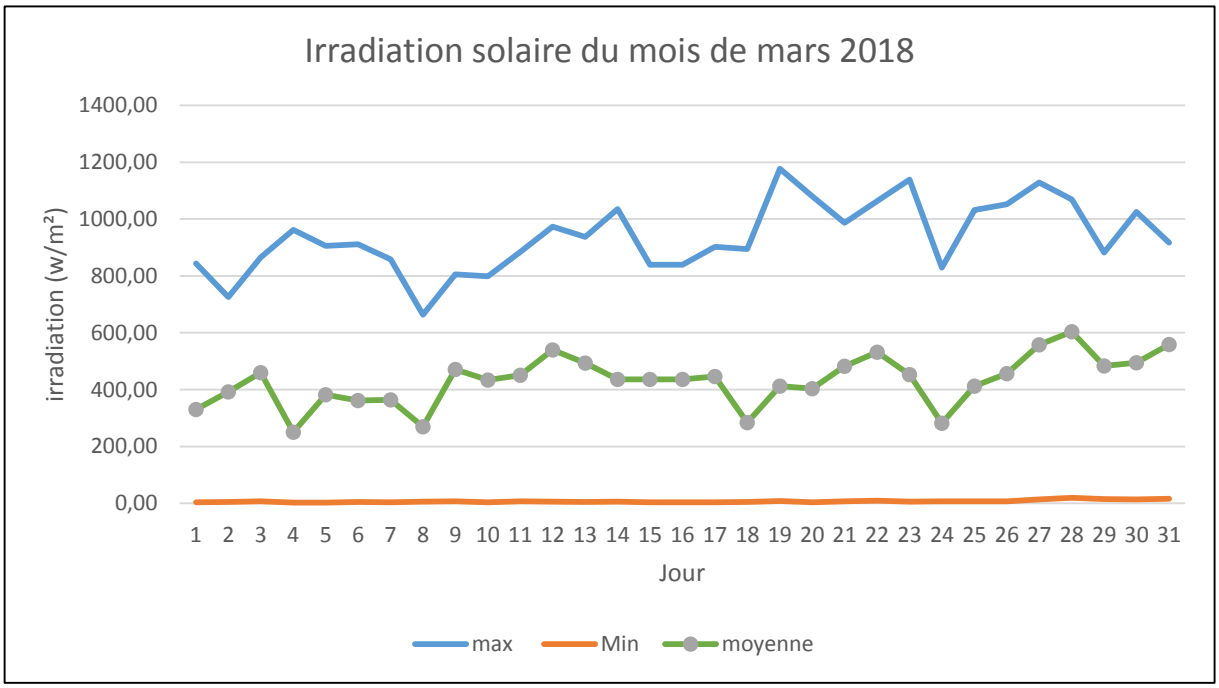


Figure 3-7 Irradiation solaire du mois de mars 2018

Par contre, la température (figure 3.8) de ce mois à subi des variation complexe à cause des vagues froides, on remarque que la température été saisonnière dans son globale (générale moyenne est entre 12 à 20°C), sauf pour la période de 20 au 26 du mois qui a connu une diminution tangible et qui a touché 0 °C .

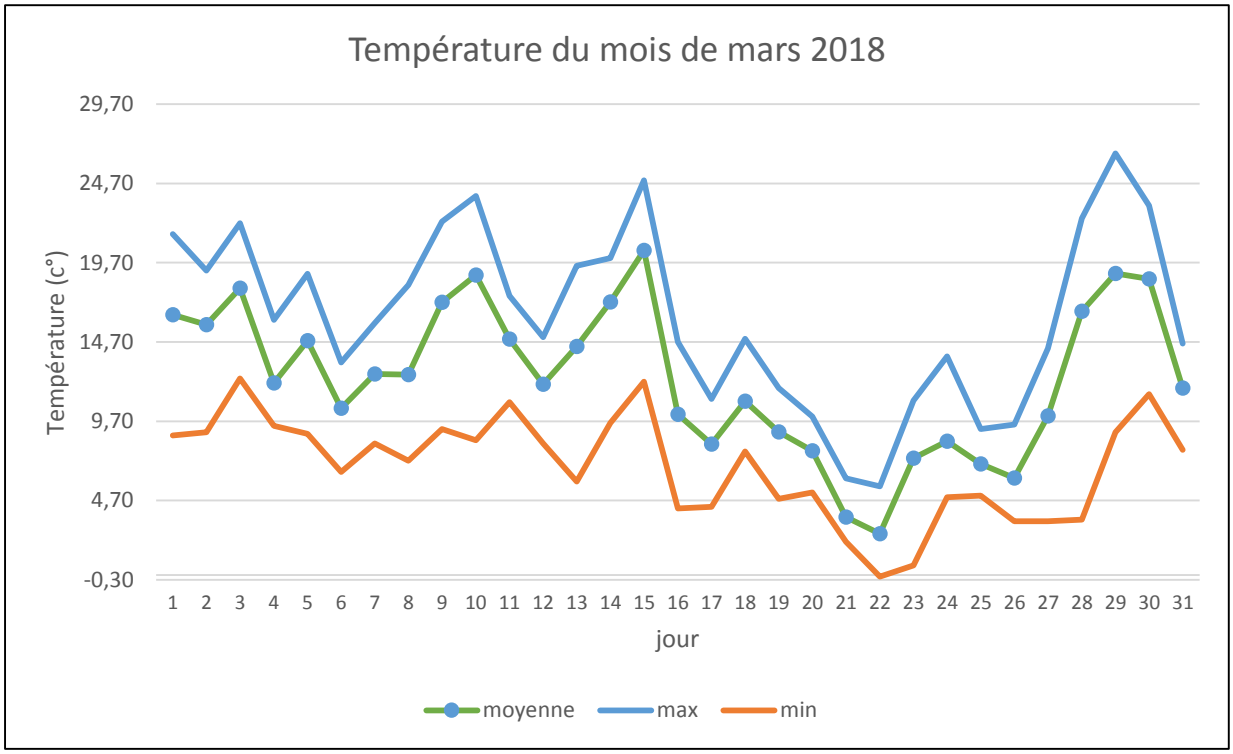


Figure 3-8 Température du mois de mars 2018

En conclusion nous pouvons affirmer les chiffres cités à paravent décrivant notre site, avec un fort ensoleillement et une température idéal toute au long de ce mois. Mais ces conditions varient d'une façon rapide et aléatoire d'heure en heure, jour en jour et encore davantage en fonction des saisons.

Sans prétendre être exhaustifs, Les figures 3.9 et 3.10 (a,b) nous montre cette variation selon la journée ainsi par rapport au saison à travers l'exemple d'une journée par saison

