

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Electrotechnique
Spécialité : **Energie Renouvelable**

Présenté par
Ait Djoudi Oufella Wiam
Zidane Saïda

Thème
**Etude et analyses des
performances d'une installation
solaire photovoltaïque autonome**

Mémoire soutenu publiquement le 02/07 / 2024 devant le jury composé de :

M M'hand Mekious
MCB, UMMTO, Président

Mme Djohra KOUSSA-SAHEB
Directeur de Recherché, CDER, Encadreur

Mme Ferroudja BITAM-MEGHERBI
Professeur, UMMTO, Co-Encadreur

Mme Rahma KACHENOURA
MCB, UMMTO, Examineur

Remerciements

Nous remercions Dieu le tout puissant pour ce qu'il nous a tant donné comme volonté, santé et surtout patience, pour pouvoir, durant toutes ces longues années d'études d'arriver là où nous sommes aujourd'hui et de concrétiser tous nos efforts par ce modeste travail.

Nous tenons en premier lieu à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Madame **Djohra KOUSSA-SAHAB**, Directrice de division de recherche en énergie photovoltaïque au Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER), pour avoir d'abord proposée ce thème, et pour ses conseils, son aide pour faire avancer notre travail.

Nous tenons à remercier respectueusement Madame **Ferroudja MEGHERBI-BITAM**, Professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO), co-encadrante de notre mémoire de Master, pour les nombreux conseils qu'elle a su nous prodiguer.

Nous remercions aussi les membres du jury de nous avoir fait l'honneur de juger notre travail : Monsieur le Président M'hand MEKIOUS et l'examinatrice Madame Rahma KACHENOURA.

Nous remercions aussi l'ensemble des enseignants du département d'Électrotechnique de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO) pour leur encadrement tout au long de ma formation.

Nous remercions également tout le personnel et les chercheurs du Centre de Développement des Énergie Renouvelable (CDER) pour leur chaleureux accueil et leur accompagnement.

Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis pour leur soutien de près ou de loin.

Nous tenons enfin à remercier vivement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail à nos chers parents ainsi qu'à toute notre famille pour leur soutien moral et leurs encouragements incessants, ainsi qu'à tous nos amis.

Saida et Wiam

Table des matières

Introduction Générale	1
Chapitre 1 Généralités sur l'énergie solaire Photovoltaïque.....	2
1.1 Introduction	4
1.2 Fondements théoriques de l'énergie solaire photovoltaïque.....	4
1.2.2 L'énergie photovoltaïque	5
1.2.3 La cellule solaire.....	5
1.2.4 La structure d'une cellule solaire	5
1.2.5 Type de cellules.....	6
1.2.5.2 Les cellules polycristallines.....	7
1.2.5.3 Les cellules amorphes.....	7
1.2.5.4 Les cellules nanocristallines	8
1.2.6 Principe de fonctionnement d'une Cellule photovoltaïque.....	9
1.2.7 Principe de la conversion photovoltaïque	9
1.2.8 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	10
1.2.8.2 Caractéristiques puissance / tension	10
1.2.9 L'influence de la lumière et de la température.....	11
1.2.10 Système photovoltaïque	11
1.2.11 Type de système photovoltaïque	11
1.2.11.2 Système photovoltaïque autonome	12
1.2.11.3 Système photovoltaïque connecté au réseau de distribution électrique.....	12
1.2.11.4 Les systèmes hybrides	14
1.2.12 Avantages et inconvénients du photovoltaïque	15
1.2.12.1 Avantages.....	15
1.2.12.2 Inconvénients.....	15
1.3 Aspects techniques et performance.....	16
1.3.1. Mesure et évaluation du rendement des systèmes photovoltaïques.....	16
1.3.2. Caractéristiques électriques des installations solaires	17
1.3.3. Normes et régulations dans l'installation de systèmes photovoltaïques.....	17
1.4 Applications et utilisations de l'énergie solaire	17
1.5 Impact environnemental et économique de l'énergie solaire.....	18
1.5.1 Avantages environnementaux de l'énergie solaire	18
1.5.2 Analyse économique : coûts, investissements et retour sur investissement.....	19
1.5.3 Politiques de soutien et perspectives de développement	19
1.6 Conclusion.....	19
Chapitre 2 : Système solaire Photovoltaïque autonome	20
2.1 Introduction.....	21
2.2 Types de systèmes PV autonomes	21
2.2.1 Les systèmes au fil du soleil.....	21

2.2.2	Les systèmes avec stockage	22
2.3	Étapes pour créer une installation photovoltaïque autonome	22
2.4	Les composants d'une installation photovoltaïque autonome.....	22
2.4.1	Le Module photovoltaïque	23
2.4.2	Système de protection [17]	24
a)	La Diode By-pass.....	25
a)	La Diode Anti-Retour.....	25
2.4.3	Les batteries	26
2.4.4	Le Régulateur.....	28
2.4.5	L'onduleur.....	30
2.5	Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques autonomes.....	32
	Les inconvénients.....	32
2.6	Principe de fonctionnement des systèmes photovoltaïque autonome.....	33
2.7	Application.....	34
2.8	Défauts dans les systèmes photovoltaïques	35
2.9	Revue de littérature sur l'installation solaire photovoltaïque autonome.....	37
2.10	Conclusion	45

Chapitre3 : Présentation de l'installation et Méthodes de diagnostics.....46

3.1	Introduction.....	47
3.2	Présentation du système.....	47
3.3	Modélisation du système.....	48
3.3.1	Modélisation de la position du soleil	48
3.3.2	Modèle du rayonnement solaire.....	50
3.3.2.1	Rayonnement solaire sur un plan Horizontal	50
3.3.2.1.1	Rayonnement total I sur un plan horizontal.....	53
3.3.2.1.2	Rayonnement diffus I_d	53
3.3.2.1.3	Rayonnement direct I_b	53
3.3.2.2	Rayonnement solaire sur un plan Incliné	53
3.3.2.2.1	Le rayonnement direct I_b	54
3.3.2.2.2	Le rayonnement diffus ID	54
3.3.2.2.3	Le rayonnement réfléchi IR	54
3.3.3	Modélisation du générateur photovoltaïque	54
3.3.3.1	Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	55
3.3.3.2	Modélisation de module photovoltaïque.....	57
3.3.4	Modélisation du système de stockage.....	61
3.3.4.1	Modèle électrochimique	61
3.3.4.2	Modèle électrique simplifié.....	62
3.3.5	Choix du régulateur.....	64
3.3.6	Choix d'onduleur	64
3.3.7	La charge.....	64

3.3.8	Méthodes de diagnostics	65
3.9	Les défauts	65
3.9.1	Défaut dans la Résistance Série (R_s)	65
3.9.2	Défaut dans la Résistance Shunt (R_p)	65
3.9.3	Défaut d'Ombrage	66
3.9.4	Défaut dans la Diode	66
3.9.5	Défaut de Mismatch.....	66
3.3.9	Conclusion.....	66

Chapitre 4 : Simulation et discussion des résultats.....67

4.1	Introduction	68
4.2	Outils de simulation	68
4.2.2	MATLAB script	68
4.2.3	PVsyst.....	69
4.3	L'emplacement géographique.....	69
4.4	Données météorologiques du site de Bouzareah.....	70
4.5	Simulation avec MATLAB.....	71
4.5.2	Rayonnement solaire sur un plan horizontal.....	72
4.5.3	Rayonnement solaire sur un plan incliné.....	73
4.5.4	La simulation du générateur PV	75
4.5.5	L'influence de l'éclairement sur la caractéristique IPV(VPV) et PPV(VPV).....	76
4.5.6	L'influence de la température sur la caractéristique IPV(VPV) et PPV(VPV).....	76
4.5.7	La puissance électrique captée par le Module PV.....	77
4.5.8	La simulation du système de stockage (Batterie).....	78
4.5.9	L'Influence de la température sur la tension de la charge et la décharge de la batterie.....	78
4.6	Résultats de simulation avec PVsyst et leur comparaison avec ceux obtenus avec MATLAB	81
4.7	Résultats de simulation des différents défauts.....	83
4.7.1	Augmentation de la Résistance Série.....	84
4.7.2	Défaut dans la résistance shunt (Parallèle).....	85
4.7.3	Défaut de Mismatch.....	86
4.7.4	Défaut d'ombrage	87
4.7.5	Défaut dans la Diode	88
4.8	Conclusion	90

Liste des figures

Numéro	Titre	Page
Figure 1.1	Différents composants du rayonnement solaire	4
Figure 1.2	la cellule photovoltaïque	5
Figure 1.3	cellule monocristalline	6
Figure 1.4	Cellule polycristalline	7
Figure 1.5	cellule amorphe	8
Figure 1.6	Les cellules nanocristallines	8
Figure 1.7	structure d'une cellule photovoltaïque	9
Figure 1.8	Caractéristiques courant/ tension d'une cellule	10
Figure 1.9	caractéristiques puissance / tension d'une cellule	10
Figure 1.10	caractéristiques courant / tension d'une cellule	11
Figure 1.11	Schéma d'un système photovoltaïque autonome	12
Figure 1.12	Schéma d'un système photovoltaïque connecté au réseau de distribution électrique	14
Figure 1.13	Système hybride	15
Figure 2.1	Schéma de principe d'un système PV autonome sans stockage (pompage au fil du soleil)	21
Figure 2.2	Schéma d'un système Solaire Photovoltaïque autonome en site isolé	22
Figure 2.3	schéma sur les composants d'un système photovoltaïque autonome	23
Figure 2.4	Mise en série des cellules PV dans le module et protection par des diodes by pass.	24
Figure 2.5	Connexion d'un GPV élémentaire avec diode by-pass	24
Figure 2.6	Etat de fonctionnement de diode by-pass.	25
Figure 2.7	Protection avec une diode anti-retour.	25
Figure 2.8	composition d'une batterie	26
Figure 2.9	Rôle de l'onduleur au sein d'une installation photovoltaïque autonome	30
Figure 2.10	fonctionnement des panneaux solaire autonome	34
Figure2.11	Générateur photovoltaïque installé au centre de recherche de la station d'assekrem Tamnerast	33
Figure2.12	Générateur photovoltaïque installé a Djanet wilaya d'illizi	33
Figure2.13	Pompage de l'eau par S.PV directions des forêts Illizi	35
Figure2.14	Electrification par E.S.des postes de surveillance OPNT Illizi	35
Figure2.15	Kit solaire (site isolé) initié par le ministère de l'agriculture	36
Figure 3.1	Image du système étudié installé au CDER.	48
Figure 3.2	Orbite de rotation de la Terre autour du Soleil.	48
Figure 3.3	Rayonnement solaire sur une surface horizontale.	51
Figure 3.4	Rayonnement solaire sur un plan Incliné.	53
Figure 3.5	Schéma équivalent de la cellule PV	55
Figure 3.6	schéma d'un accumulateur plomb-acide	61
Figure 3.7	Schéma électrique équivalent simplifié de la batterie	62
Figure 4.1	L'interface de MATLAB script	69
Figure 4.2	l'emplacement géographique avec les coordonnées sur Google earth	70
Figure 4.3	Rayonnement extraterrestre quotidien horizontal.	72
Figure 4.4	Rayonnement estimé sur un plan horizontal.	73
Figure 4.5	Evaluation du rayonnement solaire sur un plan incliné à un angle $\beta = 36^\circ$, orienté plein sud	74

Liste des figures

Figure 4.6	Caractéristique électrique I-V et P-V d'un module photovoltaïque	75
Figure 4.7	(a) Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V (b) Influence de température la caractéristique P-V.	76
Figure 4.8	(c) Influence de la température sur la caractéristique I-V (b) Influence de température la caractéristique P-V.	77
Figure 4.9	Puissance électrique captée par le module PV et le courant électrique captée par le GPV	77
Figure 4.10	Evaluation de la capacité C_{batt}/C_{10} en fonction du courant de décharge normalisé (I_{Batt}/I_{10}), sous l'influence de température	78
Figure 4.11	Influence de la température sur le processus de charge de la batterie	78
Figure 4.12	Influence de la température sur le processus de décharge de la batterie	79
Figure 4.13	Etat de charge de la batterie pour différentes durées de fonctionnement	79
Figure 4.14	La profondeur de décharge de la batterie pour différentes durées de fonctionnement	80
Figure 4.15	la caractéristique (I-V) en STC obtenus avec MATLAB et PVsyst	81
Figure 4.16	la caractéristique (P-V) en STC obtenus avec MATLAB et PVsyst	82
Figure 4.17	caractéristique de I-V (A) et P-V (B) en STC dans le cas normal et avec défauts de la résistance en série	83
Figure 4.18	caractéristique de I-V (A) et P-V (B) en STC dans le cas normal et avec défaut de la résistance en série	84
Figure 4.19	caractéristique de P-V en STC dans le cas normal et avec défaut de la résistance shunt	85
Figure 4.20	caractéristique P-V en STC avec défaut Mismatch	86
Figure 4.21	caractéristique de I-V en STC dans le cas normal et avec défaut d'ombrage	88
Figure 4.22	caractéristique de I-V en STC dans le cas normal et avec défaut de la diode	89

Dans un contexte mondial marqué par la transition énergétique et la quête de solutions durables, l'énergie solaire photovoltaïque s'impose comme une technologie clé et prometteuse. Elle offre une alternative viable aux énergies fossiles, réduisant significativement les émissions de gaz à effet de serre et jouant un rôle crucial dans la lutte contre le changement climatique. Cette transition est d'autant plus essentielle que les réserves mondiales de combustibles fossiles s'amenuisent, tandis que les préoccupations environnementales et sanitaires liées à leur utilisation ne cessent de croître [1, 2]. De plus, l'énergie solaire, de par sa capacité à être intégrée à diverses échelles (domestique, industrielle, et territoriale), contribue à l'autonomie énergétique et à la résilience des communautés face aux fluctuations des marchés énergétiques et aux impacts environnementaux.

En Algérie, pays riche en ressources énergétiques traditionnelles telles que le pétrole et le gaz naturel, la diversification du mix énergétique est devenue une priorité stratégique. Bénéficiant d'un ensoleillement exceptionnel, avec plus de 3000 heures de soleil par an dans de nombreuses régions, l'Algérie dispose d'un potentiel considérable pour le développement de l'énergie solaire. Le Plan National de Développement des Énergies Renouvelables, lancé par le gouvernement algérien, vise à intégrer de manière significative les sources d'énergie renouvelable, en particulier le solaire, dans le bouquet énergétique national. [3, 4].

L'énergie solaire photovoltaïque, se distingue par sa capacité à convertir directement le rayonnement solaire en électricité grâce à des cellules photovoltaïques. Cette technologie offre des avantages substantiels, notamment sa modularité, son faible impact environnemental, et ses coûts opérationnels réduits.

Les systèmes photovoltaïques peuvent être installés à petite échelle sur des toitures domestiques ou à grande échelle dans des centrales solaires, et ne produisent pas d'émissions pendant leur fonctionnement. De plus, les matériaux utilisés dans les panneaux solaires sont en grande partie recyclables, ce qui renforce leur attrait écologique. Toutefois, l'énergie solaire photovoltaïque présente également des défis techniques et économiques [5]. Le coût initial des installations reste élevé, malgré une baisse continue des prix ces dernières années. La production d'électricité est variable, dépendant des conditions météorologiques et de l'ensoleillement, ce qui peut être imprévisible. Pour assurer une fourniture d'énergie stable, même en absence de soleil, il est crucial de développer des solutions de stockage efficaces, telles que les batteries. Ainsi, une recherche continue et des innovations technologiques sont essentielles pour surmonter ces obstacles et maximiser le potentiel de cette source d'énergie renouvelable [5].

Dans un pays avec une aussi vaste superficie, le raccordement au réseau électrique constitue un défi majeur pour le gouvernement. C'est dans ce contexte que les systèmes photovoltaïques autonomes se

révèlent être une solution particulièrement intéressante pour l'électrification de sites isolés ou éloignés des infrastructures existantes. Ces installations indépendantes, combinées à des systèmes de stockage, permettent de fournir une alimentation électrique fiable et durable, même dans des zones dépourvues d'accès au réseau national. Une étude approfondie de ces systèmes PV autonomes, incluant l'analyse de leurs composants, de leurs performances et des interactions entre les éléments, constitue un volet essentiel de ce mémoire. Une analyse détaillée sera menée pour identifier les paramètres clés et les contraintes associés à leur dimensionnement, leur installation et leur fonctionnement, dans le but d'optimiser leur rendement, leur fiabilité, et de proposer des solutions adaptées aux spécificités locales [6].

Ce manuscrit est structuré en quatre chapitres principaux.

Le premier chapitre rappelle les bases des systèmes photovoltaïques. Il présente les composants des systèmes PV et explique le principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, en définissant l'effet photovoltaïque. Une présentation des différents modèles de cellules photovoltaïques y est également incluse.

Le deuxième chapitre offre un aperçu des différents types de systèmes photovoltaïques existants et examine les défauts pouvant affecter le générateur. Une brève revue de la littérature est incluse à la fin pour situer le contexte des recherches dans le domaine.

Le troisième chapitre détaille notre installation spécifique et la modélisation de chaque composant. Une section est dédiée aux défauts que nous avons introduits dans notre installation pour simuler et analyser leurs impacts.

Enfin, le quatrième chapitre traite des simulations réalisées avec les logiciels MATLAB et PVsyst. Une comparaison détaillée entre les résultats obtenus avec ces deux outils met en lumière l'importance de la prise en compte des différentes pertes dans la modélisation précise des systèmes solaires.

Chaque partie est conçue pour fournir une compréhension approfondie des aspects théoriques et pratiques de l'énergie solaire photovoltaïque, culminant dans une analyse comparative des outils de simulation pour une modélisation optimale des systèmes photovoltaïques.

Chapitre 1 Généralités sur l'énergie solaire Photovoltaïque

1.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque représente une réponse essentielle aux défis contemporains en matière de durabilité énergétique et environnementale. Ce chapitre explore les fondements théoriques, techniques et les applications de cette technologie innovante, mettant en lumière son rôle croissant dans le paysage énergétique mondial.

1.2 Fondements théoriques de l'énergie solaire photovoltaïque

1.2.1 Rayonnement solaire

L'énergie solaire provient du soleil, une étoile en forme de pseudosphère située à une distance moyennede 149598 kilomètres de la terre, avec un diamètre atteignant 1391000 kilomètres. Cette source d'énergie gigantesque est disponible en permanence et résulte de la fusion d'hydrogène qui se déroule dans le soleil depuis environ 4,6 milliards d'années. Lorsque les atomes d'hydrogène fusionnent, des atomes plus lourds se forment, libérant ainsi une quantité importante d'énergie sous forme de chaleur et de rayonnement, processus connu sous le nom de fusion nucléaire [7].

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. On distingue donc plusieurs composants :

- Le rayonnement direct : qui est reçu du soleil sans diffusion par l'atmosphère. Ces rayons sont parallèles entre eux et peuvent être concentrés par des miroirs.
- Le rayonnement diffus : qui est constitué de la lumière diffusée par l'atmosphère. Ce rayonnement est isotrope, c'est-à-dire qu'il provient de toutes les directions de la voute céleste de manière égale.
- L'albédo : représente la partie du rayonnement solaire réfléchi par le sol, dépendant de l'environnement du site où il est mesuré.

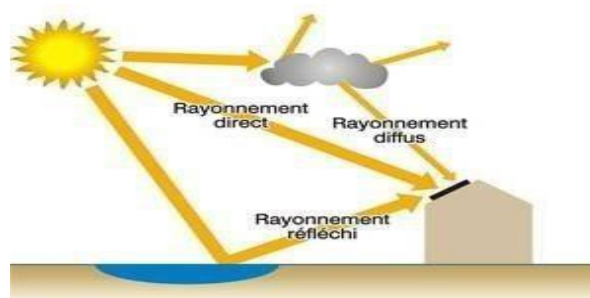


Figure 1.1 : Différents composants du rayonnement solaire.

1.2.2 L'énergie photovoltaïque

Le terme "photovoltaïque" trouve ses origines dans le grec, où "photo" signifie lumière et "volta" est dérivé du nom du physicien italien Alessandro Volta, célèbre pour avoir inventé la pile électrique en 1800. L'énergie photovoltaïque représente une conversion directe du rayonnement solaire en électricité grâce à l'utilisation de cellules photovoltaïques. Cette conversion, connue sous le nom d'effet photovoltaïque, a été découverte en 1839 par Edward Becquerel. Les cellules photovoltaïques sont assemblées en modules, qui sont ensuite regroupés en panneaux photovoltaïques. Ces panneaux permettent de convertir directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité en générant et en transportant des charges électriques à travers un matériau semi-conducteur exposé à la lumière [8].

1.2.3 La cellule solaire

Les cellules photovoltaïques, également connues sous le nom de plaques solaires, sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque ». Ce phénomène a été découvert par le physicien français Edward Becquerel en 1839 [9].

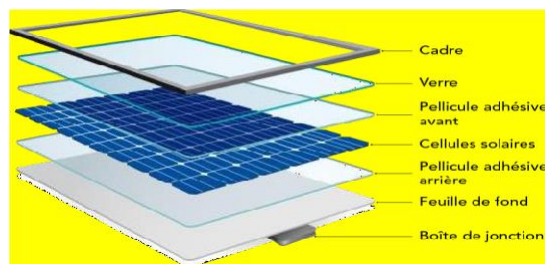


Figure 1.2 : La cellule photovoltaïque.

1.2.4 La structure d'une plaque solaire

Une cellule photovoltaïque repose sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque, qui permet la conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique. Ce processus résulte de l'interaction du rayonnement solaire avec les électrons d'un matériau semi-conducteur. La tension générée par la cellule peut varier typiquement entre 0,3V et 0,7V, en fonction du matériau utilisé, de sa configuration, de la température et de son état de vieillissement.

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur capable à la fois d'absorber l'énergie des photons incident et de transférer cette énergie à un électron, ainsi que de collecter cet électron chargé pour alimenter un circuit externe. Les cellules photovoltaïques peuvent varier en taille, allant de quelques centimètres carrés à plus de 100cm², et peuvent adopter des formes circulaires, carrées, ou dérivées de ces deux géométries.

