

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



UNIVERSITE AHMED DRAIA

جامعة أحمد دراية- أدرار

-ADRAR-

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département des Sciences de la Matière

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme de Master en

Physique

Option : Physique Energétique et Energies Renouvelables

Thème

***Evaluation expérimentale de la dégradation
des performances d'une centrale
photovoltaïque fonctionnant dans un climat
désertique***

Présenté Par :

***M^{elle}* BELLAOUI Manal**

Devant le jury composé de :

Pr. Ali Benatiallah	Président	Professeur	Université Ahmed Draia-Adrar
Dr. Bouchra Benabdelkrim	Rapporteur	MCB	Université Ahmed Draia -Adrar
Dr. Lakhder Ameer	Examineur	MCA	Université Ahmed Draia -Adrar

Année Universitaire 2020/2021

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne populaire et démocratique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE AHMED DRAYA - ADRAR

BIBLIOTHÈQUE CENTRALE

Service de recherche bibliographique

N°B.C/S.R.B//U.A/2021



جامعة احمد دراية - ادرار

المكتبة المركزية

مصلحة البحث البليوغرافي

الرقمم.م/م.ب.ب/ب.ب/أ.ج.أ/2021

شهادة الترخيص بالإيداع

انا الأستاذ (ة): بن عبد الكريم بشري Bouchra Benabdelkrim

المشرف مذكرة الماجستير.

الموسومة بـ : Evaluation expérimentale de la dégradation des performances d'une centrale photovoltaïque
fonctionnant dans un climat désertique

من انجاز الطالب (ة): بلاوي منال M^{lle} BELLAOUI Manal

كلية: العلوم و التكنولوجيا

القسم: علوم المادة

التخصص: Physique Energétique et Energies Renouvelables

تاريخ تقييم / مناقشة:

أشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم / المناقشة، وان المطابقة بين
النسخة الورقية والالكترونية استوفت جميع شروطها.
ويامكانهم ايداع النسخ الورقية (02) والاليكترونية (PDF).

- امضاء المشرف:

ادرار في: 7-7 جويلية 2021



ملاحظة: لا تقبل اي شهادة بدون التوقيع والمصادقة.

Dédicaces

**Je dédie ce travail aux êtres les plus chers dans ma vie,
« A toi maman sans toi je ne serai jamais arrivé là et pour toi et
avec tes prières je sais que je peux aller très loin ; A toi papa, tes
prières et ton soutien a fait de moi ce que je suis ; A toi mon petit
frère chéri, A vous mes sœurs, mes meilleures, mon grand frère »
Sans vous le chemin aurait été trop long, sombre et difficile, je vous
aime très fort.**

Manal

Remerciements

Avant tout nous tenons nos remerciements à notre Dieu de nous avoir donné la force et le courage pour la réalisation de cet ouvrage.

J'adresse mes plus vifs remerciements à mon encadreuse «Dr. Bouchra Ben Abdelkarim» d'abord pour sa patience, sa confiance, ses remarques, ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner ce travail. Et de l'enrichir par leurs propositions.

Mes remerciements s'étendent également à mon professeur, Salemi Abderrahmen chef de la centrale PV Zaouiet Kounta (Adrar) Par ailleurs, je tiens à exprimer mes vifs remerciements à directeur d'unité de production Sud-Ouest Bechar.

Je tiens à remercier toutes les membres de la société (SKTM) qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidé lors de déroulement de stage.

Nous adressons notre plus sincère remerciement à notre famille particulièrement à mon père et à ma mère qui m'ont aidé et encouragé et pour leur patience à notre égard sans jamais douter de nos capacités.

Je remercie mes sœurs Safaa et Hafsa et Hadjer, et mes frères Ibrahim, et Samir, Mohammed Redha pour leurs encouragements.

Je tiens à remercier spécialement, Mabrouk, Chaima, Kaouter, Salima, Abdelmouiz, Inas, Amani, qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

Nous remercions aussi tout le corps enseignant et administratif qui a contribué à notre formation universitaire.

Et tout ce qui est cher du moi de près ou de loin et qui m'aide à réaliser ce travail et me donne la volonté et l'envie de faire le possible pour réussir.

Résumé

L'énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et, malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, la quantité restante demeure encore importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m² crête dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m², il existe des zones dans le monde plus favorisées que d'autres du point de vue ensoleillement lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en eau.

En effet, le comportement de ces générateurs d'énergie s'avère plus ou moins aléatoire, en fonction du site de mise en fonctionnement. Ainsi, si l'on considère des zones à climat sec et possédant un taux d'ensoleillement important dans l'année, le flux solaire peut être facilement modélisable et prévisible en fonction des heures de la journée et des jours de l'année. Le fonctionnement des générateurs PV est alors souvent proche de celui estimé.

Un obstacle de taille demeurera par la situation géographique de notre pays dont 85% du territoire est constitué des régions arides et semi-arides caractérisées par une zone désertique importante dans le sud du pays. Cette zone saharienne qui est favorable à l'exploitation de l'énergie solaire, présente une grande variation journalière de la température ambiante, une vitesse du vent de sable importante durant certaines saisons de l'année, une durée d'ensoleillement estimée à 3500 heures/année et un potentiel énergétique de 2650 KWh/m²/année (l'un des plus élevés au monde).

Ces paramètres induisent ainsi un stress thermique au niveau des composants du module PV et ce après une longue exposition en milieu naturel.

Malgré la progression du marché du photovoltaïque, L'expérience a montré qu'après une exposition en milieu naturel les modules PV présentent une dégradation des performances électriques du module PV à cause des externes influences sur la production de module PV.

Actuellement les modules PV sont certifiés pour les climats modérés d'air libre ne prenant pas en considération les spécificités des régions désertiques, C'est la raison qui nous a poussé à orienter notre étude sur la performance d'une centrale PV située en sud d'Algérie (Centrale PV de Zaouiet Kounta-Adrar de 6 MW).

Mots clés :

Centrale PV, Performance, Dégradation, Zone désertique, Conditions climatiques.

Abstract

Solar energy is abundantly available over the entire earth's surface and, despite significant attenuation as it passes through the atmosphere; the remaining amount is still large when it reaches the ground. We can thus count on 1000 W / m² peak in temperate zones and up to 1400 W / m², there are areas in the world more favored than others from the point of view of sunshine when the atmosphere is slightly polluted with dust or water.

Indeed, the behavior of these energy generators turns out to be more or less random, depending on the site of operation. Thus, if we consider areas with a dry climate and having a significant rate of sunshine per year, the solar flux can be easily modeled and predicted according to the hours of the day and the days of the year. The operation of PV generators is then often close to that estimated.

A major obstacle will remain due to the geographical location of our country, 85% of the territory of which is made up of arid and semi-arid regions characterized by a large desert area in the south of the country. This Saharan area, which is favorable to the use of solar energy, has a large daily variation in ambient temperature, a significant sand wind speed during certain seasons of the year, an estimated period of sunshine of 3500 hours/ year and an energy potential of 2650 KWh / m² / year (one of the highest in the world).

These parameters thus induce thermal stress at the level of the components of the PV module and this after a long exposure in a natural environment.

Despite the progression of the photovoltaic market, Experience has shown that after exposure to the natural environment, PV modules exhibit a degradation in the electrical performance of the PV module due to external influences on the production of PV module.

Currently the PV modules are certified for moderate climates of free air not taking into account the specificities of desert regions, This is the reason that prompted us to focus our study on the performance of a PV plant located in the south of Algeria. (Zaouiet Kounta-Adrar photovoltaic plant of 6 MW).

Keywords:

PV plant, Performance, Degradation, Desert area, Climate conditions.

ملخص

تتوفر الطاقة الشمسية بكثرة في جميع أنحاء سطح الأرض، وعلى الرغم من التوهين الكبير أثناء مرورها عبر الغلاف الجوي، تظل الكمية المتبقية كبيرة عندما تصل إلى الأرض. يمكننا بالتالي الاعتماد على ذروة 1000 واط / متر مربع في المناطق المعتدلة وحتى 1400 واط / متر مربع، وهناك مناطق في العالم أكثر تفضيلاً من غيرها من وجهة نظر أشعة الشمس عندما يكون الجو ملوثاً قليلاً بالغبار أو الماء.

في الواقع، يتضح أن سلوك مولدات الطاقة هذه عشوائي إلى حد ما، اعتماداً على موقع التشغيل. وبالتالي، إذا أخذنا في الاعتبار المناطق ذات المناخ الجاف والتي تتمتع بمعدل مرتفع من أشعة الشمس سنوياً، فيمكن بسهولة نمذجة التدفق الشمسي والتنبؤ به وفقاً لساعات اليوم وأيام السنة. غالباً ما يكون تشغيل المولدات الكهروضوئية قريباً من المقدرة.

وستبقى عقبة كبيرة بسبب الموقع الجغرافي لبلدنا، حيث يتكون 85% من أراضيها من مناطق قاحلة وشبه قاحلة تتميز بمساحة صحراوية كبيرة في جنوب البلاد. هذه المنطقة الصحراوية، المواتية لاستخدام الطاقة الشمسية، لديها تباين يومي كبير في درجة الحرارة المحيطة، وسرعة رياح رملية كبيرة خلال مواسم معينة من العام، وفترة سطوع الشمس المقدرة بـ 3500 ساعة / سنة. 2650 كيلو واط ساعة / م² / سنة (واحدة من أعلى المعدلات في العالم) .

تؤدي هذه المعلومات بالتالي إلى إجهاد حراري على مستوى مكونات الوحدة الكهروضوئية وهذا بعد التعرض الطويل في بيئة طبيعية.

على الرغم من تقدم سوق الخلايا الكهروضوئية، فقد أظهرت التجربة أنه بعد التعرض للبيئة الطبيعية، تُظهر الوحدات الكهروضوئية تدهوراً في الأداء الكهربائي للوحدة الكهروضوئية بسبب التأثيرات الخارجية على إنتاج الوحدة الكهروضوئية.

حالياً، تم اعتماد الوحدات الكهروضوئية للمناخات المعتدلة للهواء الحر دون مراعاة خصوصيات المناطق الصحراوية، وهذا هو السبب الذي دفعنا إلى تركيز دراستنا على أداء مصنع الكهروضوئية الموجود في جنوب الجزائر (محطة توليد الطاقة الكهروضوئية في زاوية كتنة أدرار بقدر 6 ميغاوات) .

الكلمات المفتاحية:

محطة الطاقة الكهروضوئية، الأداء، التدهور، منطقة صحراوية، الظروف المناخية.

Table de matière

Dédicaces

Remerciements

Résumé

Abstract

ملخص

Table de matière..... I

Liste des figures V

Liste des tableaux..... VIII

Lise des abréviations..... IX

Introduction générale 1

Chapitre I : État de l’art de l’énergie photovoltaïque

I.1. Introduction 4

I.2. Les énergies renouvelables sont-elles réellement une solution durable et respectueuse de l’environnement pour remplacer les énergies fossiles ? 5

I.3. Historique 6

I.4. Convertisseur photovoltaïque 7

I.4.1. Effet photovoltaïque 7

I.4.2. Les semi-conducteurs 8

I.5. La constitution d'un module photovoltaïque 9

I.6. Association des cellules..... 10

I.6.1. Association en série 10

I.6.2. Association en parallèle..... 11

I.6.3. Association hybride (en série et en parallèle)..... 12

I.7. Les modules photovoltaïques 13

I.8. Réaction d’une photopile éclairée 14

I.9. Les zones de caractéristique I(V) d’un générateur photovoltaïque 16

I.10. Les paramètres photovoltaïques 17

I.10.1. Le courant de court-circuit (I_{cc}) 17

I.10.2. Tension du circuit-ouvert (V_{co}) 18

I.10.3. Le facteur de forme (FF) 19

I.10.4. Le rendement (η)	20
I.11. Protection classique d'un GPV	20
I.12. Fonctionnement à puissance maximale	22
I.13. Puissance électrique d'une cellule PV	23
I.13.1. Puissance maximale.....	23
I.13.2. Notion de puissance crête et de température d'utilisation.....	24
I.13.2.1. Puissance STC	24
I.13.2.2. Puissance NOCT.....	24
I.14. Influence des différents paramètres sur la caractéristique I (V)	24
I.14.1. Influence de l'éclairement	24
I.14.2. Influence de la température	25
I.15. Les différents systèmes PV.....	26
I.15.1. Principe d'un système PV autonome.....	26
I.15.2. Système hybride	27
I.15.3. Le système raccordé au réseau	28
I.16. Avantages et Inconvénients de l'énergie photovoltaïque	29
I.16.1. Avantages	29
I.16.2. Inconvénients.....	29
I. 17. Conclusion	30
Chapitre II : Présentation de la centrale PV du sud d'Algérie (Adrar)	
II. 1. Introduction	32
II. 2. Présentation et aperçu du groupe Sonelgaz.....	32
II. 3. SKTM.....	33
II. 4. SKTM unité Zaouiet Kounta.....	34
II. 4.1. Composition et raccordement.....	35
II. 4.2. Disposition et Caractéristiques des composants de la centrale PV	37
II. 4.2.1. Structure porteuse / de fixation	37
II. 4.2.2. Panneaux photovoltaïques.....	38
II. 4.2.3. Boite de raccordement.....	39
II. 4.2.3.1. Principes de Fonctionnement	39
II. 4.2.3.2. Modèles et caractéristiques techniques	41

II. 4.2.4. Poste de conversion (Onduleur + Transformateur)	45
II. 4.2.4.2. Transformateur	47
II. 4.2.5. Poste d'évacuation MT.....	49
II. 4.2.6. Système de surveillance et de commande	51
II. 4.2.7. Stockage	52
II. 4.2.8. Maintenance et équipements.....	54
II. 3. Conclusion.....	55
Chapitre III : Analyse des performances réelles de la centrale PV en milieu désertique	
III. 1. Introduction.....	57
III. 2. Le développement de l'énergie solaire en Algérie	57
III. 3. L'exploitation de l'énergie solaire en Algérie	58
III. 3. Conditions environnementales de l'installation PV	63
III. 3.1. Analyse de la température et des rayonnements solaires sur le site	63
III. 3.2. Analyse de vitesse du vent mensuelle.....	64
III. 3.3. La puissance de la centrale solaire de Zaouiet Kounta	65
III. 4. Méthodologies de l'évaluation des performances.....	67
III. 4.1. Analyse des performances journalières	67
III. 5. Analyse de l'évolution des performances d'une centrale solaire PV sous conditions climatiques sévères	70
III. 5.1. Énergie générée.....	70
III. 5.2. Rendement final et le rendement de référence.....	71
III. 5.3. Indice de performance normalisé.....	72
III. 5.4. Rendement énergétique mensuelle	73
III. 5.5. Facteur de charge	74
III. 6. Conclusion	76
Conclusion générale.....	78
Bibliographie.....	81
Annexe	86

Liste des figures

Chapitre I : État de l'art de l'énergie photovoltaïque

Figure.I.1: Mix d'électricité d'origine renouvelable dans le monde et contribution des diverses technologies (2019).....	5
Figure.I.2: Structure d'une cellule photovoltaïque	8
Figure.I.3: Phénomène d'absorption dans un semi-conducteur.....	8
Figure.I.4: Ruban métallique d'une cellule.....	9
Figure.I.5: Encapsulation des cellules	9
Figure.I.6: Caractéristique courant tension de N_s cellule en série.....	11
Figure.I.7: Caractéristique courant tension de (N_p) cellules en parallèle.....	11
Figure.I.8: Caractéristique résultante d'un groupement hybride	12
Figure.I.9: Le passage d'une cellule à un champ photovoltaïque	13
Figure.I.10: Module photovoltaïque.....	13
Figure.I.11: différents types de modules PV.....	14
Figure.I.12: Caractéristique courant-tension d'une photopile éclairée et polarisée par une source extérieure.....	15
Figure.I.13: Circuit équivalent complet d'une cellule PV.....	16
Figure.I.14: Les différentes zones de Caractéristique I(V) d'un générateur Photovoltaïque.....	16
Figure.I.15: Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque	17
Figure.I.16: différents régimes selon la puissance d'éclairement.....	19
Figure.I.17: Schéma d'un module photovoltaïque.....	21
Figure.I.18: Effet de la diode by-pass sur la caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque.....	21
Figure.I.19: Evolution du PPM d'un module photovoltaïque d'une puissance crête de 80 W en fonction de la température (a) et de l'éclairement (b).....	22
Figure.I.20: Puissance maximale idéale et pratique.....	23
Figure.I.21: Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V et P-V d'une cellule solaire.....	25
Figure.I.22: Influence de la température sur la caractéristique I-V et P-V.....	26

Figure.I.23: Centrale photovoltaïque autonome.	27
Figure.I.24: Centrale photovoltaïque hybride.....	27
Figure.I.25: Le Système PV raccordée au réseau.....	28

Chapitre II : Présentation de la centrale PV de sud d'Algérie (Adrar

Figure.II.1: SKTM vue par Google Map	35
Figure.II.2: Système électrique, schéma unifilaire général, site de Zaouiet Kounta (06 MWc). 36	
Figure.II.3: Schéma de la centrale de production d'électricité PV	36
Figure.II.4: Montage des supports.....	37
Figure.II.5: Module photovoltaïque.	38
Figure.II.6: Schéma de câblage Boîtes de jonction.	39
Figure.II.7: Schéma de câblage Boîtes de parallèle.	40
Figure.II.8: Schéma de câblage Boîtes générale.	41
Figure.II.9: Boîtes de jonction.....	41
Figure.II.10: Boîtes de parallèle.	43
Figure.II.11: Boîtes générale.....	44
Figure.II.12: Local de l'onduleur (Shelter).	46
Figure.II.13: L'intérieur de l'onduleur.	46
Figure.II.14: Local du transformateur.	48
Figure.II.15: L'intérieur de transformateur.	48
Figure.II.16: Schéma de poste d'évacuation.	50
Figure.II.17: Schéma de cellule de la centrale Zaouiet Kounta.	50
Figure.II.18: Interface principale de contrôle.....	52
Figure.II.19: Groupe diesel.	52
Figure.II.20: Batteries utilisés.	53
Figure.II.21: Station de traitement d'eau et équipements de nettoyage.	54

Chapitre III : Analyse des performances réelles de la centrale PV en milieu désertique

Figure.III.1: Nouvel Atlas solaire du monde	58
Figure.III.2: Programme de développement des énergies renouvelables en Algérie à l'horizon 2030.....	60

Figure.III.3: Température ambiante moyenne et le rayonnement solaire moyen sur le site de la centrale solaire.	64
Figure.III.4: Vitesse du vent moyenne mensuelle.....	65
Figure.III.5: Puissance moyenne mesuré pour chaque mois pendant quatre ans sur le site.	66
Figure.III.6: Energie mensuelle générée.	71
Figure.III.7: Rendement final (Y_F), et Rendement de référence (Y_r).	72
Figure.III.8: Rapport de performance AC.....	73
Figure.III.9: Rendement mensuelle du système.	74
Figure.III.10: Facteur de charge (2017 à 2020).	75

Liste des tableaux

Chapitre I : État de l'art de l'énergie photovoltaïque

Tableau.I.1: Capacité de production d'électricité (en GW) à base de ressources renouvelables sur les cinq dernières années..... 4

Chapitre II : Présentation de la centrale PV du sud d'Algérie (Adrar

Tableau.II.1: Chiffres clés A fin décembre 2018 33

Tableau.II.2: Caractéristiques électriques des panneaux en silicium poly-cristallin. 38

Tableau.II.3: Caractéristiques électriques de la boîte jonction. 42

Tableau.II.4: Caractéristiques électriques de la boîte parallèle..... 43

Tableau.II.5: Caractéristiques électriques de la boîte générale..... 44

Tableau.II.6: Les Caractéristiques principales de l'onduleur photovoltaïque de SG500MX. 47

Tableau.II.7: Caractéristiques électriques du transformateur principal. 48

Tableau.II.8: Caractéristiques générales de cellules SF6..... 50

Tableau.II.9: Les spécifications techniques de générateur diesel. 53

Chapitre III : Analyse des performances réelles de la centrale PV en milieu désertique

Tableau.III.1: Potentiel solaire en Algérie..... 58

Tableau.III.2: Projets réalisés en énergie solaire en Algérie 62

Liste des abréviations

IRENA	l'Agence Internationale pour les Energies Renouvelables.
PV	Photovoltaïque.
V_{oc}	Tension de circuit ouvert.
I_{cc}	Courant de court- circuit.
EVA	Éthylène Acétate de Vinyle.
GPV	Générateur photovoltaïque.
PVF ou $-(CH_2CHF)_n-$	Polyvinyl fluoride.
STC	Standard Test Conditions.
V_{Bo}	Tension d'avalanche.
I(V)	Courant-tension.
FF	Facteur de forme.
η	Le rendement.
PPM	Puissance maximal.
P&O	Perturbation & Observation.
TUC ou NOCT	La température d'utilisation de cellule
Pm	Puissance maximale. (W)
I_m	Courant du point du fonctionnement. (A)
V_m	Tension du point du fonctionnement. (V)
I	Le courant électrique. (A)
I_S	Le courant de saturation. (A)
V	La tension électrique. (V)
P	La zone P de la jonction.
N	La zone N de la jonction.
K	La constante de Boltzmann.
T	La température absolue. (K)
E	L'éclairement. (W/m ²)
I_D	Courant de diode. (A)
I_{ph}	Le photo-courant. (A)
R_S	La résistance série. (Ω)

Liste des abréviations

R_{sh}	La résistance shunt. (Ω)
q	La charge électrique d'un électron en valeur absolue.
P_{in}	la puissance lumineuse incidente.
SKTM	Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida.
LENR	Laboratoire des Energies Nouvelles et Renouvelables.
CDER	Centre de Développement des Energies Renouvelables (Algérie).
APRUE	Agence de promotion et de rationalisation de l'utilisation de l'énergie.
Y_R	Rendement de référence. (h)
Y_F	Rendement final. (h/j)
FC	Facteur de charge. (%)
PR	Rapport de performance. (%)
η_{sys}	Rendement du système PV. (%)

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie est l'un des moteurs de développement des sociétés, elle est aussi le pilier de l'économie moderne. Elle est l'étincelle qui permet l'accomplissement de toute activité humaine. Ses sources se sont diversifiées au cours du temps afin de satisfaire les besoins toujours en augmentation de l'industrie et des consommateurs.