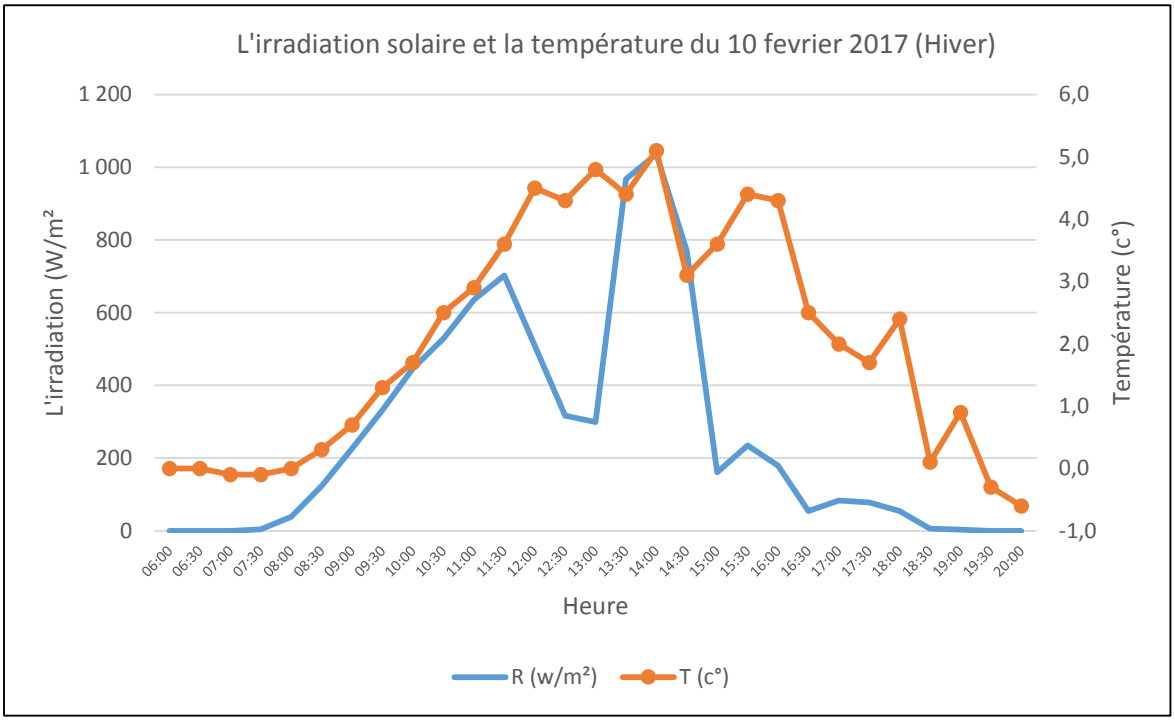


Figure 3-9 a) L'irradiation solaire pendant l'hiver

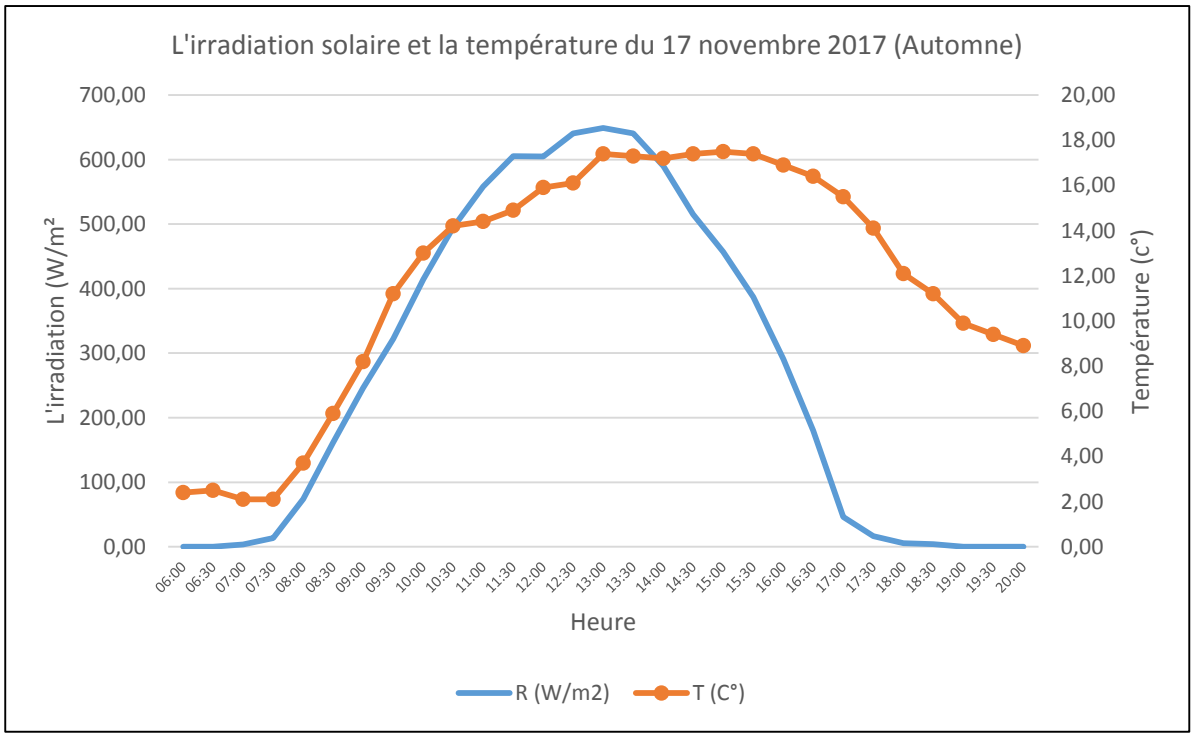


Figure 3-9 b) L'irradiation solaire pendant l'automne

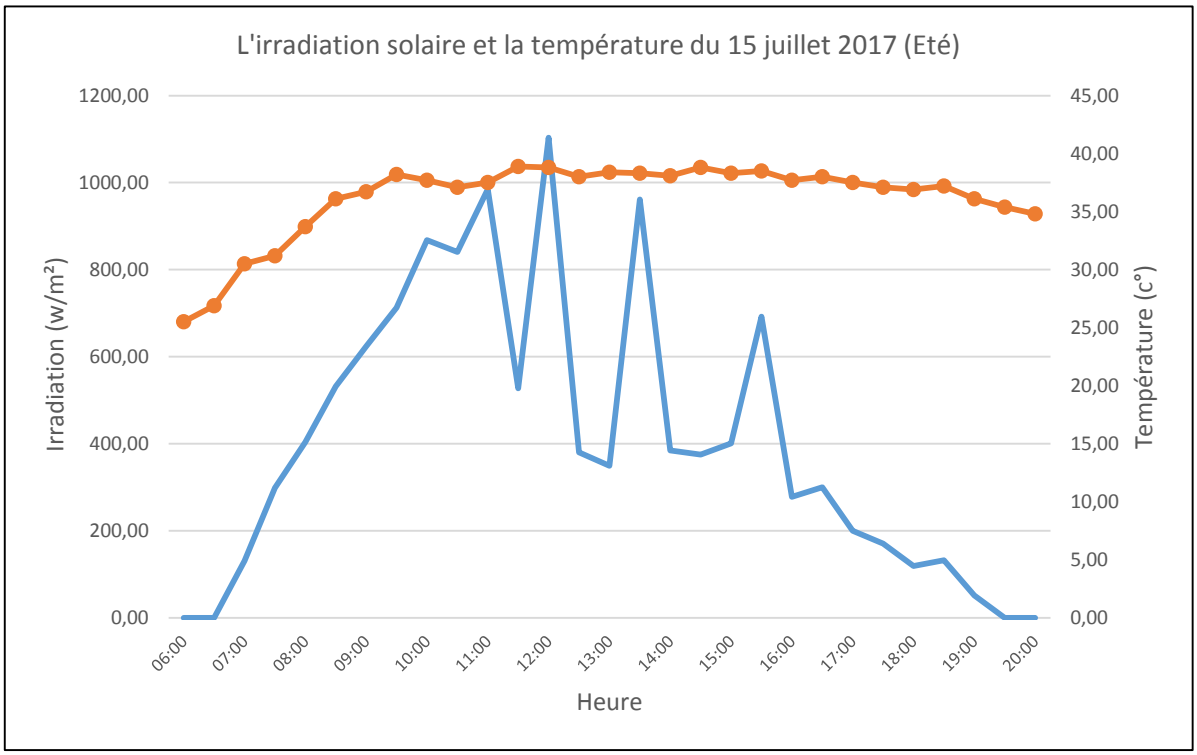


Figure 3-10 a) L'irradiation solaire et la température ambiante pendant l'Eté

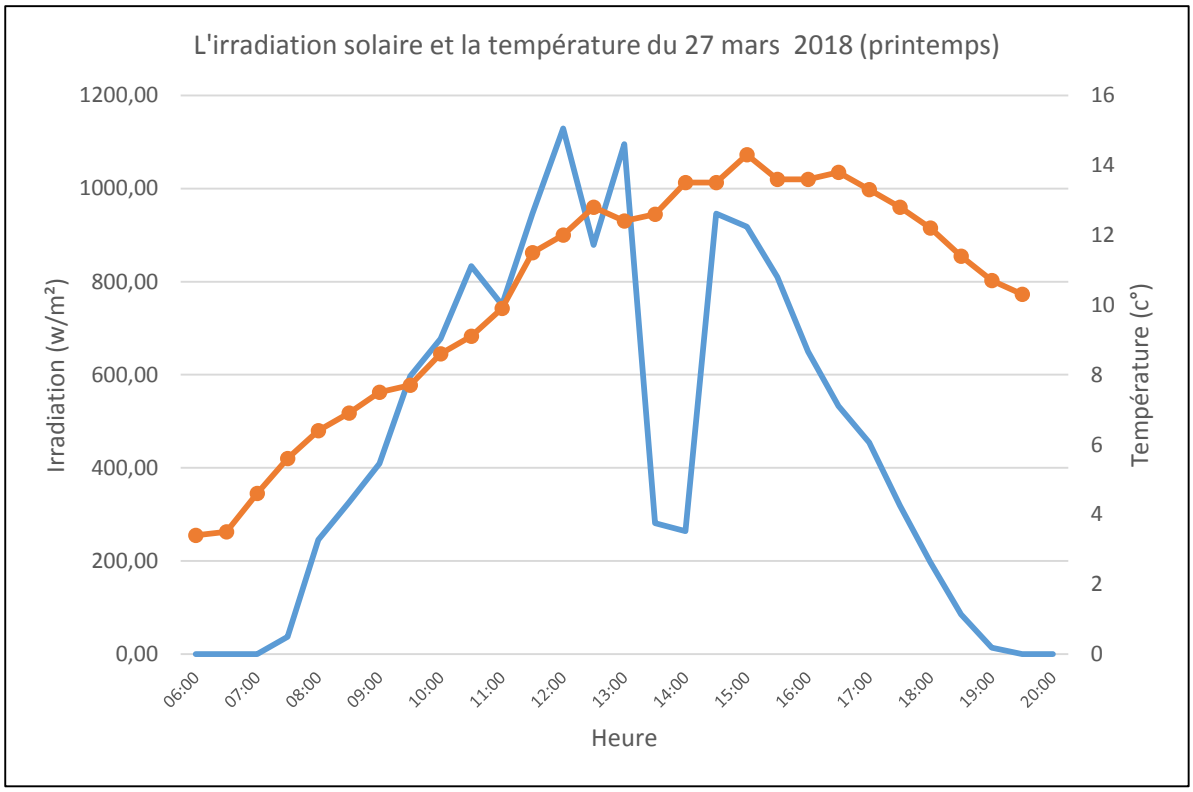


Figure 3.10. b) L'irradiation solaire pendant le Printemps

L’hiver (Figure 3.9.a) qui commence le 1er décembre et s'achèvera à la fin du mois de février, correspond à la période la plus froide de l'année dans le côté Nord du pays. En moyenne la température normale de la saison est de 5,4 °C. par ailleurs il se caractérise en générale par la plus faible insolation (n’affranche pas 600w/m²) à cause des nuages et des intempéries et des journées courtes, par contre février 2017 la journée du 10 /02/2017 nous a délivré la puissance maximale la plus atteinte depuis la mise en service de la centrale 58MW a 14 :00 qui a coïncidé une insolation de 1036w/m² et une température de 5 °C.

L’automne (Figure 3.9.b) débute le 22 septembre, jour de l'équinoxe et il s'achèvera le 30 novembre. Est en général une saison de contrastes : les journées froides et parfois humides, de plus en plus nombreuses, alternent avec des journées encore douces, parfois orageuses, donc température très variable a pas de l’heure ou jour avec une température moyenne de 15,5 °C.et un ensoleillement qui ne dépasse pas 700 w/m².

L’été (Figure 3.10.a) se distingue par sa température très élevé au elle dépasse le 25°C largement pendant presque toute la saison La chose qui affecte la production photovoltaïque malgré le bon ensoleillement reçu, varie entre 1000 et 1200 w/m².

La température au printemps (Figure 3.10.b) du 1er mars au 31 mai varie généralement entre 4 et 16 °C et une température moyenne de 13,6, on remarque que la durée du jour se rallonge et l'ensoleillement progresse et dépasse 800w/m.

3.4.2 La production électrique de la centrale et les conditions climatiques

Il est bien connu que la puissance électrique générée par un module photovoltaïque peut être fortement diminuée par rapport aux conditions optimales de production (point maximum de puissance) pour des conditions météorologiques données,

Les graphes ci-dessous nous montrent l’influence réelle des conditions climatiques sur la production (puissance, énergie) de la centrale d’Ain El Bel.