1.2.5 Type de cellules

1.2.5.1 Les cellules monocristallines

Elles sont issues d'un seul bloc de silicium fondu, donc très "pures", mais aussi plus chères à la production, donc à la vente. Ces cellules sont en générale octogonales et d'une couleur uniforme foncée(bleu marine ou gris). C'est la première génération de photopiles, Un taux de rendement excellent (12-16%) (23% en Laboratoire), Une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère, il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.

Les cellules photovoltaïques de première génération sont fabriquées à partir d'un seul bloc de silicium fondu, ce qui les rend très pures mais aussi plus coûteuses à produire et à vendre. Elles sont généralement de forme octogonale et présentent une couleur uniforme foncée, souvent bleu marine ou gris. Ces cellules affichent un taux de rendement excellent de l'ordre de 12% à 16% en conditions réelles (jusqu'à 23% en laboratoire). Cependant, leur méthode de fabrication est laborieuse et complexe, ce qui contribue à leur coût élevé. De plus, la production nécessite une grande quantité d'énergie pour obtenir du silicium cristallin pur.



Figure 1.3 : Cellule monocristalline.

1.2.5.2 Les cellules polycristallines

Les cellules photovoltaïques de deuxième génération sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé sous forme de cristaux multiples, visibles par leurs orientations différentes. Elles ont généralement une forme rectangulaire et sont de couleur bleu nuit avec des reflets. Comparativement aux cellules de première génération, celles-ci présentent plusieurs avantages :

- Coût de production moins élevé ;
- Procédé de fabrication nécessitant moins d'énergie ;
- Rendement typiquement compris entre 11% et 13% en conditions réelles (pouvant atteindre jusqu'à 18% en laboratoire).

Ces caractéristiques en font une alternative attrayante pour certaines applications photovoltaïques, malgré des rendements légèrement inférieurs aux cellules de première génération.

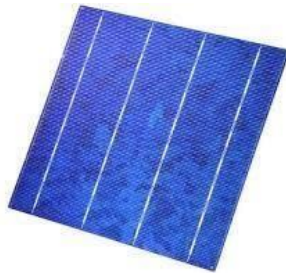


Figure 1.4 : Cellule polycristalline.

1.2.5.3 Les cellules amorphes

Les cellules photovoltaïques de troisième génération sont produites à partir d'un "gaz de silicium" projeté sur du verre, du plastique souple ou du métal par un procédé de vaporisation sous vide. Elles se distinguent par leur couleur gris très foncé et sont couramment utilisées dans les calculatrices et les montres solaires en raison de leur coût réduit et de leur adaptabilité à divers supports, notamment les matériaux souples.

Comparé aux générations précédentes, ce type de cellule présente les caractéristiques suivantes :

- Coût de production nettement inférieur ;
- Rendement moins élevé, typiquement entre 8% et 10% en conditions réelles (pouvant atteindre jusqu'à 13% en laboratoire) ;
- Durée de vie plus limitée.

Bien que moins performantes en termes de rendement et de durabilité, les cellules de troisième génération sont plus adaptées aux environnements avec des températures élevées ou une lumière diffuse, ce qui les rend idéales pour des applications spécifiques comme les dispositifs électroniques de consommation.



Figure 1.5: Cellule amorphe.

1.2.5.4 Les cellules nanocristallines

Une des dernières générations de photopiles fonctionne selon un principe avancé qui sépare efficacement les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques. Ces cellules présentent un rendement global impressionnant de 10,4 %, confirmé par des mesures en laboratoire.

En outre, elles se distinguent par un procédé de fabrication encore plus économique et un coût de production réduit. Ces avancées technologiques positionnent cette génération de cellules photovoltaïques comme une option prometteuse pour l'avenir, offrant un compromis optimal entre rendement élevé et efficacité de production.



Figure 1.6 : Les cellules nanocristallines.

1.2.6 Principe de fonctionnement d'une Cellule photovoltaïque

1.2.6.1 Jonction PN

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité à travers la production et le transport de charges électriques dans un matériau semi-conducteur. Ce matériau est constitué de deux parties dopées différemment : l'une avec un excès d'électrons (dopée de type n) et l'autre avec un déficit en électrons (dopée de type p). Lorsque ces deux parties sont mises en contact pour former une jonction p-n, les électrons en excès dans la zone n diffusent vers la zone p, créant ainsi une région chargée positivement dans la zone n et négativement dans la zone p. Ce processus crée un champ électrique entre les deux zones, qui force les électrons à migrer vers la zone n et les trous vers la zone p.

En ajoutant des contacts métalliques aux zones n et p, on forme une diode. Lorsque la jonction p-n est exposée à la lumière, les photons dont l'énergie est égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite du matériau absorbent suffisamment d'énergie pour permettre à un électron de la bande de valence de passer à la bande de conduction, laissant derrière lui un trou. Cette création de paires électron-trou génère un courant électrique si une charge est appliquée aux bornes de la cellule. Les électrons peuvent ainsi circuler de la zone n vers la zone p à travers le circuit externe, établissant ainsi une différence de potentiel et générant du courant électrique [10].

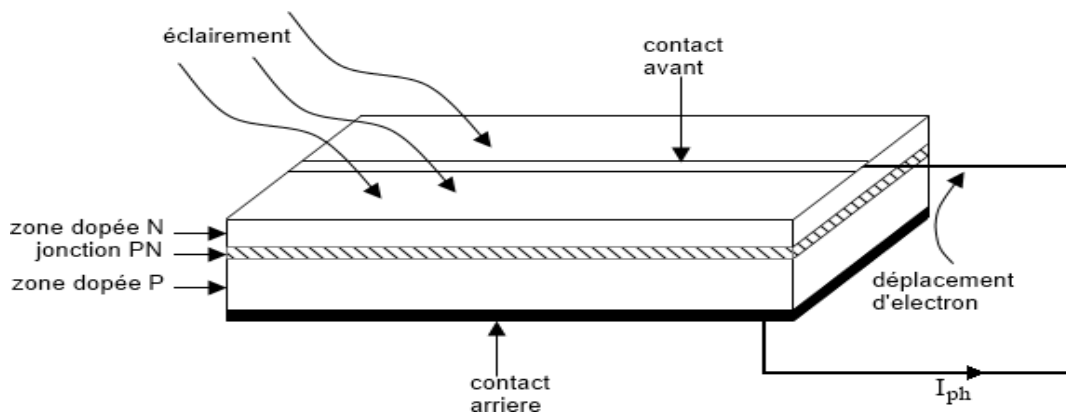


Figure 1.7 : Structure d'une cellule photovoltaïque.

1.2.7 Principe de la conversion photovoltaïque

Le principe de la conversion photovoltaïque peut être résumé comme suit :

- Absorption de la lumière par le matériau semi-conducteur, ce qui génère des paires électron-trou.
- Séparation des paires électron-trou sous l'effet d'un champ électrique induit par la structure p-n de la cellule photovoltaïque.

- Transport des charges électriques (électrons et trous) vers les électrodes aux extrémités de la cellule.
- Collection des charges électriques par les électrodes, générant ainsi un courant électrique utilisable.

Ce processus permet une conversion directe de l'énergie lumineuse solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque, faisant des cellules solaires des dispositifs efficaces pour la production d'énergie propre et renouvelable.

1.2.8 Système photovoltaïque

Un module photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules photovoltaïques connectées entre elles. Ces modules sont ensuite regroupés pour former un système photovoltaïque complet. Dans le cas d'une installation autonome (site isolé), ce système inclut également d'autres composants tels que le régulateur de charge, la batterie et l'onduleur.

En revanche, lorsqu'un système photovoltaïque est connecté au réseau électrique, la batterie n'est généralement pas nécessaire car l'énergie peut être directement fournie par le réseau en cas de besoin [11].

1.2.9 Type de système photovoltaïque

Nous distinguons trois types de systèmes photovoltaïques [12] :

- Les systèmes autonomes, conçus pour des sites isolés où ils fonctionnent de manière indépendante, sans connexion au réseau électrique principal.
- Les systèmes connectés au réseau de distribution électrique, où l'électricité produite par le système photovoltaïque peut être injectée dans le réseau et utilisée localement ou revendue.
- Les systèmes hybrides, qui combinent généralement des sources d'énergie photovoltaïque avec d'autres sources d'énergie comme des générateurs diesel ou des éoliennes, offrant ainsi une solution plus flexible et robuste pour répondre aux besoins énergétiques variés

1.2.9.1 Système photovoltaïque autonome

Un système photovoltaïque autonome est conçu pour fournir de l'énergie à un site isolé et comprend un système de stockage d'énergie. Les modules photovoltaïques produisent de l'énergie en courant continu (CC), mais étant donné que la plupart des appareils fonctionnent en courant alternatif (CA), une conversion est nécessaire.

La batterie joue un rôle essentiel en tant que dispositif de stockage : elle se charge pendant la journée avec l'énergie solaire captée. Cette énergie stockée est ensuite utilisée pour alimenter les appareils par l'intermédiaire d'un régulateur de charge, qui contrôle la charge de la batterie pour éviter

toute surcharge.

Ensuite, un onduleur est utilisé pour convertir le courant continu de la batterie en courant alternatif, nécessaire pour les appareils domestiques standard. Cependant, ce système autonome présente quelques inconvénients :

- Augmentation du coût initial en raison de la nécessité d'un système de stockage (Batterie) d'énergie, d'un régulateur de charge et d'un onduleur.
- Encombrement de l'installation, notamment en raison de la présence de la batterie et des équipements associés.
- Réduction du rendement énergétique due aux pertes lors de la conversion du courant et au stockage de l'énergie.

La Figure 1.11 illustre typiquement ce système autonome et met en évidence ces considérations.

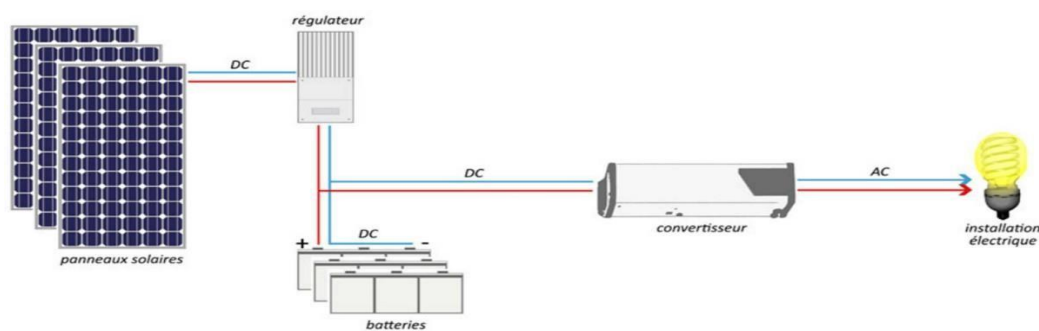


Figure 1.11 : Schéma d'un système photovoltaïque autonome.

1.2.9.2 Système photovoltaïque connecté au réseau de distribution électrique

Un système photovoltaïque peut être utilisé de manière non autonome en le connectant au réseau public de distribution électrique. Dans cette configuration, l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques en courant continu (DC) est convertie en courant alternatif (AC) par un onduleur.

Cette électricité peut être consommée sur place par le site ou, en cas de surplus de production, être revendue au réseau électrique. L'avantage principal de ce type de système réside dans le fait que lorsque la production photovoltaïque est insuffisante pour couvrir les besoins du site, le réseau électrique peut fournir l'énergie nécessaire. Ainsi, l'utilisation de batteries pour le stockage de l'énergie n'est pas nécessaire, ce qui simplifie l'installation et réduit les coûts associés aux systèmes autonomes. Cependant,

ce type de configuration dépend de la disponibilité du réseau électrique et peut nécessiter des dispositifs de protection et de contrôle pour assurer une intégration efficace et sécurisée avec le réseau public.

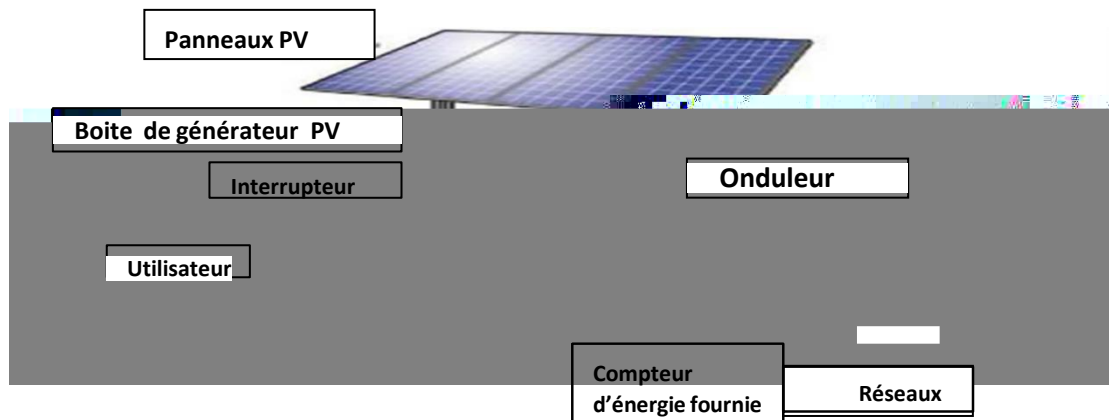


Figure 1.12 : Schéma d'un système photovoltaïque connecté au réseau de distribution électrique.

1.2.9.3 Les systèmes hybrides

Il s'agit de systèmes hybrides qui combinent plusieurs sources d'énergie différentes telles qu'une installation éolienne, un générateur diesel ou une centrale de cogénération, en plus des panneaux photovoltaïques. Ces systèmes sont utilisés lorsque le générateur photovoltaïque seul ne suffit pas à couvrir tous les besoins énergétiques requis.

Les installations hybrides permettent de diversifier les sources d'énergie disponibles, ce qui améliore la fiabilité et la disponibilité de l'approvisionnement énergétique. Par exemple, l'énergie solaire peut être complétée par l'énergie éolienne lorsque les conditions de vent sont favorables, ou par un générateur diesel lors de périodes prolongées sans ensoleillement suffisant. Cette combinaison optimise l'utilisation des ressources disponibles et peut réduire les coûts énergétiques tout en assurant une alimentation électrique stable et continue.

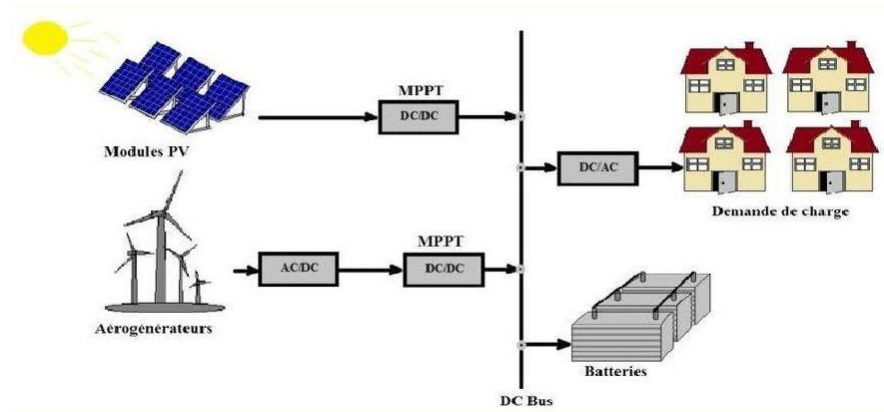


Figure 1.13 Système hybride.

1.2.10 Avantages et inconvénients du photovoltaïque

Le recours au photovoltaïque est souvent comparé à d'autres sources d'électricité telles que l'éolien ou les groupes électrogènes [13].

1.2.12.1 Avantages

- **Modularité** : Les panneaux photovoltaïques sont modulaires, permettant un montage simple adapté à divers besoins énergétiques.
- **Évolutivité** : Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au mégawatt.
- **Coûts de fonctionnement réduits** : Avec des besoins d'entretien minimes et aucun besoin de combustible, de transport ou de personnel hautement qualifié.
- **Haute fiabilité** : Absence de pièces mobiles, rendant la technologie adaptée aux régions isolées.
- **Impact écologique** : Non polluant, silencieux et sans perturbation environnementale significative, à l'exception de l'espace occupé par les installations de grande dimension.

1.2.12.2 Inconvénients

- **Coût élevé de fabrication** : La production des modules photovoltaïques nécessite une technologie avancée et des investissements importants.
- **Rendement de conversion limité** : Le rendement réel de conversion des modules est relativement faible, avec une limite théorique de 28 % pour une cellule au silicium cristallin.
- **Pertes d'énergie avec l'onduleur** : L'onduleur ne restitue pas l'énergie produite à 100 %.
- **Coûts additionnels pour le stockage** : Lorsque le stockage d'énergie sous forme de batteries est nécessaire, cela augmente le coût initial du générateur photovoltaïque. Cependant, la fiabilité

et les performances du système peuvent être maintenues si les batteries et les composants associés sont soigneusement sélectionnés.

1.3 Aspects techniques et performance

1.3.1. Mesure et évaluation du rendement des systèmes photovoltaïques

La mesure et l'évaluation du rendement des systèmes photovoltaïques sont essentielles pour garantir une performance optimale et durable des installations solaires. Cette section explore les différentes méthodes et pratiques utilisées dans ce domaine [14].

- **Méthodes de mesure directe :**

- **Pyromètres :** Instruments utilisés pour mesurer l'irradiance solaire incidente, fournissant des données cruciales sur l'intensité de la lumière solaire reçue par les panneaux photovoltaïques.
- **Cellules de référence :** Utilisées pour calibrer les performances des panneaux solaires en comparant les caractéristiques électriques standard avec les mesures réelles.

- **Méthodes de mesure indirecte :**

- **Mesures électriques :** Utilisation de multimètres et d'analyseurs de réseau pour mesurer la tension, le courant et la puissance générée par les panneaux solaires.
- **Techniques de rendement global :** Intégration des données sur une période donnée pour calculer le rendement global de l'installation, tenant compte des variations climatiques et des fluctuations de l'ensoleillement.

- **Facteurs influençant le rendement :**

- **Conditions météorologiques :** L'ensoleillement, la température et la couverture nuageuse affectent directement la performance des systèmes photovoltaïques.
- **Orientation et inclinaison :** L'optimisation de l'angle d'inclinaison et de l'orientation des panneaux solaires est cruciale pour maximiser l'absorption de l'énergie solaire tout au long de l'année.

- **Analyse de la performance :**

- **Surveillance en temps réel :** Utilisation de systèmes de surveillance pour collecter des données en temps réel sur la production d'électricité, permettant une gestion proactive et la détection précoce de tout problème.
- **Évaluation du rendement énergétique :** Calcul des rendements annuels et mensuels pour évaluer la performance réelle par rapport aux prévisions théoriques et aux normes de l'industrie.

1.3.2. Caractéristiques électriques des installations solaires

Les caractéristiques électriques des installations solaires comprennent divers paramètres essentiels qui influencent leur performance et leur intégration au réseau électrique :

- **Tension et courant** : Mesures importantes pour évaluer la puissance générée par les panneaux solaires et leur compatibilité avec les systèmes de distribution électrique.
- **Puissance** : Capacité des panneaux solaires à convertir l'énergie solaire en électricité, mesurée en watts (W) ou kilowatts (kW).
- **Résistance** : Influence sur la dissipation d'énergie et la stabilité du système photovoltaïque.

1.3.3. Normes et réglementations dans l'installation de systèmes photovoltaïques

Les normes et réglementations jouent un rôle crucial dans la conception, l'installation et l'exploitation des systèmes photovoltaïques pour assurer la sécurité, la performance et la durabilité :

- **Normes internationales** : Telles que la norme IEC 61724 qui spécifie les méthodes de mesure et de surveillance des performances des systèmes photovoltaïques.
- **Régulations locales** : Exigences spécifiques en matière de raccordement au réseau électrique, de sécurité électrique et de conformité environnementale.
- **Certifications** : Processus de certification pour garantir que les installations photovoltaïques respectent les normes de qualité et de performance établies.

1.4 Applications et utilisations de l'énergie solaire

L'énergie solaire photovoltaïque offre une polyvalence considérable dans ses applications, allant des petites installations résidentielles aux grandes centrales solaires destinées à alimenter des régions entières. Cette section explore en détail ces différentes applications ainsi que des exemples de projets et d'études de cas pour illustrer l'impact de l'énergie solaire dans divers secteurs [15].

1.4.1 Applications résidentielles

Les applications résidentielles de l'énergie solaire jouent un rôle croissant dans la réduction de la dépendance énergétique et des coûts à long terme pour les propriétaires de maisons. Cela inclut l'installation de systèmes photovoltaïques sur les toits des maisons pour capturer l'énergie solaire et la convertir en électricité utilisable, ainsi que l'intégration de batteries de stockage pour maximiser l'utilisation de l'énergie solaire.

1.4.2 Applications commerciales et industrielles

Dans le secteur commercial et industriel, l'énergie solaire est utilisée pour répondre aux besoins énergétiques importants des entreprises et des installations industrielles. Cela comprend l'intégration de systèmes photovoltaïques sur les toits et les façades des bâtiments commerciaux pour réduire les coûts d'électricité et améliorer la durabilité environnementale, ainsi que l'utilisation de l'énergie solaire pour alimenter les processus industriels et répondre aux exigences de durabilité.

1.4.3 Projets de grande échelle et centrales solaires

Les projets de grande envergure exploitent l'énergie solaire pour répondre aux besoins énergétiques à l'échelle régionale, nationale et internationale. Cela inclut la construction de centrales solaires photovoltaïques massives utilisant des milliers de panneaux solaires pour générer plusieurs mégawatts ou gigawatts d'électricité renouvelable, ainsi que l'utilisation de la chaleur solaire concentrée pour produire de l'électricité à grande échelle.

1.4.4 Exemples de cas d'étude et retours d'expérience

Les exemples de projets et les études de cas offrent des perspectives concrètes sur les bénéfices économiques, environnementaux et sociaux de l'énergie solaire. Cela inclut l'installation de systèmes photovoltaïques résidentiels permettant aux résidents de devenir autonomes en énergie, la conversion d'entrepôts industriels en usines solaires pour fournir une source d'énergie durable tout en revitalisant les communautés locales, ainsi que la construction de grandes centrales solaires contribuant à la sécurité énergétique et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle nationale.

1.5 Impact environnemental et économique de l'énergie solaire

L'énergie solaire photovoltaïque offre des avantages considérables à la fois sur le plan environnemental et économique. Cette section examine en détail ces aspects cruciaux pour mieux comprendre l'impact global de l'énergie solaire [16].