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est une énergie durable pouvant être une énergie alternative aux énergies fossiles. A cet effet, elle est considérée par les chercheurs dans le but de satisfaire les besoins futurs en matière d'énergie. Actuellement, la technologie de fabrication de modules PV est énormément améliorée en termes de qualité et du coût de fabrication.

Ces atouts ont sollicité l'intérêt de la classe politique ainsi que de la communauté scientifique à lancer et financer un nombre important de travaux de recherche dans différents axes afin de promouvoir ce domaine et de créer une nouvelle richesse. Ce développement se concrétise par la réduction du coût de fabrication des modules PV ainsi que les travaux de recherche qui ont permis de promouvoir l'électronique de puissance. Par conséquent, la mise en œuvre des installations PV, plus particulièrement celles de petites puissances raccordées au réseau Basse Tension (BT) sont apparues progressivement.

De toutes les énergies renouvelables, le solaire photovoltaïque présente un intérêt particulier en Algérie, puisqu'elle dispose d'un gisement solaire très important. La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MWc par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030.

Actuellement on compte 23 centrales photovoltaïques sur le territoire national. Parmi ces centrales photovoltaïques on distingue la centrale photovoltaïque de Zaouiet Kounta (Adrar). Le but de notre étude est d'étudier cette centrale PV de 6MWc en présentant ces différents composants et son principe de fonctionnement, d'évaluer les performances du champ photovoltaïque Zaouiet Kounta dont la capacité est de 6 MWc selon les normes standardisées

(Commission Electrotechnique Internationale) CEI 61724 et en fin utiliser une interface graphique de logiciel Excel qui permettra d'analyser ces performances rapidement.

En effet, il existe plusieurs types de panneaux solaires photovoltaïques générateurs d'électricité. Les différences se situent dans le rendement, le prix, la mise en œuvre, l'aspect extérieur, ainsi que dans la matière semi conductrice utilisée. Les cellules solaires à base de silicium se distinguent en fonction de leur application, leur performance et du processus de fabrication des couches de silicium. Dans la centrale photovoltaïque Zaouiet Kounta, le champ solaire occupe 24552 panneaux photovoltaïques (YINGLI SOLAR-silicium poly-cristallin) installés.

Le présent travail est organisé comme suit :

Le premier chapitre donne globalement un aperçu général des résultats statistiques de la contribution des énergies renouvelables dans la production énergétique et leurs avantages sur l'économie et l'environnement. Il discute aussi spécialement l'effet photovoltaïque et son développement en introduisant aussi les composants d'un module photovoltaïque et son association. On explore aussi dans ce chapitre, l'activité de ces modules en fonction des paramètres internes et externes influents sur les photopiles. On a fini ce chapitre par l'énumération des avantages et des inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Le deuxième chapitre commence par une introduction de la Sonelgaz qui représente le gérant du réseau électrique, puis la SKTM (Unité d'Adrar) qui représente la centrale PV (installation décentralisée), sa composition et raccordement, Disposition et Caractéristiques de ses composants.

Le troisième chapitre traite l'analyse des performances du champ photovoltaïque Zaouiet Kounta d'une puissance de 6 MWc raccordée au réseau national durant les années (2017 à 2020). Les paramètres de performance de cette analyse ont été spécifiés par l'Agence Internationale de l'Energie (IEA) et sont décrits dans les normes standardisées (Commission Electrotechnique Internationale) CEI 61724. Ce chapitre est divisé en deux parties, la première traite les conditions environnementales de l'installation PV, et les méthodologies d'analyse de performance. Et la deuxième, l'analyse de l'évolution des performances d'une centrale solaire PV sous conditions climatiques sévères du site de Zaouiet Kounta.

Chapitre I :
État de l'art de l'énergie
photovoltaïque

I.1. Introduction

Selon le rapport annuel «Statistiques de capacité renouvelable 2020» [1] de l'Agence Internationale pour les Energies Renouvelables (IRENA), un résumé de l'évolution des capacités cumulées de production d'électricités à base des principales ressources renouvelables dans le monde sur les cinq dernières années (2015-2019), pour chacune de ces filières, est donné dans le tableau I.1. Une brève analyse des statistiques ainsi présentées, permet déjà de dégager les premiers éléments qui pourraient aider à orienter objectivement les choix en matière de ressources renouvelables à développer dans le cadre d'une transition énergétique d'envergure.

Ainsi, selon les capacités cumulées installées à ce jour, il apparaît que la contribution de l'hydroélectricité reste encore dominante (47%) quant à la génération d'électricité renouvelable dans le monde. Cependant, il faut remarquer que cette part qui était de 60% il y a seulement cinq ans, a régulièrement régressé (Figure I.1) pour laisser place principalement à l'électricité éolienne (23.5%) et solaire photovoltaïque (22.8%) en 2019 [2]. Quant à la contribution de la biomasse et la géothermie à la production d'électricité renouvelable, elle reste faible (5.5% en 2019) et présente une évolution très limitée.

Source renouvelable primaire	2015	2016	2017	2018	2019
Hydro-électricité	1099	1129	1156	1177	1189
Eolien (On et Offshore)	416	467	514	564	623
Solaire (CSP + PV)	222	296	389	489	586
Biomasse	97	105	111	117	124
Géothermie	12	12	13	14	15
Total	1846	2009	2183	2361	2537

Tableau.I.1: Capacité de production d'électricité (en GW) à base de ressources renouvelables sur les cinq dernières années.

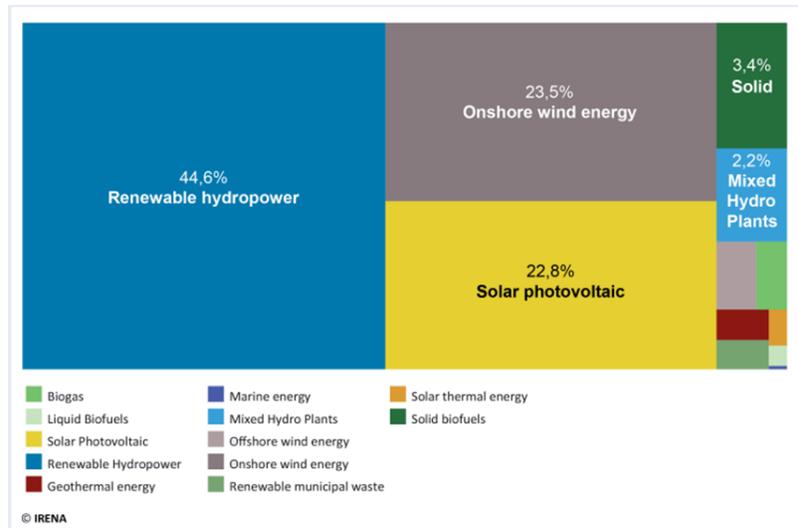


Figure.I.1 : Mix d'électricité d'origine renouvelable dans le monde et contribution des diverses technologies (2019).

Comme première conclusion, on peut retenir que seules l'hydroélectricité, l'éolien et le solaire peuvent à priori concourir à une production massive d'électricité et permettre ainsi une transition énergétique avec des objectifs ambitieux quant à la contribution des énergies renouvelables. Cependant, il est clair que les perspectives de développements futurs qu'offre chacune de ces filières, dépendent essentiellement des projections faites à moyen et long termes en matière d'innovations techniques dans le domaine en question, des critères de performance économique établis et enfin des effets induits sur l'environnement. C'est dans cette optique que l'analyse suivante sur les tendances qui se dessinent par technologie est menée afin d'affiner encore plus les données pouvant mieux éclairer la situation et aider ainsi à optimiser les choix ultérieurs quant à une éventuelle stratégie de développement effectif des énergies renouvelables dans le pays.

I.2. Les énergies renouvelables sont-elles réellement une solution durable et respectueuse de l'environnement pour remplacer les énergies fossiles ?

Alors non, c'est vrai, comme nous venons de le voir, pour l'instant ces systèmes d'exploitation ne sont pas parfaitement respectueux de l'environnement, et il semble évident qu'ils ne le seront de toute façon jamais parfaitement. Pourtant, les énergies renouvelables sont clairement la solution la plus adaptée face aux problèmes environnementaux et énergétiques auxquels nous sommes confrontés. Et c'est en les réunissant et en les développant toutes

ensemble, qu'elles pourront peut-être un jour nous permettre de remplacer les énergies fossiles, et d'atténuer peu à peu l'effet de serre. Quoiqu'il en soit, les techniques d'exploitation que nous employons actuellement s'améliorent de jour en jour, elles sont de plus en plus « propres » tout en étant de plus en plus performantes. Il s'agit, dans l'ensemble, de technologies récentes, et on ne peut qu'espérer qu'elles connaîtront le même progrès et le même développement que concurent les énergies fossiles depuis le début de leur exploitation il y a plus de deux siècles...

Dans le cadre de sa politique de développement durable, l'Algérie s'est fixé pour objectif d'obtenir de 50% de sa consommation d'électricité à partir d'énergies renouvelables... Cet objectif ne sera probablement pas atteint, mais l'important est que peu à peu tout le monde prenne conscience de l'enjeu environnemental auquel nous sommes confrontés. Nous devons à tout prix réduire nos émissions de gaz à effet de serre, nuisibles pour l'équilibre naturel de notre planète. Parallèlement, nous devons développer de nouveaux moyens de production d'énergie, devenue indispensable à notre vie, pour pallier l'épuisement des réserves en pétrole et en gaz. Nous devons aussi, dès aujourd'hui, apprendre à limiter notre consommation d'énergie afin de ne pas la gaspiller. Il faut que nous fassions passer nos intérêts personnels, ainsi que les intérêts locaux derrière les enjeux planétaires. L'engouement récent pour les énergies renouvelables n'est pas un simple phénomène de société passager ; nous en avons réellement besoin, elles sont d'ores et déjà bien présentes, et les moyens que nous utilisons pour les exploiter n'attendent qu'à être développés et améliorés [3].

I.3. Historique

Le physicien français Edmond Becquerel décrivit le premier l'effet photovoltaïque en 1839 et Einstein en expliqua les mécanismes en 1912, mais cela resta une curiosité scientifique de laboratoire jusque dans les années 50. Becquerel découvrit que certains matériaux délivrent une petite quantité d'électricité quand on les expose à la lumière.

L'effet fut étudié dans les solides tels que le sélénium par Heinrich Hertz dès les années 1870. Avec des rendements de l'ordre de 1%, le sélénium fut rapidement adopté par les photographes comme luxmètre [4].

De rapides progrès furent obtenus dès les années 1950 par les équipes de Bell Laboratories qui fabriquèrent la première cellule au silicium cristallin de rendement 4% à partir

du procédé de tirage Czochralski. L'industrie des semi-conducteurs contribua largement au développement des cellules solaires.

La taille des cellules PV accompagna la progression de la dimension des wafers de l'industrie des circuits intégrés, de 5,08 cm dans le début des années 70, à 7,62 cm à la fin des années 70, et à 10,16 cm au début des années 80, avant de s'émanciper par la découverte de la croissance de lingots multi cristallins parallélépipédiques qui donnèrent des plaquettes carrées de 10 cm de côté et qui atteignent aujourd'hui couramment 12,5 à 15 cm de côté [4].

I.4. Convertisseur photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque (PV) est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur qui transforme l'énergie lumineuse absorbée en courant électrique [5]. Le principe de fonctionnement est basé sur les propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Le choix des matériaux utilisés pour la construction des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques des électrons qui sont susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire. Une fois libérée, le déplacement de ces électrons dans le matériau forme un courant électrique de type continu, qui donne naissance à une force électromotrice aux bornes de la cellule. Ce phénomène physique est appelé effet photovoltaïque.

I.4.1. Effet photovoltaïque

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{oc}). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{cc}) et dépend fortement du niveau d'éclairement [6].

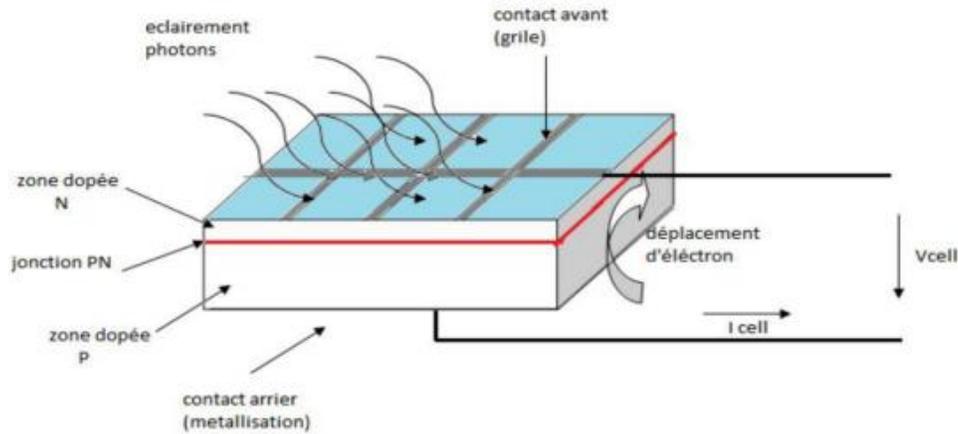


Figure.I.2 : Structure d'une cellule photovoltaïque [5].

I.4.2. Les semi-conducteurs

L'absorption de la lumière dans les semi-conducteurs peut être décrite de manière quantique. Un photon incident d'énergie égale à la largeur de bande interdite du matériau est absorbé. L'énergie de ce photon est transférée à un électron de la bande de valence qui passe dans la bande de conduction, laissant dans la bande de valence un trou (chargé positivement), voir (figure I.3). Si l'énergie du photon incident est inférieure à la largeur de la bande interdite du matériau, le photon le traverse sans être absorbé. Si l'énergie du photon est supérieur à la largeur de bande interdite du matériau, l'excès d'énergie (par rapport à la largeur de la bande interdite du matériau) donné à l'électron est converti en chaleur et est donc perdu (temps de relaxation très rapide, de l'ordre de la femto-seconde), c'est la thermalisation des porteurs. Les photons absorbés créent une paire électron-trou [7].

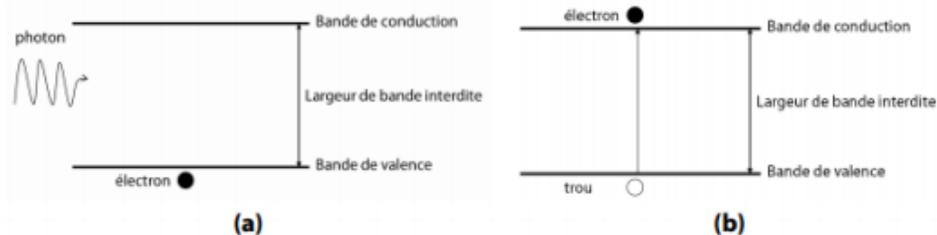


Figure.I.3 : Phénomène d'absorption dans un semi-conducteur.

(a) Un photon incident pénètre dans le semi-conducteur. (b) Son énergie est suffisante pour extraire un électron libre de la bande de valence et le transférer à la bande de conduction.

I.5. La constitution d'un module photovoltaïque

Câble des cellules photovoltaïques : les cellules sont connectées entre elles par un fin ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+) (figure I.4).



Figure.I.4 : Ruban métallique d'une cellule.

Les cellules sont encapsulées sous vide entre deux films thermoplastiques transparents (EVA : Éthylène Acétate de Vinyle). Le plus souvent, il y a présence d'un cadre en aluminium avec joint périphérique pour permettre la dilatation. Un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière. La face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLER.

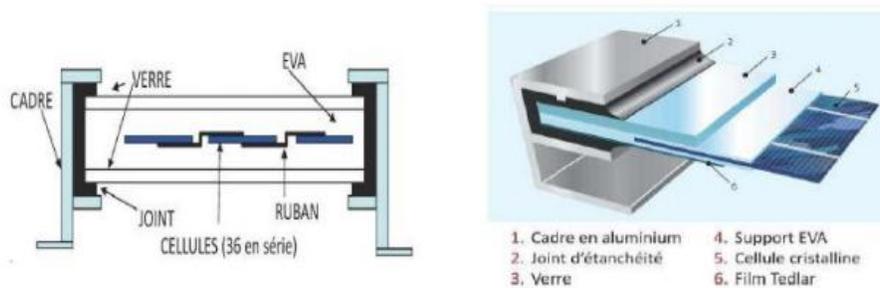


Figure.I.5 : Encapsulation des cellules [8].

La boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass. Les deux câbles unipolaires sont raccordés.

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule), ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et

souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour N_s cellules en série, constituant des branches elles même N_p en parallèles, la puissance disponible en série du générateur PV est donnée par :

$$P_{PV} = N_s \cdot V_{PV} \cdot N_p \cdot I_{PV} \quad (I.1)$$

Avec :

P_{PV} : La puissance disponible en sortie du GPV.

V_{PV} : La tension à la sortie du GPV.

I_{PV} : Le courant de sortie du GPV.

I.6. Association des cellules

I.6.1. Association en série

Une association de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, figure I.6. L'équation (I.2) résume les caractéristiques électriques d'une association série de ns cellules [9].

$$V_{coNs} = V_{co} \times N_s \quad (I.2)$$

$$I_{ccNs} = I_{cc} \quad (I.3)$$

Avec :

V_{coNs} : La somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.

I_{ccNs} : Courant de court-circuit de N_s cellules en série.

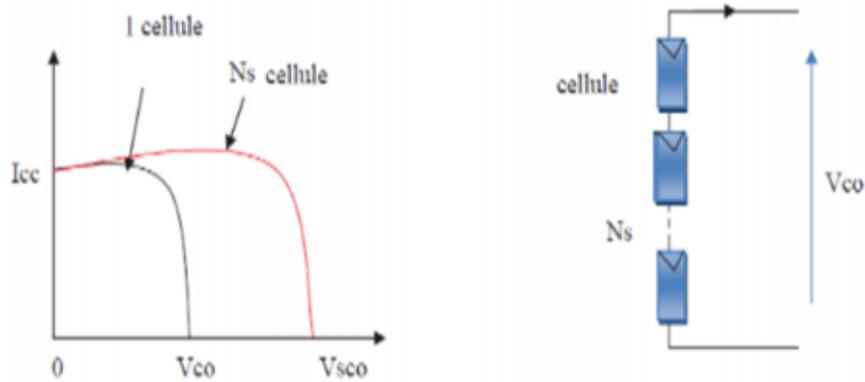


Figure.I.6 : Caractéristique courant tension de N_s cellule en série.

I.6.2. Association en parallèle

Une association parallèle de (N_p) cellule (figure I.7) est possible et permet d'augmenter le courant de sortie du générateur. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [10].

$$V_{coNp} = N_p \times I_{cc} \tag{I.4}$$

$$V_{ccNp} = V_{co} \tag{I.5}$$

I_{ccNp} : La somme des courants de court circuit de (N_p) cellule en parallèle.

V_{ccNp} : Tension de circuit ouvert de (N_p) cellule en parallèle.

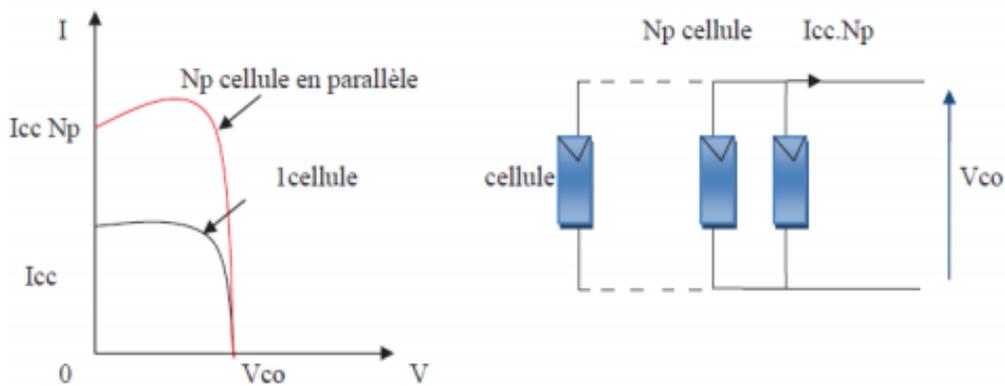


Figure.I.7 : Caractéristique courant tension de (N_p) cellules en parallèle.

I.6.3. Association hybride (en série et en parallèle)

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations :

$$I_{cc} = N_p \times I_{cc} \quad (I.6)$$

$$V_{co} = N_s \times V_{co} \quad (I.7)$$

N_p : Nombre des cellules en parallèle.

N_s : Nombre des cellules en série.

La (figure I.8) montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en N_s série et en parallèle N_p , cellules identiques [11].