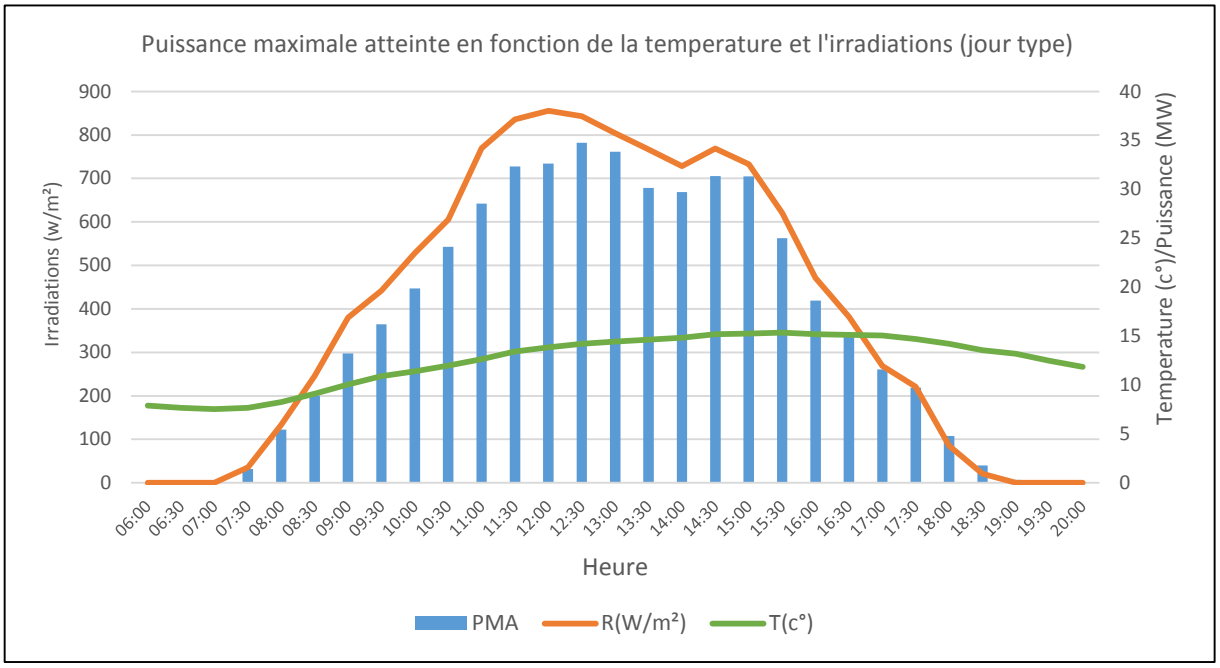


Figure 3-11 Puissance maximale atteinte par rapport à la température et l'éclairement pour un jour type

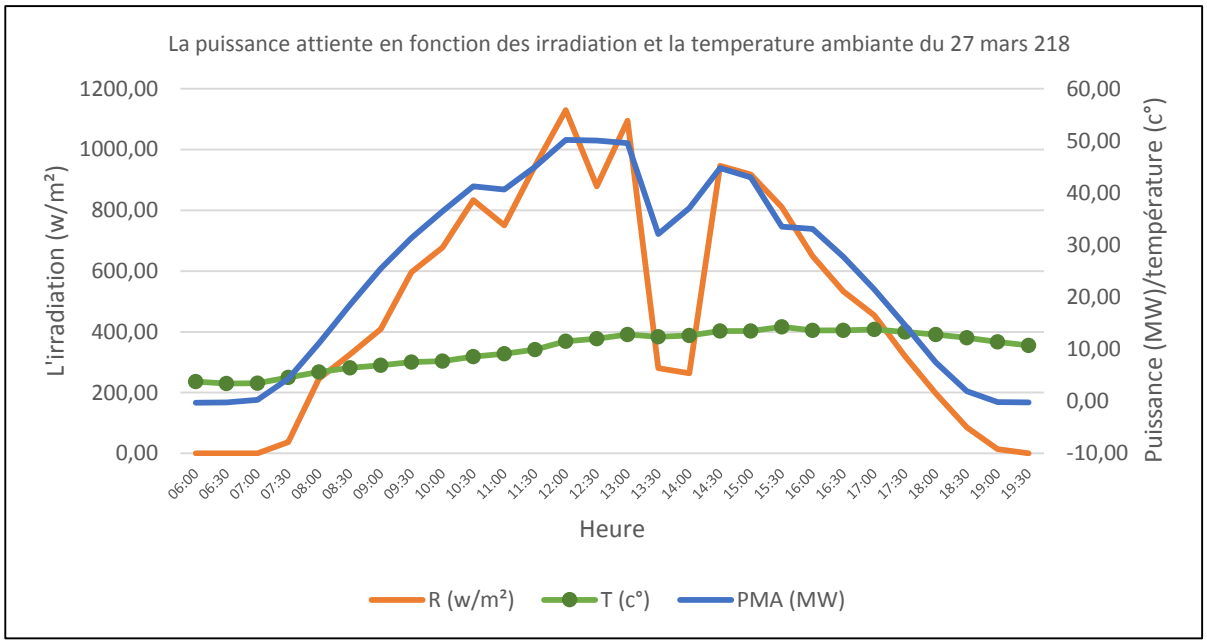


Figure 3-12 Puissance maximale atteinte par rapport à la température et l'éclairement pour le 27 mars 2018

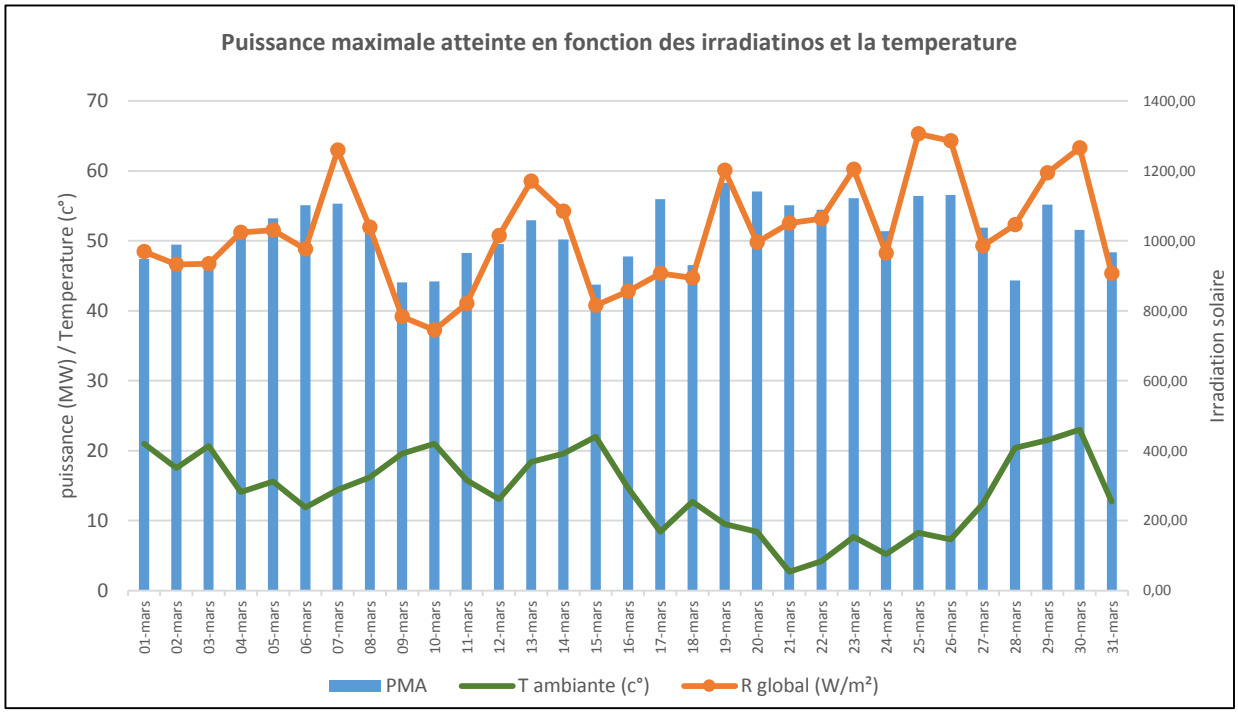


Figure 3-13 Puissance maximale atteinte par rapport à la température et l'éclairement pour le mois de mars 2018

Tout d'abord on constate des donnes que la puissance minimale nécessaire pour que le système commence à fournir de l'énergie électrique au réseau est d'environ 20 W/m².

La puissance (Figure 3.12/3.13) du jour varie entre 0.04 MW (début ou fin de journée) et 58 MW avec une moyenne de 25.30 MW qui correspond à la moitié de la puissance crête, la puissance maximale atteinte pendent tout le mois de mars est de 58.27 MW le 19 du mois à 14 :00 avec une insolation de 1201.2 W/m²et une température de 9.5° c.

La température ambiante est inférieure à la température des tests standard dont son effet sera léger, quand à l'éclairement, on voie bien qu'il est déterminant, et que la production PV suit ces traces pour les heures de jour et tout au long du mois.