L'énergie solaire contribue significativement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la préservation de l'environnement. En utilisant une ressource renouvelable et propre, elle réduit considérablement l'empreinte carbone tout au long de son cycle de vie. Les panneaux solaires photovoltaïques ne produisent pas de polluants atmosphériques lors de leur exploitation, contrairement aux centrales thermiques qui brûlent des combustibles fossiles. De plus, l'énergie solaire contribue à la sécurité énergétique en diversifiant le mix énergétique et en réduisant la dépendance aux importations de combustible.

1.6 Conclusion

En conclusion, l'énergie solaire photovoltaïque représente une solution viable et durable pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux tout en réduisant notre empreinte écologique. Ce chapitre a exploré les fondements théoriques, les aspects techniques et les applications pratiques de l'énergie solaire, démontrant son potentiel à transformer positivement notre système énergétique vers un avenir plus propre et plus résilient.

2.1 Introduction

Un système photovoltaïque autonome, également désigné comme un système solaire hors réseau, représente une infrastructure électrique autosuffisante, totalement indépendante des réseaux de distribution conventionnelle. Ce dispositif alimente directement l'utilisateur en électricité sans être raccordé au réseau électrique principal. Cependant, ce type de système nécessite des moyens de stockage de l'énergie afin de pallier les périodes d'indisponibilité du rayonnement solaire.

Les systèmes photovoltaïques autonomes sont installés dans les zones où il constitue la solution énergétique la plus économiquement viable. À l'heure actuelle, ces installations sont principalement déployées dans les régions isolées, éloignées des réseaux électriques centralisés et où les besoins énergétiques demeurent relativement modestes. [17]

2.2.1 Type de système PV autonome

On distingue deux types :

- Les systèmes au fil du soleil
- Les systèmes avec stockage

• Les systèmes au fil du soleil

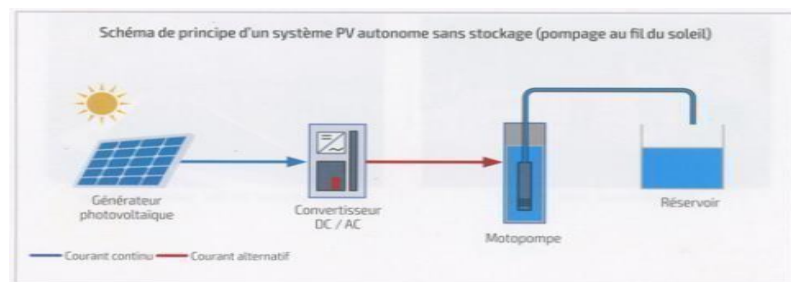


Figure 2.1 : Schéma de principe d'un système PV autonome sans stockage (pompage au fil du soleil)

Pendant la journée, le générateur photovoltaïque fournit de l'électricité directement à l'utilisation ou via un convertisseur de Courant Continu à Courant Alternatif (CC/AC). La quantité d'énergie fournie à l'utilisation dépend de l'intensité du soleil. Pendant la nuit, l'alimentation de l'utilisation est interrompue, la rendant inopérante.

Les principales applications photovoltaïques fonctionnant au fil du soleil sont les suivantes : Le pompage, la ventilation, la production de froid, le dessalement d'eau de mer, entre autres [18].

2.2.2 Les systèmes avec stockage :

- Principe de fonctionnement

Pendant la journée, les panneaux photovoltaïques fournissent une alimentation en courant continu aux récepteurs électriques et rechargent simultanément le dispositif de stockage, généralement constitué de batteries. Un régulateur de charge est intégré au système afin d'empêcher une surcharge des batteries en cas de production solaire excessive.

Durant la nuit et par temps défavorable, les récepteurs sont alimentés à partir de l'énergie stockée dans les batteries. Un limiteur de décharge est implémenté pour protéger les batteries contre une décharge profonde, qui pourrait altérer leur durée de vie.

Lorsque le système comporte des récepteurs fonctionnant en courant alternatif, un onduleur autonome est installé. Cet équipement permet de convertir la tension continue générée par les panneaux solaires en une tension alternative adaptée à l'alimentation de ces récepteurs.

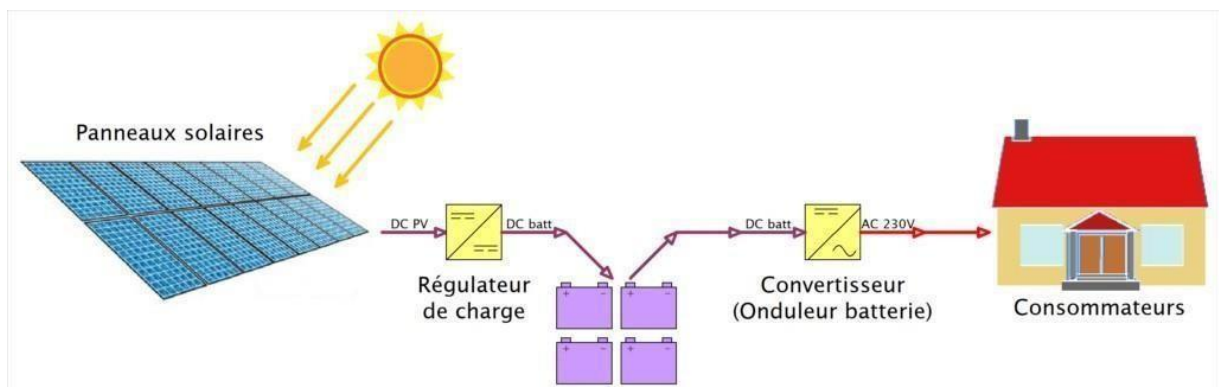


Figure 2.2 : Schéma d'un système Solaire Photovoltaïque autonome en site isolé

2.3 Étapes pour créer une installation photovoltaïque autonome :

- Choisir un emplacement approprié pour les panneaux solaires (orientés sud, sud-est ou sud-ouest) avec une inclinaison de 30 à 35 degrés.
- Installer les panneaux solaires sur le toit/sol ou le toit du bâtiment.
- Connecter le régulateur aux panneaux photovoltaïques.
- Configurer votre kit solaire.
- Charger le parc de batterie au maximum.

2.4 Les composants d'une installation photovoltaïque autonome

Les composants d'une installation photovoltaïque autonome sont les suivants :

1. **Panneaux solaires** : Les panneaux solaires constituent l'élément principal d'un système photovoltaïque. Ils captent la lumière du soleil et la convertissent en électricité. Ces panneaux sont généralement installés sur le toit ou dans une zone dégagée afin de recevoir le maximum de lumière solaire.

2. **Contrôleur de charge** : Le contrôleur de charge régule le flux d'électricité des panneaux solaires vers les batteries, garantissant que les batteries sont chargées au rythme optimal et prévient la surcharge.

3. **Banc de batterie** : Le banc de batteries stocke l'électricité générée par les panneaux solaires pour une utilisation pendant les périodes de faible ensoleillement ou la nuit. La taille de la banque de batteries dépend des besoins énergétiques du système.

4. **Onduleur** : L'onduleur convertit l'électricité en courant continu (CC) produite par les panneaux solaires et stockée dans les batteries en électricité en courant alternatif (AC), utilisée pour alimenter les appareils.

5. **Générateur de secours (facultatif)** : Dans certains systèmes autonomes, un générateur de secours peut être inclus pour fournir une alimentation supplémentaire pendant les périodes prolongées de faible ensoleillement ou lorsque la banque de batteries est épuisée.

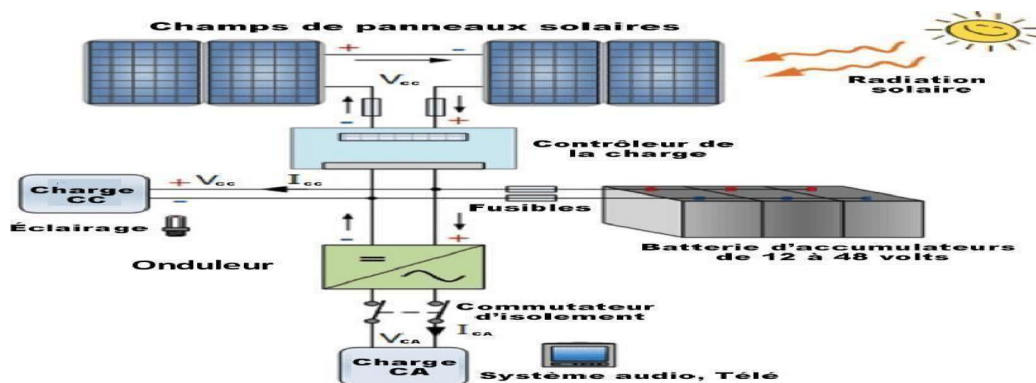


Figure 2.3 : schéma sur les composants d'un système photovoltaïque autonome

2.4.1 Le Module photovoltaïque

Les cellules solaires sont généralement connectées en série dans les modules couramment commercialisés. Cette configuration série des cellules solaires permet d'augmenter la puissance. Un module photovoltaïque « classique » contient 36 ou 72 cellules. Pour protéger les modules PV contre le point chaud (hot-spot) résultant d'un déséquilibre d'éclairement, il est nécessaire de monter une diode au silicium "diode de by-pass" en parallèle tête bêche sur une branche, généralement

constituée de dix-huit cellules en série. Pour une meilleure protection des cellules, il a également été proposé de connecter chaque cellule individuelle à une diode de by-pass. En outre, d'autres architectures de connexion des diodes de by-pass dans le module, comme illustré dans la Figure 2.4, ont été proposées. Cependant, ces propositions ne sont pas largement appliquées en raison des défis de fabrication associés. [11]

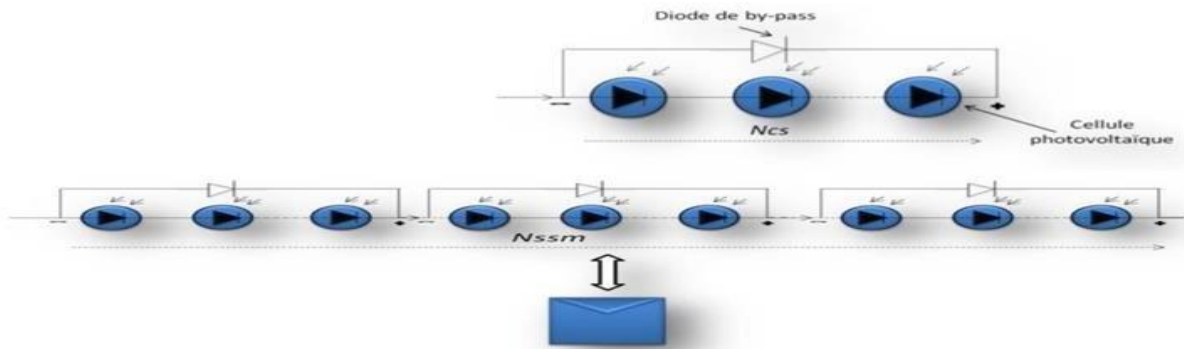


Figure 2.4 : Mise en série des cellules PV dans le module et protection par des diodes by pass.

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

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

2.4.2 Système de protection [19]

Pour garantir la protection électrique d'un générateur photovoltaïque et assurer leur bon fonctionnement en cas d'ombrage, Il existe deux types de protections : diode by-pass et diode anti-retour. La Figure illustre ces deux protections

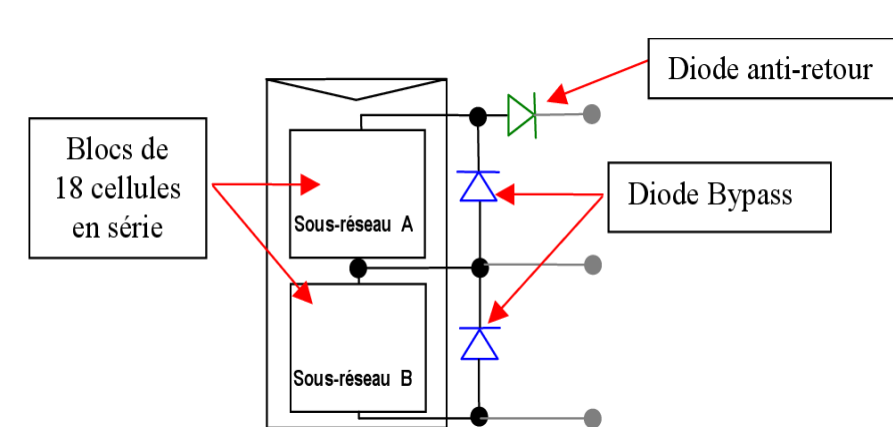


Figure 2.5 : Connexion d'un GPV élémentaire avec diode by-pass

a) La Diode By-pass

La diode de by-pass est connectée en antiparallèle avec un groupe de cellules pour protéger les cellules les plus faibles contre la polarisation inverse. Cette diode devient conductrice en cas d'ombrage d'une ou plusieurs cellules dans une branche, et elle reste bloquée dans des conditions normales. Ainsi, elle permet de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter la formation de points chauds.

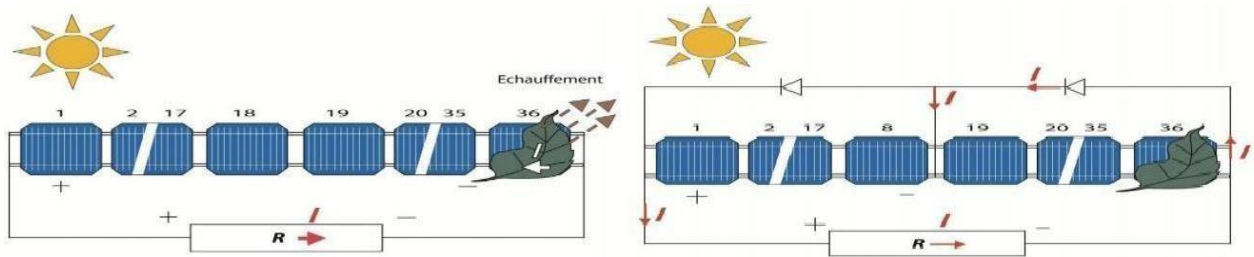


Figure 2.6 : Etat de fonctionnement de diode by-pass.

b) La Diode Anti-Retour

La tension produite par chaque string peut être différente. Lorsque ces strings sont mis en parallèle en parallèle de ces strings pour former un champ, le string avec la tension la plus faible peut absorber un courant inverse provenant des autres strings. Cette situation peut entraîner une baisse de production, et les modules du string traversés par le courant inverse pourraient également être susceptibles de défaillance. Pour éviter ces courants inverses, une diode anti- retour est placée au bout de chaque string.

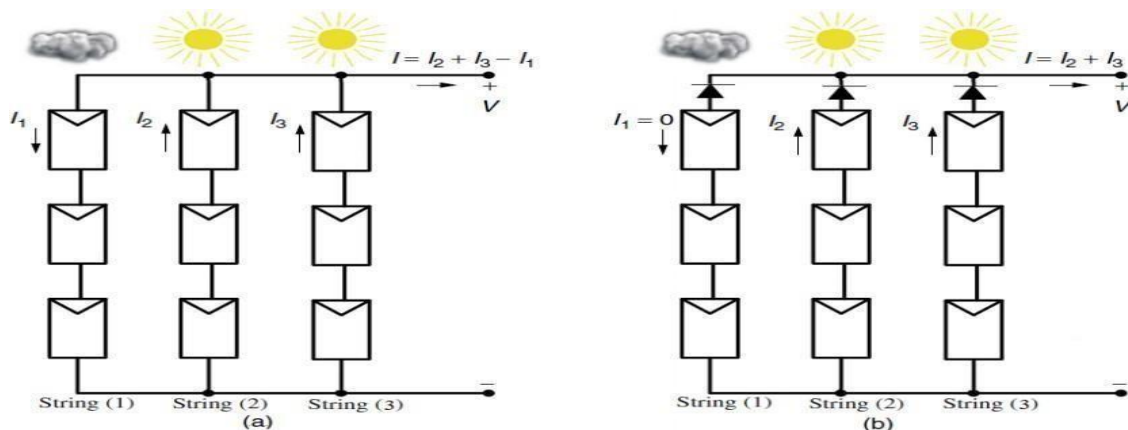


Figure 2.7 : Protection avec une diode anti-retour.

2.4.3 Les batteries :

Le stockage d'énergie par batteries est un élément indispensable des systèmes photovoltaïques autonomes, tant du point de vue technique qu'économique. En effet, ces

batteries jouent un rôle crucial pour garantir la continuité de l'alimentation électrique lorsque le rayonnement solaire n'est pas disponible, que ce soit pendant les périodes nocturnes ou en cas de conditions météorologiques défavorables.

• Définition :

Une batterie est un dispositif de stockage d'énergie électrique qui fonctionne grâce à des réactions électrochimiques. Elle peut stocker de l'énergie électrique sous forme d'énergie chimique et la restituer sous forme électrique lorsqu'elle est connectée à un circuit extérieur.

Une batterie est généralement composée d'une ou plusieurs cellules électrochimiques. Chaque cellule est constituée de deux électrodes, une anode et une cathode, plongées dans un électrolyte conducteur ionique. Lorsque la batterie est déchargée, des ions se déplacent entre les électrodes à travers l'électrolyte, provoquant des réactions chimiques

• Composition des batteries :

La composition générale des batteries comprend plusieurs éléments clés qui varient en fonction du type de batterie. Voici les composants courants des batteries : [20]

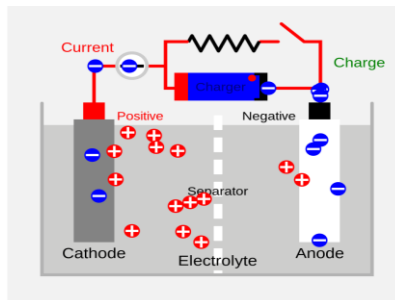


Figure 2.8 : composition d'une batterie

1. Électrodes : Les batteries sont composées d'électrodes, une anode (électrode négative) et une cathode (électrode positive), Les matériaux des électrodes varient selon la technologie de batterie (Plomb, lithium, nickel, etc.).

2. Électrolyte : C'est un liquide ou un gel conducteur d'ions qui permet le mouvement des charges électriques entre les électrodes. L'électrolyte est essentiel pour le fonctionnement de la batterie.

3. Collecteur d'électrons : Il s'agit d'un matériau conducteur qui permet de collecter et de diriger les électrons générés lors de la réaction chimique entre les électrodes et l'électrolyte.

4. Matériaux actifs : Ce sont les matériaux qui stockent et libèrent des charges électriques lors des réactions chimiques. Ces matériaux actifs varient en fonction du type de batterie et peuvent être des oxydes métalliques, des sels, etc.

5. Boîtier et séparateurs : Les batteries sont généralement enfermées dans un boîtier pour assurer leur sécurité et leur intégrité. Des séparateurs sont également utilisés pour empêcher un court-circuit entre les électrodes.

6. Connecteurs et bornes : Les connecteurs et les bornes permettent de relier la batterie à un circuit électrique pour fournir de l'énergie.

Ces composants de base sont présents dans la plupart des batteries, mais leur composition exacte peut varier en fonction du type de batterie, qu'il s'agisse de batteries au plomb-acide, de batteries lithium-ion, de batteries nickel-cadmium, etc.

- **Les différents types de batterie :**

Les différents types de batteries couramment utilisés dans les systèmes photovoltaïques autonomes sont les suivants :

1. Batteries au plomb-acide :

Ce sont les plus répandues et économiques. Elles offrent une bonne tolérance aux décharges profondes mais une durée de vie limitée de 5 à 10 ans en usage photovoltaïque. Il existe deux principales technologies :

- Batteries ouvertes à électrolyte liquide
- Batteries étanches au gel ou AGM (Absorbed Glass Mat) sans entretien

2. Batteries lithium-ion :

Présentant une densité énergétique élevée, ces batteries sont de plus en plus utilisées mais restent plus coûteuses. Elles sont plus légères, tolèrent mieux les cycles et les décharges profondes, avec une durée de vie estimée de 6 à 10 ans. [21]

3. Batteries NiCd (Nickel-Cadmium) :

Très robustes mais désormais délaissées pour des raisons environnementales (présence de cadmium).

4. Batteries NiMH (Nickel-Hydrure Métallique) :

Alternative intéressante mais assez coûteuse, plus performante que le plomb. Durée de vie de 5 à 10 ans.

Le choix dépend des critères technique et économique. Les batteries au plomb restent prédominantes pour les petites installations, tandis que le lithium-ion gagne en popularité pour les grosses avec ses avantages compensant son coût supérieur.

L'intégration judicieuse de la batterie (dimensionnement, régulation, etc.) est primordiale pour optimiser l'autonomie énergétique du système photovoltaïque.

2.4.4 Le Régulateur

Le régulateur solaire, également appelé **régulateur de charge** ou **contrôleur de charge**, joue un rôle essentiel dans les systèmes d'énergie solaire. Voici comment il fonctionne :

1. Régulation de la charge :

Lorsque la batterie solaire est complètement chargée, le régulateur limite ou arrête la charge provenant du module solaire. Cela évite les surcharges qui pourraient endommager la batterie.

Il surveille en permanence l'état de charge de la batterie et ajuste la charge en conséquence.

2. Ralentissement de la décharge :

Pour éviter les décharges profondes, le régulateur réduit la consommation électrique en délestant les utilisations ou en les arrêtant complètement.

Les décharges profondes peuvent endommager les batteries, c'est pourquoi le régulateur intervient pour protéger leur durée de vie.

3. Protection contre les courts-circuits :

En cas de court-circuit, le régulateur coupe automatiquement l'alimentation pour éviter tout dommage.

4. Protection des panneaux solaires photovoltaïques :

Le régulateur protège les panneaux solaires contre les retours de charges électriques qui pourraient les endommager.

5. Protection thermique :

Une sonde surveille la température des batteries. Si elles surchauffent, le régulateur prend des mesures pour protéger le système.

6. Affichage de l'état : [22]

Le régulateur solaire affiche l'état de fonctionnement du module photovoltaïque (panneau solaire) et le niveau de charge de la batterie.

Cette information est généralement affichée via des LEDs ou un écran digital.