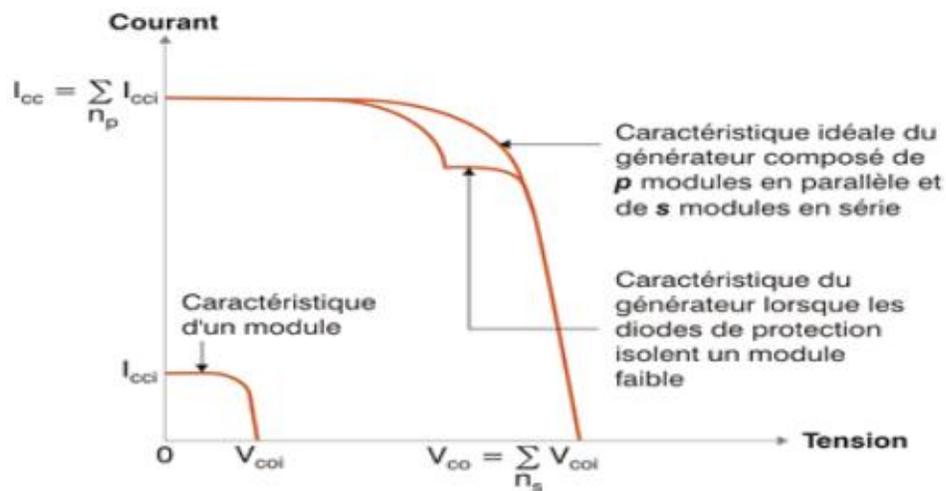


Figure.I.8 : Caractéristique résultante d'un groupement hybride [13].

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit I_{cc} et de la tension à vide V_{co} sont plus ou moins importantes (figure I.8). La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules à une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes) [11].

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient

qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée.



Figure.I.9 : Le passage d'une cellule à un champ photovoltaïque [12].

I.7. Les modules photovoltaïques

Les cellules cristallines telles quelles ne permettent pas d'utiliser l'énergie photovoltaïque de manière efficace et pérenne. En effet, les cellules ne développent qu'une puissance relativement faible (de l'ordre de 3 W) et sont extrêmement fragiles et sensibles aux éléments extérieurs (corrosion). Pour utiliser l'énergie PV à grande échelle, les cellules sont connectées entre elles en série pour augmenter la tension et en parallèle pour augmenter le courant. Elles sont ensuite encapsulées entre une feuille de verre et une feuille de Tedlar (Polyvinyl fluoride (PVF) ou $-(CH_2CHF)_n-$) à l'aide d'un polymère (éthylène vinyl acetate EVA) [13].



Figure.I.10 : Module photovoltaïque.

Les modules les plus courants mesurent 1580 x 808 mm et contiennent 72 cellules pour une puissance de 200 Wc. Il existe des modules de tailles différentes allant de 1 cellule (100 mm x 100 mm) jusqu'à des modèles pour intégration en façade de 2631 x 1645 (117 kg pour 580 Wc). Actuellement, des modules de 300 Wc et plus se développent sur le marché.

Les cellules d'un module typique sont séparées en plusieurs segments d'environ 18 cellules qui sont protégées par des diodes. Si une de ces cellules venait à être ombragée, la diode se déclencherait de manière à protéger les cellules de cette partie de module.



Figure.I.11 : différents types de modules PV.

Enfin, Chaque module est testé en bout de chaîne sous des conditions normalisées : Standard Test Conditions (STC) : éclairement : 1000 W/m², t° cellules : 25°, Air Mass1 : 1,5.

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques.
- Protection mécanique.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur [13].

I.8. Réaction d'une photopile éclairée

La caractéristique complète d'une photopile éclairée est illustrée par la figure I.12 dans trois quadrants. On constate que dans le 1er quadrant, la photopile fonctionne comme génératrice avec une tension et puissance positives. Dans ce cas la photopile fonctionne normalement et ne court aucun risque. On constate aussi que dans le quadrant 2, elle fonctionne comme réceptrice d'une faible impédance d'une façon similaire au fonctionnement d'une diode polarisée en direct. Cela arrive quand la tension à la borne de la cellule en question est produite par le circuit extérieur et quand sa valeur dépasse celle du V_{co} , la photopile fonctionne comme

réceptrice d'une forte impédance d'une façon similaire au fonctionnement d'une diode polarisée en inverse quand le courant traversant la cellule est venant du circuit extérieur et quand sa valeur dépasse le courant de court-circuit. Dans ce cas, dû à la résistance série R_s , la jonction n'est polarisée en inverse qu'à partir d'un point «A» où la puissance est égale à « $-I \times R_s$ ». Dans les deux cas où la cellule est en état récepteur (2^{ème} et 4^{ème} quadrants), elle doit être proscrite dû au risque affronté des réchauffements locaux (hot-stop).

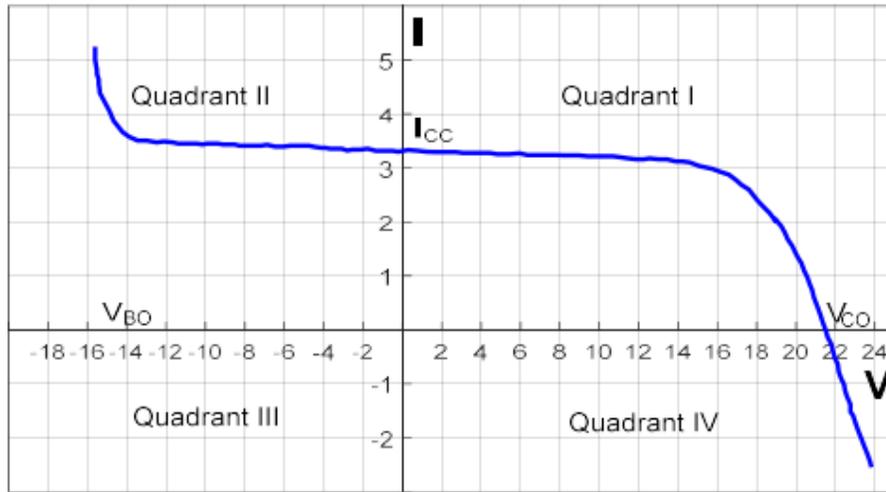


Figure.I.12 : Caractéristique courant-tension d'une photopile éclairée et polarisée par une source extérieure.

En fonction du matériau employé, la température et l'état de vieillissement la cellule aura typiquement une tension de circuit ouvert (V_{oc}) estimée entre 0,3 Volts et 0,7 Volts. Et selon l'éclairement, les technologies et les tailles (de 5 à 8 A pour le silicium cristallin), le courant de court-circuit (I_{cc}) varie différemment dans plusieurs conditions. La modélisation schématique d'une cellule PV est représentée dans la figure I.13. La modélisation dans le premier et le quatrième quadrant est illustré dans la figure I.13 (a). Vous pouvez constater dans la figure I.13 (b) que pour simuler la caractéristique de la cellule PV dans le deuxième quadrant, on a ajouté en parallèle une quatrième branche qui se constitue d'une diode montée en série, un générateur de tension (V_{Bo} tension d'avalanche). Cela a été effectué pour réaliser une simulation du fonctionnement d'une cellule PV est polarisée en inverse [14].

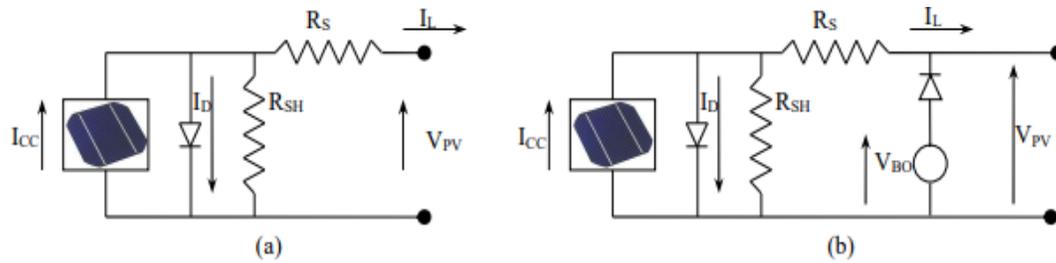


Figure.I.13 : Circuit équivalent complet d'une cellule PV.

I.9. Les zones de caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température fixée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe $I = f(V)$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (I.14) représente les trois zones essentielles de cette caractéristique : [15]

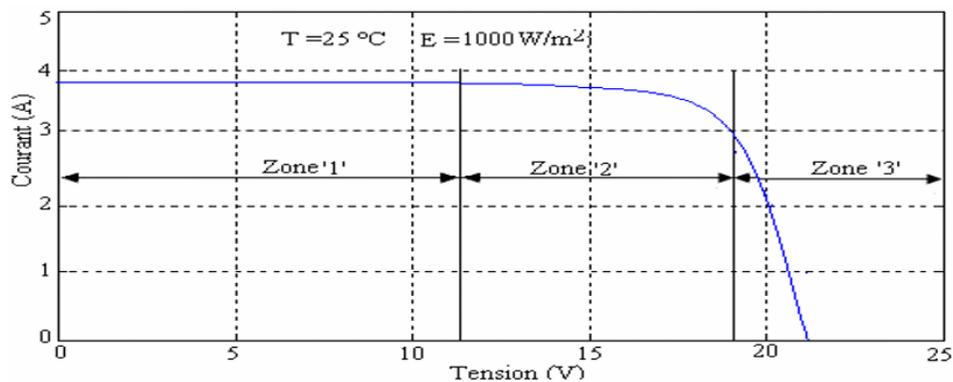


Figure.I.14 : Les différentes zones de Caractéristique I(V) d'un générateur Photovoltaïque.

- La zone (1) : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- La zone (3) : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.
- La zone (2) : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur.

I.10. Les paramètres photovoltaïques

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique $I(V)$. La figure I.15 représente une caractéristique courant-tension $I(V)$ dans le noir et sous illumination typique d'une cellule photovoltaïque à jonction PN. Le tracé de cette courbe permet d'accéder à bon nombre de paramètres physiques caractéristiques du composant. Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension à circuit ouvert (V_{co}) et le facteur de forme (FF) du composant.

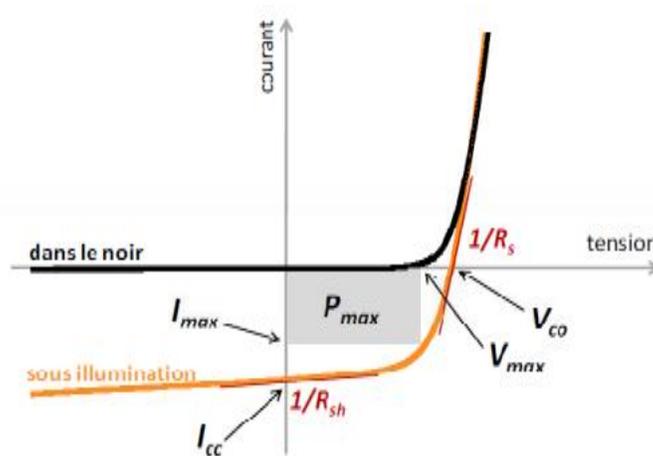


Figure.I.15 : Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque [16].

I.10.1. Le courant de court-circuit (I_{cc})

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule, de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue [17].

Où $V=0$ (Pratiquement $I_{cc} = I_{ph}$).

I.10.2. Tension du circuit-ouvert (V_{co})

Comme son nom indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule [18].

$$V_{co} = \frac{KT_C}{q} \log \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \quad (\text{I. 8})$$

Avec :

$\frac{KT_C}{q}$: représentant la potentiel thermodynamique.

K : La constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$).

q : La charge d'un électron, $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

T_C : La température absolue.

I_s : Le courant de saturation.

I_{ph} : Le courant photonique.

Deux régimes peuvent être observés suivant le degré d'éclairement figure I.16 :

▪ Régime des faibles flux lumineux : dans ce cas, $I_{ph} \ll I_s$, ce qui permet d'écrire :

$$\log \frac{I_{ph}}{I_s} = \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (\text{I. 9})$$

D'où :

$$V_{co} \approx \frac{KT_C}{q} \cdot \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (\text{I. 10})$$

C'est la zone de comportement linéaire de la cellule. La formule précédente peut s'écrire aussi : $V_{co} = R_0 \cdot I_{ph}$, en posant $R_0 = \frac{KTc}{q \cdot I_s}$: R_0 est la résistance interne de la diode en polarisation externe nulle (circuit ouvert) est sous faible flux lumineux.

- Régime des flux lumineux suffisamment intenses pour que $I_{ph} \gg I_s$, soit :

$$\frac{I_{ph}}{I_s} \gg 1.$$

D'où :

$$V_{co} = \frac{KTc}{q} \log \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (I.11)$$

C'est le domaine du comportement logarithmique.

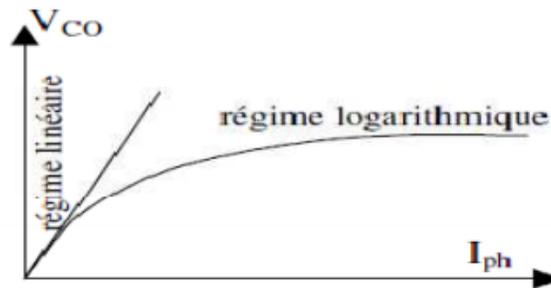


Figure.I.16 : différents régimes selon la puissance d'éclairage.

Il est important de remarquer que cette tension augmente avec le log d' I_{ph} , donc avec le log de l'illumination. En revanche, elle décroît avec la température, malgré le terme $\frac{KTc}{q}$. En effet, le courant de saturation, I_s dépend de la surface de la diode (donc de la cellule) et des caractéristiques de la jonction : il varie exponentiellement avec la température et cette dépendance en température compense largement le terme $\frac{KTc}{q}$. Donc la tension de circuit ouvert V_{co} baisse avec la température, ce qui est important dans le dimensionnement des systèmes.

I.10.3. Le facteur de forme (FF)

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV :

C'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \times V_{oc}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [18]. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (I.12)$$

I.10.4. Le rendement (η)

Le rendement, η des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{in} .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \quad (I.13)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule [19].

I.11. Protection classique d'un GPV

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en séries et en panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles, figure I.17.

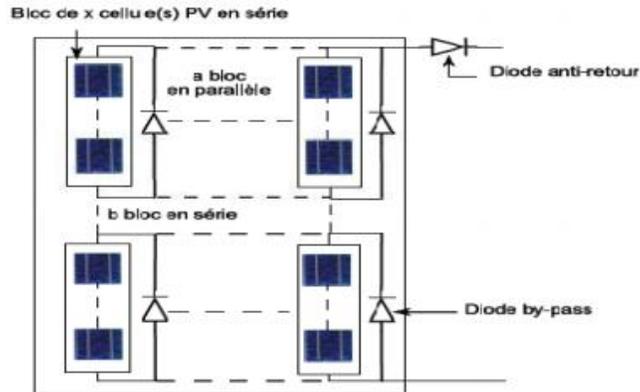


Figure.I.17 : Schéma d'un module photovoltaïque.

La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.

Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées.

La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur, comme illustré sur la figure I.18, par la perte d'une partie de la protection d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance [20].

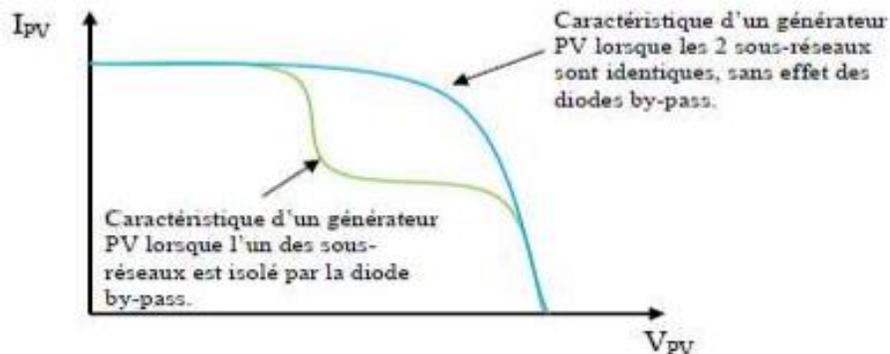


Figure.I.18 : Effet de la diode by-pass sur la caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque.

I.12. Fonctionnement à puissance maximale

La caractéristique électrique $P(V)$ de ce type de GPV s'avère proche de celle d'une cellule PV aux rapports de proportionnalités près. Ces rapports dépendent du nombre de cellules connectées en série et du nombre de branches de cellules associées en parallèle. Cette caractéristique est également non linéaire et présente un point de puissance maximale (PPM) caractérisé par un courant et une tension nommés respectivement, comme pour la cellule, I_{max} et V_{max} . Sur la figure I.19, nous pouvons observer l'évolution du PPM d'un module commercial typique de 80 W crêtes constitué de 36 cellules monocristallines en série, en fonction de la température et de l'éclairement.

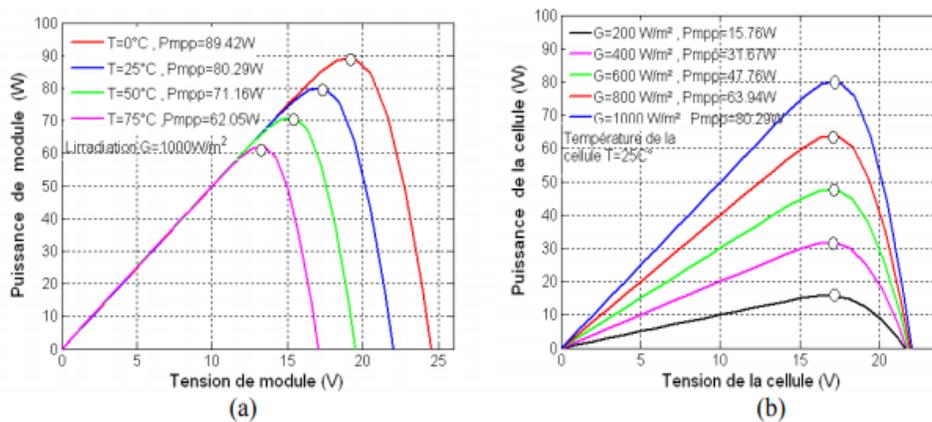


Figure.I.19 : Evolution du PPM d'un module photovoltaïque d'une puissance crête de 80 W en fonction de la température (a) et de l'éclairement (b).

Dans un système électrique comprenant une source et une charge, la recherche du point de fonctionnement optimal par des techniques d'optimisation représente ce qui est le plus important. Dans le cas du photovoltaïque, cette démarche est plus complexe du fait que la caractéristique des cellules dépend fortement de l'ensoleillement et de la température ambiante, entre autres. Il faut trouver un dispositif permettant de fonctionner à tout moment suivant le point de fonctionnement optimal. Différentes méthodes de maximisation de puissance classées en deux catégories : les méthodes indirectes, utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement...) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum et les méthodes directes, sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la

variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturba & Observa (P&O), l'incrément de conductance.

I.13. Puissance électrique d'une cellule PV

La puissance électrique délivrée par une cellule photovoltaïque est le produit de la tension par le courant qu'elle génère. Ces deux grandeurs, courant et tension, dépendent à la fois des propriétés électriques de la cellule mais aussi de la charge électrique à ses bornes.

I.13.1. Puissance maximale

La puissance maximale P_{max} idéale d'une cellule solaire idéale est égale à la multiplication de la tension de circuit ouvert V_{co} par le courant de court-circuit I_{cc} (la surface du rectangle OABC):

$$P_{max} = V_{co} \times I_{cc} \quad (I.14)$$

P_{max} (W): La puissance fournie par la cellule PV.

V_{co} (V): La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.

I_{cc} (A): L'intensité de court-circuit débitée par la cellule PV.

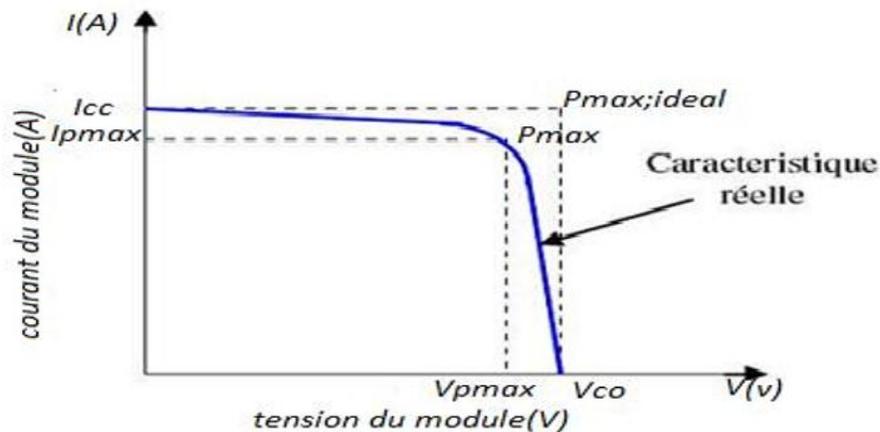


Figure.I.20 : Puissance maximale idéale et pratique.

I.13.2. Notion de puissance crête et de température d'utilisation

I.13.2.1. Puissance STC

La puissance crête (STC) d'un module photovoltaïque s'exprime en Watt-crête : c'est la puissance qu'il peut fournir s'il est fermé sur sa charge optimale et soumis à une irradiance de 1000 W/m² (spectre AM 1.5) alors que la température des cellules est de 25 °C.

I.13.2.2. Puissance NOCT

La température d'utilisation de cellule (TUC en français et NOCT en anglais), est la température qu'atteint une cellule encapsulée dans un module soumis à une irradiance de 800 W/m², à une température ambiante de 20 °C, une inclinaison de 45 ° et avec un vent de 1 m/s dans les conditions de circuit ouvert.