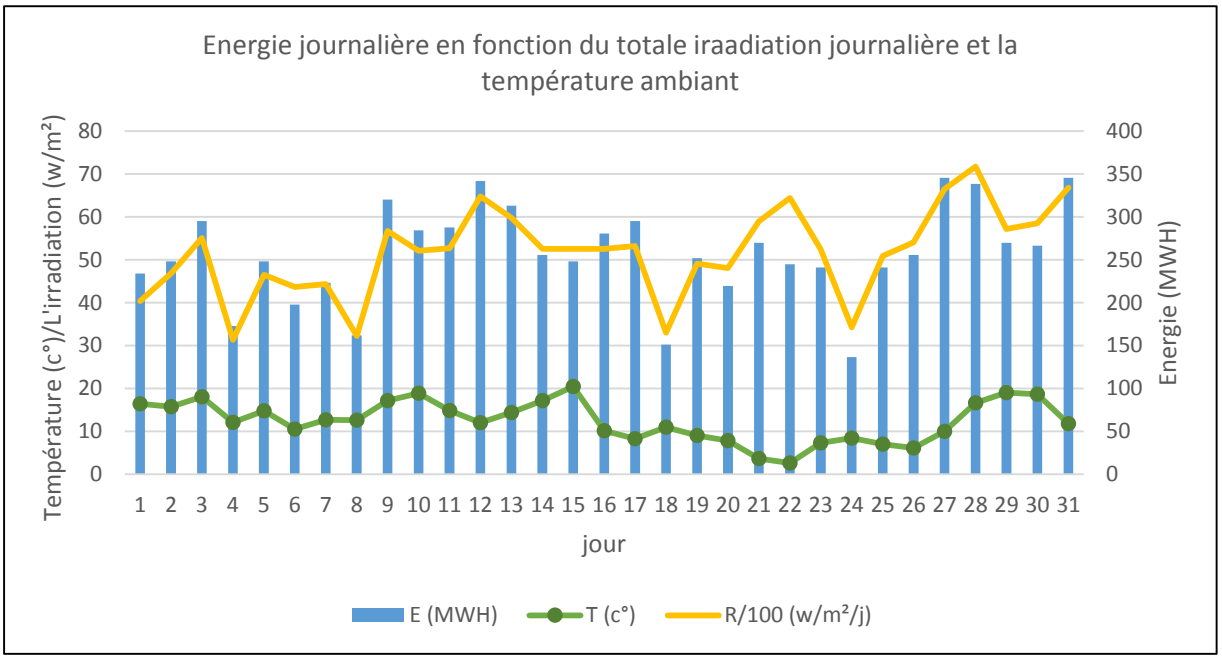


Figure 3-14 Energie journalière en fonction du totale irradiation journalière et la température ambiante

L'énergie maximale obtenu (Figure 3.14) est de 341.6 MWH le 31 mars, et l'énergie minimale est de 136.8 MWH avec une moyenne de 257.7 MWH/j, une énergie totale produite pendant le mois mars est de 7988.4 MWH et 102.1 MWH d'énergie consommée qui représente 1.27 % de la production totale.

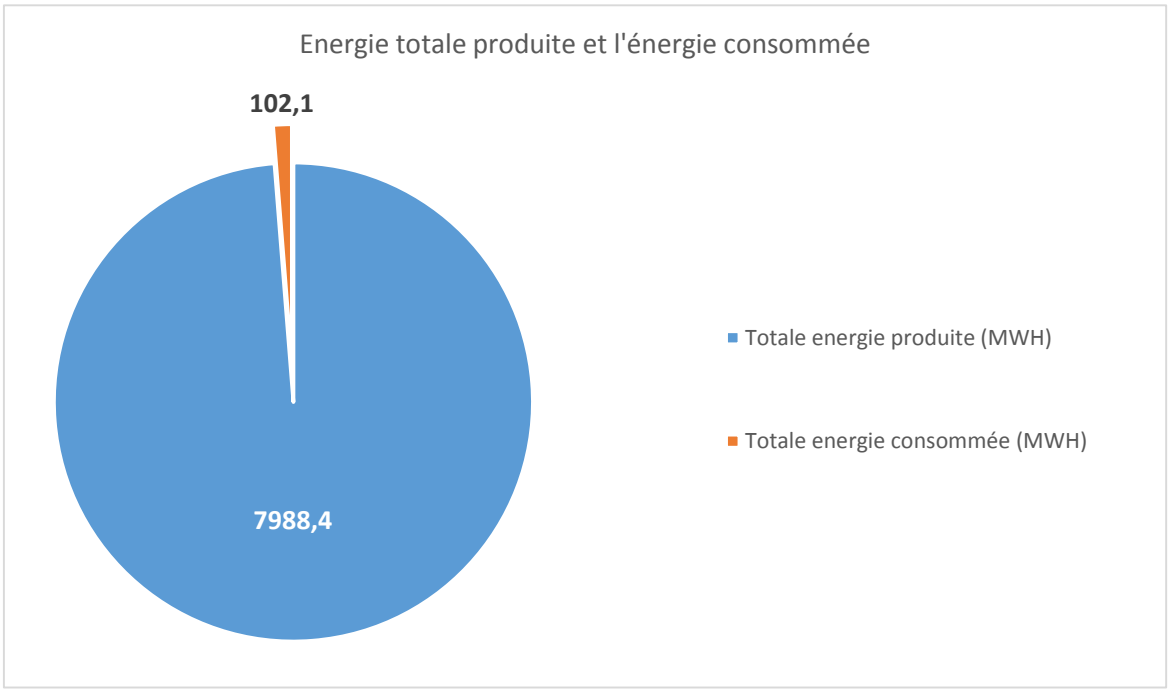


Figure 3-15 Energie totale produite et l'énergie consommée

3.4.3 Vitesse du vent et humidité

Notre présence au niveau de la centrale au cours de notre stage nous a permis de remarquer l'impact des paramètres peu cité dans les expériences scientifiques (laboratoire ou simulation) ; vitesse du vent et humidité.

Dans une centrale de grande échelle il presque impossible de définir la température des panneaux certain centrale utilise des panneaux témoin pour se rapprocher de la valeur exacte, mais elle reste loin de la température véridique, de ce fait, on se base généralement sur la température ambiante qui est certainement biaisée.

La valeur exacte de la température du panneau est affectée par la vitesse du vent qui est lui-même affectée par l'humidité (vent chaud ou vent frais), cette combinaison aide à diminuer souvent la température du panneau même avec une température ambiante plus élevée. La figure 3.16, nous affirme ce point.

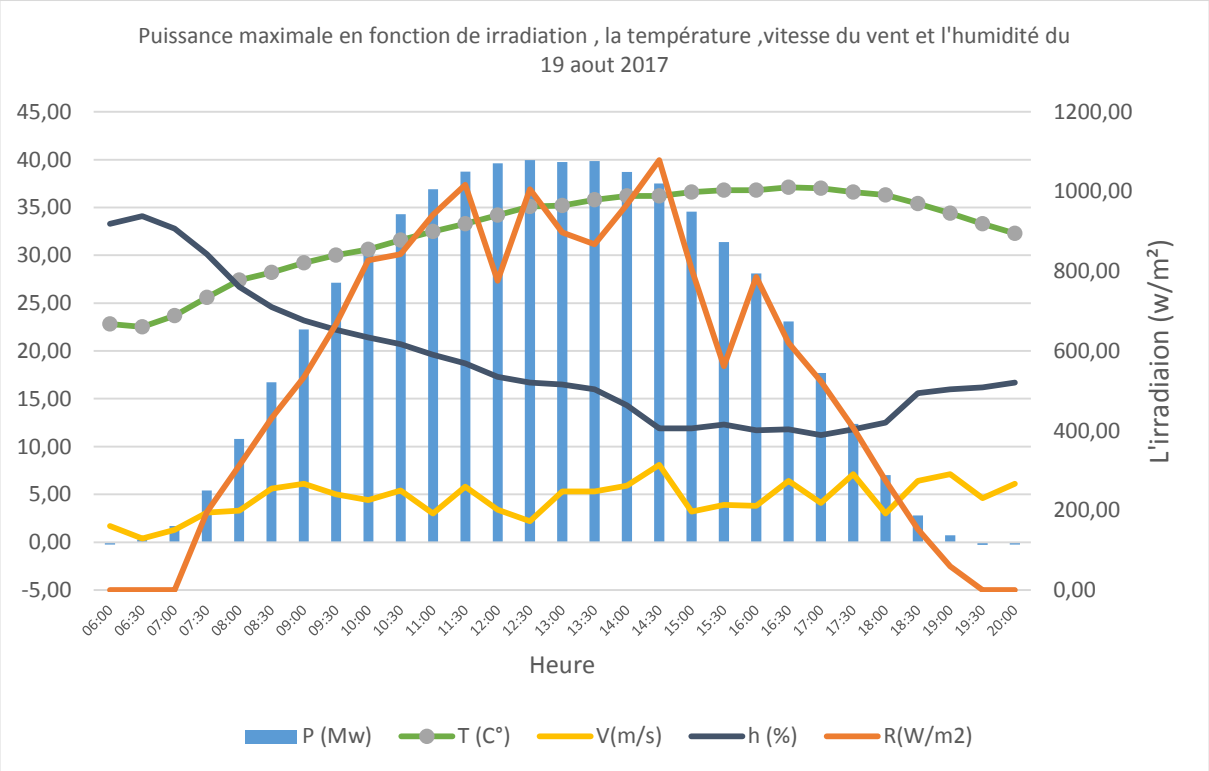


Figure 3-16 Puissance maximale en fonction de l'irradiation, la température, vitesse du vent et l'humidité

3.4.4 Présentation des coefficients et paramètres de performance [45]

Des paramètres de performance normalisés (norme 61724 de IEC) (IEC, 1998) peuvent être employés pour définir la performance globale du système en ce qui concerne la production énergétique, la ressource solaire et l'effet global des pertes de système. Ils ont été établis pour fournir les informations nécessaires pour la conception de systèmes de PV et l'évaluation des performances. Ils sont normalisés pour comparer les performances des systèmes PV suivant la situation géographique, la technologie et la conception. Ces paramètres sont :

- ***L'énergie normée du système (YF)***

L'énergie de système PV normée YF est l'énergie de sortie nette EPV (courant alternatif) divisée par la puissance nominale P0 du champ PV installé. Elle représente le nombre d'heures pendant lesquelles le champ PV devrait fonctionner à puissance nominale pour fournir la même énergie. YF normalise l'énergie produite par le système et permet de comparer l'énergie produite par des systèmes PV de tailles différentes :

$$YF = \frac{E_{pv}}{P_0} \quad \text{[kWh/kWc] ou [h/j]} \tag{3.17}$$

- ***Energie normée du champ PV (YA)***

L'énergie de champ PV normée YA est l'énergie en sortie du champ (courant continu) EA divisée par la puissance nominale P0 du champ PV installé. Elle représente le nombre d'heures de fonctionnement du champ PV à sa puissance nominale pour fournir la même énergie. YA normalise l'énergie produite en ce qui concerne la taille du champ PV :

$$YA = \frac{E_A}{P_0} \quad \text{[kWh/kWc] ou [h/j]} \tag{3.18}$$

- ***L'énergie de référence (YR)***

L'énergie de référence normée YR est l'irradiation totale reçue dans le plan du champ divisé par l'irradiation de référence G du PV. Elle représente un nombre d'heures Équivalent à l'irradiation de référence. Si l'irradiation est égale 1 kW/m2, alors YR est le nombre de soleil-heures maximal ou de rayonnement solaire en kWh/m2.