Certains régulateurs solaires plus performants proposent des "fonctions avancées" intégrées ou en option :

- Compensation de la température ambiante
- Écran d'information numérique
- Connectivité
- Système d'alarmes
- Enregistrement de données

- Modes de charge variés
- Gestion de sources d'énergie complémentaires :

Ces fonctionnalités avancées permettent une gestion plus fine et plus intelligente du système photovoltaïque autonome, améliorant ainsi son efficacité et sa fiabilité.

Enfin, sans oublier les régulateurs solaires MPPT (Maximum Power Point Tracking), qui deviennent de plus en plus répandus.

2.4.5 L'onduleur :

De nos jours, la plupart des appareils électriques disponibles sur le marché sont conçus pour fonctionner avec la tension alternative du réseau. En conséquence, les fabricants ne proposent pas d'équivalents en tension continue. C'est pourquoi la présence d'un onduleur est essentielle pour offrir aux utilisateurs un large choix d'équipements électriques.

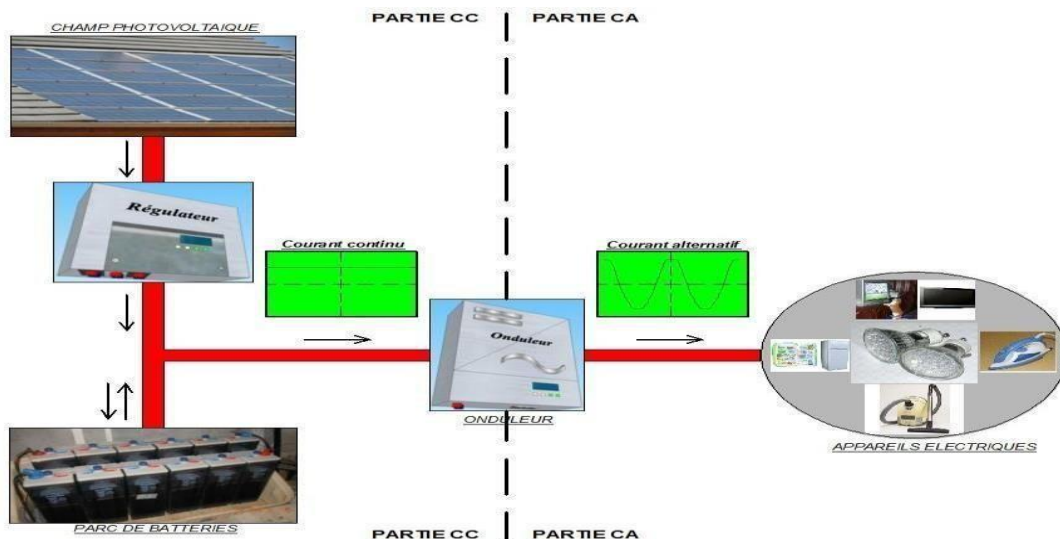


Figure 2.9 : Rôle de l'onduleur au sein d'une installation photovoltaïque autonome

On distingue deux grandes catégories d'onduleurs :

1. Les onduleurs assistés par une source de tension alternative :
 - Ils convertissent le courant continu en un courant alternatif compatible avec le réseau électrique, en reproduisant ses caractéristiques (tension efficace, fréquence).
 - Ils sont utilisés dans les installations photovoltaïques raccordées au réseau.
2. Les onduleurs autonomes
 - Ils peuvent fonctionner sans source de tension alternative externe.
 - Ils fournissent une tension alternative conforme aux besoins de l'utilisateur.

Cette diversité d'onduleurs permet aux utilisateurs de systèmes photovoltaïques autonomes de disposer d'une grande variété d'équipements électriques compatibles.

Un point essentiel à mentionner :

Il faut savoir que de nombreux onduleurs bons marchés sont de mauvaise qualité ne sont pas conçus spécifiquement pour les applications photovoltaïques. Ils s'avèrent largement inefficaces dans ce contexte. Il est donc essentiel de choisir des onduleurs autonomes qui soient spécifiquement adaptés aux systèmes photovoltaïques. Cela garantira un fonctionnement optimal et une meilleure conversion de l'électricité générée par les panneaux solaires.

- Dimensionnement de l'onduleur photovoltaïque autonome :

Côté courant continu (CC) :

- L'onduleur doit être adapté à la tension du système imposée par les batteries, généralement 12V, 24V ou 48V.

Côté courant alternatif (CA) :

- L'onduleur fournira un signal de sortie CA adapté aux appareils qu'il alimente, typiquement :

- Tension alternative de 230 V efficaces à 50 Hz

La puissance nominale de l'onduleur doit couvrir la somme des puissances de tous les équipements que l'on souhaite faire fonctionner simultanément. Une marge de dimensionnement de 20 à 30% est recommandée pour garantir le bon fonctionnement de l'onduleur, même à des températures ambiantes supérieures à 25°C.

2.2 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques autonomes [19] :

Les avantages :

Il existe plusieurs avantages à utiliser un système photovoltaïque autonome :

1. Indépendance énergétique : En produisant leur propre électricité, les systèmes autonomes garantissent l'indépendance énergétique et réduisent la dépendance au réseau électrique, notamment dans les zones reculées.

2. Avantages environnementaux : L'énergie solaire est une source propre et renouvelable, ce qui fait des systèmes photovoltaïques autonomes un choix respectueux de l'environnement.

3. Zéro émission : les utilisateurs consomment l'électricité produite sans générer de gaz polluant.

4. Economies de coûts : Les systèmes photovoltaïques autonomes permettent de réaliser des économies substantielles à long terme en réduisant ou éliminant les factures d'électricité, tout en offrant une source d'énergie fiable.

5. Fiabilité : Ces systèmes sont fiables et offrent une source d'énergie constante et stable. Ils contribuent ainsi à garantir un approvisionnement énergétique continu.

6. Evolutivité : Les systèmes photovoltaïques autonomes sont flexibles et peuvent être facilement étendus ou modifiés pour répondre aux besoins énergétiques changeants.

Dans l'ensemble, les systèmes photovoltaïques autonomes constituent une source d'énergie durable et fiable. Ils permettent de fournir de l'électricité dans des endroits hors réseau ou éloignés, tout en offrant de nombreux avantages, aussi bien sur le plan environnemental que financier.

Les inconvénients :

1. Coût d'investissement initial élevé : L'installation d'un système photovoltaïque nécessite un investissement conséquent, à la fois pour le matériel et pour l'installation par des professionnels qualifiés. De plus, il est souvent nécessaire d'investir dans un parc de batteries coûteux pour stocker l'électricité produite, surtout en fonction de la consommation énergétique de chaque foyer. La production d'énergie est également aléatoire et dépendante de la météo, ce qui rend nécessaire une optimisation des habitudes de consommation. Dans certains cas, l'intégration d'équipements domotiques peut être recommandée pour une meilleure gestion de la production.

2. Investissement dans des batteries de stockage : Les panneaux solaires ne peuvent souvent pas fournir 100% de l'électricité nécessaire à un foyer, surtout en période de faible ensoleillement. Il est donc souvent nécessaire d'investir dans un système de stockage par batteries pour le surplus d'électricité produite. Cependant, le coût des batteries "solaires" est également un investissement important, surtout si l'objectif est de stocker l'énergie pour une utilisation ultérieure. De plus, la production d'énergie solaire n'est pas toujours synchronisée avec la consommation réelle du foyer, ce qui crée un déséquilibre. Pour remédier à cela, il est nécessaire de modifier ses habitudes de consommation énergétique et d'adopter un mode d'autoconsommation plus efficace.

3. Dépendance à la météo : Les conditions météorologiques influent sur la quantité d'énergie produite par les panneaux solaires. Par exemple, la production est généralement plus faible en hiver qu'en été. Cela peut entraîner des pénuries d'énergie, surtout pendant les périodes de faible ensoleillement. Pour pallier à cela, il est possible d'utiliser un générateur photovoltaïque de secours connecté au réseau public de distribution électrique. Dans ce cas, l'énergie produite est soit consommée sur place, soit revendue sur le réseau en cas de surplus. Lorsqu'il y a un déficit ou pendant les périodes défavorables, le réseau alimente le site, ce qui évite le recours à des batteries de stockage coûteuses.

2.6 Principe de fonctionnement des systèmes photovoltaïques autonomes :

Le système repose principalement sur des panneaux solaires, qui capturent le rayonnement solaire et le convertissent en électricité sous forme de courant continu (CC). Ce courant continu est ensuite dirigé vers un régulateur de charge qui contrôle et gère le flux énergétique.

Pendant les heures d'ensoleillement, le régulateur dirige le courant produit par les panneaux solaires à la fois vers les charges en courant continu (CC) à alimenter, telles que les éclairages et les petits appareils fonctionnant en (CC), et vers un banc de batteries pour stocker le surplus d'énergie. Pour protéger les batteries contre une décharge excessive, un limiteur de décharge est utilisé, assurant ainsi leur durabilité lorsque le soleil n'est pas disponible comme pendant la nuit ou en cas d'intempéries, les charges sont alimentées par les batteries via un onduleur. Cet onduleur convertit le courant continu (CC) stocké dans les batteries en courant alternatif (CA), adapté aux appareils standards.

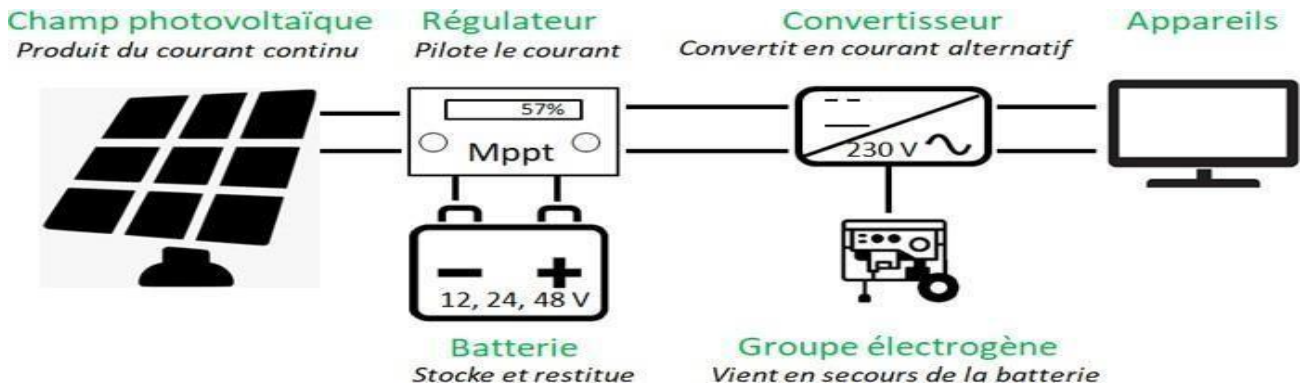


Figure 2.10 : fonctionnement des panneaux solaire autonome

Des équipements complémentaires tels qu'un générateur peuvent être intégrés en appoint pour faire face à des pics de consommation ou des conditions météorologiques défavorables prolongées. Cette configuration permet de garantir un approvisionnement énergétique continu et autonome, optimisant ainsi l'utilisation de l'énergie solaire produite. [23]

2.3 Application :

On peut catégoriser les systèmes photovoltaïques autonomes selon leur puissance nominale et leurs domaines d'application :

- Alimentation électrique autonome de produits grand public de faible puissance, tels que les lampes solaires et les bornes d'éclairage de jardin, on utilise généralement une énergie photovoltaïque de faible puissance qui est directement intégrée à ces produits.

- Pour l'électrification de bâtiments résidentiels, commerciaux ou publics, avec des puissances allant de quelques centaines de watts à quelques kilowatts, on utilise des systèmes connus sous

le nom de "Solar Home Systems" (SHS), Ces systèmes trouvent leur utilité pour l'alimentation électrique de résidences secondaires, d'écoles, de centres de santé dans les pays en développement, etc.

- Pour l'alimentation électrique dans des applications professionnelles et industrielles, nécessitant des puissances allant de quelques dizaines de watts à quelques kilowatts, on utilise des systèmes photovoltaïques autonomes. Ces systèmes sont fréquemment employés pour la signalisation routière, la protection cathodique, les télécommunications, etc.

La gamme de puissance et les caractéristiques techniques de ces systèmes sont adaptées en fonction des besoins énergétiques spécifiques de chaque application. Cela garantit une solution d'alimentation électrique fiable et durable, notamment dans les zones non raccordées aux réseaux électriques conventionnels.

2.8 Défauts dans les systèmes photovoltaïques [22]

Le fonctionnement d'une installation photovoltaïque n'est pas toujours parfait. Bien que nous ayons précédemment décrit les principaux éléments constitutifs d'une telle installation, il est important de souligner que divers défauts et anomalies peuvent affecter ces composants. Au fil du temps, une installation PV est susceptible de rencontrer diverses conditions de fonctionnement anormales et différents types de défaillances. La nature précise de ces problèmes varie d'une installation à l'autre, en fonction de facteurs tels que la conception, l'installation, l'exploitation et l'entretien du système.

Tableau 1 : Les différents défauts dans les systèmes photovoltaïques

Élément de GPV	Origines des défauts et d'anomalies
Générateur PV	Feuil d'arbre, déjections, pollution, sable, neige ...etc.
	Détérioration des cellules, fissure, échauffement des cellules
	Pénétration de l'humidité, dégradation des interconnexions
	Corrosion des liaisons entre les cellules
	Modules de performance différente
	Modules arraché ou cassé
	Modules court-circuités, Modules inversés
Boite de jonction	Rupture du circuit électrique
	Court-circuit du circuit électrique
	Pénétration de l'humidité, dégradation des interconnexions

	Destruction de la liaison
	Corrosion des connexions
Câblage et connecteur	Circuit ouvert
	Court-circuit
	Mauvais câblage (module inversé)
	Corrosion des contacts
	Rupture du circuit électrique
Diode de protection	Destruction des diodes.
	Absence ou non fonctionnement des diodes
	Inversion de la polarité des diodes au montage, diode mal connectée

2.9 Revues de littérature sur l'installation solaire photovoltaïque autonome :

2.8.1 En Algérie :

Bénéficiant d'un ensoleillement considérable, l'Algérie est le sujet de nombreux travaux de recherche sur le déploiement de systèmes photovoltaïques autonomes, principalement destinés à l'électrification des localités isolées dépourvues d'accès au réseau électrique conventionnel.

Voici quelques exemples d'installations réalisées en Algérie :

Générateur photovoltaïque installé au centre de recherche de la station d'Assekrem-Tamenrasset Puissance 5kW : [23]

Étant donné l'absence totale de réseau électrique national dans cette région, le recours à l'énergie solaire photovoltaïque s'est avéré nécessaire pour alimenter les équipements de mesure de la couche d'ozone et d'autres paramètres radiométriques de la station. L'objectif principal du projet était de mettre en place un système photovoltaïque fiable pour alimenter en permanence les équipements de la station V.A.G.

La centrale PV se compose de 100 modules de 50 Wc, 4 régulateurs de charge, un onduleur de 3 kW et un parc de batteries de 2000 Ah.

Comparé au système initial de 1996 avec une régulation classique, la rénovation réalisée en 2007 a permis d'adopter une nouvelle architecture modulaire de type PWM, réduisant les pertes d'énergie et la fréquence de dysfonctionnement. Ce projet s'inscrit dans la vision à long terme du développement de la production d'électricité photovoltaïque décentralisée et contribue à la diversification du mix énergétique national.



Figure 2.11 : Générateur photovoltaïque installé au centre de recherche de la station d'Assekrem–
Tamenrasset

Générateur photovoltaïque installé à Djanet willaya d'Illizi Puissance 8kW, financé par le groupe Sonatrach :

La filiale ER2 du Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER) a réalisé une installation photovoltaïque d'envergure dans la région de Djanet, wilaya d'Illizi. Financé par la Fondation Sonatrach/Tassili, ce projet d'électrification solaire a permis d'alimenter en électricité le village de Torset, d'une puissance totale de 8 kW.

Cette réalisation constitue la première expérience d'ER2 dans le domaine de l'électrification rurale décentralisée par le solaire photovoltaïque, après les précédents travaux sur les centrales de plus grande échelle. Ce projet pilote démontre les capacités techniques et opérationnelles d'ER2 à mettre en œuvre des solutions solaires adaptées aux besoins spécifiques des communautés isolées, ne disposant pas d'accès au réseau électrique national. [23]



Figure 2.12 : Générateur photovoltaïque installé à Djanet willaya d'Illizi

Réalisations des projets d'énergie solaire par le Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural (MADR).**Tableau 2 : regroupement des kits solaires distribués dans des zones isolées**

Applications	Institution impliquée	Capacités cumulées en2019 (KWc)
Kits solaires distribués dans les zones isolées	CDARS (29unités)	15
	HCDS	1150
	DGF (5503 unités)	2200
Total		3365

Le tableau ci-dessus regroupe les kits solaires distribués dans les zones isolées, mis en œuvre par le CDARS (29 unités), le HCDS (1150 unités) et la DGF (5503 unités), pour une capacité totale de 3365 kWc.

Cette répartition montre l'engagement de différentes institutions gouvernementales, telles que le Commissariat au Développement de l'Agronomie Saharienne, le Haut-commissariat au développement de la Steppe et la Direction Générale des Forêts, dans le déploiement de solutions solaires photovoltaïques pour électrifier les zones rurales et isolées du pays. L'objectif global de ces programmes est de favoriser l'accès à l'électricité par des moyens décentralisés et renouvelables, contribuant ainsi au développement économique et social des régions éloignées.

CDARS : Commissariat au Développement de l'Agronomie Saharienne HCDS : Haut-commissariat au Développement de la Steppe

DGF : Direction Générale des Forêts

Programme de pompage initié par la fondation Sonatrach Tassili

Ce programme, mis en œuvre par ER2, illustre l'engagement de cette filiale du CDER à déployer des solutions de pompage solaire dans les régions les plus éloignées du pays. L'utilisation de l'énergie solaire pour alimenter ces systèmes de pompage présente de nombreux avantages, tels que l'autonomie énergétique, la fiabilité et la facilité d'entretien, par rapport aux alternatives classiques fonctionnant aux énergies fossiles. Ce projet porté par la Fondation Sonatrach-Tassili souligne l'importance accordée par les institutions algériennes aux énergies renouvelables, en particulier pour répondre aux besoins en eau dans les zones rurales et désertiques du sud du pays. L'expertise d'ER2 dans ce domaine a ainsi pu être mise à contribution au service de ce programme innovant de pompage solaire [23].

Pompage de l'eau par S. PV directions des forêts Illizi

Parmi les réalisations d'ER2, on peut noter l'installation d'un système de pompage d'eau alimenté par l'énergie solaire photovoltaïque, au niveau de la direction des forêts de la wilaya d'Illizi. Cette solution de pompage solaire s'inscrit dans la diversité des projets menés par la filiale du CDER, visant à exploiter le potentiel des énergies renouvelables pour répondre aux besoins en électricité et en eau dans des zones isolées. Le recours à l'énergie solaire photovoltaïque pour alimenter ce système de pompage d'eau permet d'assurer une alimentation électrique fiable et autonome, sans avoir à dépendre du réseau électrique ou de groupes électrogènes. Cette réalisation témoigne de l'expertise d'ER2 dans l'intégration de solutions solaires adaptées aux usages spécifiques des institutions et acteurs locaux, tels que les services forestiers dans cette région éloignée.



Figure 2.13 : Pompage de l'eau par S. PV directions des forêts Illizi

Electrification par E.S. des postes de surveillance OPNT Illizi

Une réalisation d'ER2 visant à alimenter en électricité, à l'aide de l'énergie solaire, les postes de surveillance de l'Office National du Tourisme (OPNT) situés dans la wilaya d'Illizi. Cette initiative s'inscrit dans la diversité des projets menés par la filiale du CDER pour électrifier, de manière décentralisée et renouvelable, différentes infrastructures et équipements isolés dans les régions du sud algérien. L'utilisation du solaire photovoltaïque pour alimenter ces postes de surveillance de l'OPNT permet d'assurer une alimentation électrique fiable et autonome, sans dépendre du réseau électrique traditionnel qui peut s'avérer difficile d'accès dans ces zones éloignées. Cette réalisation démontre ainsi la capacité d'ER2 à proposer des solutions d'électrification solaire adaptées aux besoins spécifiques d'acteurs institutionnels tels que l'OPNT, contribuant ainsi à la mise en valeur du patrimoine touristique de ces régions désertiques. [23]



Figure 2.14 : Electrification par E.S. des postes de surveillance OPNT Illizi

Kit Solaire (site isolé) initié par le ministère de l'agriculture

Programme d'électrification solaire des foyers isolés, mené par ER2 en collaboration avec le ministère de l'agriculture. Ce programme vise à fournir des kits solaires individuels aux habitants de ces zones rurales éloignées, qui ne peuvent pas être raccordées au réseau électrique conventionnel. Grâce à ces kits solaires autonomes, les foyers isolés bénéficient désormais du confort de l'électricité, améliorant ainsi leurs conditions de vie. Cette initiative innovante, portée conjointement par ER2 et le ministère de l'agriculture, illustre l'engagement des pouvoirs publics algériens à assurer l'accès à l'électricité dans les régions les plus reculées, en s'appuyant sur les solutions solaires photovoltaïques. Le succès de ce programme témoigne de la capacité d'ER2 à concevoir et déployer des systèmes solaires adaptés aux besoins spécifiques des populations rurales isolées.



Figure 2.15 : Kit Solaire (site isolé) initié par le ministère de l'agriculture

Principales réalisations du CDER dans le domaine du photovoltaïque

Tableau 3 : les principales réalisations du Centre de Développement des Énergies Renouvelables

Région	Usage	Puissance installée et systèmes
Batna (Est Algérie)	Electrification de logements pour enseignants	10 kWc
	Etude et installation de mini centrales pour différents usages	1 centrale de 5 kWc et 3 centrales de 2.5 kW
	Santé rurale	5 conservateurs médicaux (60 litres de capacité unitaire)
Oum El Bouaghi	Pompage	5 systèmes dans différents sites de la région
Tiaret	Eclairage, pompage, santé	Plusieurs systèmes
Centre	Téléphonie rurale	8 relais de 160 W
Différentes régions	Balisage aérien et signalisation	15 radio-balises dans plusieurs aéroports
Sud	Alimentation de relais hertziens	10 systèmes de 2 kWc

Le tableau présente les principales réalisations du Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER) dans le domaine du photovoltaïque, en indiquant la région, les usages et les types de systèmes installés.