En première approximation, la température d'une photopile est directement proportionnelle à l'irradiance et peut être obtenue par la formule empirique suivante :

$$T_c = T_a + \frac{E_m}{800} (TUC - 20) \quad (I. 15)$$

Où E_m est l'irradiance exprimée en W/m².

Il existe une méthode simple pour mesurer la température d'utilisation de cellule grâce à l'extrême sensibilité de la tension de circuit ouvert aux variations de température.

La puissance NOCT (TUC) d'un module photovoltaïque s'exprime en Watt: c'est la puissance qu'il peut fournir s'il est fermé sur sa charge optimale et soumis à une irradiance de 800 W/m² (spectre AM 1.5) alors que la température ambiante est de 20 °C, son inclinaison de 45 °, ses deux faces libres, un vent de face de 1 m/s dans les conditions de circuit ouvert [21].

I.14. Influence des différents paramètres sur la caractéristique I (V)

I.14.1. Influence de l'éclairement

Une baisse de l'éclairement provoque une diminution de la création de paires électron/trou avec un courant changé à l'obscurité. Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction du photo-courant et du courant de diode à l'obscurité, il y a une baisse du courant solaire I_{cc} proportionnelle à la variation de l'éclairement accompagnée d'une très légère

diminution de la tension V_m et donc un décalage du point P_m du panneau solaire vers les puissances inférieures.

Les graphes suivants représentent les caractéristiques $P(V)$ et $I(V)$ respectivement d'un générateur photovoltaïque pour une température constante ($T=25\text{ °C}$) et un ensoleillement variable.

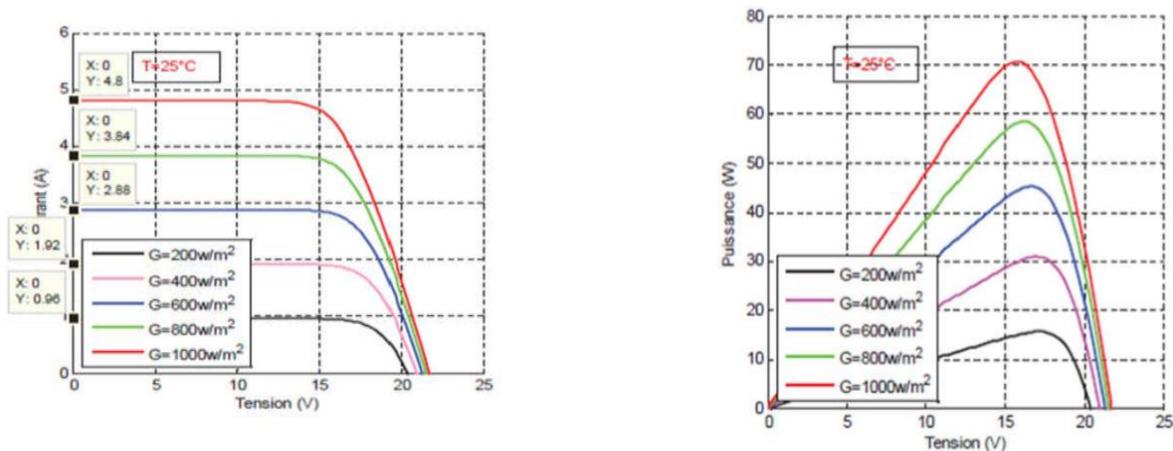


Figure.I.21 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V et P-V d'une cellule solaire.

Il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement. Ceci implique donc que :

- La puissance optimale de la cellule (P_m) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension [22].

I.14.2. Influence de la température

La figure (I.22) présente respectivement des courbes $P(V)$ et $I(V)$ pour différentes températures de fonctionnement du module photovoltaïque à une irradiation constante. Nous remarquons 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. On en déduit donc que le panneau peut fournir une tension correcte, même à faible éclairage, par conséquent la puissance extractible diminue. Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la

température de la cellule au-dessus de 25 °C. Enfin, il est important de noter que, lorsque l'éclairement est plus faible que 100 W/m^2 la tension du panneau varie à son tour. Elle baisse avec l'éclairement [22].

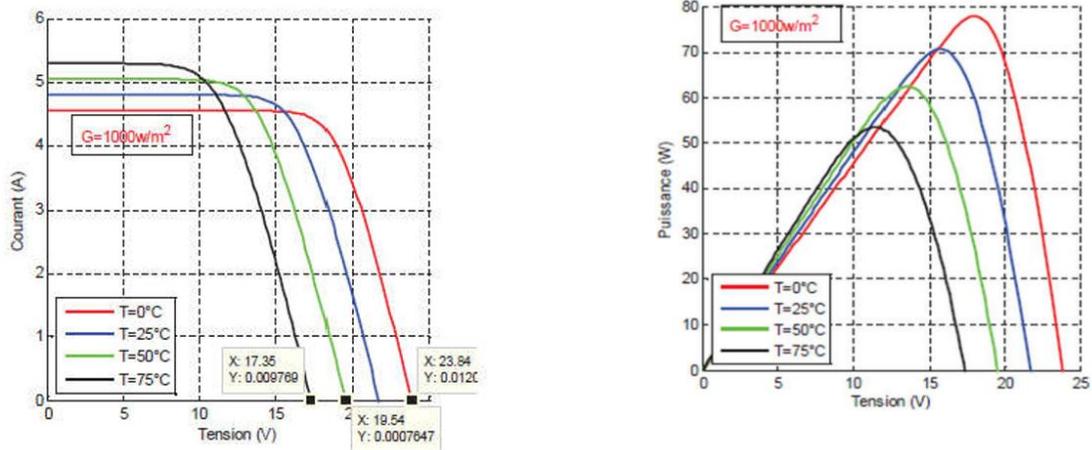


Figure.I.22 : Influence de la température sur la caractéristique I-V et P-V.

I.15. Les différents systèmes PV

I.15.1. Principe d'un système PV autonome

Une installation photovoltaïque (PV) est dite autonome – ou isolée – quand elle n'est pas reliée à un réseau de distribution. Le système PV autonome permet de fournir du courant électrique à des endroits où il n'y a pas de réseau.

Il se révèle particulièrement adapté pour des applications comme une pompe dans le jardin, l'éclairage en zone isolée, l'alimentation de bornes téléphoniques le long de l'autoroute, etc. Pour ces applications il n'est pas toujours possible de mettre en place un réseau d'alimentation classique, soit à cause de contraintes techniques, soit pour des raisons économiques.

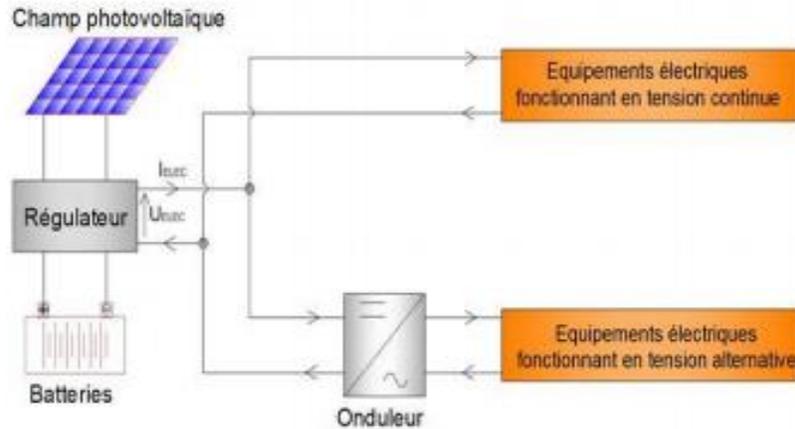


Figure.I.23 : Centrale photovoltaïque autonome.

I.15.2. Système hybride

Le système hybride allie l'énergie photovoltaïque à celle d'autres sources. En règle générale, il comporte une éolienne ainsi qu'un groupe électrogène d'appoint au diesel, au propane ou à l'essence. Un tel système peut convenir dans le cas d'une résidence ou d'un immeuble commercial non connecté à un réseau de distribution. Le système hybride constitue probablement un bon choix. La plupart des systèmes hybrides comportent une batterie d'accumulateurs dont provient la charge de consommation. Les modules maintiennent la charge des accumulateurs tant qu'il y a assez de soleil.

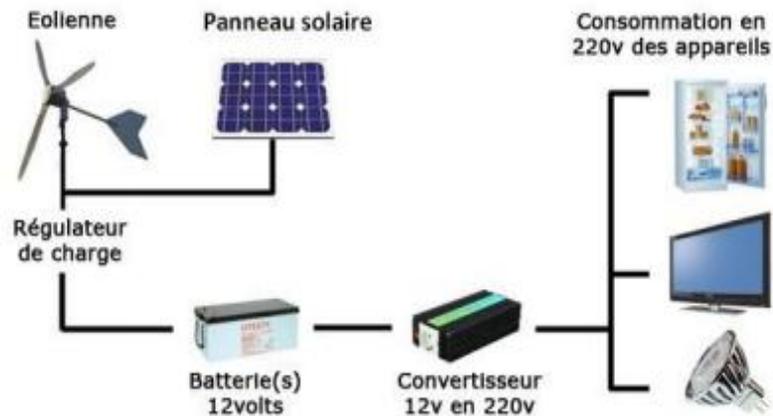


Figure.I.24 : Centrale photovoltaïque hybride.

Si on assortit une éolienne au système, celle-ci recharge les accumulateurs pendant les périodes venteuses, qui surviennent souvent lorsque le ciel est couvert ou durant la nuit. Par conséquent, les éléments éoliens et solaires se complètent avantageusement. Le groupe électrogène n'est mis en marche qu'à l'occasion pour charger les accumulateurs durant les périodes nuageuses prolongées, ou sans vent, et quand il est en marche, il tourne à plein régime. Son rendement et son efficacité énergétique sont donc bien supérieurs ; de plus, il nécessite alors moins d'entretien et il dure plus longtemps. Les systèmes qui comportent à la fois des composantes solaires et éoliennes suffisent souvent aux besoins, sans qu'un groupe électrogène ne soit nécessaire.

I.15.3. Le système raccordé au réseau

La particularité de l'énergie photovoltaïque raccordée au réseau dans la plupart des cas, la centrale photovoltaïque peut être installée à proximité du lieu de consommation, évitant ainsi les pertes en ligne qui peuvent atteindre 15% sur les grands réseaux électriques lorsque des centaines de kilomètres séparent les lieux de production et de consommation. Cette énergie répond bien au concept de la décentralisation.

Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que si nous voulions une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité [23]. L'électricité est produite en courant continu par les modules, puis transformée en courant alternatif par les onduleurs qui transforment le courant pour qu'il soit compatible avec les caractéristiques du réseau. C'est "l'interface" entre l'installation et la compagnie d'électricité.

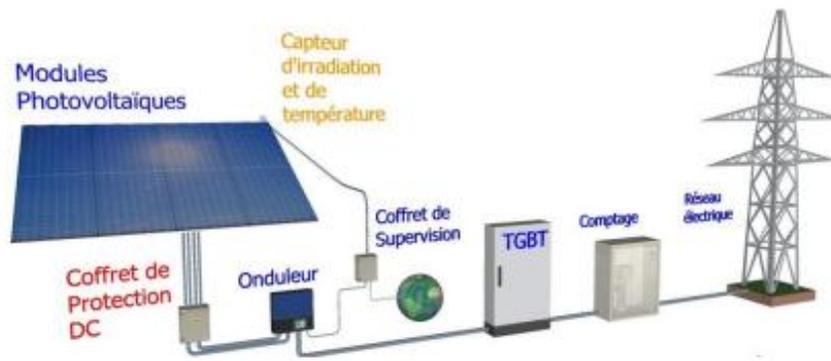


Figure.I.25 : Le Système PV raccordée au réseau.

I.16. Avantages et Inconvénients de l'énergie photovoltaïque**I.16.1. Avantages**

Une haute fiabilité ; les modules sont garantis pendant 25 ans par la plupart des constructeurs.

- ❖ Elle ne comporte pas de pièces mobiles, qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- ❖ Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt .
- ❖ Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- ❖ La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique, car le produit final est non polluant, silencieux, peu de déchet [24].

I.16.2. Inconvénients

- ❖ La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé; L'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.
- ❖ Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%) .
- ❖ Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- ❖ Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis [25].

17. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'avenir des énergies renouvelables. Ensuite le fonctionnement d'une cellule solaire en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque (l'effet photovoltaïque), ainsi que les paramètres photovoltaïques et l'influence des différents paramètres extérieurs sur les caractéristiques électriques des modules photovoltaïques. Enfin, nous avons présenté les différents systèmes photovoltaïques. Dans le chapitre suivant, on va étudier une présentation de la centrale PV du sud d'Algérie (Adrar).

Chapitre II :
**Présentation de la centrale
PV du sud d'Algérie (Adrar)**

I.1. Introduction

L'introduction des énergies renouvelables en Algérie est devenue une recommandation des pouvoirs publics et une donnée incontournable. L'Algérie est confrontée actuellement à une obligation stratégique de la diversification de ses sources d'énergie, Les projets de mini centrale constitueront une expérience à généraliser à travers de territoire national en vue d'une meilleure maîtrise de la gestion du programme national des énergies renouvelables. Dans le sud du pays une filiale de la Sonelgaz vient d'être créée à Ghardaïa SKTM de par sa position géographique. L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde (5 milliards GWh/an) [26], Avec une durée d'insolation sur le Sahara et les hauts plateaux pouvant atteindre les 3900 heures [27].

II.2. Présentation et aperçu du groupe Sonelgaz

Le secteur de l'électricité et du gaz a, de tout temps, occupé une place prépondérante dans le contexte socio-économique national. Ce rôle traditionnellement assuré par les sociétés du groupe Sonelgaz, a été conforté par les dispositions de la loi 02/01 portant sur l'électricité et la distribution publique du gaz par canalisation [28].

Grâce à sa ressource humaine formée et qualifiée, le Groupe occupe une position privilégiée dans l'économie du pays en tant que responsable de l'approvisionnement de près de neuf millions de ménages en électricité et de cinq millions en gaz naturel.

On compte :

- Société algérienne de production de l'électricité (SPE).
- Shariket kahraba oua takat moutadjadida (sktm).
- Société algérienne de gestion du réseau de transport de l'électricité (GRTE).
- Société algérienne de gestion du réseau de transport du gaz (GRTG).
- Opérateur système électrique (OS).
- Compagnie d'engineering de l'électricité et du gaz (CEEG).
- Société de distribution de l'électricité et du gaz d'Alger (SDA).
- Société de distribution de l'électricité et du gaz du Centre (SDC).
- Société de distribution de l'électricité et du gaz de l'Est (SDE).
- Société de distribution de l'électricité et du gaz de l'Ouest (SDO).

- Sharikat kahraba skikda (SKS).
- Sharikat kahraba berrouaghia (SKB).
- Sharikat kahraba koudiet eddraouch (SKD).
- Sharikat kahraba terga (SKT).
- Algerian operating maintenance company (AOM).

Production d'Électricité	76 027 GWh
Capacité installée	21 999 MW
Longueur réseau de transport	
Electrique	30 511 Km
Gaz	22 124 Km
Longueur réseau de distribution	
Électrique	346 641 Km
Gaz	116 923 Km
Nombre de clients	
Électricité	10 042 318
Gaz	6 049 389
Ressources humaines	
Permanents	65 749
Temporaires	25 469

Tableau.II.1 : Chiffres clés A fin décembre 2018 [29, 30].

II.3. Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida (SKTM)

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 [31].

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 :

- 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.
- De la volonté de 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.

II.4. SKTM unité Zaouiet Kounta

La central solaire de Zaouiet Kounta, d'une puissance de 06 mégawatt, ont été lancés récemment sur un site situé à 2 Km au nord de Zaouiet Kounta, sur une superficie de 12 hectares près de l'injecteur 220/30 KV (GRTE), Ce projet entrera en service le 12/01/2016 à 13H20 [32].

Situation géographique

- ✓ Nord : centraletg/tv (spe).
- ✓ Est : apiste et terin vide.
- ✓ Soud : terin vide est les jardins.
- ✓ Ouast : terin vide et la ville de Zaouiet Kounta (2 Km) et la route nationale N° 6 (2km).

Coordonnées géographiques

- ✓ 27°14'21'' N .0°10'30.60'' O.
- ✓ Élev: 251m.
- ✓ Altitude: 1.27 Km.



Figure.II.1 : SKTM vue par Google Map [33].

II.4.1. Composition et raccordement

La centrale photovoltaïque de Zaouiet Kounta contient 06 sous-champs, chaque sous-champs produit 1 MWc. 93 Matrices, chaque matrice constituée de 44 panneaux devisée en 2 string, chaque string est constitué de 22 panneaux raccordés en série. Le nombre total des panneaux est 24552. Chaque 8 string (4 matrices) sont raccordés à une boite de jonction, chaque 3 boites de jonction sont raccordées à une boite parallèle et chaque 4 boites parallèles sont raccordées à une boite générale se trouvant dans un shelter. Un shelter contient 2 boites générales et 2 onduleurs. La boite générale est reliée à l'onduleur (CC/AC) qui est relié au transformateur (élevateur 315 V/30 KV) et puis aux arrivées qui injectent au jeu de barres d'où on injecte au réseau électrique.

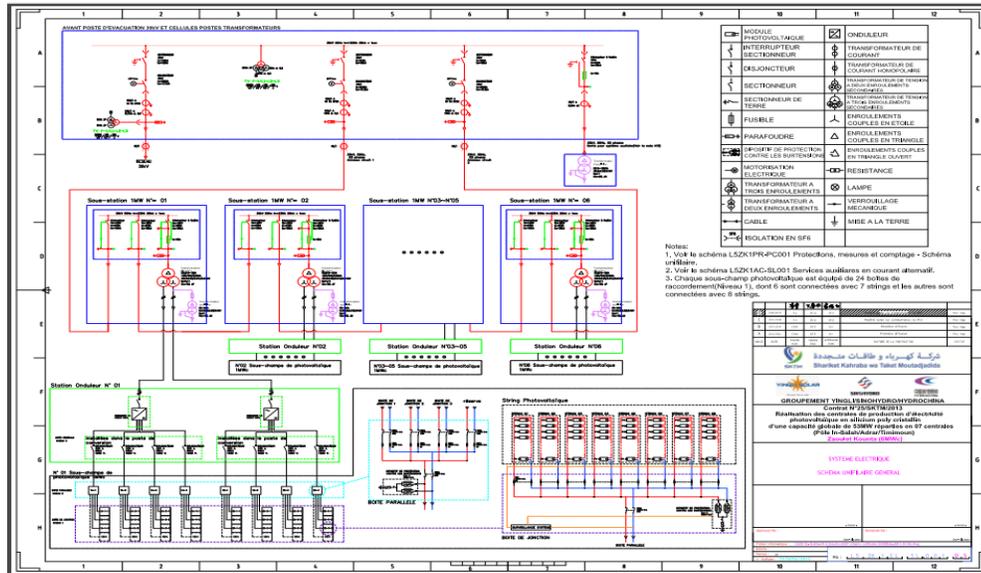


Figure.II.2 : Système électrique, schéma unifilaire général, site de Zaouiet Kounta (06 MWC)

[34].

Les raccordements réalisés pour l'injection de l'énergie électrique de la centrale PV de Zaouiet Kounta dans le réseau électrique de Sonelgaz. Les panneaux produisent des tensions continue V_{cc} L'onduleur transformé la tension continue des panneaux V_{cc} à une tension alternatif V_{ac} . Le transformateur doit augmenter la valeur de tension jusqu'à ce que la tension égale la tension de réseau électrique de Sonelgaz, pour un couplage dans les bonnes conditions (tension, fréquence) et éviter les conséquences de mauvais couplage (perturbation de réseau électrique ...).



Figure.II.3 : Schéma de la centrale de production d'électricité PV [35, 36].

L'injection au réseau électrique est faite sous trois conditions de synchronisation qui sont :

- Même fréquence.
- Même tension.
- Même champ tournant (pas de déphasage).

II.4.2. Disposition et Caractéristiques des composants de la centrale PV

II.4.2.1. Structure porteuse / de fixation

Les panneaux photovoltaïques sont fixés à des supports métalliques fixes, ou encore à des supports mobiles appelés « suiveurs solaires » qui permettent de suivre la trajectoire du soleil. Ces supports sont généralement ancrés au sol à l'aide de pieux qui, selon les caractéristiques géologiques de l'emplacement, peuvent être vissés, battus, forés dans le roc ou installés dans des bases de béton.

Fonction matériel

- Etre stable.
- Supporter le poids des modules.
- Résister aux contraintes environnementales.



Figure.II.4 : Montage des supports.

II.4.2.2. Panneaux photovoltaïques

Le panneau est composé de silicium avec une surface de verre, matériels d'EVA en dos, cadre en aluminium et boîte de câble etc.

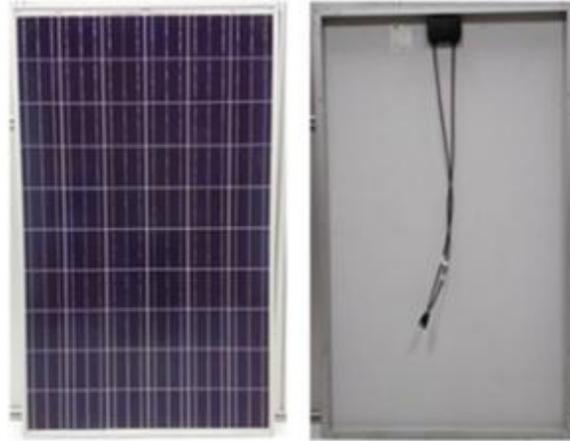


Figure.II.5 : Module photovoltaïque.