YR définit la ressource de rayonnement solaire pour le système PV. Elle est fonction du lieu d'installation du système, de l'orientation du champ et de la variation des conditions météorologiques d'un mois sur l'autre ou d'une année sur l'autre :

$$YR = \frac{H_T}{G_{STC}} \quad \text{[kWh/kWc] ou [h/j]} \qquad (3.19)$$

- ***Le Rapport de Performance (PR)***

Le Rapport de Performance PR est l'énergie de système YF divisée par l'énergie de référence YR, il mesure l'effet global des pertes sur le rendement évalué, dues au câblage, aux coupures et arrêts de l'onduleur, à des pertes qui apparaissent au moment de conversion du courant AC en courant DC, à la température des modules mais aussi au temps du panne du système et à l'encrassement des modules.

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \qquad (3.20)$$

Les valeurs de PR sont typiquement rapportées sur une base mensuelle ou annuelle. Les valeurs calculées pour des intervalles plus petits (hebdomadaire ou journalier) peuvent être utiles pour identifier des occurrences d'échecs des composants. En raison des pertes dues à la température des modules de PV, les valeurs de PR sont plus élevées en hiver qu'en été et se situent dans l'intervalle 0,60 à 0,80. Si l'encrassement des modules de PV est saisonnier, il peut également affecter les valeurs du PR. Les valeurs annuelles décroissantes peuvent indiquer une baisse permanente de La performance du système.

- ***Le rendement énergétique du champ PV (η)***

Le rendement de champ PV correspond au rapport entre l'électricité E_A produite par le système et l'énergie solaire E_L reçue à la surface des panneaux PV pour une période donnée.
Il représente l'efficacité avec laquelle le champ PV convertit l'énergie solaire en électricité.

$$\eta = \frac{E_A}{E_{L\ \ S}} \quad [\%] \qquad (3.21)$$

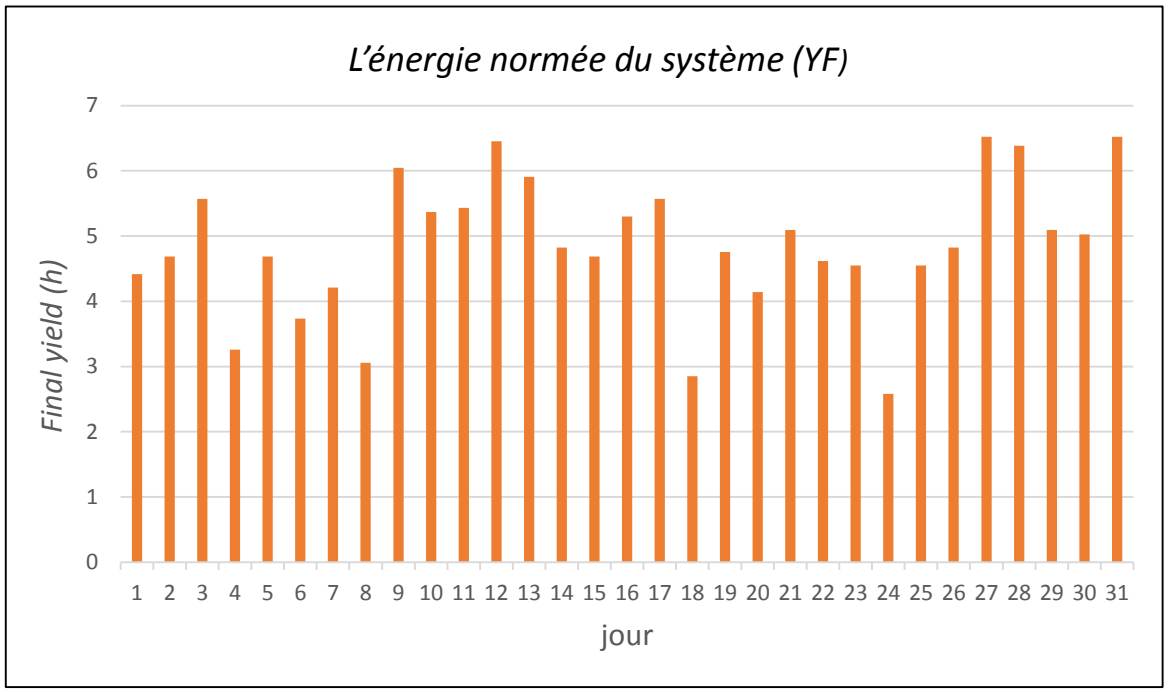


Figure 3-17 L'énergie normée du système (YF)

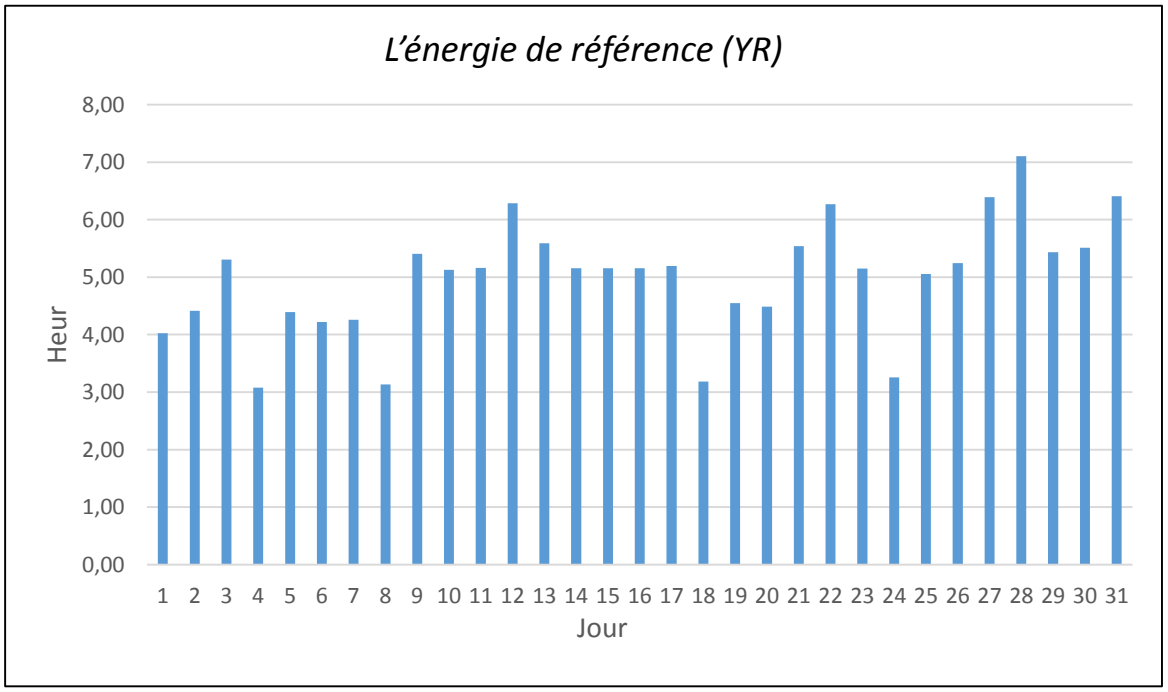


Figure 3-18 L'énergie de référence (YR)