On y voit que le CDER est intervenu dans plusieurs régions d'Algérie, notamment à Batna, Oum El Bouaghi, Tiaret Centre et dans différentes régions du sud du pays.

Les applications concernent des domaines variés tels que l'électrification de logements, l'alimentation des mini-centrales pour différents usages, l'équipement du secteur de la santé rurale, le pompage, l'éclairage, les télécommunications rurales, le balisage aérien et l'alimentation de relais hertziens.

Le tableau met ainsi en évidence la diversité des réalisations photovoltaïques menées par le CDER sur l'ensemble du territoire algérien, visant à répondre aux besoins énergétiques de différents secteurs dans ces régions.

2.9.1 Dans le monde

Au niveau mondial, la capacité en énergies renouvelables a augmenté de 50% en 2023 par rapport à l'année précédente, ajoutant 507 GW de nouvelles capacités, avec le solaire photovoltaïque représentant les trois quarts de ces ajouts. Les projections indiquent que la capacité mondiale en énergies renouvelables continuera à croître rapidement, atteignant près de 710 GW d'ici 2028. Les principales sources de cette croissance seront le solaire et l'éolien, qui représenteront 96% des nouvelles capacités installées.

Les statistiques sur les énergies renouvelables montrent une croissance significative dans plusieurs régions du monde. Voici un résumé détaillé pour quelques pays et régions clés, basé sur les données les plus récentes de l'Agence Internationale pour les Énergies Renouvelables (IRENA) et d'autres sources officielles. [24]

Chine :

En 2023, la Chine a considérablement renforcé sa capacité en énergies renouvelables, atteignant une augmentation de 297,6 gigawatts (GW), soit 63% de l'augmentation mondiale. La Chine reste le leader mondial avec une capacité totale de 1 220 GW. La majeure partie de cette croissance provient du solaire photovoltaïque, qui a ajouté 216,9 GW l'année dernière.

États-Unis :

Les États-Unis ont également vu une augmentation notable, avec une capacité totale atteignant 316 GW en 2023. Le pays a ajouté 29 GW de capacité renouvelable l'année dernière, avec une croissance importante dans les secteurs de l'énergie solaire et éolienne.

Union Européenne :

L'Union Européenne (UE) a fixé un nouvel objectif contraignant d'au moins 42,5% d'énergies renouvelables dans la consommation totale d'énergie d'ici 2030. En 2023, l'UE a atteint une part de 23% d'énergies renouvelables. Des pays comme la Suède (69,4%) et la Finlande (58,5%) ont des parts élevées d'énergies renouvelables dans le chauffage et le refroidissement, tandis que d'autres comme l'Irlande (6,3%) et les Pays-Bas (8,6%) sont à la traîne. [25]

Canada :

Le Canada a une capacité installée de 107 GW en énergies renouvelables, dominée par l'hydroélectricité, qui représente environ 70% de sa production totale d'électricité. Le solaire et l'éolien gagnent également du terrain, avec des ajouts respectifs de 2 GW et 13 GW l'année dernière.

Ces données reflètent une transition énergétique globale significative vers les énergies renouvelables, malgré les défis persistants, notamment le financement des projets dans les économies émergentes et en développement. La réalisation des objectifs ambitieux fixés par Les accords internationaux dépendront de l'augmentation des investissements et du soutien politique pour les technologies propres.

2.9 Conclusion :

Les systèmes photovoltaïques autonomes offrent une solution énergétique durable et fiable, permettant une indépendance énergétique, des avantages environnementaux significatifs, des économies à long terme et une fourniture d'électricité fiable. Cependant, malgré ces nombreux avantages, des inconvénients tels que le coût initial élevé, la dépendance aux conditions météorologiques et la nécessité d'investir dans des batteries de stockage peuvent être des défis à considérer. Il est essentiel de bien dimensionner le système, d'optimiser les habitudes de consommation et d'intégrer des équipements de gestion pour maximiser l'efficacité et la rentabilité de l'énergie solaire produite. En somme, les systèmes photovoltaïques autonomes représentent une solution prometteuse pour répondre aux besoins énergétiques dans les zones non raccordées aux réseaux électriques conventionnels, offrant une alternative respectueuse de l'environnement et économiquement viable.

Chapitre 3 : Présentation de l'installation et Méthodes de diagnostics

3.1 Introduction

Pour réaliser une étude approfondie des systèmes photovoltaïques, il est crucial de commencer par analyser et évaluer le potentiel solaire du site concerné. Jusqu'à présent, toutes les études ont adopté une approche fondée sur la modélisation mathématique, utilisant MATLAB pour modéliser l'ensemble du système. Nous débuterons donc par la modélisation du gisement solaire spécifique au site d'installation, puis nous procéderons à la modélisation de tous les composants de notre système.

3.2 Présentation du système

Notre travail consiste à étudier une installation solaire photovoltaïque autonome avec stockage à batteries comme illustré par la figure (3.1). Cette installation expérimentale, est située au Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER) à Bouzaréah, Alger.

Le but principal de cette étude est d'analyser l'impact des défauts sur le système. Les étapes suivantes décrivent le système que nous étudions :

1. Implantation des modules photovoltaïques :

L'installation des modules photovoltaïques sur la toiture du bâtiment ou à proximité immédiate est essentielle. Ces dispositifs de conversion sont spécifiquement conçus pour capter le rayonnement solaire incident et le transformer en électricité continue (courant continu ou DC) par le biais du processus photovoltaïque. Cette étape constitue la première phase de la chaîne de valorisation énergétique de la ressource solaire.

2. L'onduleur :

L'onduleur est un dispositif de l'électronique de puissance qui convertit le courant continu (DC) en courant alternatif (AC). Cette transformation permet de rendre l'énergie électrique produite par le système photovoltaïque compatible avec l'alimentation des charges alternatives requises.

3. Stockage de l'électricité :

Toute l'électricité produite durant la journée par les panneaux photovoltaïques est intégralement stockée dans les batteries.

4. Introduction de défauts :

Une fois le système étudié, nous introduirons des défauts dans l'installation simulée pour observer les différents résultats obtenus. Ces résultats seront ensuite comparés aux résultats théoriques de fonctionnement sans défauts pour évaluer la performance pratique de l'installation en utilisant le logiciel MATLAB.



Figure 3.1 Image du système étudié installé au CDER.

3.3. Modélisation du système

3.3.1 Modélisation de la position du soleil

La Terre effectue une rotation autour de son axe dans le sens trigonométrique, ce qui s'entraîne l'alternance entre les jours et les nuits. Ensuite, elle orbite autour du soleil en environ 365,242 jours, soit environ 365 jours, 5 heures, 48 minutes et 40 secondes.

Cette trajectoire est elliptique, avec le soleil proche du centre de cette ellipse, qui a une forme semblable à un œuf allongé.

La distance entre la Terre et le soleil varie au cours de l'année [26], étant minimale au début de janvier et maximale au début de juillet, comme illustré dans la figure (3.2).

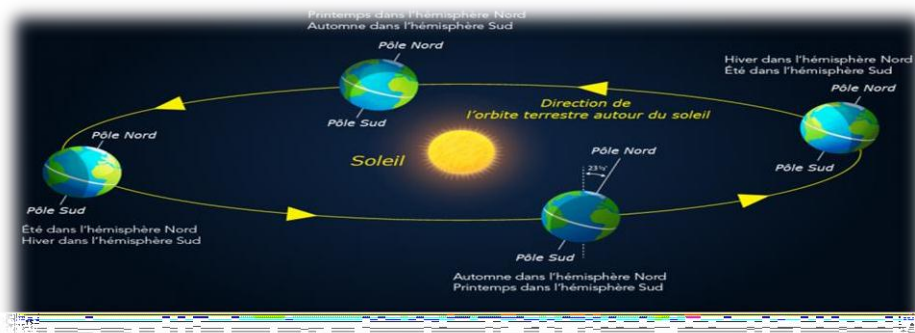


Figure 3.2 Orbite de rotation de la Terre autour du Soleil.

Pour une personne se tenant à un point précis sur la Terre, la position du soleil peut être déterminée en utilisant deux angles importants. [27] : l'angle d'altitude(α) et l'angle d'azimut (θ_s). L'angle d'altitude, qui représente la position angulaire du soleil dans le ciel ($\sin(\alpha)$), est mesuré par rapport à l'horizon. Il est donné par l'équation suivante :

$$\sin(\alpha) = \sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \quad (3.1)$$

Avec :

ϕ : Latitude de l'emplacement

δ : l'angle de déclinaison.

ω : est l'angle horaire.

Ainsi, l'angle de déclinaison, qui est le paramètre géométrique définissant l'inclinaison entre le plan équatorial terrestre et la trajectoire reliant la Terre au Soleil, est déterminé par l'équation mathématique suivante :

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(\frac{360}{365}\right) \cdot (j - 80) \quad (3.2)$$

j : le numéro du jour de l'année qui est entre 1 et 365j.

L'angle horaire mesure la position du soleil par rapport à midi, et représente le moment où le soleil passe par le plan méridien du zénith. Pour calculer sa valeur, on applique l'équation suivante [28] :

$$\omega = 15 \cdot (TSV - 12) \quad (3.3)$$

Avec :

TSV : le Temps solaire vrai qui est exprimé par l'équation suivante :

$$TSV = TSM \cdot \frac{ET}{90} \quad (3.4)$$

(ET) représente l'équation du Temps, qui est la différence entre les heures solaires apparentes et les heures solaires moyennes. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$ET = 9,87 \cdot \sin(2 \cdot B) - 7,53 \cdot \cos(B) - 1,5 \cdot (B) \quad (3.5)$$

Avec B qui donne :

$$B = \frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot (N - 81) \quad (3.6)$$

N : le numéro du jour de l'année

Ainsi le temps solaire moyen TSM est donné par :

$$TSM = TU \cdot \left(\frac{L}{15} \right) \quad (3.7)$$

Avec :

L : la longitude de site.

3.3.2 Modèle du rayonnement solaire

L'évaluation du rayonnement solaire est cruciale pour estimer la disponibilité de l'énergie solaire dans un lieu donné. Cette estimation revêt une grande importance dans de nombreux domaines, notamment celui de l'énergie solaire. Elle permet de comprendre le potentiel d'utilisation de cette énergie et d'orienter des décisions éclairées concernant l'installation de panneaux solaires ou d'autres applications solaires.

La littérature présente différents modèles d'estimation du rayonnement solaire, qui se distinguent les uns des autres par le nombre de paramètres pris en compte dans les calculs. [29]

Le modèle choisi dans notre travail est "le modèle d'estimation de l'indice de clarté".

L'indice de clarté : L'indice de clarté est un rapport entre le rayonnement solaire reçu à la surface terrestre et celui provenant de l'espace, et il varie selon les endroits et les saisons, engendrant ainsi des variations dans les estimations.

L'indice de clarté horaire : $K_t = \frac{I}{I_0}$

L'indice de clarté journalier : $K_t = \frac{H}{H_0}$

L'indice de clarté moyen mensuel $K_t = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0}$

Notre objectif est d'évaluer le rayonnement solaire quotidien sur un emplacement précis en réalisant des calculs de rayonnement solaire à la fois sur une surface horizontale et sur une surface inclinée [29].

3.3.2.1 Rayonnement solaire sur un plan Horizontal

La somme des deux composantes, le rayonnement solaire direct du soleil et le rayonnement solaire diffus provenant du ciel, forme le rayonnement solaire total quotidien sur une surface horizontale, noté HT comme illustré dans la figure (3.3)

$$HT = HB + HD \quad (3.8)$$

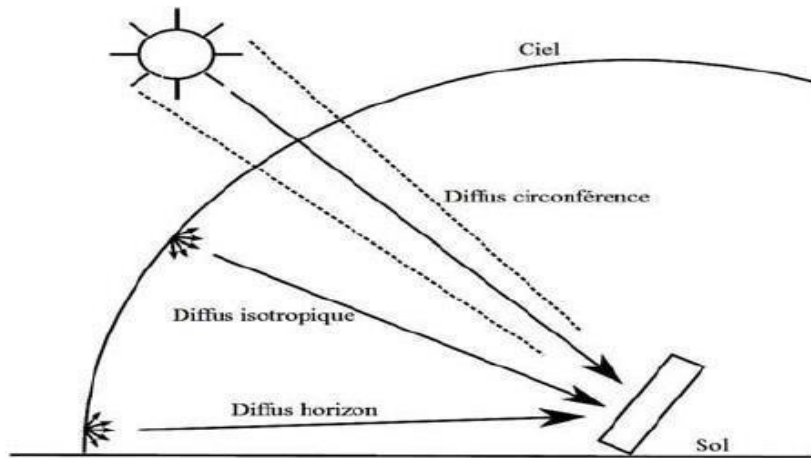


Figure 3.3 : Rayonnement solaire sur une surface horizontale.

Le calcul du rayonnement solaire quotidien extraterrestre sur une surface horizontale peut être réalisé en utilisant les équations suivantes [30] :

$$H = \frac{24 \cdot G_{SC}}{\pi} \cdot \left(1 + 0,033 \cdot \cos \frac{360 \cdot n}{365} \right) \cdot (\cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s) + \sin(\theta) \cdot \sin(\delta)) \quad (3.9)$$

G_{SC} : La constante solaire qui est de 1367 W/m^2 .

H_0 : Rayonnement solaire quotidien extraterrestre exprimé en W/m^2 .

ϕ : L'altitude du site.

ω_s : La durée d'insolation maximale.

δ : L'angle de la déclinaison.

n : Le numéro du jour de l'année $1 < n < 365$.

L'indice de clarté (KT) est exprimé par l'équation suivante :

$$K_t = a + b \cdot \bar{\sigma} = \frac{H}{H_0} \quad (3.10)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{w}{w_s} \quad (3.11)$$

Tel que :

w : La durée d'insolation.

w_s : La durée d'insolation maximale.

Ainsi les valeurs des constantes 'a' et 'b' données par Beeckman pour la région d'Alger et du Sahara en Algérie sont :

$$\text{Cas de Tamanrasset } \begin{cases} a = 0.25 \\ b = 0.70 \end{cases}$$

$$\text{Cas d'Alger } \begin{cases} a = 0.49 \\ b = 0.45 \end{cases}$$

La valeur du rayonnement terrestre est exprimée par :

$$H = KT + H_0 \quad (3.12)$$

La corrélation diffuse quotidienne (de Erbs et Al) moyenne est donnée par :

$$Kd = \frac{HD}{H} = 1,391 - 3.560.KT + 4.189.KT^2 - 2,137.KT^2 \quad (3.13)$$

En connaissant le rayonnement terrestre quotidien H exprimé par l'équation (3.12), et le rayonnement diffus quotidien HD de l'équation (3.14). Le rayonnement direct sur une surface horizontale HB peut être calculé par la formule suivante :

$$HB = H + HD \quad (3.15)$$

On a rt qui représente le rapport entre le rayonnement total horaire au rayonnement totalquotidien :

$$rt = \frac{\pi}{24} \left(\alpha + \beta \cdot \cos(w) \cdot \frac{\cos(w) \cdot \cos(ws)}{\sin(ws) - \left(\frac{2\pi ws}{360} \right) \cdot \cos(ws)} \right) \quad (3.16.a)$$

Avec :

$$\alpha = 0,409 + 0,5016 \cdot \sin(ws - 60) \quad (3.16.b)$$

$$\beta = 0,6609 + 0,4767 \cdot \sin(ws - 60) \quad (3.16.c)$$

Avec rd qui représente le rapport entre le rayonnement diffus horaire et le rayonnement diffus quotidien :

$$rt = \frac{\pi}{24} \cdot \frac{\cos(w) \cdot \cos(ws)}{\sin(ws) - \left(\frac{2\pi ws}{360} \right) \cdot \cos(ws)} \quad (3.17)$$

3.3.2.1.1 Rayonnement total I sur un plan horizontal :

Pour calculer le rayonnement horaire total reçu par une surface plane horizontale, on utilise l'équation (3.18) [31]

$$I = rt.H \quad (3.18)$$

3.3.2.1.2 Rayonnement diffus I_d :

Le rayonnement horaire diffus reçu sur une surface horizontale se calcule à partir de l'équation (3.19). [31]

$$I_d = r_d.HD \quad (3.19)$$

3.3.2.1.3 Rayonnement direct I_b :

Le rayonnement direct est donné par l'équation (3.20). C'est la différence entre le rayonnement total et le rayonnement diffus [31]

$$I_b = I - I_d \quad (3.20)$$

3.3.2.2 Rayonnement solaire sur un plan Incliné

Après avoir calculé les composantes directe et diffuse du rayonnement solaire sur une surface horizontale, il est possible de déterminer l'irradiation totale (composantes directe et diffuse) sur une surface inclinée avec un angle optimal β , comme illustré sur la Figure 3.4. Plusieurs méthodes sont alors envisageables pour effectuer le calcul de ce rayonnement [32].

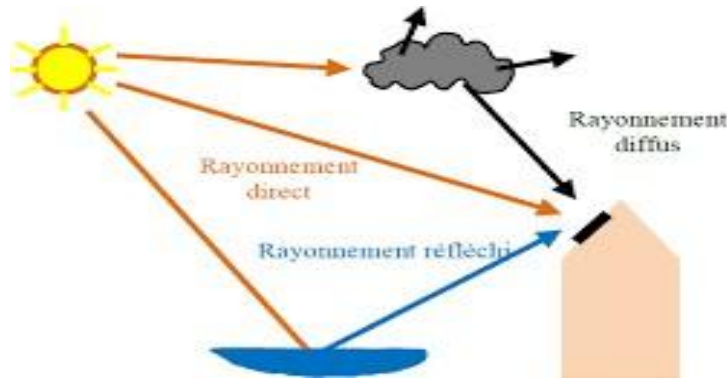


Figure 3.4 Rayonnement solaire sur un plan Incliné.

Dans cette étude, en utilisant le modèle de LIU et JORDAN (1962), nous effectuons le calcul de l'irradiation totale (IT) en utilisant les équations suivantes :

$$IT = I_b + I_d + I_r \quad (3.21)$$

$$IT = I_b.R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_r \rho_0 \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad (3.22)$$

3.3.2.2.1. Le rayonnement direct I_b :

Pour calculer le rayonnement solaire direct sur une surface inclinée, on multiplie le rayonnement solaire direct I_b sur une surface horizontale par le rapport entre le rayonnement direct incident sur le plan incliné et celui incident sur un plan horizontal.

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (3.23)$$

Tel que θ est l'angle d'incidence donnée par :

$$\cos(\theta) = \cos(\delta) \cdot \cos(\phi - \beta) \cdot \cos(\omega_s) + \sin(\phi - \beta) \cdot \sin(\delta) \quad (3.24)$$

Et θ_z l'angle zénithal donné par :

$$\cos(\theta_z) = \cos(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\omega_s) + \sin(\phi) \cdot \sin(\delta) \quad (3.25)$$

β : est l'angle d'inclinaison qui avoisine $\approx 35^\circ$ à Alger.

3.3.2.2.2 Le rayonnement diffus ID

Pour calculer le rayonnement diffus (ID) sur une surface horizontale, on multiplie ce dernier par le rapport R_d

$$R_d = 1 + \frac{\cos \beta}{2} \quad (3.26)$$

3.3.2.2.3 Le rayonnement réfléchi IR

Le rayonnement réfléchi est donné par l'expression

Avec :

$$R_r = (\rho_0) \cdot \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \quad (3.27)$$

ρ_0 : est l'albédo qui se trouve entre 0.2 et 0.7 en Algérie.

3.3.3 Modélisation du générateur photovoltaïque

3.3.3.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Il existe plusieurs types de modèles pour représenter les générateurs photovoltaïques, qui se distinguent par le nombre de paramètres pris en compte dans le calcul de la tension et du courant final.

Ces modèles peuvent inclure une, deux ou trois diodes.

Le modèle est le plus couramment utilisé est celui à une diode. Son circuit électrique équivalent, illustré dans sur la figure (3.5), comprend une source de courant qui convertit la lumière en électricité, une résistance shunt (R_{sh}) qui simule le courant de fuite de la cellule, et une résistance série (R_s) qui exprime les résistances de contact et de connexion. [33]

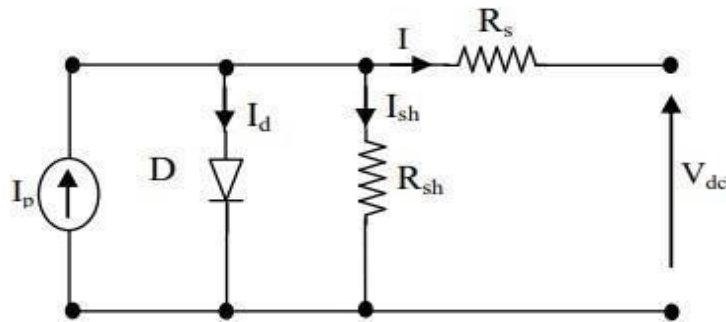


Figure 3.5 Schéma équivalent de la cellule PV

Une cellule photovoltaïque peut être modélisée par une équation décrivant le comportement statique de la jonction PN, similaire à celui d'une diode standard. Cette équation prend en compte le courant de court-circuit ainsi que les pertes induites par les résistances dans la connectique. En régime statique, une cellule photovoltaïque en silicium se comporte comme une diode ordinaire, ce qui est exprimé par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (3.28)$$

Avec :

I : Le courant fourni par la cellule,

$I_{ph} = I_0 \left(\frac{G}{1000} \right)$: Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G). Ce courant I_{ph}

Correspond au courant de court-circuit I_{cc} .

$I_p = V + \left(\frac{I R_s}{R_p} \right)$ Le courant dérivé par la résistance parallèle.

$I_d = I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right)$: le courant traversant la diode.

I_0 : Le courant de saturation inverse d'une diode.

$T = \frac{KT}{q}$: La tension thermique.

q : Charge de l'électron ($1.602 \times 10^{-19} C$).

K : constante de Boltzmann ($1.381 \times 10^{-23} J/K$).

n : Facteur de non idéalité de la jonction.

T : La température effective de la cellule en kelvin.