Les panneaux sont en silicium poly cristallin, orientés vers le sud d'une inclinaison de 27°. Il est mesuré à un spectre solaire AM1.5G, Une irradiation 1000 W/m² et une température cellule de 25 °C.

Marque	YINGLI SOLAR
Type de module	YL245P-29b
Puissance mesurée	245,0W (0/+5W)
Tension mesurée	29,6V
Courant mesurée	8,28A
Fusible en série	15A
Classe d'application	A
Tension a circuit ouvert	37,5V
Courant de court-circuit	8,83A
Tension système max	1000V

Tableau.II.2 : Caractéristiques électriques des panneaux en silicium poly-cristallin.

II.4.2.3. Boîte de raccordement

II.4.2.3.1. Principes de Fonctionnement

1. Schéma de câblage Boîtes de jonction

Les boîtes de raccordement doivent avoir aux ~ 8 entrées (les deux polarités) 4 mm^2 et deux sorties jusqu'à 70 mm^2 , une mise à la terre avec section minimale de 16 mm^2 y compris protection fusible sur toutes les entrées (taille 10×38 et du type gR), un interrupteur-sectionneur en sortie, parafoudre classe II, et un monitorisateur de string (« string monitor »).

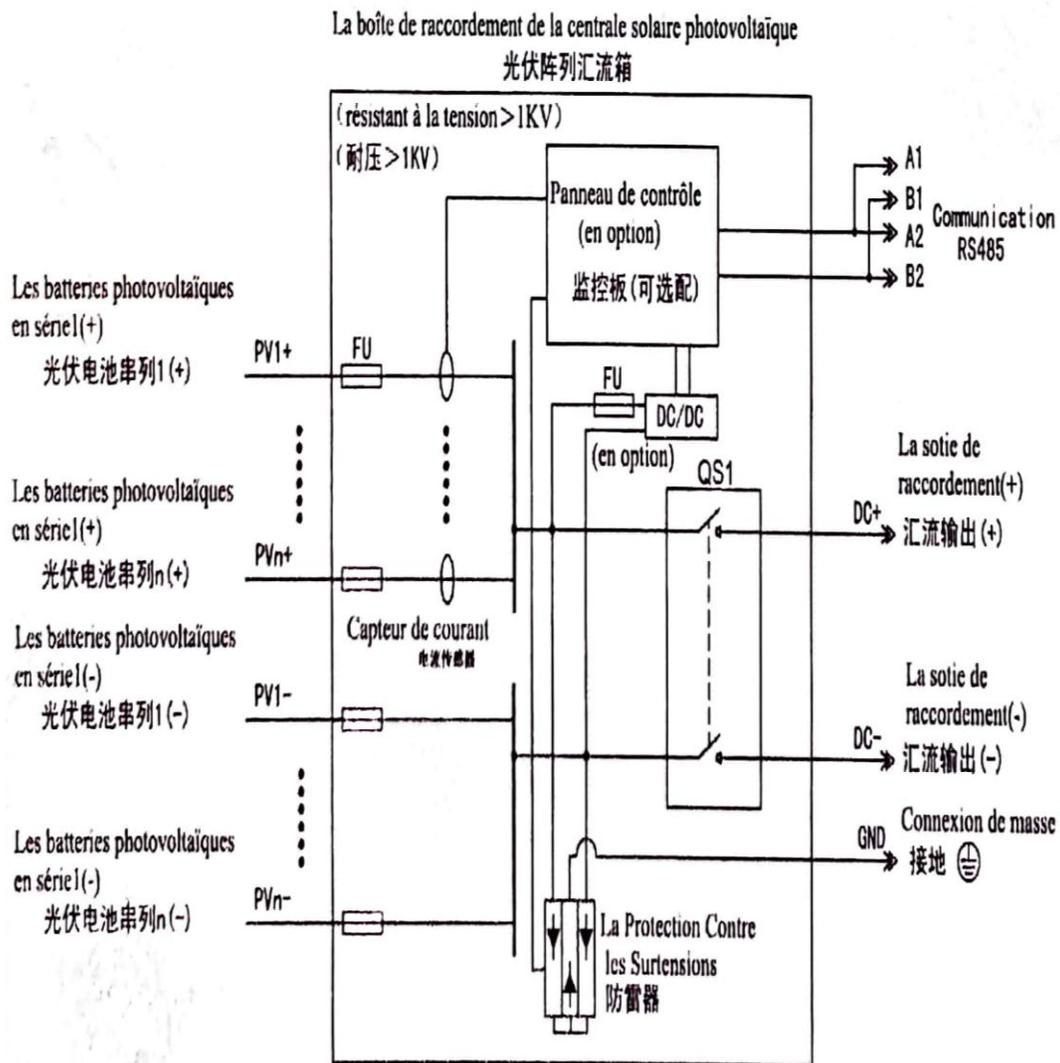


Figure.II.6 : Schéma de câblage Boîtes de jonction.

2. Schéma de câblage Boîtes de parallèle

Les boîtes de parallèle devront contenir ce qui suit :

Quatre entrées à 70 mm² (les deux polarités) et une sortie (les deux polarités) jusqu'à 240 mm². Les entrées sont constituées d'interrupteur à fusibles et la sortie d'interrupteur-sectionneur, selon schéma unifilaire.

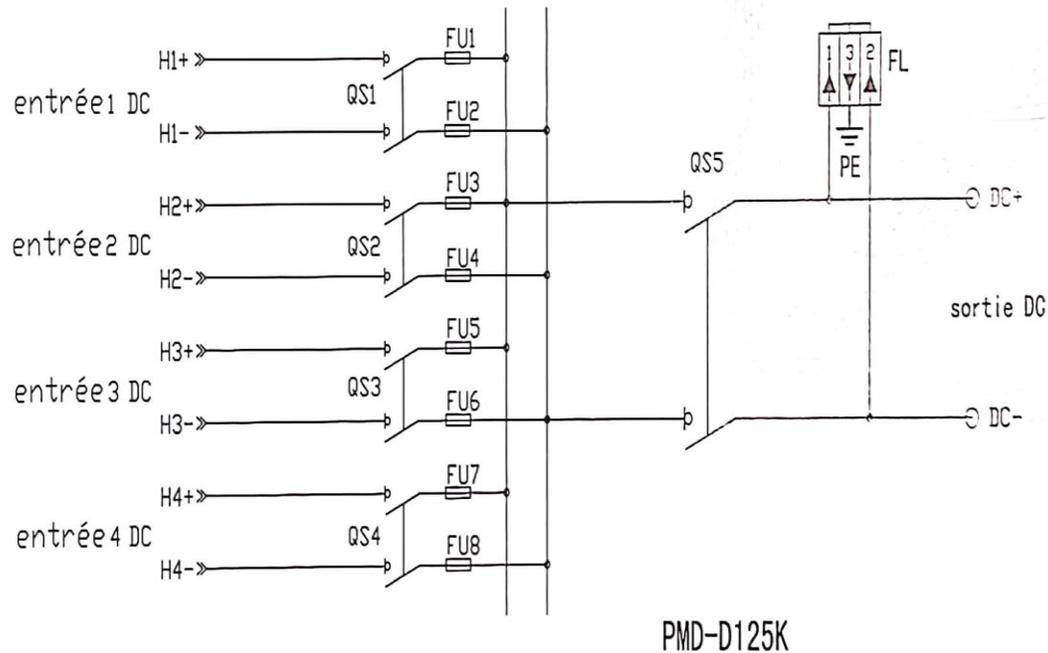


Figure.II.7 : Schéma de câblage Boîtes de parallèle.

3. Schéma de câblage Boîtes générales

Ces boîtes devront avoir quatre entrées (les deux polarités) et quatre sorties (les deux polarités) jusqu'à 240 mm². Elles seront constituées d'un interrupteur –sectionneur.

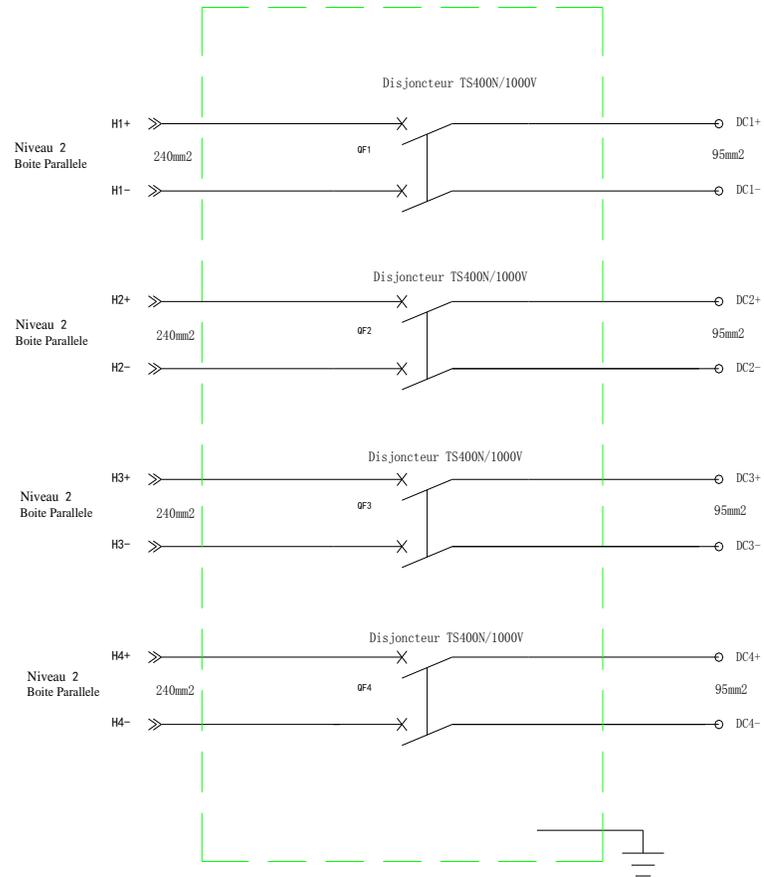


Figure.II.8 : Schéma de câblage Boîtes générales.

II.4.2.3.2. Modèles et caractéristiques techniques

- ❖ La boîte de jonction utilisée pour ce projet : PVS- 8 M



Figure.II.9 : Boîtes de jonction.

Caractéristiques	Unités	Exigences
Fabricant		Sungrow (China)
Type ou modèle		PHOTOVOLTAÏQUES-8M
Fusible (pour chaque polarité)	A	15A
Tension maximum	V	DC1000V
Intensité maximum de sortie	A	125A
Intensité maximum par entrée	A	10A
Courant de court circuit	A	12A
Courant de surcharge temporaire	A	Chaque d'entrée de 15A
Section des câbles en entrée	mm ²	4~6
Section des câbles en sortie	mm ²	70
Matériau		acier laminé à froid
Degré de protection (IP)		IP65
Interrupteur-sectionneur général DC	A	160A
Mise à la terre	Oui	Oui
Plage de température de fonctionnement	°C	-25 à 60
Bornes de raccordement d'entrée		Connexion par bornes à sertir
Bornes de raccordement de sortie		Connexion de boulon par bornes à sertir froid
Para foudre	Oui	Oui
Organes de mesure et contrôle (monitoring) -Mesure de courant pour chaque chaine -Mesure de tension DC -Détection de fin de vie de parafoudre -Indication de l'état d'interrupteur sectionneur général DC -Détection de fusion de fusibles	Oui	Oui
Module de communication avec le système contrôle commande	Oui	Oui (MODBUS RS485)

Tableau.II.3 : Caractéristiques électriques de la boite jonction.

- ❖ La boîte de parallèle utilisée pour ce projet : PMD-125K



Figure.II.10 : Boîtes de parallèle.

Caractéristiques	Unités	Exigences
Fabricant		Sungrow (China)
Type ou modèle		PMD-D125K
Fusible (pour chaque polarité)	A	125A
Tension maximum	V	1000V
Intensité maximum de sortie	A	400
Intensité maximum par entrée	A	400
Courant de court circuit	A	480
Courant de surcharge temporaire	A	480
Section des câbles en entrée	mm ²	70
Section des câbles en sortie	mm ²	240
Matériau		acier laminé à froid
Degré de protection (IP)		IP65
Interrupteur-sectionneur DC	A	400
Mise à la terre	Oui	Oui
Plage de température de fonctionnement	°C	-20 à 60
Bornes de raccordement d'entrée		barre de cuivre
Bornes de raccordement de sortie		barre de cuivre

Tableau.II.4 : Caractéristiques électriques de la boite parallèle.

- ❖ La Boîte générale utilisée pour ce projet : PMD-500K



Figure.II.11 : Boîtes générales.

Caractéristiques	Unités	Exigences
Fabricant		Sungrow (China)
Type ou modèle		PMD-D500K
Fusible (pour chaque polarité)	A	400
Tension maximum	V	1000
Intensité maximum de sortie	A	400
Intensité maximum par entrée	A	400
Courant de court circuit	A	16
Courant de surcharge temporaire	A	480
Section des câbles en entrée	mm ²	240
Section des câbles en sortie	mm ²	95
Matériau		acier laminé à froid
Degré de protection (IP)		IP20
Interrupteur général DC	A	400A
Mise à la terre	Oui	Oui
Plage de température de fonctionnement	°C	-20 à 60
Bornes de raccordement d'entrée		barre de cuivre
Bornes de raccordement de sortie		barre de cuivre

Tableau.II.5 : Caractéristiques électriques de la boîte générale.

II.4.2.4. Poste de conversion (Onduleur + Transformateur)

Ce poste à un rôle détermine pour le fonctionnement de la centrale qui se caractérise en :

- Convertir le courant continu en courant alternatif.
- Protéger les circuits de distribution DC et les intervenants des risques électriques et atmosphériques.
- Générer un courant alternatif de qualité.
- Transformer la basse tension en moyenne tension.

II.4.2.4.1. Onduleur

L'électricité produite par les chaînes de panneaux photovoltaïques est acheminée à des boîtes de jonction par des câbles fixés le long des supports de panneau. Des câbles souterrains relient ensuite les boîtes de jonction à des onduleurs. Les onduleurs sont des appareils électroniques qui convertissent le courant continu produit par les panneaux photovoltaïques en courant alternatif (CA). Un grand nombre de chaînes de panneaux est raccordé à chaque onduleur.

Fonctions de l'onduleur

- Convertir le courant continu généré par le champ PV en courant alternatif.
- Ajuster sa tension et sa fréquence de sortie en fonction de celle du réseau.
- Affichage et enregistrement des données :
- DC : tension / courant / puissance.
- AC : tension / courant / puissance.
- Durée de fonctionnement.
- Statut et défauts.
- fréquence.
- Energie produite.

L'onduleur situé à l'interface entre le champ PV et le réseau, il doit être adapté aux impératifs techniques et doit assurer la sécurité de deux sous-systèmes électriques très différents.



Figure.II.12 : Local de l'onduleur (Shelter).



Figure.II.13 : L'intérieur de l'onduleur.

Type/Marque	SUNGROW/SG1000TS
Entée DC	
Tension MAX	1000V
Isc	2×1334A
Tension min Vmpp	500V
Tension max Vmpp	850V
Courant d'entée max.	2×1120A
Catégorie de surtension	II
Sortie AC	
Puissance nominale de sortie	1000 KW
Tension nominale de sortie	3~315V
Fréquence nominale de sortie	50 Hz
Courant de sortie max.	2×1008A
Facture de puissance	-0,9~0,9
Catégorie de surtension	III
Classe de protection	I
Protection IP	IP54
Température de fonctionnement	-35 °C à +60 °C

Tableau.II.6 : Les Caractéristiques principales de l'onduleur photovoltaïque de SG500MX.

II.4.2.4.2. Transformateur

Il faut généralement hausser la tension du courant à la sortie des onduleurs pour qu'elle atteigne le niveau requis par le réseau électrique. C'est la fonction des transformateurs de puissance. À la sortie de ceux-ci, l'électricité passe dans le réseau collecteur de la centrale, constitué de câbles souterrains.



Figure.II.14 : Local du transformateur.



Figure.II.15 : L'intérieur de transformateur.

Marque	SUNTEN
Type	ZBW10A-1250/30/0.315-0.315
Capacité nominale	1250 KVA
Code produit	Z140237-02155
Tension nominale	30/0.315
Fréquence nominale	50 Hz
Classe de l'enveloppe	10 K
Poids total	8300 Kg
Original	Foshan. Chine
Dimensions d'aspect	4700×2438×2896 mm

Tableau.II.7 : Caractéristiques électriques du transformateur principal.

II.4.2.5. Poste d'évacuation MT

Le poste d'évacuation est le bâtiment qui abrite les dispositifs de comptage de l'électricité produite et les protections électriques entre le réseau public et la centrale. C'est la limite de propriété entre l'exploitant de la centrale et le réseau public ERDF. C'est dans ce poste que se fait le raccordement avec le réseau public de distribution et donc la séparation du domaine public et du domaine privé.

Il s'agit également d'un local disposé en limite de propriété et qui doit être accessible 24h/24 aux agents ERDF.

Le poste d'évacuation contient les éléments suivants:

- Compartiment de barres.
- Cuve métallique isolée en SF6:
 - Disjoncteur.
 - Sectionneur.
 - Interrupteur –Sectionneur.
 - Interrupteur –Sectionneur.
 - Fusible –Interrupteur.
- Compartiment des câbles.
- Types de cellule.

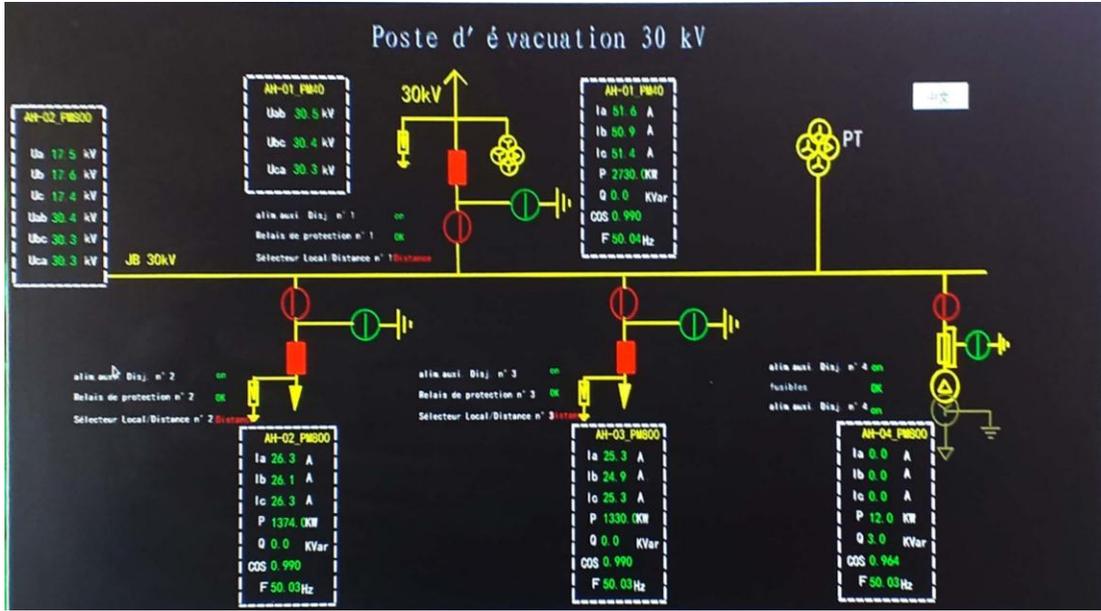


Figure.II.16 : Schéma de poste d'évacuation.

- Cellules blindées avec isolement au SF6.

Configuration	Tension assignée	Courant assignée	Pouvoir de coupure de court-circuit	Arc interne
Simple barre	24 KV – 36KV	1250 / 1600	25 A / 31,5 Ka	Up to IAC AFLR 31,5kA/1s

Tableau.II.8 : Caractéristiques générales de cellules SF6.



Figure.II.17 : Schéma de cellule de la centrale Zaouiet Kounta.

❖ Domaine d'application

- Sous-stations de distribution primaire.
- Compagnies électriques.
- Parcs éoliens.
- Aéroports.
- Sous-stations de traction.
- Grandes industries.

II.4.2.6. Système de surveillance et de commande

Le système de surveillance d'ordinateur de centrale est le pivot de production, de fonctionnement et de gestion de centrale, les données détectées doivent être centralisées pour faire le traitement d'analyse, ensuite les commandes de contrôle correspondantes sont envoyées par la salle de commande centralisée; dans le même temps, le système de surveillance envoie les données concernées au centre de dispatching d'énergie électrique de niveau supérieur, reçoit et exécute les commandes du centre de dispatching d'énergie électrique.

Les opérations doivent être effectuées en se basant sur un système SCADA & SERVEUR OPC fournis par NARI Group Corporation.

Fonction matériel

- suivre le fonctionnement et la performance de l'installation.
- permettre d'optimiser la production (détection d'anomalie).