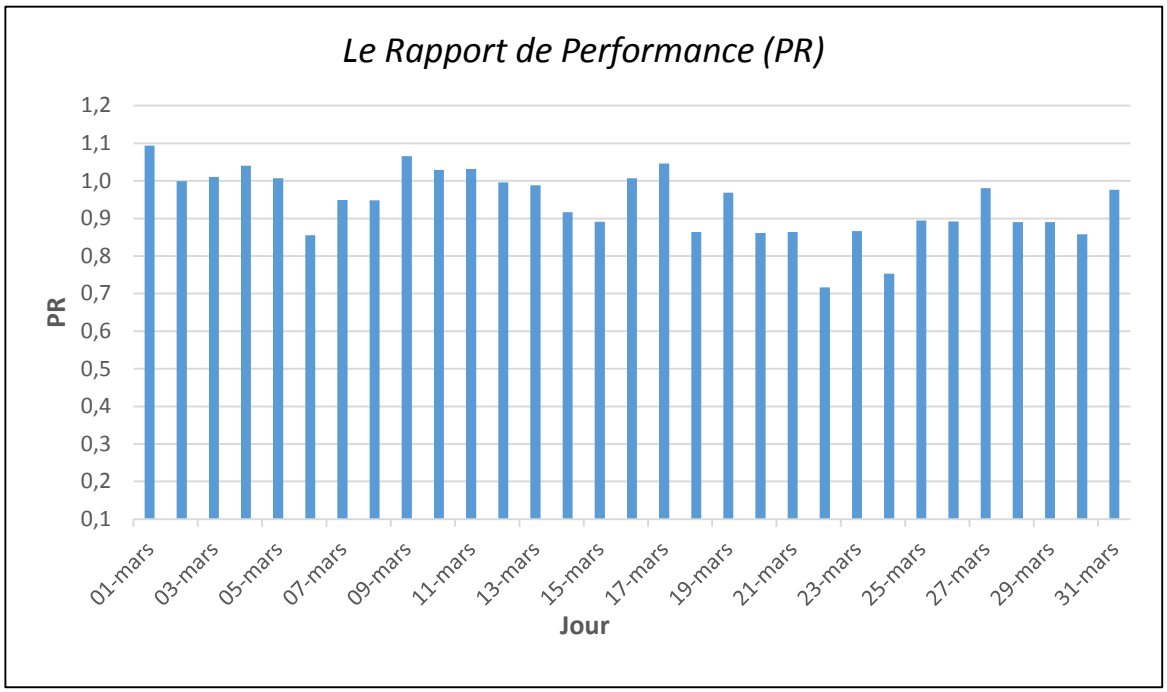


Figure 3-19 Le Rapport de Performance (PR) journalier

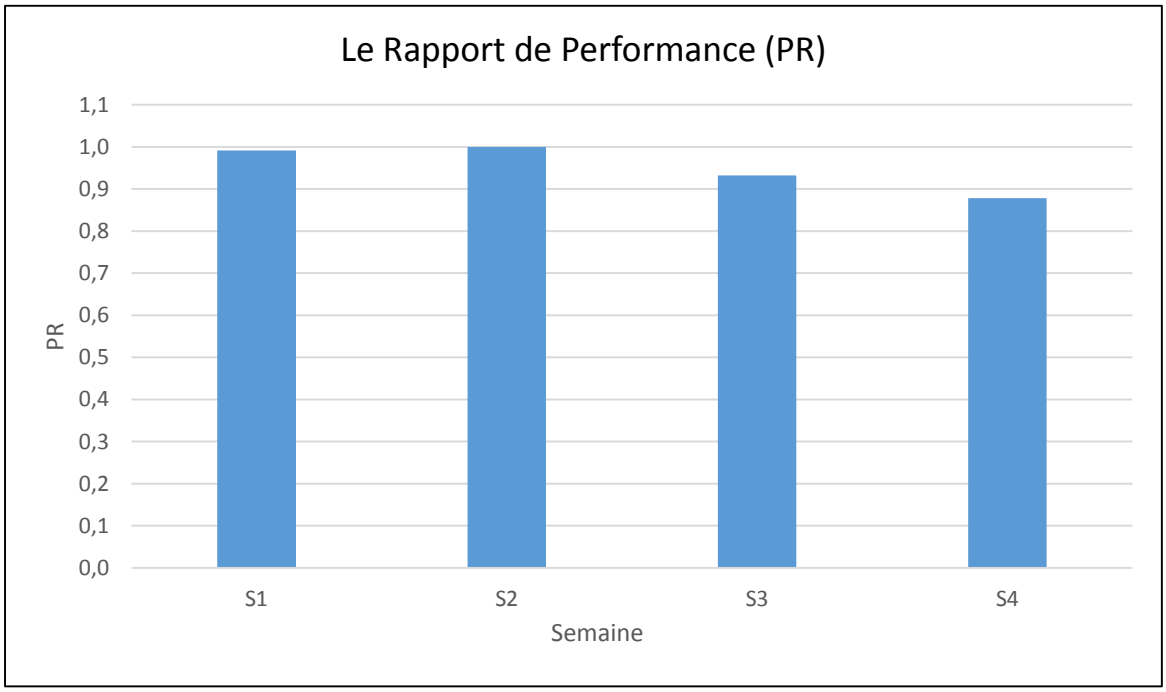


Figure 3-20 Le Rapport de Performance (PR) hebdomadaire

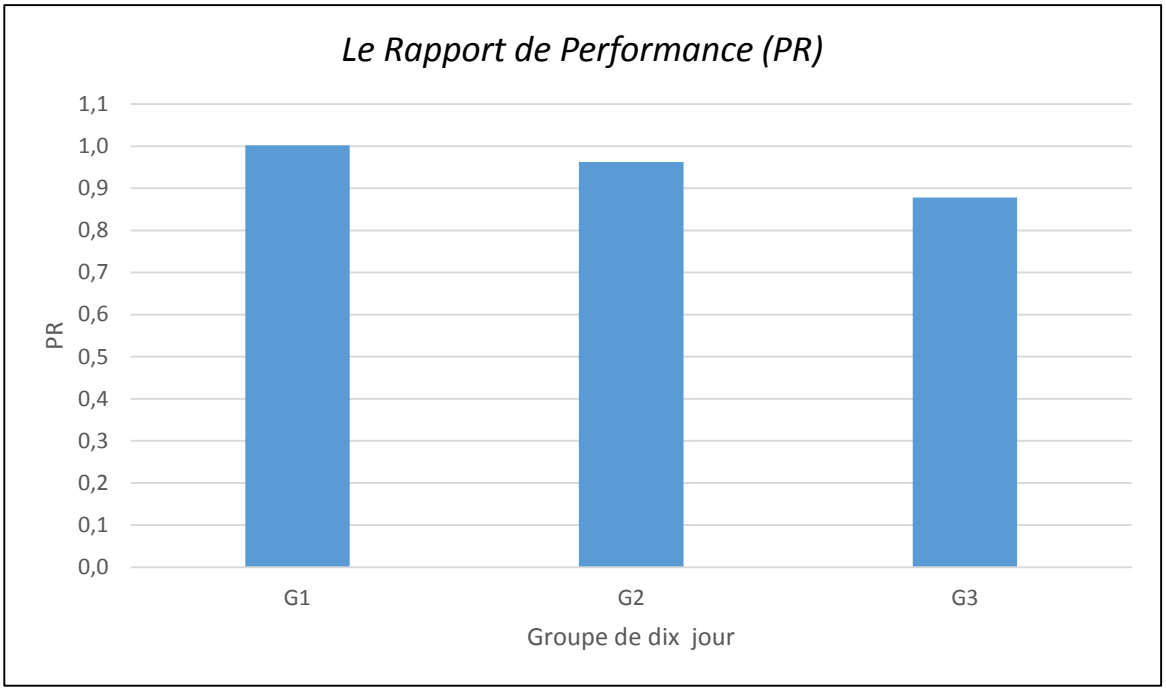


Figure 3-21 Le Rapport de Performance (PR) du groupe de dix jours

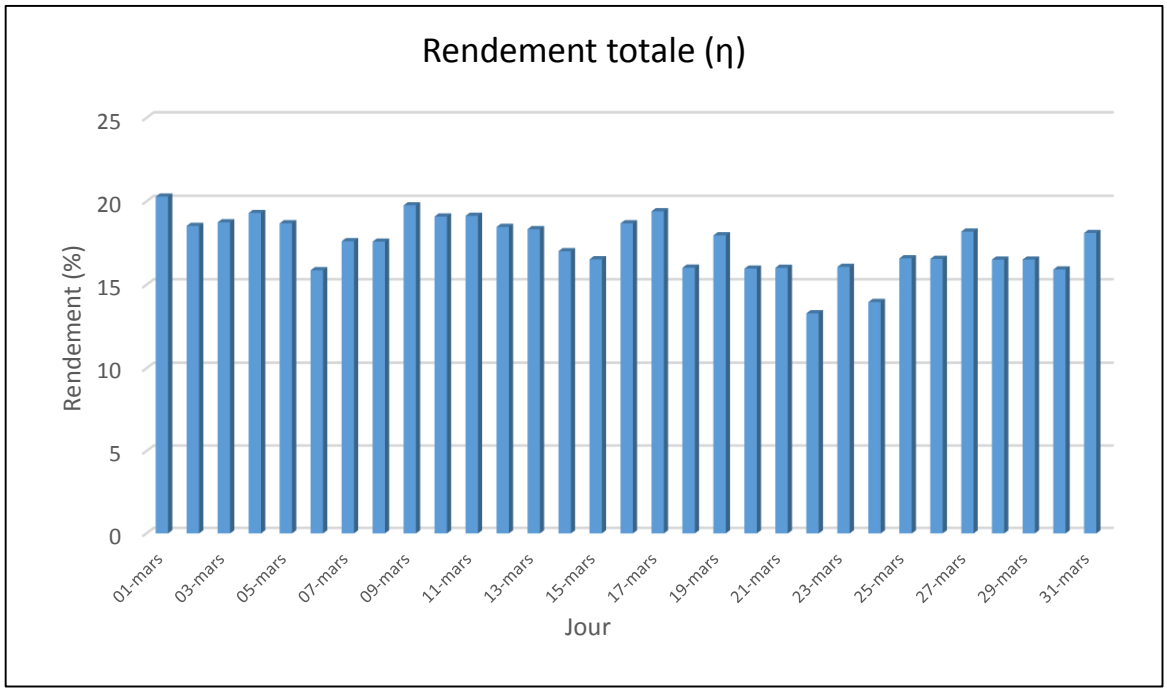


Figure 3-22 Rendement total (η)

3.4.5 Interprétation des résultats

- **Energie normée du système**

L'énergie normée YF (Final Yield) correspond à la productivité d'un système PV selon le nombre qu'il est capable de fournir la même énergie s'il fonction a sa puissance nominale

La figure (3.17) nous révèle que le nombre d'heure est définis entre 2h 34min (24 mars) et 6h 31min (27 et 31 du mois), 83% du mois la productivité a franchi la barre du 4 heures, 45 % de fois a dépassé les 5 heures et 19 % les 6 heures.

Nous pouvons expliquer le nombre trouvez par rapport au nombre d'heure par jour du mois de mars qui représente 11 heures d'ensoleillement relatives par l'intermittence de ce dernier a cause des conditions climatique instables.

Malgré ça la centrale montre une productivité intéressante avec une moyenne journalière de 4 heures 12 minute ce qui affirme relativement le potentiel énergétique du site, D'où l'aide importante qu'elle a apporté au réseau locale et nationale.

- **Energie de référence (YR)**

YR (reference yield) est le nombre d'heures équivalent à l'irradiation de référence (1000w/m²), elle représente les heures du jour efficace, la figure 3.18 apparait un potentiel solaire très avantageux avec une fluctuation entre 3heurs (8 mars), et 7 heures 6 minute (27 mars ; le jour le plus rentable), et 5 heures 10 minute de moyenne, de même 64% des jours ont franchi la barre de la moyenne, et 16 % pour 6 heures.

- **Rapport de Performance (PR)**

L'indice de performance (performance ratio) souvent appelé facteur de qualité est l'une des valeurs les plus importantes pour l'évaluation de l'efficacité d'une installation photovoltaïque. Concrètement, l'indice de performance désigne le rapport entre le rendement énergétique réel et le rendement énergétique théoriquement possible. Il est en grande partie indépendant de l'orientation de l'installation photovoltaïque et du rayonnement sur l'installation photovoltaïque. Ceci étant, l'indice de performance permet de comparer des installations photovoltaïques reliées au réseau sur différents emplacements, à travers le monde entier.