La forme du courant fourni par la cellule photovoltaïque est donnée par l'expression suivante :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (3.29)$$

3.3.3.2 Modélisation de module photovoltaïque :

Le module photovoltaïque utilisé appartient à la série **80S5 Green Light Energy**, conçue pour une production d'énergie solaire économique adaptée à des usages variés. Ce module intègre 36 cellules solaires en silicium monocristallin assemblées en série. Les caractéristiques électriques détaillées de ce panneau photovoltaïque sont présentées en annexe A.

Pour modéliser le comportement d'un module photovoltaïque, divers modèles mathématiques peuvent être employés. Ces modèles varient en fonction de l'approche de calcul utilisée et du nombre de paramètres pris en compte pour décrire la relation entre le courant et la tension délivrée par le module.

Nous avons choisi un modèle simplifié, qui utilise uniquement les paramètres fournis par le fabricant. La caractéristique I-V de ce modèle présenté ci-dessous.

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right) - \left(\frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (3.30)$$

Le courant de saturation inverse d'une diode est donné par : $I_0 = \frac{I_{cc}}{e^{\left(\frac{V_{c0}}{nkT}\right) - 1}}$ (3.32)

On suppose que la résistance parallèle est infinie, l'équation I devient :

$$I = I_{cc} - I_0 \cdot \left(e^{\left(\frac{q(V+IR_s)}{nkT}\right)} - 1 \right) \quad (3.33)$$

Bien que :

I : Le courant fourni par la cellule.

V : La tension à la borne de la cellule.

On calcule la résistance série R_s dans le point V_{co} :

$$dI = 0 - I_0 \left(\frac{dV + R_s \cdot dI}{nVT} \right) \cdot \left[e^{\left(\frac{V+I.R_s}{nVT} \right)} \right] \quad (3.34)$$

La résistance série influe sur la pente de la courbe des caractéristiques I-V au voisinage de V_{co} .

Elle est calculée par l'équation suivante :

$$R_s = - \frac{dI}{dV} - \frac{nVT}{I_0 \cdot e^{\left(\frac{V+I.R_s}{nVT} \right)}} \quad (3.35)$$

Pour résoudre l'équation de caractéristique non linéaire, on applique la méthode itérative de Newton, dont les étapes sont les suivantes :

$$x_{n+1} = \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (3.36)$$

Avec : $f'(x_n)$: La dérivée de la fonction $f(x_n)$

x_n : La présente itération.

x_{n+1} : L'itération suivante.

En conséquence, nous pouvons réécrire l'équation (3.33) de la manière suivante :

$$f(I) = I_{cc} - I - I_0 \cdot \left(e^{\left(\frac{V+I.R_s}{nVT} \right)} - 1 \right) \quad (3.37)$$

Ainsi :

En remplaçant dans l'équation (3.36), on calcule le courant (I) par l'équation :

$$x_{n+1} = I_n - \frac{I_{cc} - I - I_0 \cdot \left(e^{\left(\frac{V+I.R_s}{nVT} \right)} - 1 \right)}{-1 - I_0 \left(\frac{R_s}{nVT} \right) \cdot \left[e^{\left(\frac{V+I_n.R_s}{nVT} \right)} \right]} \quad (3.38)$$

Les équations précédemment présentées ne sont valables que dans des conditions de fonctionnement optimales.

Afin d'étendre nos calculs à différents niveaux d'éclairement et de température, nous utilisons un modèle permettant de déplacer la courbe de référence vers de nouvelles positions.

Ceci nous permet d'obtenir les caractéristiques décrivant l'influence de la température et de l'irradiation solaire sur les performances du panneau photovoltaïque [34].

$$I_{cc}(T) = I_{cc}(T_{ref}) [1 + (T - T_{ref})] \quad (3.39)$$

$$I_{ph} = I_{cc} \left(\frac{G}{1000} \right) \quad (3.40)$$

$$I_0(T) = I_0(T_{ref}) \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{n}} \left[e \left(\frac{-q \cdot E_g}{n \cdot K} \right) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (3.41)$$

α : Coefficient de variation du courant en fonction de la température.

T_{ref} : Température de référence 25°C.

G : Irradiation solaire.

3.3.4 Modélisation du système de stockage :

La modélisation du dispositif de stockage par batterie représente une étape cruciale dans l'analyse et la mise en œuvre d'un système photovoltaïque autonome. Cette modélisation permet de simuler les performances de la batterie et d'évaluer ses paramètres clés lors des cycles de charge et de décharge, notamment la tension aux bornes ainsi que les états de charge minimaux et maximaux admissibles (SOCmin-SOCmax). De plus, une modélisation adéquate joue un rôle essentiel dans la gestion optimale des flux énergétiques impliquant le stockage.

Il existe principalement deux types de modèles pour représenter l'évolution temporelle de la batterie, à savoir les modèles d'ordre chimique et les modèles d'ordre électrique [35].

3.3.4.1 Modèle électrochimique :

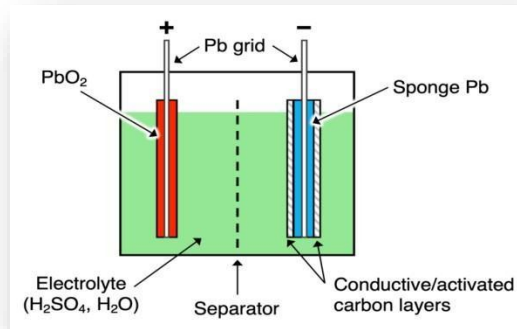


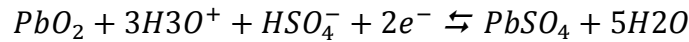
Figure 3.6 : schéma d'un accumulateur plomb-acide.

Le modèle électrochimique, illustré par la Figure (1), représente l'une des premières approches utilisées pour modéliser le comportement dynamique d'une batterie dans le temps.

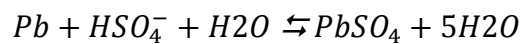
Ce type de modèle est généralement employé pour décrire les phénomènes de transfert de masse, d'énergie et de transport des électrons au sein de la solution électrochimique.

Il repose sur les lois électrochimiques régissant chaque phase et chaque cellule constitutive de la batterie [36].

Dans une réaction d'oxydo-réduction, il y'a un transfert d'électrons : A l'anode (Oxydation) :



A la cathode (réduction) :



3.3.4.2 Modèle électrique simplifié :

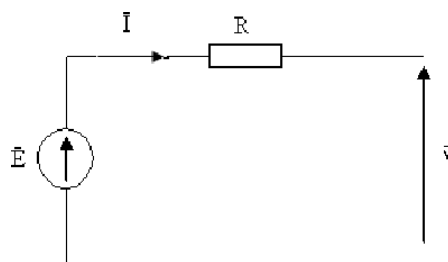


Figure 3.8 : Schéma électrique équivalent simplifié de la batterie

Ce modèle représente la batterie par une source de tension idéale E_0 (tension à vide) en série

avec une résistance interne R_0 , La tension de sortie aux bornes de la batterie est représentée par V , comme illustré sur la figure (2). Dans ce modèle électrique simplifié, la source de tension idéale E_0 et la résistance interne R_0 sont considérées comme des paramètres constants. [33]

L'équation ci-dessous décrit la relation entre le courant I_b circulant dans la batterie et la tension de sortie V_b qu'elle délivre aux bornes de la batterie nous avons :

$$V_{bat} = E - R_{bat} \cdot I_{bat}$$

3.3.4.2.1 Modèle de capacité (CIEMAT) :

Le modèle de capacité indique la quantité d'énergie restituable par la batterie en fonction du courant moyen de décharge. Il s'appuie sur le courant I_{10} , lié au régime C_{10} (décharge complète en 10h). A 25°C, le courant I_{10} permet d'évaluer la capacité énergétique disponible pour un courant de décharge donné. [33].

$$\frac{C_{bat}}{C_{10}} = \frac{1,67}{1 + 1,67 \cdot \left(\frac{I}{I_{10}}\right)^{0,9}} \cdot (1 + 0,005 \cdot \Delta T) \quad (3.42)$$

I_{10} : Le courant nominal de la batterie,

C_{10} : La capacité nominale de la batterie (en Ah) en régime de décharge courant,

C_{Bat} : La capacité de la batterie donnée par le constructeur,

ΔT : Echauffement de la batterie par rapport à la température ambiante de 25°C.

La capacité C_{bat} est utilisée comme référence pour déterminer l'état de charge de la batterie (SOC),

t : La durée de charge de la batterie.

La profondeur de décharge maximale DOD est évaluée selon la capacité de la batterie respectivement

$$DOD = 1 - SOC$$

3.3.4.2.2 Modèle de charge d'une batterie :

La tension aux bornes d'une batterie dépend des caractéristiques de ses composants internes, notamment la force électromotrice (f.é.m.) générée par les réactions électrochimiques [36]

$$V_{battcharge} = n_b \cdot [2 + 0,16 \cdot SOC] + n_b \cdot \frac{I_{batt}}{C_{10}} \left[\frac{6}{1 + (I_{batt})^{0,86}} + \frac{0,27}{(1 - SOC)^{1,2}} + 0,036 \right] \cdot (1 - 0,025 \cdot \Delta T) \quad (3.43)$$

n_b : Nombre de cellules.

ΔT : Variation de la température.

$$\Delta T = T - 25$$

3.3.4.2.3 Modèle de décharge d'une batterie :

L'équation pour la tension est similaire à celle obtenue pendant la phase de charge [37]

$$V_{\text{battcahrge}} = n_b \cdot [1,965 + 0,12 \cdot \text{SOC}] + n_b \cdot \frac{|I_{\text{batt}}|}{C_{10}} \left[\frac{4}{1 + |I_{\text{batt}}|^{1,3}} + \frac{0,27}{(1 - \text{SOC})^{1,5}} + 0,02 \right] \cdot (1 - 0,007 \cdot \Delta T) \quad (3.44)$$

3.3.5 Choix du régulateur :

Afin de déterminer la puissance utile ' P_u ' délivrée en sortie du régulateur, il est nécessaire d'effectuer les calculs suivants en prenant en compte les différents rendements et pertes du système :

Avec :

$P_{n\text{rég}}$: La puissance nominale du régulateur,

$\eta_{\text{rég}}$: Le rendement du régulateur est estimé de 95%.

3.3.6 Choix d'onduleur :

L'onduleur est un dispositif d'électronique de puissance qui convertit une tension continue en une tension alternative (DC/AC), d'amplitude efficace et de fréquence fixe ou réglable.

Pour calculer la puissance délivrée par l'onduleur ' P_s ', on utilise l'équation suivante :

$$P_u = P_{n\text{rég}} \cdot \eta_{\text{rég}}$$

η_{ond} : Rendement d'onduleur.

En général la valeur du rendement des convertisseurs DC/AC, communément appelés onduleur, est comprise en moyenne entre 90% et 93%. Dans le cas étudié, le rendement de l'onduleur est de 90%.

Application numérique :

La puissance finale sortie d'onduleur :

$$P_s = P_{\text{max panneau}} \cdot \eta_{\text{rég}} \cdot \eta_{\text{ond}}$$

$P_{\text{max panneau}}$: La puissance maximale du panneau. $P_s = 80\text{W}$

$$P_s = 80 \times 0,95 \times 0,90$$

$$P_s = 68,4\text{W}$$

3.3.7 La charge :

Notre charge est nocturne et son profil de charge est comme suit :

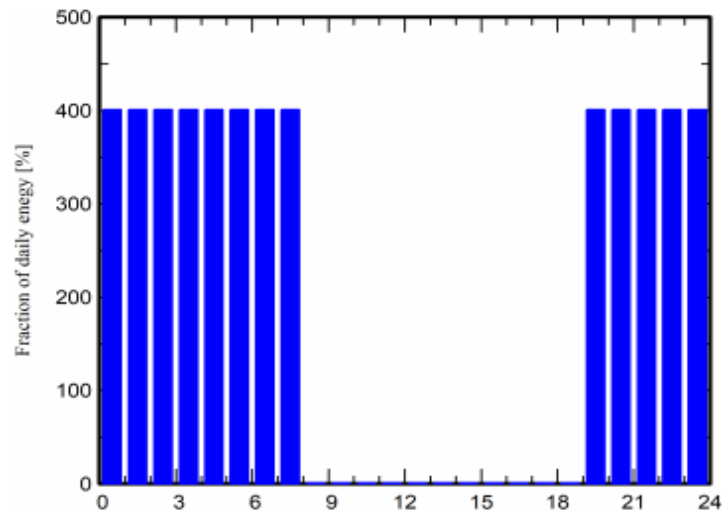


Figure 3.9 : Les méthodes de diagnostics

Les méthodes de diagnostic sont essentielles pour assurer une performance optimale et une durabilité maximale du système.

Ces méthodes peuvent être classées en plusieurs catégories :

1. Surveillance en temps réel : Utilisation de systèmes de monitoring qui collectent en continu des données sur la production d'énergie, la tension, le courant et l'état de charge des batteries.
2. Ces systèmes permettent de détecter rapidement les anomalies de fonctionnement.
3. Analyses périodiques : Réalisation d'inspections visuelles et de tests électriques réguliers pour évaluer l'état des panneaux, des connexions et des composants du système. Cela inclut des tests de courbe I-V pour évaluer les performances des modules.
4. Thermographie : Utilisation de caméras infrarouges pour détecter les points chauds et les défauts non visibles à l'œil nu sur les panneaux et les connexions électriques.
5. Analyse des données historiques : Comparaison des performances actuelles avec les données historiques et les prévisions théoriques pour identifier les tendances de dégradation à long terme.
6. Tests de capacité des batteries : Évaluation régulière de l'état de santé et de la capacité des batteries de stockage, cruciales pour les systèmes autonomes.
7. Diagnostics avancés : Utilisation d'algorithmes d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique pour prédire les défaillances potentielles et optimiser la maintenance préventive.

Ces méthodes, utilisées de manière complémentaire, permettent une détection précoce des problèmes, une maintenance ciblée et une optimisation continue des performances du système photovoltaïque autonome.

3.9 Les défauts

Après la modélisation de notre système, nous analyserons l'impact des défauts suivants et leurs effets sur les performances de l'installation photovoltaïque :

3.9.1 Défaut dans la Résistance Série (R_s)

La résistance série R_s représente toutes les résistances électriques présentes dans le circuit du module photovoltaïque, incluant les résistances des contacts métalliques, des connexions électriques et des matériaux semi-conducteurs. Un défaut dans la résistance série se traduit par une augmentation de cette résistance, ce qui cause des pertes ohmiques. Ces pertes se manifestent par une dissipation de puissance sous forme de chaleur, réduisant ainsi la puissance maximale que le module peut produire. Plus la résistance série est élevée, plus la chute de tension aux bornes des cellules est importante, ce qui diminue le courant de sortie et affecte l'efficacité globale du module. En résumé, une R_s élevée dégrade significativement la performance du système photovoltaïque.

3.9.2 Défaut dans la Résistance Shunt (R_p)

La résistance shunt R_p est associée aux chemins de fuite parasites qui court-circuitent la jonction p-n du module photovoltaïque. Un défaut dans la résistance shunt signifie une diminution de cette résistance, ce qui permet à un courant de fuite plus important de circuler à travers la cellule. Cela provoque des pertes de courant, réduisant le courant disponible pour être collecté à la sortie du module. Une R_p faible a pour effet de diminuer la tension en circuit ouvert (V_{oc}) et le facteur de remplissage (FF), entraînant une baisse de l'efficacité et de la puissance maximale du module. Ainsi, un défaut dans la résistance shunt peut fortement compromettre la performance du système photovoltaïque.

3.9.3 Défaut d'Ombrage

L'ombrage des cellules photovoltaïques, qu'il soit partiel ou total, a un impact disproportionné sur la performance du module. Lorsque des cellules individuelles sont ombragées, elles produisent moins de courant par rapport aux cellules non ombragées. Dans un circuit série, cette différence de courant entraîne des pertes de puissance importantes, car le courant du circuit est limité par la cellule

la plus faiblement éclairée. De plus, l'ombrage peut entraîner des points chauds (hot spots) où l'énergie dissipée peut endommager les cellules. L'effet global de l'ombrage est une réduction significative de la production d'énergie et de l'efficacité du système photovoltaïque.

3.9.4 Défaut dans la Diode

Les diodes sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour protéger les cellules contre les effets de l'ombrage et pour empêcher les courants de circulation indésirables. Un défaut dans une diode peut se manifester de plusieurs façons, telles qu'une défaillance de la diode de dérivation (bypass diode) ou une diode bloquée en mode conducteur. Une diode de dérivation défaillante ne pourra pas protéger les cellules ombragées, entraînant une surchauffe et des points chauds, ce qui peut endommager les cellules et réduire l'efficacité du module. Une diode bloquée en mode conducteur peut entraîner une perte de puissance inutile, car elle permet un flux de courant continu même lorsqu'il n'est pas nécessaire. Les défauts dans les diodes peuvent donc avoir un impact significatif sur la protection et la performance du système photovoltaïque.

3.9.5 Défaut de Mismatch

Le défaut de mismatch se produit lorsque des cellules photovoltaïques ayant des caractéristiques électriques différentes sont connectées ensemble dans un même module ou string. Les différences peuvent être dues à des variations de fabrication, de vieillissement, de température ou d'ombrage. Lorsque ces cellules dissemblables sont connectées en série, le courant du circuit est limité par la cellule ayant le courant le plus faible, ce qui réduit la puissance globale générée. Dans les connexions parallèles, les différences de tension peuvent entraîner des courants de circulation indésirables. Le mismatch peut causer des pertes de puissance significatives et une diminution de l'efficacité globale du système photovoltaïque.

3.3.9 Conclusion

Ce chapitre a exploré les bases de la modélisation et des composants clés des générateurs photovoltaïques. Nous avons étudié en détail les équations décrivant les caractéristiques I-V et P-V, ainsi que l'incidence de la température et de l'éclairement sur ces caractéristiques. De plus, nous avons examiné les principes de la modélisation et de l'estimation de la production d'énergie solaire simulée pour différents sites. Cette approche de modélisation système constitue un fondement essentiel pour l'analyse et l'optimisation des installations photovoltaïques, en permettant de prédire avec précision les bilans énergétiques, d'analyser les interactions entre les composants, et d'évaluer l'influence des conditions environnementales sur les performances globales.

Chapitre 4 : Simulation et discussion des résultats

4.1 Introduction :

Après la modélisation des différents composants du système PV autonome avec stockage, ce chapitre présente le site d'implantation à Bouzareah ainsi que ses caractéristiques climatiques. L'objectif est d'évaluer les performances du système.

Dans des conditions normales, puis d'introduire divers défauts pour analyser leurs impacts sur les résultats obtenus. Cette approche, qui combine l'étude du fonctionnement normal avec celle des situations de défauts, permettra d'obtenir une vision complète des performances du système photovoltaïque autonome avec stockage.

Les logiciels MATLAB et PVSyst sont utilisés pour ces analyses.

4.2 Outils de simulation

4.2.1 Matlab :

MATLAB est un environnement de programmation et de calcul numérique largement utilisé en ingénierie et dans les sciences mathématiques.

Il offre un langage de programmation intuitif et des bibliothèques de fonctions flexibles pour la modélisation, la simulation et l'analyse de données [38].

4.2.2 MATLAB script :

Un script ou éditeur de script, est une forme basique de programme dans MATLAB, présentée sous la forme d'un fichier contenant une série de lignes de commandes et d'appels de fonctions du programme.

Les résultats sont souvent affichés sous forme de figures (graphique), ou de résultats numériques.

Pour créer un script dans MATLAB, il suffit de sélectionner 'New script' dans le menu "File" de la barre d'outils "Tools". Une nouvelle fenêtre s'ouvrira alors où vous pourrez écrire votre programme. Pour exécuter ce script, il vous suffit de cliquer sur "Run" ou utiliser la commande appropriée dans l'interface MATLAB comme illustré sur la figure (4.1).

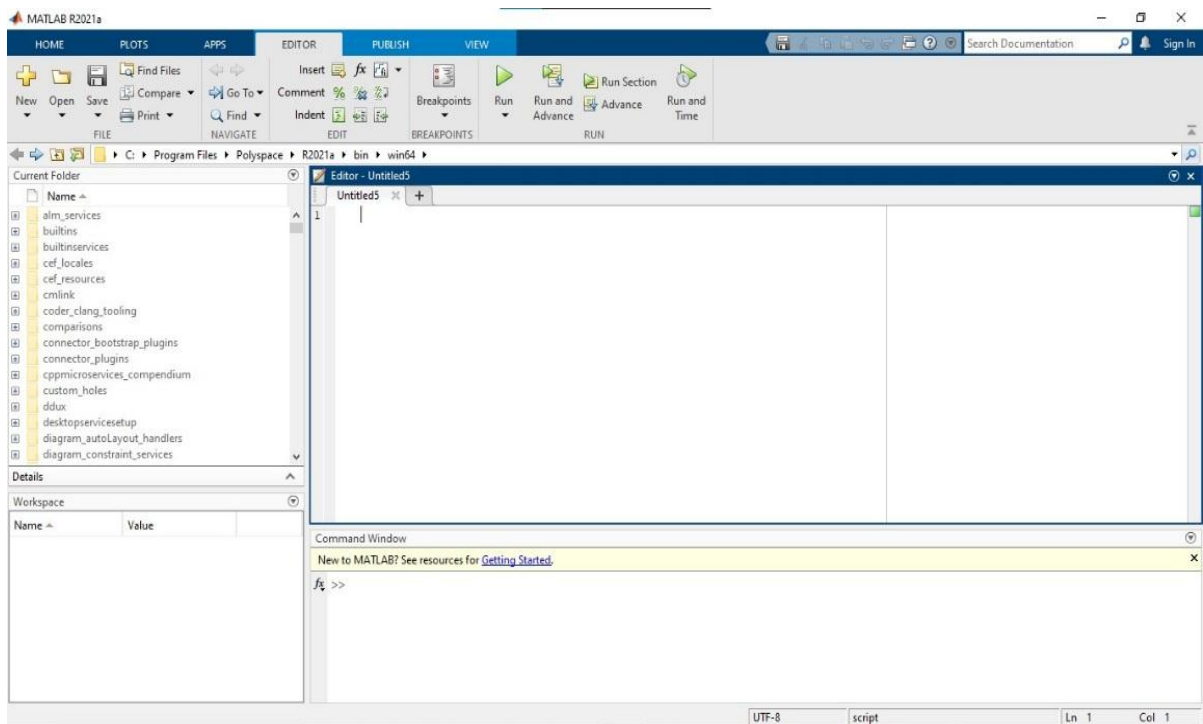


Figure 4.1 : L'interface de MATLAB script

4.2.3 PVsyst :

PVsyst est un logiciel spécialisé dans la conception et la simulation de systèmes photovoltaïques. C'est un outil polyvalent conçu non seulement pour les architectes, ingénieurs et chercheurs, mais aussi comme support pédagogique.