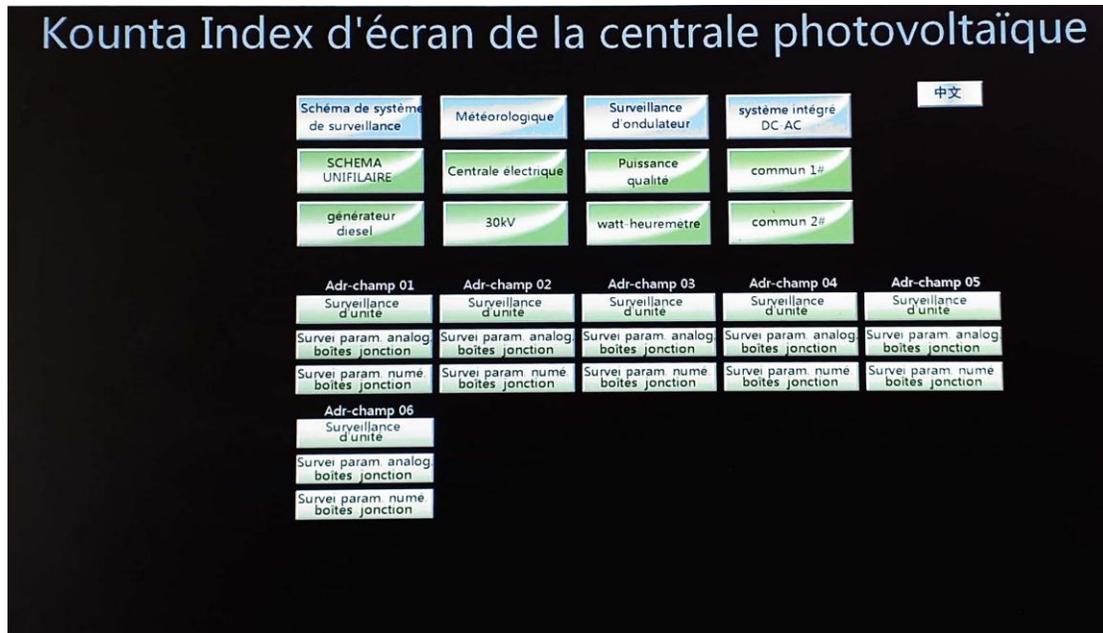


Figure.II.18 : Interface principale de contrôle.

II.4.2.7. Stockage

En cas de panne du réseau électrique, pour juguler le problème pour qu'il n'y est pas de coupure de courant, la centrale a mis en disposition un groupe diesel pour l'éclairage du poste de garde et l'alimentation de la salle de commande (Serveurs) et des batteries en cas ou y aurait un problème dans le groupe diesel.

Fonction matériel

- stocker et gérer l'énergie électrique stockée.
- Batterie, énergie électrique en secours.



Figure.II.19 : Groupe diesel.



Figure.II.20 : Batteries utilisés.

Modèle de groupe : XG-50GF			
Usine de production		Jiangsu Xingguang Power Equipment Co., Ltd.	
Conforme à la norme		Respecter les normes nationales "Normes techniques de fréquence du groupe de générateur diesel" de JB / T10303-2001	
Puissance de sortie	50	Taux de régulation de tension stable	$\leq \pm 1\%$
Puissance de sortie	62.5	Taux de régulation de tension transitoire	$\leq +20 \sim -15\%$
Fréquence nominale	50	Temps de récupération de tension	$\leq 1.5S$
Tension nominale	400	Taux de fluctuation de tension	$\leq 0.5\%$
Courant nominale	90	Taux de régulation de fréquence	$\leq 5\%$
Poids net (kg)	889	Taux de fluctuation de fréquence	$\leq 0.5\%$
Dimension (Longue \times large \times Haut)	1800 \times 750 \times 1200	Temps de stabilisation de fréquence	$\leq 5S$

Tableau.II.9 : Les spécifications techniques de générateur diesel.

II.4.2.8. Maintenances et équipements

Le nettoyage de vos panneaux photovoltaïque est un facteur important de leur efficacité. Un nettoyage régulier permet donc une meilleure production et ainsi un gain réel. Ils utilisent du matériel spécifique et des produits adaptés pour garantir un résultat à la hauteur d'attentes. Durant le nettoyage une vérification de l'état panneaux est effectuée, Lavage et rinçage à l'eau déminéralisée. Les brosses à eau permettent de déloger la saleté et de l'enlever avec de l'eau pure.



Figure.II.21 : Station de traitement d'eau et équipements de nettoyage.

II.5. Conclusion

Ce chapitre est basé sur des données réelles acquises lors d'un stage pratique au sein de la centrale solaire de Zaouiet Kounta (SKTM), la capacité installée de la centrale était 6 MW et il est exposé à des climats arides dans le site d'Adrar (sud de l'Algérie). Le site de la centrale était choisi pour son assiette foncière, sa disponibilité, et son accessibilité au point de raccordement.

En plus, nous avons donné un aperçu sur les notions élémentaires nécessaires à la composition de centrale PV tel que les panneaux en silicium poly-cristallin, la boîte générale, l'onduleur et le transformateur.

Chapitre III :
**Analyse des performances
réelles de la centrale PV en
milieu désertique**

III.1. Introduction

Afin de comprendre d'une part, les performances des systèmes de génération d'électricité à base d'énergie solaire et, d'autre part, l'impact du climat local, l'installation pilote photovoltaïque de 6 MWc raccordée au réseau va être étudiée. Cette installation est unique dans cette région et représente un outil de recherche et de développement pour le Laboratoire des Energies Nouvelles et Renouvelables (LENR) du CERD.

Etant donné que cette centrale photovoltaïque est la première installation photovoltaïque reliée au réseau électrique de Zaouiet Kounta, aucune donnée n'est disponible sur les performances réelles des systèmes photovoltaïques à Zaouiet Kounta ou dans les mêmes conditions climatiques des régions sahariennes. Le but de ce chapitre est de comprendre le fonctionnement d'une centrale photovoltaïque raccordée au réseau, dans des conditions climatiques potentiellement préjudiciables et la tenue de ses performances dans le temps (arides, poussiéreuses, avec de très faibles précipitations et une latitude faible et donc une inclinaison faible des panneaux) de Zaouiet Kounta.

Pour ce faire, nous allons dans un premier temps des études portant l'état de l'art de développement des énergies renouvelables en Algérie. Dans un second temps, nous présentons les conditions environnementales de l'installation PV. Dans un troisième temps les méthodologies d'analyse de performance qui seront implémentées et adaptées à notre cas d'étude. Enfin, les données issues du monitoring pendant quatre années consécutives (2017-2020) ont été analysées sur une base horaire, journalière et mensuelle afin d'évaluer les tendances de performance du système solaire PV sous les conditions climatiques de type désertique. Et l'impact des paramètres climatiques ainsi que les pertes dues à l'empoussièrement seront estimés.

III.2. Le développement de l'énergie solaire en Algérie

Cette section a été consacrée à l'évaluation de la contribution de l'énergie solaire au développement durable en Algérie.

III.3. L'exploitation de l'énergie solaire en Algérie

En raison de sa situation géographique, l'Algérie est classée comme étant l'un des pays les mieux dotés en ressources solaires au monde et au bassin méditerranéen (figure III.1) ; soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, et 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque [37].

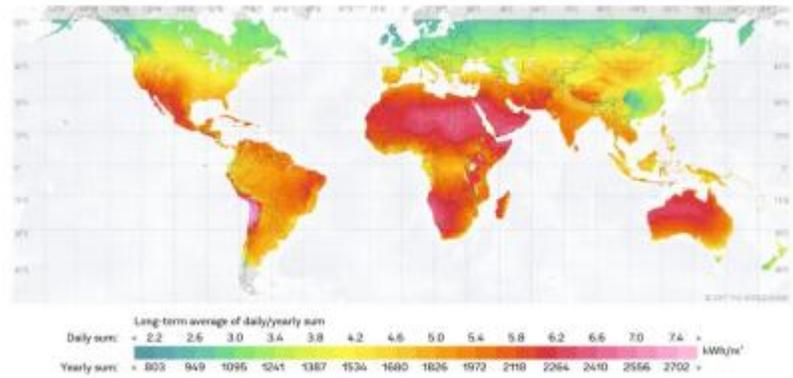


Figure.III.1 : Nouvel Atlas solaire du monde [38].

Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards GW/h par an avec une durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépassant les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures dans les hauts plateaux et au Sahara [39].

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m²/an au Nord et 2263 KWh/m²/an au sud du pays [40].

Régions	Régions Côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Énergie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau.III.1 : Potentiel solaire en Algérie [41].

À travers le tableau ci-dessus, on constate que le potentiel solaire le plus important et qui couvre 86% de la superficie du territoire est situé dans le sud du pays. Des études précédentes ont déjà confirmé la grande capacité du désert à recevoir de l'énergie, notamment l'étude menée par le physicien allemand Gérard Knies qui démontre que six heures d'ensoleillement du Sahara permettraient de stocker de l'électricité pour l'ensemble du genre humain pendant une année entière. Par ailleurs, une autre étude évoquée par un économiste algérien, Bachir Messaitfa, dans son livre Algérie 2030-vision prospective, assure la capacité du Sud algérien à satisfaire la demande mondiale en énergie électrique en moyenne de (4) quatre fois, tout en respectant la norme de la sécurité énergétique [42].

Ce gigantesque gisement solaire a donc permis à l'Algérie d'y aller en avant vers une transition énergétique qui va assurer, à long terme, une transformation profonde de la consommation énergétique du pays en devenant de moins en moins dépendant des énergies fossiles, et cela en raison du contexte international qui engage les pays à renforcer leurs politiques environnementales et lutter contre le réchauffement climatique. Et aussi pour faire face à la demande énergétique croissante du pays.

Ainsi, le gouvernement a adopté un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables en Algérie en février 2011, il est apparu dans sa phase expérimentale et de veille technologique, des éléments nouveaux et pertinents sur la scène énergétique, aussi bien nationale qu'internationale, nécessitant la révision du programme de développement des énergies renouvelables. Parmi ces éléments, il convient de citer [43] :

- Une meilleure connaissance du potentiel national en énergies renouvelables à travers les études engagées, lors de cette première phase, notamment les potentiels solaires et éoliens.
- La baisse des coûts des filières photovoltaïque et éolienne qui s'affirment de plus en plus sur le marché pour constituer des filières viables à considérer (maturité technologique, coûts compétitifs...).
- Les coûts de la filière CSP (solaire thermique) qui restent élevés associés à une technologie non encore mature notamment en termes de stockage avec une croissance très lente du développement de son marché.

Ce programme actualisé en mai 2015, consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22000 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.

Cette capacité sera répartie sur les différentes filières des énergies renouvelables comme le montre la figure suivante [44] :

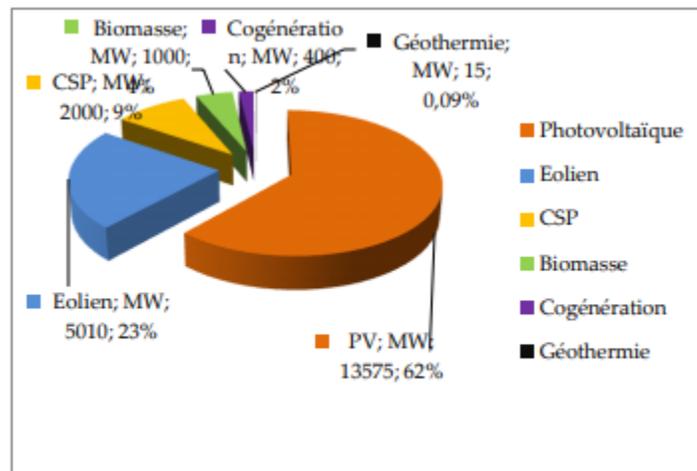


Figure.III.2 : Programme de développement des énergies renouvelables en Algérie à l'horizon 2030 [45].

Il est à constater qu'une part majoritaire, d'environ 62% de la capacité totale installée à l'horizon 2030, sera fournie à partir de l'énergie photovoltaïque et environ seulement 9% de cette capacité a été dédiée au développement de l'énergie thermique, en raison de la baisse des coûts qu'a marqué la technologie de la photovoltaïque dans le monde et les coûts de la technologie CSP qui reste assez élevés en revanche.

À cet effet, l'exploitation de l'énergie solaire en Algérie selon le programme précité passera par deux grandes phases :

- 1^{re} phase entre (2015-2020) : consiste à installer une capacité de 3000 MW en énergie photovoltaïque.

- 2^e phase entre (2021-2030) : l'installation d'une capacité de 10575 MW en énergie photovoltaïque et 2000 MW en énergie thermique.

Et afin d'aboutir aux objectifs, notamment en ce qui concerne le développement de l'énergie solaire, des structures d'appui et dispositifs de soutien ont été mis en place. Ainsi qu'un cadre juridique favorable ; comme suit :

➤ **Mise en place d'un ensemble de textes législatifs et réglementaires encadrant le développement des énergies renouvelables en Algérie.**

➤ **Mise en place des Structures d'appui :**

- Création des centres de recherche affiliés aux entreprises comme le CREDEG, filiale du Groupe Sonelgaz, l'agence de promotion et de rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APRUE) et une société filiale de Sonelgaz spécialisée dans la réalisation des projets d'énergies renouvelables (SKTM).

- Création des centres de recherche spécialisés dans le domaine des énergies renouvelables, tel que : CDER et ces filiales, CRTSE, CREDEC, URMER....

- Création du ministère de l'Environnement et des Énergies renouvelables en 2017.

Ainsi veiller à la coopération entre ces différents acteurs, en vue de développer les technologies et les procédés innovants en matière d'énergies renouvelables.

➤ **Mesures d'incitations financières et fiscales :**

- Mise en place d'avantages financiers, fiscaux et de droits de douane pour les actions et projets qui concourent à la promotion des énergies renouvelables. (À titre d'exemple : réduction des droits de douane, réduction de la TVA, système de soutien des prix aux investissements...).

- Création du fond national pour la maîtrise de l'énergie, pour les énergies renouvelables et la cogénération (FNMEERC) qui est alimenté annuellement de 1% de la redevance pétrolière et du produit de certaines taxes [46].

Cependant, en termes de réalisation d'études ; et de projets d'énergie solaire avant et après l'adoption du programme précité, il est à noter que [40] :

✓ une capacité de près de 375 MW a été mise en service, répartie entre les différentes régions sud et hauts plateaux comme le montre le tableau suivant :

Projet	Capacité installée	Région	Année de mise en service	Maitre d'ouvrage
Centrale solaire composé de 109 systèmes PV	0.453 MWc	wilayas du SUD : d'Adrar, Tindouf, Tamanrass et, Illizi	1998	Sonelgaz
Centrale solaire PV	0.5 MWc	wilayas du SUD : M'Sila, El-Oeud, Tamanrasset, Illizi, Ghardaïa	2006-2010	Sonelgaz
Centrale hybride solaire-gaz (CSP)	150 MWcdont l'apport solaire et de 30 MWc (solaire thermique)	HassiR'mel(Laghouat)	2011	ABENER/ NEAL/ COFIDES/SO NATRACH
Centrale photovoltaïque pilote	1,1 MWc	Ghardaïa	2014	Sonelgaz
(22) Centrales photovoltaïques	343 MWc	Hauts Plateaux et Grand Sud	2015-2018	Sonelgaz

Tableau.III.2 : Projets réalisés en énergie solaire en Algérie [47].

✓ En ce qui concerne la réalisation d'études portant sur le développement de cette énergie, les points suivants peuvent être cités :

- L'élaboration de l'Atlas solaire de l'Algérie, par le ministère de l'Énergie en collaboration avec l'Agence Spatiale algérienne (ASAL).

- L'identification d'un ensemble de sites à haut potentiel solaire pouvant accueillir des centrales électriques solaires, par le ministère de l'Énergie en collaboration avec l'Agence Spatiale algérienne (ASAL).

- Étude d'impact de l'intégration de l'énergie solaire sur le réseau électrique algérien, guidée par Sonelgaz en collaboration avec la CESI et RES4MED.

III.3. Conditions environnementales de l'installation PV

Pour réaliser l'analyse des conditions environnementales du site, dans cette partie nous interprétons les données issues des différents capteurs (pyranomètre, thermomètre, anémomètre et girouette).

III.3.1. Analyse de la température et des rayonnements solaires sur le site

Afin de comprendre l'environnement dans lequel évolue l'installation solaire photovoltaïque, nous avons illustré sur la figure III.3 le rayonnement solaire moyenne mensuel sur le plan des modules (R_{moy}) et la température moyenne (T_{moy}) enregistrés pendant les heures d'ensoleillement durant les quatre années (2017-2020) d'exploitation de la centrale. Sur ce graphique, nous observons une proportionnalité entre T_{moy} et R_{moy} avec une diminution de T_{moy} et de R_{moy} pendant la période estivale et une augmentation de T_{moy} et de R_{moy} en saison d'hiver. La température se situe entre un minimum de 12,29 °C en janvier 2017 et un maximum de 40,82 °C en juillet 2018. La quantité de rayonnement solaire reçue varie entre 249,92 W/m² pour le mois de janvier 2018 et 369,41 W/m² pour le mois juin 2019. La température ambiante moyenne sur site et l'irradiation reçue sont respectivement de 27,24 °C et 296,01 W/m². La température ambiante moyenne maximale est atteinte pendant les périodes où le rayonnement solaire est plus faible, notamment le mois de juillet. La réduction du taux de rayonnement solaire atteignant les modules solaire PV est due à la nébulosité du ciel induit par la levée de poussière.

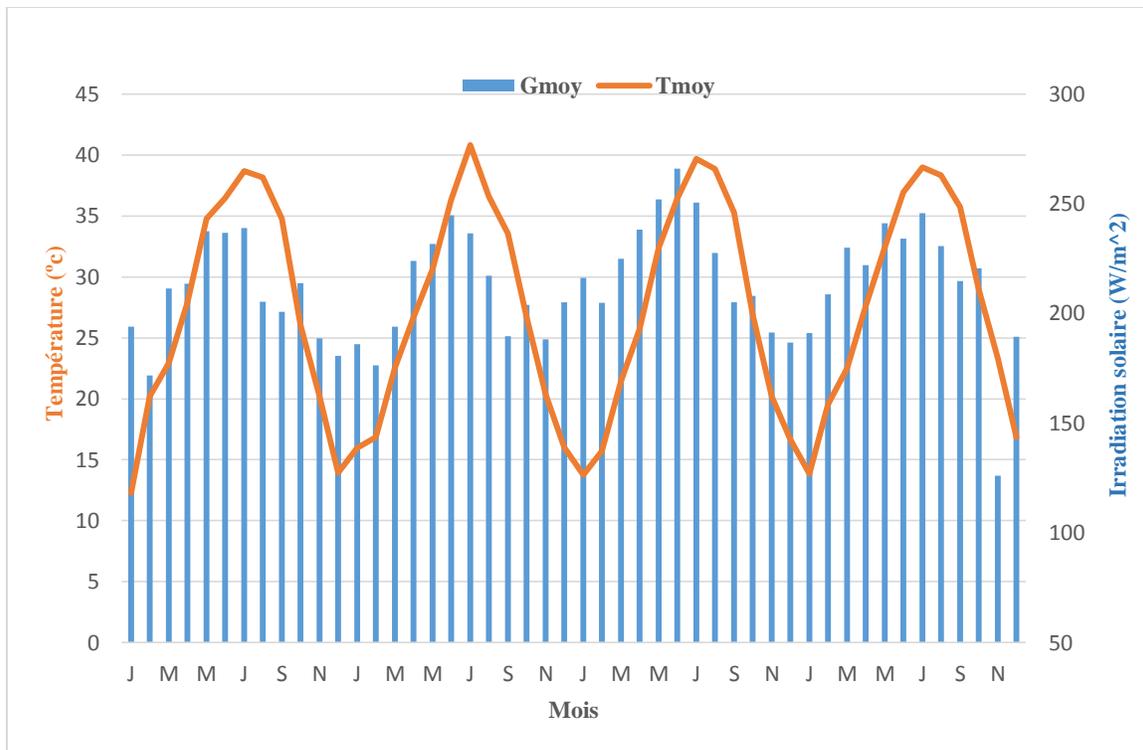


Figure.III.3 : Température ambiante moyenne et le rayonnement solaire moyen sur le site de la centrale solaire.

III.3.2. Analyse de vitesse du vent mensuelle

Sur la figure III.4 nous montrons la vitesse du vent mensuelle sur le site de la centrale solaire durant les quatre années (2017-2020). La vitesse moyenne du vent sur le site de la centrale solaire est de 5,28 m/s avec un minimum de 4,27 m/s atteint en novembre 2018 et un maximum de 6,39 m/s en juillet 2017. Ces constatations de la vitesse du vent montre que le site de la centrale solaire PV est bien ventilé.

La vitesse de vent a un effet positif représenté dans le refroidissement des panneaux photovoltaïques, mais selon la nature des sols de notre région ; la vitesse du vent élevé provoque le déplacement des poussières sur les panneaux et donc le réduire leur performances.

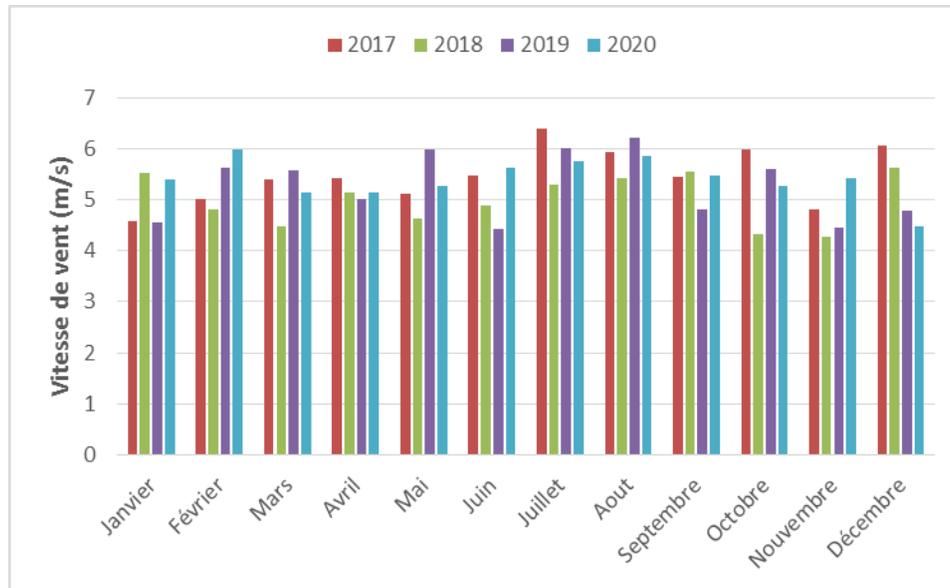


Figure.III.4 : Vitesse du vent moyenne mensuelle.