Plus la valeur d'une installation photovoltaïque se rapproche de 1, plus cette installation photovoltaïque présente un fonctionnement efficace. Cependant, il n'est pas possible d'atteindre la valeur de 1 en pratique, car le fonctionnement de l'installation photovoltaïque engendre

toujours des pertes, qui sont inévitables (par exemple pertes thermiques suite au réchauffement des panneaux photovoltaïques). Les installations photovoltaïques performantes atteignent toutefois un indice de performance pouvant aller jusqu'à 80 %.

Les valeurs de PR sont typiquement rapportées sur une base mensuelle ou annuelle. Les valeurs calculées pour des intervalles plus petits (hebdomadaire ou journalier) peuvent être utiles pour identifier des occurrences d'échecs des composants. En raison des pertes dues à la température des modules de PV

Les valeurs de PR journalière (figure 3.19) trouvée varie entre 0.6 et 1.1, pour cela nous avons essayé d'élargir la période de référence en la calculant pour des semaines (La figure 3.20) et pour chaque 10 jour (figure 3.21), ce qui a donné des résultats relativement acceptables. En effet, le rapport de performance hebdomadaire à varié entre 0.99 et 0.87 et de dix jour de 1 à 0.87, ce qui indique un taux d'efficacité très important, et étant donné que le rapport de performance de tout le mois de mars est de 0.94. Nous pouvons conclure que les pertes thermiques (suite au réchauffement des panneaux photovoltaïques) sont négligeables pour ce mois.

- **Rendement de la centrale**

Comme tout système de conversion d'énergie, une installation photovoltaïque est caractérisée entre autres par son rendement, Il permet de distingue la fraction de l'énergie lumineuse captée au départ que l'on retrouve sous forme électrique injectée sur le réseau. Il est donc égal au rapport entre l'énergie lumineuse E_L reçue sur les panneaux et l'énergie électrique E_A de sortie injectée sur le réseau.

Avec un rendement du panneaux égale à 15.7 et une surfaces efficaces de 0.28 Km^2 (285723m^2), la figure 3.22 montre des rendements journaliers très remarquable entre 13.3 % et 20.3 % et un rendement global du mois 17.43%, ce qui révèle encore une fois avec des résultats plus qu'attendu, la rentabilité forte de ce système PV.

3.4.6 Optimisation du système PV et son intégration au réseau [32]

3.4.6.1 Préconisation pour un meilleur raccordement des EnR

- **La première solution** consiste à laisser raccorder au réseau le même nombre de groupes conventionnels tout en réduisant leur puissance produite. Cette solution permet de garantir la réserve nécessaire, car la réserve constituée sur chaque groupe conventionnel augmente tandis que la production de ces groupes diminue. Néanmoins, avec la diminution de la production conventionnelle, l'un des producteurs, voire plusieurs, fonctionnerait éventuellement en dessous du minimum technique. De plus on assiste à l'optimisation de la production électrique (optimisation de l'écoulement de puissance). Cette solution n'est donc acceptable que dans une certaine mesure.
- **Une autre solution** consiste à diminuer le nombre des groupes conventionnels connectés pour assurer que la production de ces groupes soit comprise entre leurs maximum et minimum techniques. Cependant, au-delà d'un certain taux de pénétration des EnR, la quantité de réserve requise pourrait ne plus être garantie avec un nombre réduit de groupes participants aux réglages primaires de la fréquence.
- **Mitigation de surtension :** La surtension peut être limitée en utilisant le mode de contrôle VAR (volt-ampère réactif) de l'onduleur. Lorsque la tension augmente, le mode d contrôle VAR peut répondre dynamiquement en réglant le facteur de puissance. Dans le cas où la puissance active est une autre façon de maintenir la tension dans les limites.
- **Mitigation de là sous tension :** Une solution pour atténuer la sous tension est de limiter la quantité de puissance de sortie PV injectée dans le réseau. Une autre solution consiste à utiliser les prévisions météorologiques pour réduire la quantité de la puissance attendue lorsque des nuages sont prévus. Cela nécessite l'utilisation de mesures météorologiques en temps réel et d'algorithmes de prévisions météorologiques. Le logiciel de prévision météorologique doit être intégré aux contrôleurs des onduleurs PV.
- **Elaboration de CREnR Algérien :** Le déploiement à grande échelle des EnR dans les systèmes électriques insulaires fait appel à une analyse critique des approches de l'exploitation traditionnelles de ce type de système. En conséquence, de nouvelles fonctions de régulation, visant à soutenir la stabilité et la sécurité du système tout en déployant de nouvelles technologies et en adoptant de nouvelles règles d'exploitation ont été définies, ces règles et exigences sont données dans le code du réseau des EnR (CREnR).

Pour le réseau électrique **Algérien**, des recommandations sur la façon d'élaborer et de réviser un CREnR sont présentées comme suit :

✓ Assurer un processus approprié pour développer un CREnR

Les caractéristiques propres du système électrique doivent être évaluées par une étude approfondit avant d'établir un CREnR. Le développement attendu et souhaité du système électrique doit être pris en compte lors de l'élaboration d'un code du réseau, l'étude des CREnR des autres pays ainsi que l'adoption de leurs exigences sont bien encouragés ; à condition que ces exigences soient vérifiées pour la compatibilité avec les caractéristiques propres du système électrique. Cela permet dès le début d'éviter ou d'attirer l'attention sur certain problème.

En outre, *il est fortement recommandé* d'utiliser les normes techniques internationales, car cela évite de reproduire les résultats de la recherche déjà disponibles.

✓ Considérer les caractéristiques propres du système électrique

Les exigences techniques spécifiées dans un CREnR doivent tenir compte des aspects suivants :

Taille du réseau (longueur des lignes, capacité, puissance minimale) ; Niveau d'interconnexion ; fortement interconnecté, faiblement interconnecté, avec ou sans connexions synchrones (ou non-synchrones) avec d'autres systèmes électriques ; Niveau de tension : un code du réseau de transport à très haute tension peut différer beaucoup de celui d'un réseau de distribution à basse tension ;

✓ Validation du modèle de génération à base des EnR

La validation d'un modèle permet d'assurer la bonne performance des systèmes de contrôle et de l'approuver, ceci afin de l'utiliser pour l'analyse de la stabilité.

✓ Appuyer les politiques nationales et la législation

Les exigences du CREnR devraient soutenir la politique des énergies renouvelables. S'il existe un système de soutien solide pour une ou plusieurs technologies particulières (pour notre cas, les centrales solaires PV et CSP), l'opérateur du réseau doit éviter de les soumettre à des exigences techniques extrêmement restrictives. Cependant, il doit choisir les exigences de telle sorte que même un développement très rapide ne met pas en danger la sécurité du réseau.

- **Des solutions de Smart grids :** afin de faciliter l'intégration des EnR dans le système électrique, les réseaux devront être gérés de manière plus réactive, grâce aux

technologies de Smart grids. Ces technologies regroupent de nombreux outils et systèmes pour la gestion des réseaux (comptage communicant, stockage de l'électricité, modèles de marché, onduleurs et charges contrôlables, etc.). Les nouvelles technologies de l'information et de la communication interviendront également afin d'optimiser les flux d'énergie et, notamment, d'assurer l'équilibre « offre/demande ». En développant l'observabilité, la prévisibilité, le pilotage et la flexibilité, les Smart grids permettront de mieux gérer l'intermittence des énergies renouvelables [46].

3.4.6.2 Préconisation pour la centrale

- **La maintenance**

La maintenance d'un équipement est définie dans la norme par "*l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé"*. Ainsi la maintenance garantit le niveau de production d'électricité attendu de l'installation photovoltaïque tout au long de sa durée de vie. Bien que la technologie photovoltaïque ne possède pas d'éléments mobiles et donc fait preuve d'une grande fiabilité, l'investissement important au départ s'attend à une grande longévité du système afin de garantir sa rentabilité. La maintenance préventive et corrective de l'installation s'effectue sur l'ensemble des équipements et sur son environnement proche. Elle permet avant tout de prévenir ou de corriger les défauts de l'installation photovoltaïque.
La maintenance peut apporter :

- Effectuée une maintenance corrective après dysfonctionnement d'un ou plusieurs ; modules photovoltaïques.
- Effectuer un entretien régulier de l'onduleur pour le préserver davantage
- S'assurer de l'état de propreté des composants et de repérer certaines anomalies ;
- Supprimer la crasse et de retrouver le niveau de production d'électricité d'origine ;
- Entretenir les évacuations des eaux pluviales et les trop-pleins ;
- S'assurer de la tonte de la végétation [5].

- **Nettoyage des panneaux solaires :** le nettoyage des panneaux solaires fait, ces derniers temps, l'objet d'une communication effrénée de la part de nombreux « spécialistes » du secteur, les saletés, poussières et mousses qui encrassent les

panneaux peuvent nuire à leurs performances, en effet, selon diverses études, leur rendement peut même diminuer de 3 à 25 % par an [47].

La société doit fortement désigner une équipe bien formée selon un programme annuel étudié pour entamer les travaux d'entretien et de nettoyage pour éviter au plus tard la dégradation des performances.

3.5 Conclusion

Il est connu au milieu de la communauté scientifique l'impact majeur des conditions climatiques défavorable sur la production photovoltaïque à travers des expériences dans les laboratoires au par des simulations de logiciels, En outre, l'étude pratique donne un autre angle de vue de l'influence de ces paramètres et d'autre.

Nous avons, tout au long de ce chapitre, donné un résumé sur notre étude sur la nouvelle centrale photovoltaïque raccorder au réseau de transport 60KV algérien de Ain el bel de ce fait, pour analyser les performances du ce système PV nous avons utilisé les méthodologies standardisées à base des coefficients normalisés. Les données enregistrées sur la période de mois de mars 2018 toutes les une demi-heure nous ont permis d'analyser le comportement de l'installation sur cette période.