Il offre une aide détaillée sur les procédures et modèles utilisés, une interface ergonomique des guides intégrés, ainsi que guide, et la possibilité d'importer des données météorologiques provenant de diverses sources ainsi que des données personnelles. [39]

4.3 L'emplacement géographique :

Le site d'implantation du système est au Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER) situé à Bouzareah, sur la façade nord de la Méditerranée en Algérie, dans la banlieue d'Alger. Il est positionné à une latitude de $36,48^\circ$ Nord et une longitude de $3,48^\circ$ Est, à une altitude de 339 mètres, comme l'illustre cette figure suivante (4.2).



Figure 4.2 : l'emplacement géographique avec les coordonnées sur Google earth

L'image prise de Google Earth montre le repère (a) identifiant l'emplacement du Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER), ainsi que les coordonnées géographiques associées au point (b). Les données extraites de l'image Google collectées et analysées, revêtent une importance significative pour évaluer la quantité d'énergie solaire disponible, c'est-à-dire les niveaux du potentiel solaire de la région.

4.4 Données météorologiques du site de Bouzareah :

L'évaluation de la pertinence d'un site pour l'installation d'un système photovoltaïque autonome nécessite une observation attentive des données météorologiques et radiométriques, notamment la température ambiante, l'humidité relative et la vitesse du vent. Dans le cas présent, les données utilisées ont été collectées par la station de mesure du Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER).

Bouzareah possède un climat méditerranéen tempéré, caractérisé par des étés chauds et secs. Sur l'année, la température moyenne à Bouzareah est de **19,7°C**, l'humidité relative est de **65%**, et les précipitations moyennes s'élèvent à **672,3 mm**

• Température :

La température est un paramètre variable influencé par plusieurs facteurs dans l'environnement humain. Ces variations dépendent principalement du rayonnement solaire, de la vitesse du vent, l'altitude et de la nature du sol. La température n'est donc pas constante mais fluctue permanence en raison de ces

différents éléments climatiques et géographiques.

En Algérie, les températures extérieures moyennes mensuelles suivent généralement un schéma élevé en été et plus bas en hiver. Elles varient typiquement de 10.5°C en janvier et 39°C en août, des moyennes annuelles oscillant entre 10°C et 12°C en hiver et entre 24°C et 26°C en été. En 2024, une température maximale de 32°C a été enregistrée au mois de mai.

• **L'humidité :**

Le site de Bouzareah (CDER), situé à Alger, est caractérisé par un climat très humide, avec une atmosphère presque constamment saturée en vapeur d'eau. La moyenne saisonnière de l'humidité relative est de 65% [38], ce qui le classe dans la catégorie des zones humides [40].

• **La durée d'ensoleillement :**

La durée d'ensoleillement fait référence au temps pendant lequel l'intensité du rayonnement solaire direct dépasse un seuil conventionnel. Sous un ciel dégagé, cette durée est généralement proche de la longueur du jour. Les mesures mensuelles et annuelles sont obtenues en additionnant les périodes journalières d'ensoleillement, enregistrées par un instrument appelé héliographe. [41]

4.5 Simulation avec MATLAB

4.5.1 La simulation du gisement solaire :

Après une revue de la littérature, les modèles mathématiques sélectionnés pour le calcul des différentes composantes du rayonnement solaire ont été implémentés et simulés à l'aide de MATLAB. Les résultats obtenus comprennent :

• **Irradiation extraterrestre horizontale :** Calcul de l'intensité du rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère terrestre, sans tenir compte des effets de l'atmosphère.

• **Rayonnement solaire sur une surface horizontale :** Estimation de l'énergie solaire atteignant une surface horizontale au niveau du sol, en tenant compte de l'absorption et de la diffusion par l'atmosphère.

• **Rayonnement solaire sur une surface inclinée :** Calcul du rayonnement solaire sur une surface inclinée avec un angle optimal correspondant à la latitude du lieu, prenant en considération l'orientation optimale pour maximiser l'énergie captée.

Il est essentiel de noter que ces estimations sont valables principalement pour un ciel dégagé et peuvent varier en fonction des conditions météorologiques locales et des saisons, le rayonnement extraterrestre quotidien horizontal est représenté dans la figure (4.3).

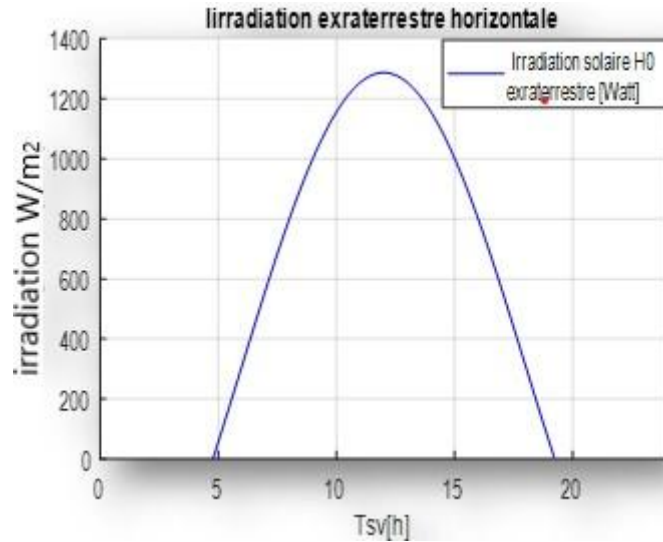


Figure 4. 3 : Rayonnement extraterrestre quotidien horizontal.

La figure ci-dessus illustre les résultats du calcul de l'irradiation extraterrestre sur un plan horizontal pour la journée du 6 juin 2024. Cette courbe représente l'intensité du rayonnement solaire extraterrestre en fonction de l'heure du jour, exprimée en watts par mètre carré (W/m²). Le pic d'irradiation correspond généralement aux heures centrales de la journée, lorsque l'angle d'incidence solaire est optimal par rapport à la latitude du lieu. Ces données sont cruciales pour évaluer le potentiel énergétique solaire d'un site donné et orienter la conception optimale des systèmes photovoltaïques.

4.5.2 Rayonnement solaire sur un plan horizontal :

La figure suivante présente les résultats de simulation des trois composantes du rayonnement solaire sur un plan horizontal pour une journée dégagée du 6 juin 2024 :

- **Rayonnement global :** Représente l'ensemble du rayonnement solaire atteignant la surface horizontale, exprimé en watts par mètre carré (W/m²). Il comprend à la fois le rayonnement direct et le rayonnement diffus après leur interaction avec l'atmosphère.
- **Rayonnement diffus :** Correspond à la partie du rayonnement solaire diffusé par l'atmosphère, mesuré en watts par mètre carré (W/m²). Ce rayonnement est réparti de manière isotrope sur la surface terrestre.

• **Rayonnement direct** : Indique la composante du rayonnement solaire qui atteint directement la surface sans interaction significative avec l'atmosphère, également exprimé en watts par mètre carré (W/m^2).

Les résultats de la figure (4.4) représentent le rayonnement estimé sur un plan horizontal qui sont essentiels pour comprendre la répartition du rayonnement solaire et optimiser la conception des systèmes photovoltaïques en fonction des conditions spécifiques de la journée et du lieu.

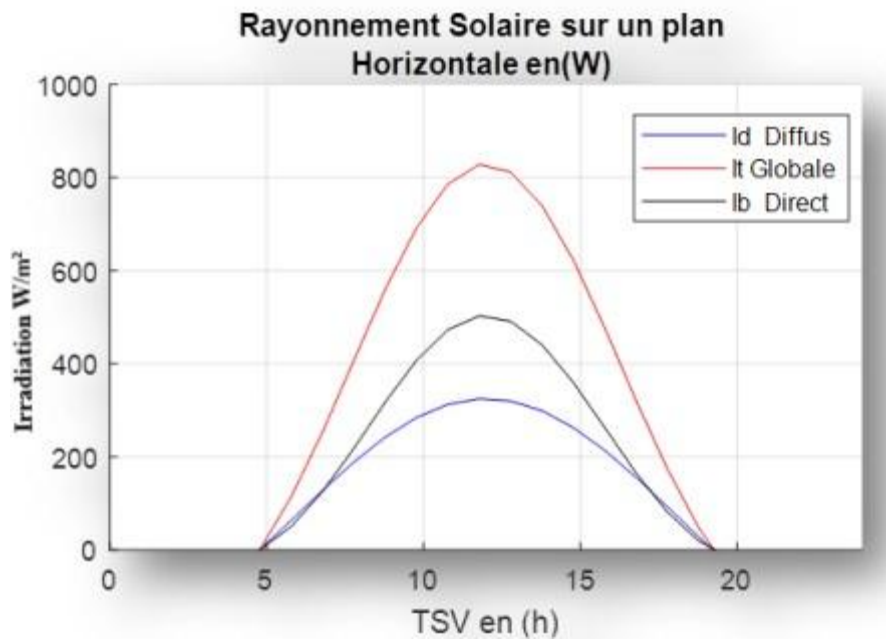


Figure 4.4 : Rayonnement estimé sur un plan horizontal.

4.5.3 Rayonnement solaire sur un plan incliné :

La figure (4.5), illustre l'estimation du rayonnement solaire sur un plan incliné à un angle de $\beta = 36^\circ$, orienté plein sud.

Les courbes représentent :

- **Rayonnement total** : L'ensemble du rayonnement solaire atteignant la surface inclinée, incluant le rayonnement direct, le rayonnement diffus après leur interaction avec l'atmosphère, et l'irradiation réfléchie.

- **Rayonnement direct** : La composante du rayonnement solaire qui atteint directement la surface inclinée sans interaction significative avec l'atmosphère.

- **Rayonnement diffus** : La partie du rayonnement solaire diffusée par l'atmosphère, répartie de manière isotrope sur la surface inclinée.

• **Irradiation réfléchi** : La fraction du rayonnement solaire réfléchi par des surfaces environnantes, contribuant à l'éclairement total reçu par le plan incliné.

Ces données ont été calculées à partir des mesures de rayonnement total, direct et diffus sur un plan horizontal, adaptées pour prendre en compte l'angle d'inclinaison et l'orientation sud du plan. Elles sont cruciales pour évaluer la performance d'un système photovoltaïque incliné et orienté de manière optimale pour maximiser la capture d'énergie solaire.

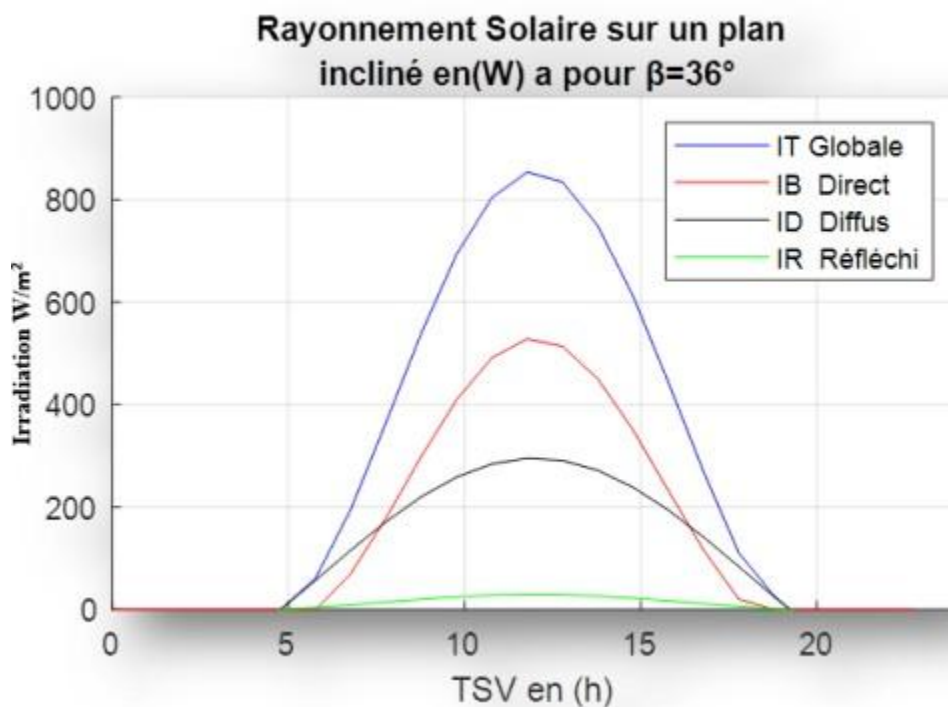


Figure4. 5 : Evaluation du rayonnement solaire sur un plan incliné à un angle $\beta = 36^\circ$, orienté plein sud

Discussions des résultats :

La figure (4.4) illustre l'estimation de l'irradiation solaire sur une surface horizontale, exprimée en watts par mètre carré (W/m^2), en fonction du temps solaire vrai (TST).

L'irradiation est observée à ses valeurs maximales au moment où le soleil est au zénith, et ses valeurs minimales sont notées au lever et au coucher du soleil. La courbe présente une tendance sinusoïdale typique, caractérisant l'évolution quotidienne du rayonnement solaire direct, diffus et global sous un ciel dégagé.

La figure (4.5) montre l'estimation de l'irradiation solaire sur une surface inclinée à un angle optimal de 36° , également en watts par mètre carré (W/m^2). Cet angle correspond à l'angle de latitude de Bouzareah et optimise l'absorption du rayonnement solaire. Comparée à la surface horizontale, l'inclinaison permet une captation accrue du rayonnement solaire direct, en particulier autour du midi solaire. La courbe révèle que cette configuration capte plus efficacement l'énergie solaire en maximisant l'irradiation globale reçue par la surface.

En conclusion, l'analyse des résultats obtenus démontre que l'irradiation solaire est sensiblement améliorée par une surface inclinée par rapport à une surface horizontale, justifiant ainsi l'importance de l'optimisation de l'angle d'inclinaison pour les installations photovoltaïques. Ces informations sont cruciales pour le dimensionnement, la conception et l'optimisation des systèmes photovoltaïques, permettant une meilleure captation de l'énergie solaire et une performance accrue du système.

4.5.4 La simulation du générateur PV :

Suite à l'application des équations de modélisation du générateur photovoltaïque (GPV), dont les caractéristiques techniques sont fournies en annexe, les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) du système ont été obtenues sous les conditions standards (STC : $G=1 \text{ kW}/\text{m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$), comme présenté dans la figure (4.6). Ces courbes sont essentielles pour comprendre le comportement électrique du GPV.

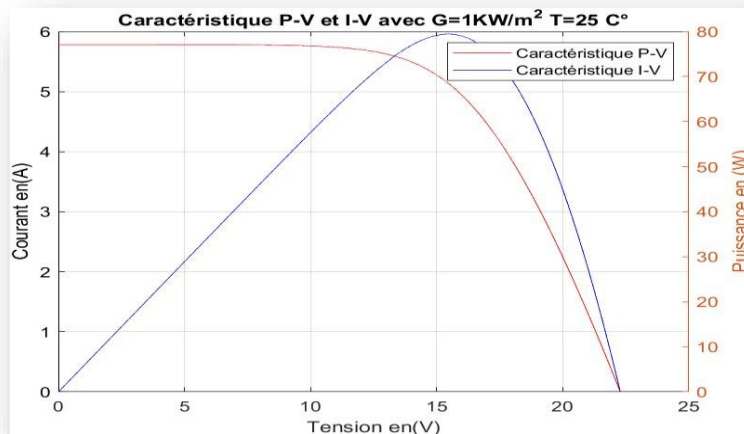


Figure 4.6 : Caractéristique électrique I-V et P-V d'un module photovoltaïque.

4.5.5 L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$

En utilisant le logiciel MATLAB pour simuler le module photovoltaïque **80S5 Green Light Energy**, nous avons pu générer les courbes caractéristiques I-V (courant-tension) et P-V (puissance-tension).

Ces simulations ont été réalisées à une température ambiante de 25 °C, en variant les niveaux d'éclairement de **400 W/m² à 1000 W/m²** par incréments de **200 W/m²**.

On constate que la tension en circuit ouvert (V_{co}) reste pratiquement constante malgré les variations d'éclairement (G). Cela s'explique par le fait que la V_{co} dépend principalement des propriétés de la jonction PN et est moins sensible aux variations de l'intensité lumineuse.

En revanche, le courant de court-circuit (I_{cc}). Varie de manière significative avec l'éclairement, augmentant proportionnellement avec l'intensité lumineuse, car l' I_{cc} est directement lié au nombre de photons incident.

Par conséquent, une augmentation de l'éclairement (G) se traduit par une augmentation de la puissance générée par le module photovoltaïque, ce qui souligne l'importance de l'ensoleillement pour maximiser l'efficacité énergétique des systèmes photovoltaïques, comme illustré dans la figure (4.7).

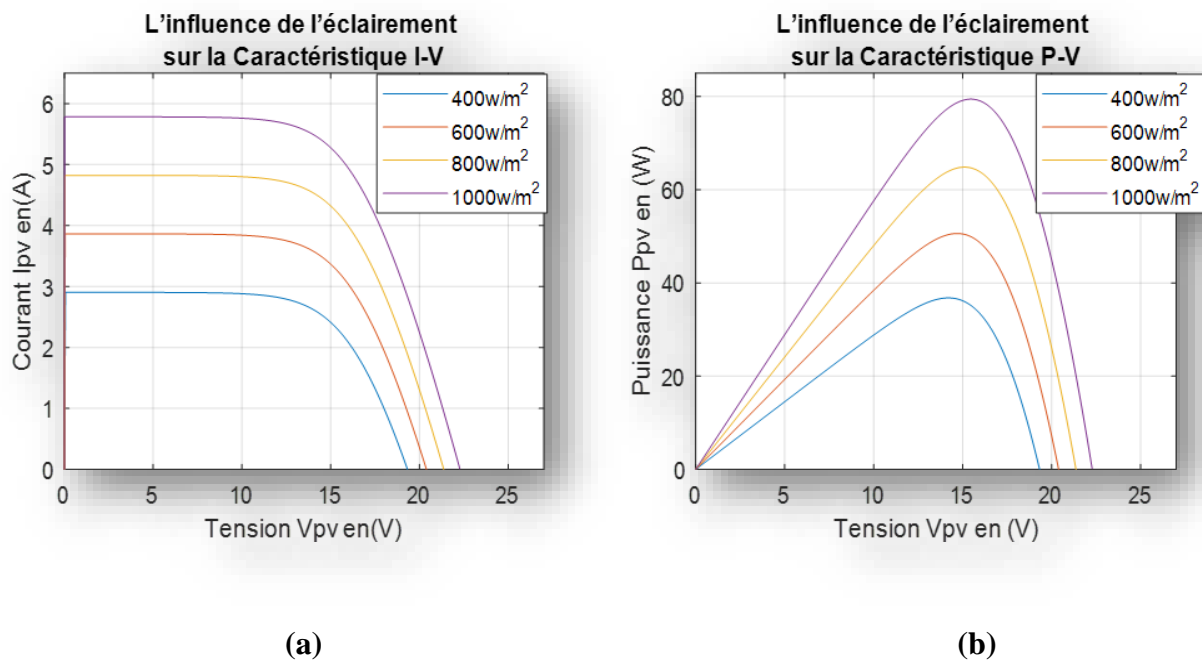


Figure 4.7 :(a) Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V

(b) Influence de l'éclairement sur la caractéristique P-V.

4.5.6 L'influence de la température sur la caractéristique IPV(VPV) et PPV(VPV)

Les caractéristiques **I-V** et **P-V** ont été simulées pour un éclairement constant de **1000 W/m²**, avec une plage de température allant de **15 °C à 60 °C**, par incréments de **15 °C**. L'analyse des résultats montre des variations significatives dans la **tension de circuit ouvert (V_{co})** en réponse aux changements de température (**T°**). En particulier, **V_{co}** diminue avec l'augmentation de la température, un phénomène bien documenté dans la littérature photovoltaïque en raison des effets thermiques sur les matériaux semi-conducteurs, comme illustre la figure (4.8).

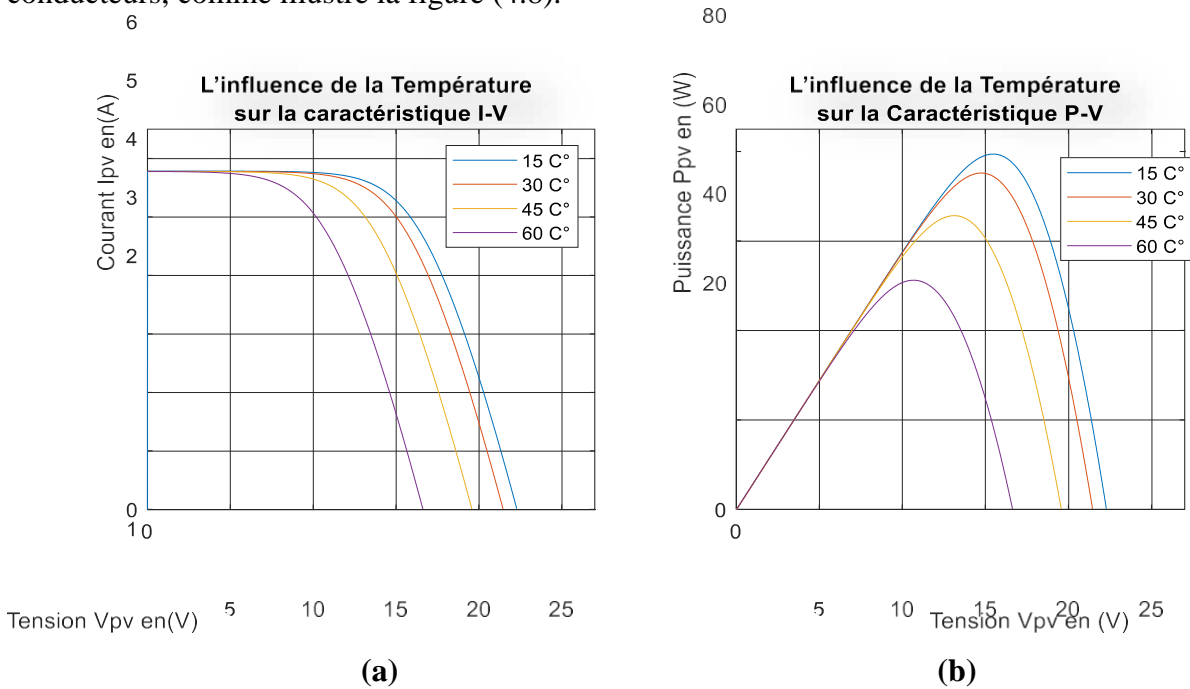


Figure 4.8 : Influence de température la caractéristique I-V (b) Influence de température la caractéristique P-V.