III.3.3. La puissance de la centrale solaire de Zaouiet Kounta

Après l'étude que nous avons faite sur les caractéristiques des sites, nous allons analyser l'influence de la température, l'intensité de rayonnement et la vitesse du vent sur les puissances délivrées de la centrale.

La figure III.5 représente la puissance moyenne pendant les quatre années d'exploitation de la centrale photovoltaïque. La puissance moyenne mensuelle varie avec un minimum de 1219,42 KW en juillet 2017 et un maximum de 1399,40 KW en octobre 2017 avec une moyenne de 1289,70 KW, et La puissance moyenne mensuelle varie avec un minimum de 1130 KW en décembre 2020 et un maximum de 1424 KW en mars 2020 avec une moyenne de 1252,65 KW, Où nous observons la baisse de puissance pendant les mois d'été à cause de la température élevée (effet de température sur les modules et rendement) à juillet pour chaque année.

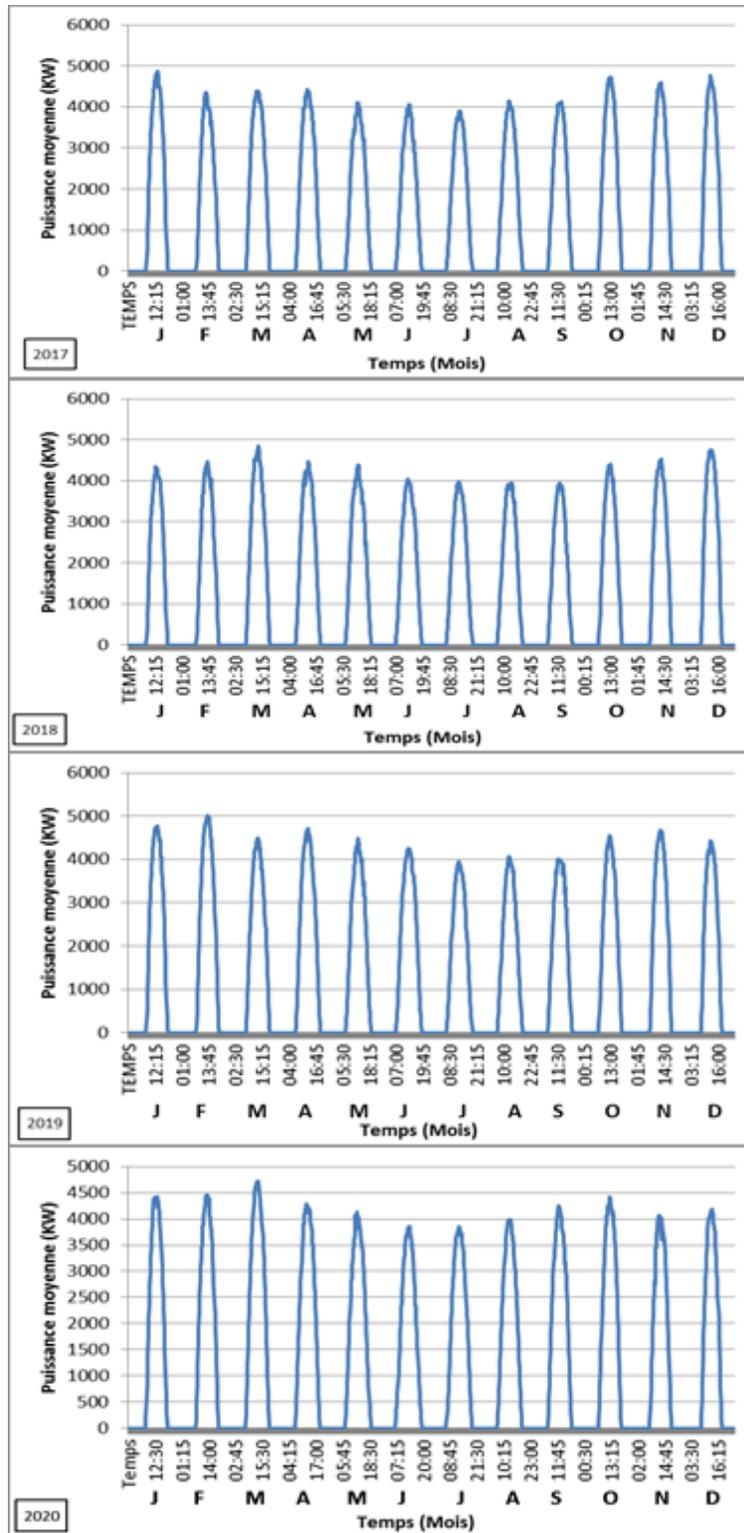


Figure.III.5 : Puissance moyenne mesuré pour chaque mois pendant quatre ans sur le site.

III.4. Méthodologies de l'évaluation des performances

III.4.1. Analyse des performances journalières

Afin d'analyser les performances d'un système solaire PV, des paramètres de performance ont été spécifiés par l'Agence Internationale de l'Energie (IEA) et sont décrits dans les normes standardisées (Commission Electrotechnique Internationale) CEI 61724 [48]. Ces paramètres sont le rendement de référence (Y_r), le rendement du champ PV (Y_a), le rendement final du système PV (Y_F), le rapport de performance (PR), les pertes du système (L_S) et les pertes diverses (L_C). Ces paramètres sont utilisés pour définir les performances du système dans son ensemble par rapport à la production d'énergie, les ressources solaires et l'effet global des pertes du système photovoltaïque.

Les indicateurs normalisés agissent comme des clés de comparaison pour connaître la performance d'un système PV connecté au réseau.

- **L'énergie fournie au réseau de distribution (E_{AC})**

L'énergie journalière fournie au réseau de distribution (E_{AC}) exprime la somme du produit de la puissance produite par le temps de la durée du jour, elle est donnée par la formule suivante [49] :

$$E_{AC,d} = T_r \sum_{t=1}^{t=Trp} V_{AC} \times I_{AC} \quad (\text{III. 1})$$

$$T_r = 15 \text{ min}$$

Avec :

T_r : C'est le temps d'intervalle.

T_{rp} : C'est la période de fonctionnement.

V_{AC} : La tension produite par le champ PV.

I_{AC} : Le courant produit par le champ PV.

De même, l'énergie mensuelle fournie au réseau de distribution est notée par $E_{AC,m}$, elle présente la somme de toutes les énergies fournies durant les jours du mois, elle est exprimée par la relation suivante :

$$E_{AC,m} = \sum_{d=1}^N E_{AC,m} \quad (\text{III. 2})$$

Avec :

N : le nombre de jours durant le mois.

$E_{AC,m}$: L'énergie mensuelle fournie au réseau de distribution.

- **Rendement de référence (Y_R)**

Le rendement de référence est le rapport entre la quantité totale de rayonnement solaire arrivant à la surface des panneaux solaires photovoltaïques G_t (KW/m^2) et la quantité de rayonnement de référence G_{STC} ($1 KW/m^2$) [50,51]. Ce paramètre représente le nombre d'heures durant lesquelles l'éclairement est égal à celui de référence, Le rendement de référence journalier $Y_{R,d}$ est exprimé par la formule suivante :

$$Y_{R,d} = \frac{T_r \sum_d G_t}{G_{STC}} \quad (\text{III. 3})$$

G_t : L'énergie journalière du rayonnement arrivant à la surface des panneaux PV.

G_{STC} : Le rayonnement de référence (dans les conditions standard).

Notant que le rendement de référence mensuel $Y_{R,m}$, est la moyenne des rendements de référence journaliers $Y_{R,d}$, il est exprimé par la formule suivante :

$$Y_{R,m} = \frac{1}{N} \sum_1^N Y_{R,d} \quad (\text{III. 4})$$

Avec :

N : le nombre de jours durant le mois.

$Y_{R,d}$: Le rendement de référence journalier.

$Y_{R,m}$: Le rendement de référence mensuel.

- **Rendement final du système PV (Y_F)**

Le rendement final correspond à l'énergie totale produite par le système PV, E_{AC} (MWh) par rapport à la puissance nominale installée P_{PV} (MWc). Cette quantité représente le nombre d'heures pendant lesquelles le champ PV devrait fonctionner à sa puissance nominale [52]. Le rendement final journalier est donnée par :

$$Y_{F,d} = \frac{E_{AC,d}}{P_{PV}} \quad (\text{III. 5})$$

$$P_{PV} = 6MW$$

Le rendement final du système mensuel est la moyenne des rendements finaux du système journaliers, il est donné par :

$$Y_{F,m} = \frac{1}{N} \sum_N^1 Y_{F,m} \quad (\text{III. 6})$$

- **Indice de performance normalisé (PR)**

Le rapport de performance PR indique l'effet global des pertes sur la production énergétique des rangées d'un système PV. Les valeurs de PR indiquent à quel point un système PV approche les performances idéales dans des conditions réelles d'exploitation. PR est défini par le ratio entre le rendement final et le rendement de référence, c'est une quantité adimensionnelle [53,54].

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \times 100 \quad [\%] \quad (\text{III. 7})$$

- **Rendement du système PV (η_{sys})**

Le rendement du système PV est le rapport de l'énergie totale générée par le système PV (E_{AC}) au produit de la quantité d'irradiation (H_t) sur le plan des panneaux et de la surface globale (A) du champ photovoltaïque [50,51].

$$\eta_{sys} = \frac{E_{AC,d}}{H_t \times A} \quad [\%] \quad (III. 8)$$

Avec :

A : La surface du champ photovoltaïque.

$E_{AC,d}$: L'énergie journalière totale générée par le système PV (E_{AC}).

Le rendement mensuelle du système est donnée par :

$$\eta_{sys} = \frac{E_{AC,m}}{H_t \times A} \quad [\%] \quad (III. 9)$$

Avec :

$E_{AC,m}$: L'énergie mensuelle totale générée par le système PV (EAC).

- **Facteur de charge (FC)**

Le facteur de charge est un moyen utilisé pour présenter l'énergie fournie par un système de production d'électricité [55] et défini comme le rapport de la production annuelle d'énergie réelle à la quantité d'énergie générée par la centrale solaire photovoltaïque si elle fonctionnait à sa puissance nominale maximale ($P_{PV,rated}$) pendant 24 h par jour pendant une année. Le facteur de capacité annuel du système PV est donné par l'équation suivante :

$$FC = \frac{E_{AC}}{P_{PV} \times 8760} \times 100 \quad [\%] \quad (III. 10)$$

Le facteur de charge d'un système peut également être calculé comme suit :

$$FC_m = \frac{E_{AC,m}}{P_{PV} \times 24 \times N} \times 100 \quad (III. 11)$$

III.5. Analyse de l'évolution des performances d'une centrale solaire PV sous conditions climatiques sévères

III.5.1. Énergie générée

L'énergie mensuelle générée par le système photovoltaïque est représentée sur la figure III.6. Le pic de la production d'énergie est atteint pour le mois de mars 2020 avec 1059,46 MWh et le minimum d'énergie a été généré pour le mois de novembre 2020 avec 572,93 MWh.

L'énergie maximale générée est 1,85 fois supérieure à l'énergie minimale générée. La production moyenne mensuelle d'énergie est de 925,34 MWh. La production d'énergie a été estimée à 925,75 MWh pour la première année. La baisse de l'énergie générée pour la période de novembre à décembre pour l'année 2017 et 2019 est liée à diminution de la quantité d'irradiation reçue par le champ PV et à diminution de température sur site. Par contre la croît de l'énergie générée pour la période de novembre à décembre pour l'année 2018 et 2020 est liée à augmentation de la quantité d'irradiation reçue par le champ PV et à diminution de température sur site (voire la figure III.3).

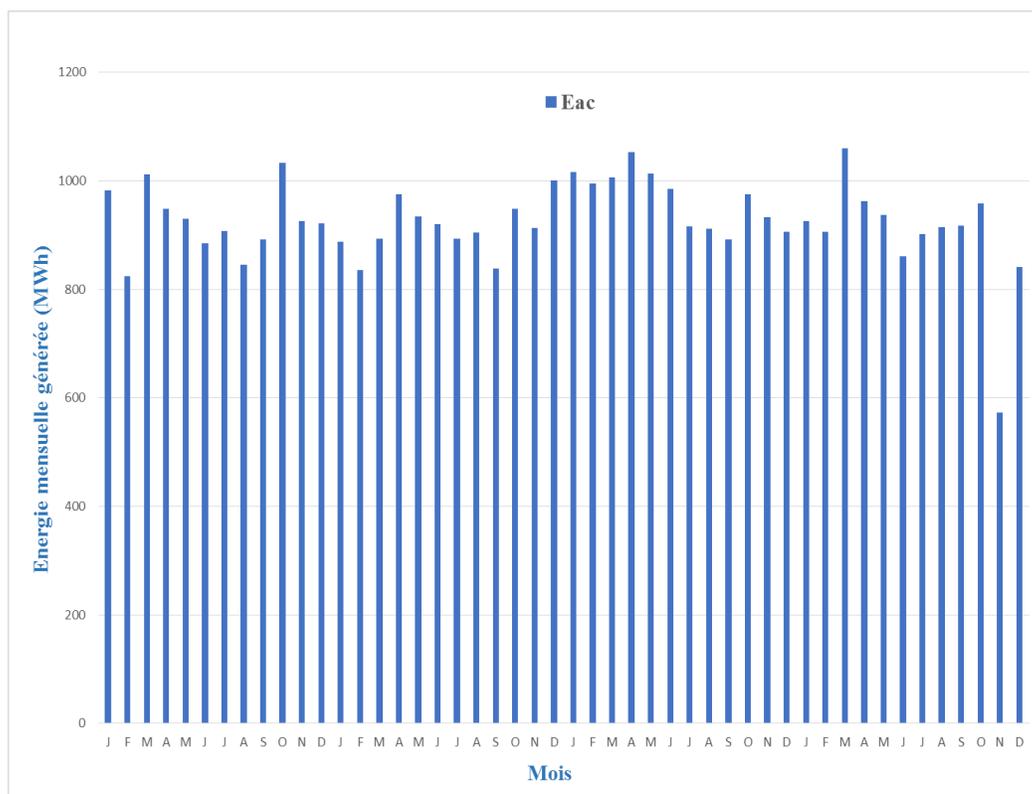


Figure.III.6 : Énergie mensuelle générée.

III.5.2. Rendement final et le rendement de référence

La figure III.7 illustre le rendement final moyen (Y_F), et le rendement de référence (Y_r) pendant les quatre années d'exploitation de la centrale photovoltaïque. Y_F , Y_r sont exprimés en heure par jour (h/j). Le rendement final mensuel varie avec un minimum de 4,52 h/j en décembre 2020 et un maximum de 5,91 h/j en février 2019 avec une moyenne de 5,15 h/j. Y_F étant la productibilité de la centrale solaire PV est très influencée par la variation des rayonnements solaires. Nous notons également que Y_F est faible pendant les mois d'hiver de novembre,

décembre pour l'année 2017 et 2019. Bien que non représentée, la variabilité du rendement de référence (Y_r) est similaire à Y_F , en raison de la dépendance de Y_F à l'ensoleillement du site. Le rendement de référence est compris entre un minimum de 5,99 h/j (janvier 2018) à 8,86 h/j (juin 2019) avec une moyenne de 7,10 h/j.

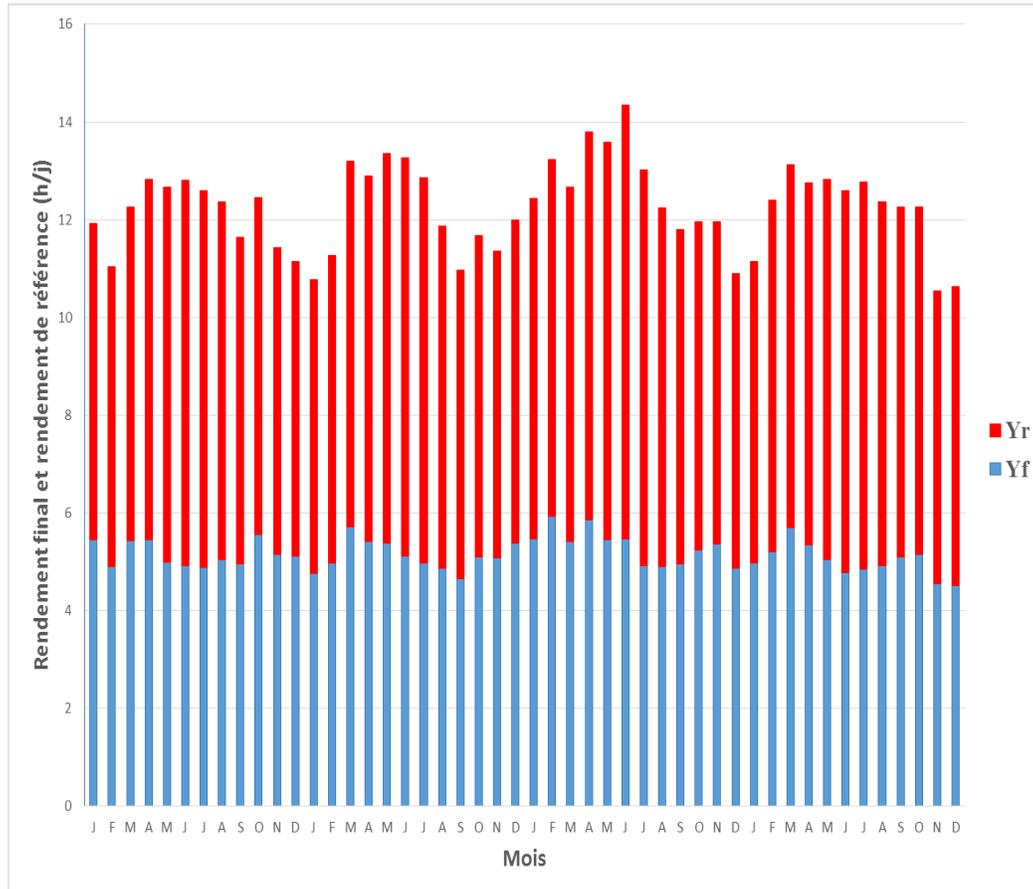


Figure.III.7 : Rendement final (Y_F), et Rendement de référence (Y_r).

III.5.3. Indice de performance normalisé

L'évolution mensuelle de l'indice de performance de la centrale PV de Zaouiet Kounta durant les années (2017, 2018, 2019 et 2020) est représentée sur la figure III.8. L'indice de performance normalisé mensuelle (PR) varie entre 61% (juillet-2019) et 85% (décembre-2017).

Notant qu'un indice de performance supérieur à 80% correspond à un système dont les performances approchent les performances idéales dans les conditions STC. La baisse de l'indice pour les mois de mai, juin et juillet est due à l'effet de la température et la poussière. Ce

soulèvement de poussière induit l'opacité du ciel qui réduit le taux d'insolation des panneaux solaires PV.

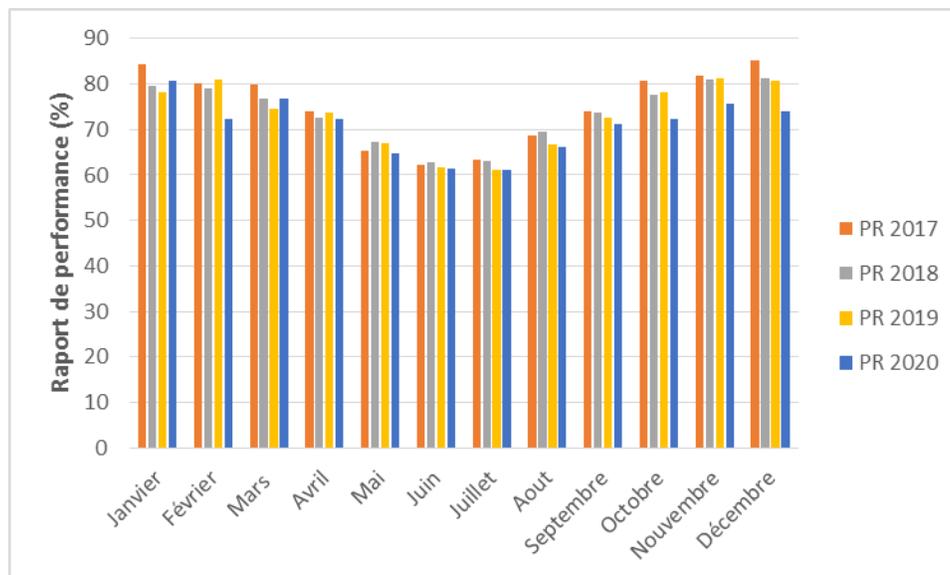


Figure.III.8 : Rapport de performance AC.