La conclusion majeure de ce travail, que notre site malgré les conditions climatiques variable dispose d'un potentiel solaire fort qui pourri aider le gestionnaire du réseau ainsi que l'opérateur système à sauvegarder et soulager leur système.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'Algérie suit progressivement l'évolution mondiale et a fixé un plan de développement des énergies renouvelables pour 2030 avec une capacité de 22 GW, le projet a débuté par l'installation de plusieurs centrales photovoltaïques et éoliens dans diverses régions du pays et d'une capacité actuelle de 600 MW, mais qui reste loin de son objectif. Cela peut être réalisé de plus en plus à l'avenir grâce à son potentiel solaire gigantesque connu au niveau international.

L'objectif de ce travail est l'étude réel d'une centrale PV de grande puissance raccordes au réseau de transport à travers l'observation de l'effet des conditions climatiques du site sur la productivité et l'analyse des performances standardisées.

Nous avons rappelé, en premier lieu des généralités sur la source fondamentale de l'énergie photovoltaïque; le soleil, son pouvoir énergétique et les propriétés de son rayonnement puis ensuite, nous avons décrit les convertisseurs photovoltaïques, leur caractéristique I-V, leur circuit électrique équivalant et leurs principaux grandeurs caractérisant ainsi que l'étude de l'influence des divers paramètres (l'éclairement, la température, les résistances parasites série et parallèle) sur leur caractéristique puis nous avons cité les différents types de cellules solaires.

Dans la deuxième partie nous avons parlé du réseau de transport algérien dans ces compositions générales et les prescriptions relatives au raccordement de producteur électrique ainsi que l'impact lier à son intégration, nous avons montré, le potentiel solaire algérien ; le tarif d'achat garantie et le programme nationale de développement des EnR et on a conclu avec l'état de l'art de l'énergie solaire photovoltaïque nationale.

Notre étude dans le dernier chapitre sur la centrale PV de Ain el bel d'une capacité crête de 53MW raccordes au réseau de transport pendant le mois de mars qui reste expressif et non-exhaustif. Nous a montré qu'installer de tels systèmes présents un intérêt considérable pour le système électrique. En effet, on remarque que malgré l'influence significative des conditions climatiques, la centrale a dévoilé une productivité encourageante, et l'étude de performance a affirmé les ressources solaires importantes du site et la production énergétique favorable.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] A.P KIRK. « *Solar Photovoltaic Cells: Photons to Electricity*. Academic Press », 2014.

[2] J.-M. Malherbe, « DU ECU introduction à la physique du Soleil », l'observatoire de paris, 2016.

[3] A. SPIGA, « Planétologie : atmosphère, surface, habitabilité UE M1 Grandes Questions Environnementales, Laboratoire de Météorologie Dynamique », UPMC paris, 2017.

[4] J. BERNARD, « Energie Solaire : Calculs et Optimisation, Technosup : Génie énergétique ». Ellipsis Marketing, Paris, 383p, 2011.

[5] A. LABOURET, M. VILLOZ, « Energie solaire photovoltaïque»,4ème édition. Dunod, 2009.

[6] S. BENSALEM, « Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires», universite ferhat abbas – setif, 2011.

[7] J-M. Bonnefond, « Les Capteurs de mesures du rayonnement naturel, Pratiques et outils de mesure des rayonnements naturels dans les domaines visible, solaire et infrarouge », cahier des techniques de l'INRA, 2008.

[8] A. MEKEMECHE, « modélisation à deux dimensions des propriétés physique de cellules solaires au silisium à base de substrat de type n. : étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes », thèse de doctorat, université de ABDELHAMID IBN BADIS. Mostaguanem, 2017.

[9] A. LABOURET, P. CUMUNEL, JP. BRAUN, B. FARRAGGI, « cellules solaires : les base du photovoltaïque » ,ETSF n :5 France, 2010.

[10] T. Mambrini, « Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies », THÈSE DE DOCTORAT, UNIVERSITE PARIS-SUD, 2014.

[11] A. Ricaud, « L'électricité photovoltaïque », CYTHELIA Expertise et Conseil, 2009.

[12] O. GERAUD, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », ENS Cachan, 2002.

[13] S. PETIBON, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de doctorat, Université Toulouse III, 2009.

[14] Y. IBRAHIM, « système hybride photovoltaïque – éolien – diesel sans stockage», Thèse d'ingéniorat, l'université libanaise, 2013.

[15] A. MORSLI, « Etude d'un système solaire photovoltaïque », Mémoire de Magister, *ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE, 2010.*

[16] A.M.Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W.Warta, «Solar cell efficiency tables (version 50) », 2017.

[17] H. Mignon, M. Orphelin « L'intégration des énergies renouvelables dans le réseau de transport d'électricité », Fondation Nicolas Hulot, 2014.

[18] SIEMENS, « Power Engineering Guide - Transmission and Distribution », 4th Edition, 2005.

[19] J.M. DELBARRE, « Postes à HT et THT - Rôle et Structure, Techniques de l'Ingénieur », Traité Génie électrique, D 4570, 2004.

[20] M. ZELLAGUI, « Etudes des protections des réseaux électriques MT (30 & 10kV) », Mémoire de Magistère, Constantine, 2010.

[21] Groupe Sonelgaz, XD, « Guide Technique de Distribution », Document technique de Groupe SONELGAZ, 1984.

[22] Schneider Electric, « Architecteur de Réseau de Distribution », 2007.

[23] www.grte.dz/

[24] www.energy.gov.dz/

[25] A. HAMMOUD, « Etude des convertisseurs haute tension pour la protection et la coordination de réseau de distribution ». Thèse de Doctorat en Génie Electrique, INSA de Lyon, 2010.

[26] M.Abbaci, A. Khouas « Ahmed Étude et simulation de la protection des lignes HTB », université Yahia farés, Médéa, 2014.

[27] C. CLAUDE, D. PIERRE, « Protection des réseaux de Transport et de Répartition », Direction de la Production et du Transport d'Electricité (EDF), octobre 2005.

[28] C. PRÉVÉ, « Protection des Réseaux Electriques », Edition HERMES, Paris 1998.

[29] L. G HEWITSON, M. BROWN, R. BALAKRISHNAN, « Guide de la protection des équipements électriques », Paris : Dunod, 2007.

[30] Thi Minh Chau, « Le Couplage onduleurs photovoltaïques et réseau, aspects contrôle commande et rejet de perturbations ». Université de Grenoble, 2012.

[31] The International Renewable Energy Agency (IRENA) http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/?topic=4&subTopic=16

[32] S. MAKHLOFI « impact d'intégration des énergies renouvelable sur le réseau isolé d'Adrar » thèse de doctorat, école nationale polytechnique, 2017.

[33] Robyns, B., Davigny, A., Saudemont, C., Ansel, A., Courtecuisse, V., François, B., Deuse, J. « Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie ». *J3eA, 2006*.

[34] Décret exécutif n° 06-429 du 26 novembre 2006 « fixant le cahier des charges relatif aux droits et obligations du producteur d'électricité »

[35] Arrêté du 14 Safar 1429 correspondant au 21 février 2008 fixant les règles techniques de raccordement au réseau de transport de l'électricité et les règles de conduite du système électrique.

[36] B. Multon, X.Roboam, B.Dakyo, C.Nichita, O.Gergaud, H.Ben Ahmed, « Aérogénérateurs électriques », Techniques de l'ingénieur, D3960,2004.

[37] N. Laverdure, D. Roye, S.Bacha, R. Belhomme, « Technologie dessystèmes éoliens – Intégration dans les réseaux électriques », Revue 3EI ,n°39, pp. 14-25, 2004.

[38] B. Paluch, « Introduction à l'énergie éolienne », REE, n°5, ,pp. 35-50, 2005.

[39] A. Davigny, « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie ». Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, 2007.

[40] Fiche d'exploitation centrale PV de ain el bel, SKTM,2016.

[41] https://fr.wikipedia.org/wiki/Projet_Desertec

[42] Atlas solaire Algérien CDER.

[43] programme nationale site de ministère de l'énergie.

[44] www.sktm.dz/

[45] V. Acquaviva. « Analyse de l'intégration des systèmes énergétiques a sources renouvelables dans les réseaux électriques insulaires ». Université Pascal Paoli, 2009.

[46] http://www.smartgrids-

[47] J. F MULLER, « L'impact de l'énergie sur la société future : un autre monde se dessine », 2010.

ANNEXE

Annexe

Figure A.1 panneux solaire



Figure A.2 champs de panneux solaire



Figure A.3 transformateur 315v/30Kv

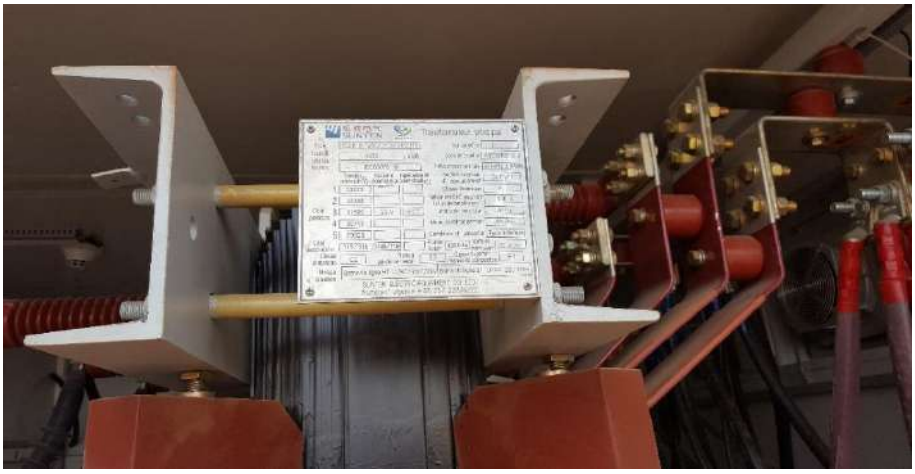


Figure A.4 reloute du onduleur et transformateur 30Kv



Figure A.5 Transformateur 60/30 Kv



Figure A.6 Station météorologique



Figure A.7 Station météorologique



Figure A.8 Cellule de comptage



Figure A.9 Cellule de communication



Figure A.10 bâtiment 30Kv et de relayage



Figure A.11 bâtiment 30Kv et de relayage



Figure A.12 Poste de d'évacuation 60/30Kv