III.5.4. Rendement énergétique mensuelle

La figure III.9 montre le rendement mensuel moyen des modules photovoltaïques des quatre années (2017-2020) de suivi de la centrale PV. Il se situe entre 9,17% en juillet 2019 et 12,80% en décembre 2017 avec une valeur moyenne du rendement PV de 11,01%. Le rendement nominal des modules PV étant de 14,14% dans les conditions STC, par comparaison aux extremums, nous observons un écart de 1,34% pour le maximum (Déc-17), 4,97% pour le minimum (juil-19) et un écart de 3,13% pour le rendement PV moyen. A part le mois d'aout 2017, les plus faibles valeurs du rendement sont enregistrées les mois de juillet avec 9,47%, 9,17% et 9,20% respectivement pour 2018, 2019 et 2020. La valeur moins prononcée du rendement PV enregistrée pour le mois de juillet 2019 est liée aux taux d'empoussièrment des modules PV qui était plus élevé par rapport aux mois de mai des autres années. Selon la figure III.3, juillet 2017 a une température plus basse ($T_{moy} = 38,69 \text{ }^\circ\text{C}$) et un niveau d'irradiation solaire plus basse ($G_{moy} = 321,17 \text{ W/m}^2$) qu'en juillet 2020 ($T_{moy} = 39,00 \text{ }^\circ\text{C}$, $G_{moy} = 330,21 \text{ W/m}^2$), juillet 2019 ($T_{moy} = 39,70 \text{ }^\circ\text{C}$, $G_{moy} = 336,97 \text{ W/m}^2$) et juillet 2018 ($T_{moy} = 40,82 \text{ }^\circ\text{C}$, $G_{moy} = 328,66 \text{ W/m}^2$).

En dehors de l'année 2020 où le rendement reste sensiblement constant pendant la saison chaude, les variations saisonnières restent semblables chaque année avec des graphiques en forme d'entonnoir.

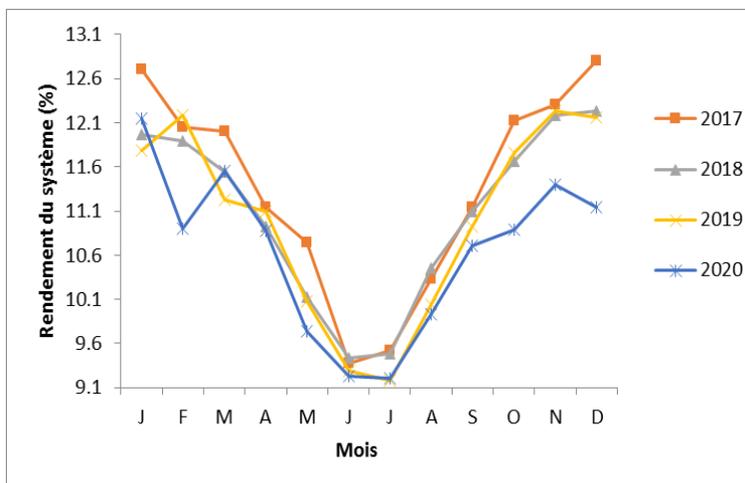


Figure.III.9 : Rendement mensuelle du système.

III.5.5. Facteur de charge

La performance des centrales photovoltaïques connectées au réseau est mieux définie par le facteur de charge (FC) ou "capacity factor" en anglais, qui est le rapport de sa production réelle en courant alternatif sur une période de temps. La figure III.10 montre le facteur de charge moyen mensuel pour les quatre années d'exploitation de l'installation solaire PV de 6 MWc. Les FC varient entre 18,83% en décembre 2020 et 24,66% pour le mois de février 2019, la moyenne sur les quatre années étant de 21,46%. La moyenne la plus élevée est atteinte la troisième année avec un FC de 22,16%. La baisse des FC est observée pour la période estivale rude de juin à août. Les facteurs de charges les plus faibles au cours des quatre années d'exploitation sont enregistrées pour les mois de décembre et sont de 21,34%, 22,40%, 20,28% et 18,83% respectivement pour 2017, 2018, 2019 et 2020. Comme illustré sur la figure III. 10, le FC est un paramètre fortement influencé par les variations saisonnières illustrées et cela se traduit par un écart d'environ 3% entre les mois d'estivale (juin à août) et les autres mois de l'année. Comme les valeurs de FC dépendent de l'irradiation solaire et de la température ambiante, la période de juin à août correspond aux périodes où les températures et l'irradiation sont plus augmentées (Figure III.3). C'est la raison pour laquelle le FC diminue pendant cette période. Un facteur

comme l'empoussièrement de l'installation photovoltaïque peut aussi contribuer à cette diminution.

De plus, le facteur de charge est significatif dans la conception des centrales solaires PV car il peut estimer si un système solaire photovoltaïque sur un site donné est potentiellement exploitable.

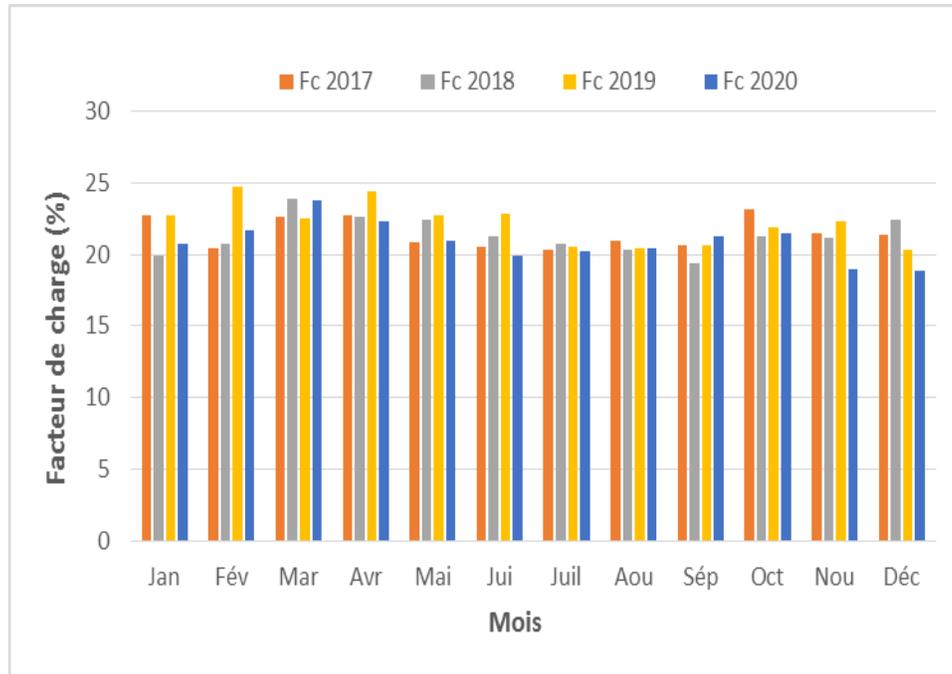


Figure.III.10 : Facteur de charge (2017 à 2020).

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, les performances du système photovoltaïque de Zaouiet Kounta connecté au réseau de 6 MWc ainsi que l'impact des facteurs climatiques ont été évaluées sur une période de quatre ans. Une analyse détaillée des performances a été effectuée sur la base des données surveillées de cette centrale photovoltaïque en suivant les normes CEI 61724 qui définissent des indicateurs de performance clés permettant d'évaluer la performance énergétique globale de toute centrale photovoltaïque.

Les paramètres de performance de cette centrale solaire PV sont résumés comme suit :

- L'énergie mensuelle générée (EAC) dans la centrale photovoltaïque de Zaouiet Kounta durant les quatre années (de 2017 à 2020) varie d'un année à un autre, elle présente une valeur maximale durant le mois de mars (1059,46 MWh) et une valeur minimale d'énergie durant le mois de novembre (572,93 MWh) avec une moyenne de l'énergie générée est 925,34 MWh.
- Le rendement de référence moyen mensuel et le rendement final sont respectivement de 5,15 h/j, 7,10 h/j.
- Le rapport de performance moyen pour le système PV (AC) est d'environ 73%.
- Le rendement moyen du système PV est 11,01%, avec le minimum et le maximum sont respectivement 9,17% (juil-19) et 12,80% (déc-17). Des graphiques en forme d'entonnoir ont été observés en relation avec la variation saisonnière des rendements de système PV.
- Le facteur de charge varie entre 18,83% (déc-20) et 24,66% (fév-19). La moyenne maximale est atteinte pour la troisième année avec 22,16%, avec une moyenne du facteur de charge des quatre années de 21,46%.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'Algérie a adopté en 2011 une stratégie ayant pour objectif de produire d'ici 2030, 40% d'électricité à partir de ressources renouvelables. Un plan à long terme sur les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique a été adopté pour objectif, la mise en place de 22.000 MW de capacité installée entre 2011 et 2030 dont 12.000 MW pour couvrir la demande nationale et 10.000 MW pourraient être exportés, si des garanties d'achat à long terme et des financements extérieurs étaient sécurisés. Ce programme inclut la réalisation, d'ici 2020, d'une soixantaine de centrales solaires photovoltaïques et solaires thermiques, de fermes éoliennes et de centrales hybrides. C'est aussi l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde et en particulier de la région MENA. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et sahara).

Notre étude porte sur une de ces centrales photovoltaïques, c'est la centrale PV de Zaouiet Kounta située dans la wilaya d'Adrar en Algérie.

Une interface graphique a été pour l'analyse de performance de la centrale de Zaouiet Kounta (Adrar) pour les quatre années (2017 à 2020) en utilisant le logiciel Excel. Les résultats de cette interface sont les mêmes résultats calculés en utilisant le logiciel de Matlab.

L'interface graphique permet de calculer et d'analyser les paramètres de performance suivants ; l'énergie AC, le rendement de référence (Y_r), le rendement final du système PV (Y_F), le rapport de performance (PR), le facteur de charge (FC), le rendement du système (η).

L'analyse de performance du champ photovoltaïque de la centrale solaire de Zaouiet Kounta selon les normes standardisées (Commission Electrotechnique Internationale) CEI 61724, nous a permis de constater que :

- L'énergie mensuelle générée (E_{AC}) dans la centrale photovoltaïque de Zaouiet Kounta durant les quatre années (2017, 2018, 2019 et 2020) varie d'une année à un autre, elle présente une valeur maximale durant le mois de mars (1059,46 MWh) et une valeur minimale d'énergie durant le mois de novembre (572,93 MWh) avec une moyenne de l'énergie générée est 925,34 MWh.

- Le rendement de référence moyen mensuel et le rendement final sont respectivement de 5,15 h/j, 7,10 h/j.
- Le rapport de performance moyen pour le système PV (AC) est d'environ 73%.
- Le rendement moyen du système PV est 11,01%, avec le minimum et le maximum sont respectivement 9,17% (juil-19) et 12,80% (déc-17). Des graphiques en forme d'entonnoir ont été observés en relation avec la variation saisonnière des rendements de système PV.
- Le facteur de charge varie entre 18,83% (déc-20) et 24,66 (fév-19). La moyenne maximale est atteinte pour la troisième année avec 22,16%, avec une moyenne du facteur de charge des quatre années de 21,46%.

Les résultats présentés dans ce travail a montré que il est nécessaire d'effectuer des tests préalables et de connaître le profil de site c'est-à-dire des propriétés statistiques des variables en jeu à tous les niveaux d'éclairiments possibles et faire le suivi de l'endurance et de la fiabilité des systèmes et équipements solaires installer en milieu saharien pour une meilleure rentabilité des installations PV dans le Sahara

Comme perspective, on propose de compléter cette étude en tenant compte des prochaines années. De même, faire une comparaison entre cette centrale et d'autres tel que la centrale Reggan ou d'autres régions tel que Ghardaïa et Tamanrasset et même avec des pays hors Algérie, comme le Koweït et l'Inde par exemple, ainsi voir l'effet de la poussière sur les propriétés de performance électrique des modules PV dans la centrale solaire étudiée peut faire l'objet d'une étude plus approfondie. Il peut être approprié de prendre en compte le type de poussière par l'évaluation des caractéristiques de l'empoussièrement à la surface des modules PV et tenir compte de la modification spectrale de l'irradiation due à la poussière suspendue dans la prédiction énergétique. Un autre problème important à étudier est l'effet d'ombrage sur la surface des modules PV.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Renewable capacity statistics 2020, International Renewable Energy Agency (IRENA), https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2020.pdf
- [2] Renewable Energy Technologies, <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Technologie>.
- [3] Conclusion | TPE : Les énergies renouvelables, une solution vraiment respectueuse de l'environnement ?
<https://energiesrenouvelables.wordpress.com/>
- [4] BOUZEGANE Mhenna, GAOUAOUI Ferhat. Alimentation d'un moteur à courant continu par une source photovoltaïque. Master Académique, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2018.
- [5] LAKHDARA Amira. Etude de la commande la puissance stockage d'un système photovoltaïque. Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2019.
- [6] Pr. DHIB Abderrahmen. Evaluation de performance d'un système photovoltaïque à injection réseau. Master, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi-,2017.
- [7] HASNI Hadjèr. Caractérisation Automatisée d'une cellule solaire. Master, Université Med Khider Biskra, 2014.
- [8] M^{elle} AMARA Karima. Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension. Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.
- [9] DJEDID Meriem. Etude expérimentale de l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement d'une cellule PV. Master, Université Larbi Ben M'hidi -Oum El Bouaghi-, 2019.
- [10] Mr. BELKACEM Mourad. Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximale (MPPT). Master, Université Abou Bekr Belkaid De Tlemcen, 2015.

- [11] DJEMAI Ilyas Zemghassene. Recharge d'une batterie avec un panneau photovoltaïque et poursuite du point de puissance maximale. Mémoire en vue d'obtention du MASTER Académique en Automatiques, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2018.
- [12] M^{me} AZIZI Amina. Modélisation optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride. Thèse Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat troisième cycle, Université Badji Mokhtar –Annaba, 2019.
- [13] OUANOUGHY Mohamed Zouhair. Commande d'un système photovoltaïque par deux techniques (P&O et FLC). Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2019.
- [14] REZOUG Mohamed Redha. Etude et Réalisation d'un Système d'Orientation et de Conversion Destiné à Optimiser le Rendement d'un Système. Thèse Pour l'Obtention du diplôme de doctorat en science, Université des Frères Mentouri de Constantine, 2018.
- [15] ARAB Salim, TOUDERT Dalila. «Etude d'un Système Photovoltaïque ». Mémoire de Fin d'Etude de Master Académique, Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2017.
- [16] AZIZ Halima, SADDEK Somia. Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque organique inversé. Master, Université Ahmed Draia Adrar, 2017.
- [17] BIDA Sara. Etude des performances d'une station photovoltaïque connectée au réseau. Mémoire de Master, Université Mohamed Khider, 2017.
- [18] AGGAB Salma, BEN AMARA Wahida. Extraction des paramètres électriques des modules photovoltaïques basée sur les algorithmes génétiques. Master académique, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2018.
- [19] M^{elle} KARIMI Siham. Contribution à l'analyse des performances du système PV raccordé au réseau sous différentes conditions climatique dans un milieu saharien. Master, Université Ahmed Draïa Adrar, 2018.
- [20] Helali Kamelia, «Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative». Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2012.

- [21] Modules et systèmes photovoltaïques, Systèmes PV_ Alain Ricaud_Sept-08 Comprese, 10/161.
- [22] NDIAYE Papa Amadou, KAWTHER Achari. « Production d'énergie électrique à partir d'un système photovoltaïque ». Mémoire de Master Académique, Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2019.
- [23] TAHTAH Ilyes, LOUAHADJ Aissa. Influence Des Paramètres Externes et Internes Sur Les Caractéristiques du Générateur PV. Master, Université Larbi Tebassi – Tebassa, 2017.
- [24] BAHTOUN Hicham, NOURI Abdelkader. Etude des différents montages et différents branchements des panneaux solaires. Master, Université l'arbi ben m'hidi (Oum el bougi), 2014.
- [25] HOUAMED Abdelkamel, HARIZ Abdelkader Abdelhak. Application des réseaux artificiels des neurons pour contrôler la tension d'un système photovoltaïque connecté à un réseau local. Master Académique, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 2015.
- [26] CHERIFI Sara, HADDAD Mohamed. L'énergie solaire : un moteur du développement durable en Algérie. Les Cahiers du Cread, vol. 35 - n° 03 – 2019.
- [27] BOUZIANE Afaf. Évaluation du rayonnement solaire en Algérie pour des applications photovoltaïques. Master Académique, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2018.
- [28] Rapport d'activités et comptes sociaux consolidés 2016. www.sonelgaz.dz, En ligne, visité le 30 mars 2021.
- https://rise.esmap.org/data/files/library/algeria/CC%2019/CC_19%20SONELGAZ%20Annual%20Report%202016.pdf
- [29] Présentation du Groupe Sonelgaz. www.sonelgaz.dz, 2020. En ligne, visité le 1 Avril 2021.
- [30] Sonelgaz. www.sonelgaz.dz, 2020. En ligne, visité le 1 Avril 2021.
- [31] Société du groupe Sonelgaz ELIT.Spa. Shariketkahrabawataket moutadjad. www.sktm.dz, 2014. En ligne, visité le 29 mars 2021.
- [32] Rapport sur la centrale PV-ZKP-2017. Shariket kahraba wa taket moutadjadida. Sktm.

- [33] Centrale électrique solaire Zaouiet Kounta par google Map, 2021. En ligne, visité le 26 mars 2021.
- [34] L5ZK1EL-SL001-D5 Z.Kounta 6MW schéma unifilaire GENERAL-2014.10.06.pdf.
- [35] Photovoltaïque.info.www.ppotovoltaïque.info, 2019.En ligne, visité le 9 Avril 2021.
- [36] <http://mobile.twitter.com/radioalgerie/status/126258520860960929>
- [37] Mefti A, Bouroubi M.Y, & Mimouni H, (2002), «Évaluation du Potentiel énergétique Solaire », Bulletin des Énergies Renouvelables(2) 02, décembre 2002.
- [38] Source : Banque Mondiale, disponible sur : <http://www.banquemondiale.org/>, consulté le 2 septembre 2018.
- [39] Lahmar F, Rahmouni S, & Chitour C.E, (2007), « Le Potentiel énergétique actuel de l'Algérie », 11e journée de l'énergie, Laboratoire de valorisation des énergies fossiles, École Nationale Polytechnique, p. 12.
- [40] Ministère de l'Énergie. (2018), Bilan des réalisations fourni par la structure chargée des énergies renouvelables.
- [41] Source : Ministère de l'Énergie : <http://www.energy.gov.dz>, consulté le : 12 septembre 2018.
- [42] بشيرمصيطفي. (2017). «الجزائررؤية إستشرافية». سلسلة صناعة الغد، جسور للنشر والتوزيع، الطبعة الأولى، صفحة 140
- [43] Ministère de l'Énergie. (2016), commission de régulation de l'électricité et du gaz, les énergies renouvelables en Algérie, Berlin, p. 10.
- [44] Ministère de l'Energie. (2016), Programme de Développement des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité énergétique en Algérie, Algérie, janvier, p. 3, online : <http://www.energy.gov.dz/francais/uploads/2016/Energie/energierenouvelable.pdf>, visite le 12/09/2018.
- [45] Source : réalisé par nos soins à partir de la référence suivante : ministère de l'Énergie. (2016), Programme National des Énergies Nouvelles et renouvelables, Algérie, page 9, online : <http://www.energy.gov.dz/francais/uploads/2016/Programme-National/Programme-NationalEnergies-Nouvelles-Renouvelables.pdf>., consulté le 12 septembre 2018.

- [46] Journal officiel, Décret exécutif n° 16-121 du 28 Joumada Ethania 1437 correspondant au 6 avril 2016 modifiant et complétant le décret exécutif n° 15-319 du Aouel Rabie El Aouel 1437 correspondant au 13 décembre 2015 fixant les modalités de fonctionnement du compte d'affectation spéciale n° 302-131 intitulé « Fonds national pour la maîtrise de l'énergie et pour les énergies renouvelables et de la cogénération ».
- [47] Source : réalisé par nos soins à partir du bilan de réalisation fourni par la structure chargée des énergies renouvelables au sein du ministère de l'Énergie.
- [48] International Standard IEC 61724, Photovoltaic system performance monitoring guidelines for measurement, Data exchange and analysis, 1998.
- [49] HNEINI Mema Babe. Etude de la centrale photovoltaïque de Skhouna (Saida). Master Académique, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2019.
- [50] Sundaram S, Babu JSC. Performance evaluation and validation of 5 MWp grid connected solar photovoltaic plant in South India. *Energy Convers Manage*, Vol.100, pp.429–439, 2015.
- [51] Sharma Vikrant, Chandel SS. Performance analysis of a 190 KWp grid interactive solar photovoltaic power plant in India. *Energy*, Vol.55, pp.476–485, 2013.
- [52] Bouchra BENABDELKRIM, « Etude et simulation de l'effet de paramètre climatique sur les modules solaires en couche mince en région saharien », Thèses de Doctorat , UNIVERSITE AHMED DRAIA- ADRAR, 2021
- [53] Trillo-Montero D, Santiago I, Luna-Rodriguez J, Real-Calvo R. Development of a software application to evaluate the performance and energy losses of gridconnected photovoltaic systems. *Energy Convers Manage*, Vol.81, pp.144–159, 2014.
- [54] Ozden T, Akinoglu BG, Turan R. Long term outdoor performance of three different on-grid PV arrays in central Anatolia – an extended analysis. *Renew Energy*, Vol.101, pp.182–195, 2017.
- [55] ElhadjSidi CEB, Ndiaye ML, Bah ME, Mbodji A, Ndiaye A, Ndiaye PA. Performance analysis of the first large-scale (15 MWp) grid-connected photovoltaic plant in Mauritania. *Energy Convers Manag*, Vol.119, pp ; 411–421, 2.

Annexe



Figure. I : Champs photovoltaïques de centrale PV de Zaouiet Kounta.



Figure. II : L'ordinateur de travail.



Figure. III : Station météorologique.