4.5.7 La puissance électrique captée par le Module PV :

Suite à l'application des équations examinées au chapitre 3 et effectué la simulation avec MATLAB, nous avons obtenu le résultat de la modélisation d'un module PV. La figure (4.9) ci- dessous présente la **puissance** électrique captée par le module PV et le courant électrique captée par le GPV.

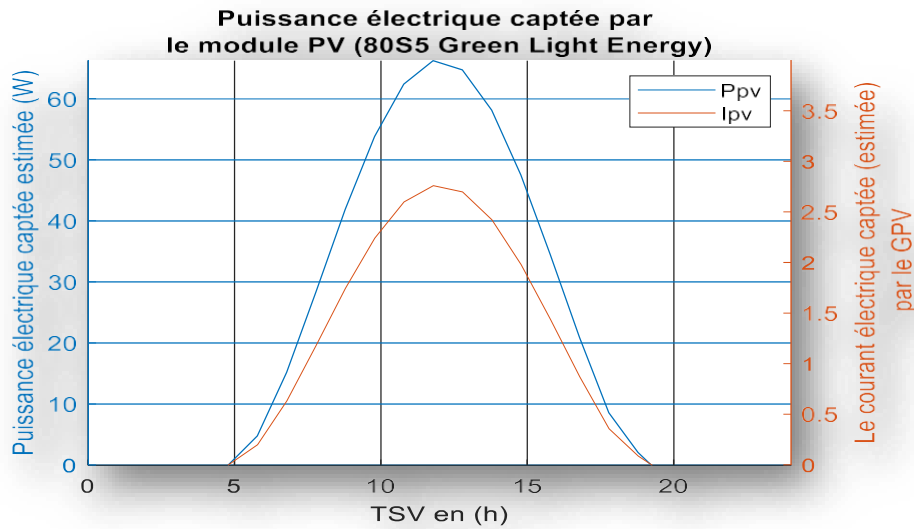


Figure 4. 9 : Puissance électrique captée par le module PV et le courant électrique captée par le GPV.

4.5.8 La simulation du système de stockage (Batterie) :

Après avoir appliqué les équations examinées au chapitre 3 et effectué la simulation avec MATLAB, nous avons obtenu le résultat de la modélisation d'une batterie selon le modèle CIEMAT.

La figure (4.10) représente la capacité de la batterie obtenue à partir de ce modèle.

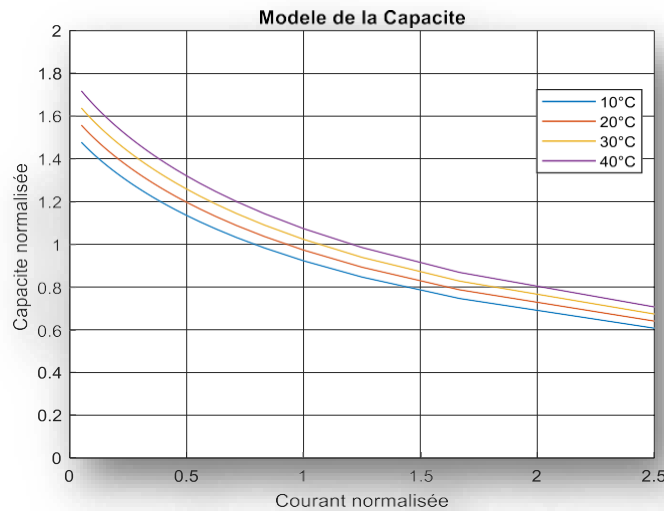


Figure 4. 10 : Evaluation de la capacité C_{batt}/C_{10} en fonction du courant de décharge normalisé (I_{Batt}/I_{10}), sous l'influence de température.

4.5.9 L’Influence de la température sur la tension de la charge et la décharge de labatterie :

Les figures suivantes illustrent l’influence de la température sur les processus de charge et de décharge de la batterie, selon le modèle CIEMAT.

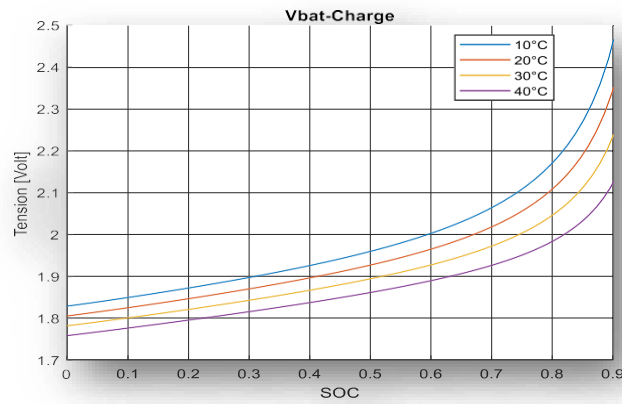


Figure 4.11 : Influence de la température sur le processus de charge de la batterie.

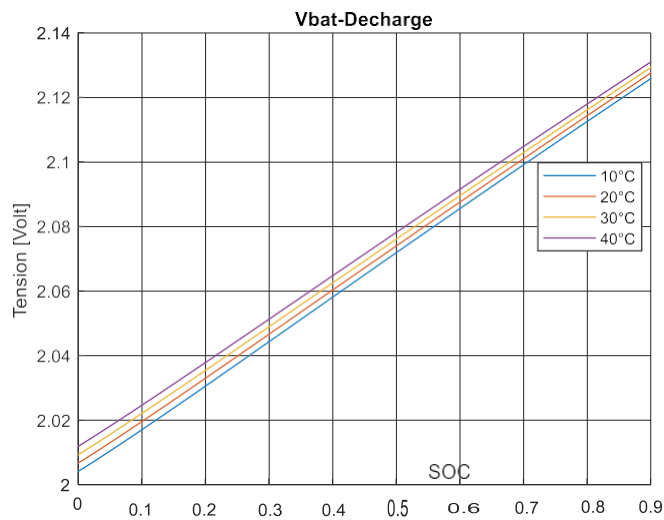


Figure 4.12 : Influence de la température sur le processus de décharge de la batterie.

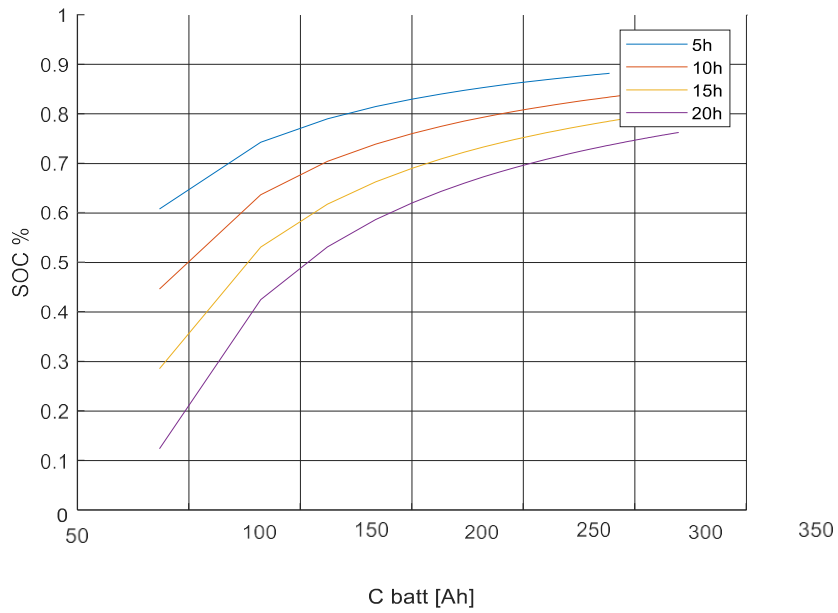


Figure 4.13 : Etat de charge de la batterie pour différentes durées de fonctionnement.

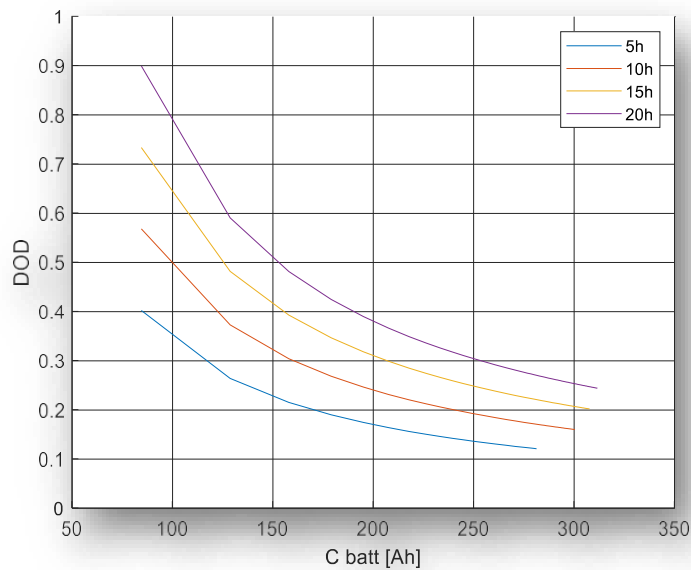


Figure4. 14 : Profondeur de décharge de la batterie pour différentes durées de fonctionnement.

Discussion des résultats

L'analyse approfondie des résultats observés est comme suit :

- **Évolution de la Capacité de la Batterie avec la Température** : La figure 10 confirme que la capacité de la batterie augmente avec la température [55]. Ce phénomène est souvent observé car la

mobilité des ions à l'intérieur de la batterie est améliorée à des températures plus élevées. Cependant, cet avantage est généralement contrebalancé par une réduction de la durée de vie de la batterie en raison d'une dégradation plus rapide des matériaux actifs et d'une augmentation des processus de vieillissement

• **Influence de la Température sur la Charge de la Batterie** : La figure (4.11) montre que sous des températures élevées, la charge de la batterie est favorisée.

Cela est dû à la facilitation de la migration des électrons à travers les électrodes et l'électrolyte, accélérant ainsi le processus de recharge.

Cette tendance est cruciale pour les applications où une récupération rapide de l'énergie stockée est nécessaire, comme dans les systèmes photovoltaïques intermittents.

• **Impact de la Température sur la Décharge de la Batterie** : En revanche, la figure 12 indique que la température élevée a un effet défavorable sur la décharge de la batterie.

On observe une diminution de la capacité de la batterie à maintenir un niveau de décharge stable à mesure que la température augmente. Cela peut être attribué à une augmentation de la résistance interne de la batterie et à une diminution de la mobilité des ions dans l'électrolyte, réduisant ainsi l'efficacité globale du processus de décharge.

• **Analyse de l'État de Charge (SOC) en Fonction de la Capacité** : Les figures (4.13) et (4.14) explorent l'évolution du SOC en fonction de la capacité pour différentes durées de fonctionnement.

Elles montrent clairement qu'une décharge de 10 heures permet de maintenir un SOC minimal de 40%, ce qui est idéal pour prolonger la durée de vie de la batterie en évitant des décharges profondes excessives.

En revanche, les courbes pour des durées de décharge de 15 et 20 heures dépassent la profondeur de décharge maximale (DOD), entraînant ainsi un endommagement précoce de la batterie.

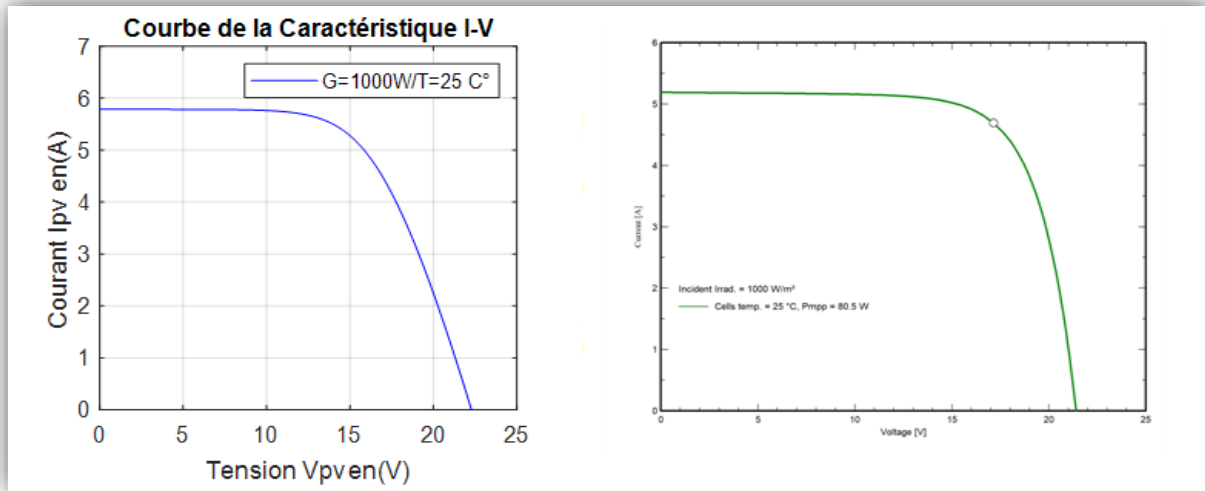
Ainsi, les résultats discutés mettent en lumière l'importance critique de la température dans les performances des batteries utilisées dans les systèmes photovoltaïques.

Une compréhension approfondie de ces dynamiques est essentielle pour concevoir, exploiter et maintenir efficacement les systèmes de stockage d'énergie, en visant à la fois une performance optimale et une durabilité à long terme.

4.6 Résultats de simulation avec PVsyst et leur comparaison avec ceux obtenus avec MATLAB

- **Caractéristique (I-V)**

La figure (4.15) indique la caractéristique (I-V) en STC obtenus avec MATLAB et PVsyst.



Courbe 1 générée via MATLAB

Courbe 2 extraite du logiciel PVsyst

Figure 4.15 : la caractéristique (I-V) en STC obtenus avec MATLAB et PVsyst

Les deux graphiques représentent les caractéristiques courant-tension (I-V) d'un panneau photovoltaïque, mais proviennent de sources différentes : le premier a été généré via un script MATLAB, tandis que le second est issu du logiciel PVsyst.

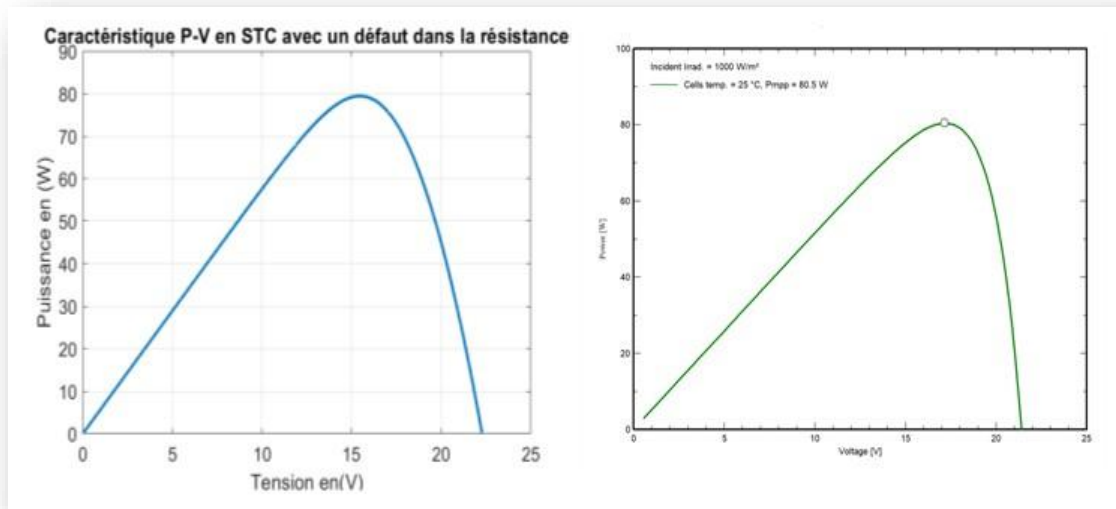
En comparant ces deux courbes, plusieurs observations peuvent être faites :

La première courbe, provenant de MATLAB, montre la caractéristique typique d'un panneau solaire fonctionnant dans des conditions standard (irradiance de 1000 W/m² et température de cellule de 25°C). On y observe un courant de court-circuit (I_{cc}) élevé, une tension en circuit ouvert (V_{oc}) autour de 20V et une puissance maximale (P_{max}) importante, caractéristiques d'un panneau en bon état de fonctionnement.

La seconde courbe, issue de PVsyst, présente également une allure similaire, avec un I_{cc} et un V_{oc} comparables à ceux de la courbe MATLAB. La forme globale des deux courbes est assez proche, indiquant un comportement I-V typique d'un panneau photovoltaïque dans des conditions normales de fonctionnement. Les légères différences numériques entre les deux courbes peuvent être attribuées à des hypothèses ou paramètres de modélisation légèrement différents entre PVsyst et MATLAB.

Néanmoins, l'allure générale et les tendances sont très similaires, reflétant fidèlement les caractéristiques I-V d'un panneau solaire sain.

Bien que les outils de simulation puissent générer des valeurs numériques légèrement différentes en raison de leurs méthodologies spécifiques, la cohérence dans la forme des courbes I-V entre MATLAB et PVsyst démontre leur capacité à modéliser avec précision le comportement d'un panneau photovoltaïque sous irradiance standard et à température normale de fonctionnement, la figure (4.16) indique la caractéristique (P-V) en STC obtenus avec MATLAB et PVsyst



Courbe 1 de MATLAB

Courbe 2 du logiciel PVsyst

Figure 4.16 : la caractéristique (P-V) en STC obtenus avec MATLAB et PVsyst

Les deux courbes représentent les caractéristiques puissance-tension (P-V) d'un panneau solaire sous des conditions normales (irradiance de 1000 W/m² et température de cellule de 25°C).

Nonseulement les valeurs de Pmax sont identiques, mais les courbes P-V présentent également une allure très similaire dans leur ensemble, avec une puissance de l'ordre de 80W.

La forme de la courbe, la tension à la puissance maximale (Vmp) et toutes les caractéristiques sont pratiquement superposables entre les deux graphiques.

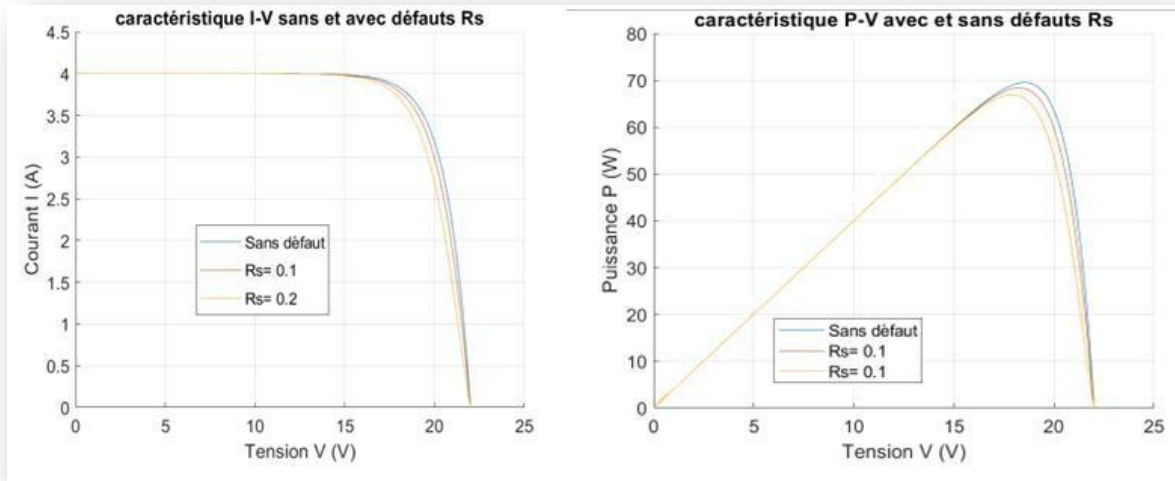
Cette correspondance parfaite entre les résultats obtenus par MATLAB et PVsyst démontre que ces deux outils de simulation parviennent à des estimations très similaires des performances P-V d'un panneau photovoltaïque fonctionnant dans des conditions normales, sans défauts.

Cette comparaison souligne la fiabilité et la cohérence des deux approches lorsqu'il s'agit de reproduire fidèlement les caractéristiques P-V d'un panneau photovoltaïque dans des conditions standard, sans perturbations ni anomalies.

4.7 Résultats de simulation des différents défauts

4.7.1 Défaut de la résistance en série

Cette figure (4.17) illustre les caractéristiques puissance-tension (P-V) et courant-tension (I-V) d'un système photovoltaïque en conditions STC, avec et sans défaut de résistance en série (R_s Diminuer).



(A)

(B)

Figure 4.17 : caractéristique de I-V (A) et P-V (B) en STC dans le cas normal et avec défauts de la résistance en série

D'après le graphique, on peut observer l'impact significatif d'un défaut dans la résistance série sur les performances d'un panneau solaire.

Dans le cas normal sans défaut (courbe bleue), la caractéristique P-V (Puissance-Tension) montre un point de puissance maximale bien défini, et la caractéristique I-V (Courant-Tension) indique le courant maximal, permettant une extraction optimale de l'énergie.

Cependant, lorsqu'il y a un défaut de résistance série (courbes rouge et orange), on observe une déformation notable des caractéristiques P-V et I-V. Le point de puissance maximale devient moins prononcé et la puissance maximale disponible diminue de manière importante.

Ce phénomène est attribuable aux pertes électriques introduites par la résistance série parasite, qui réduisent l'efficacité du panneau solaire.

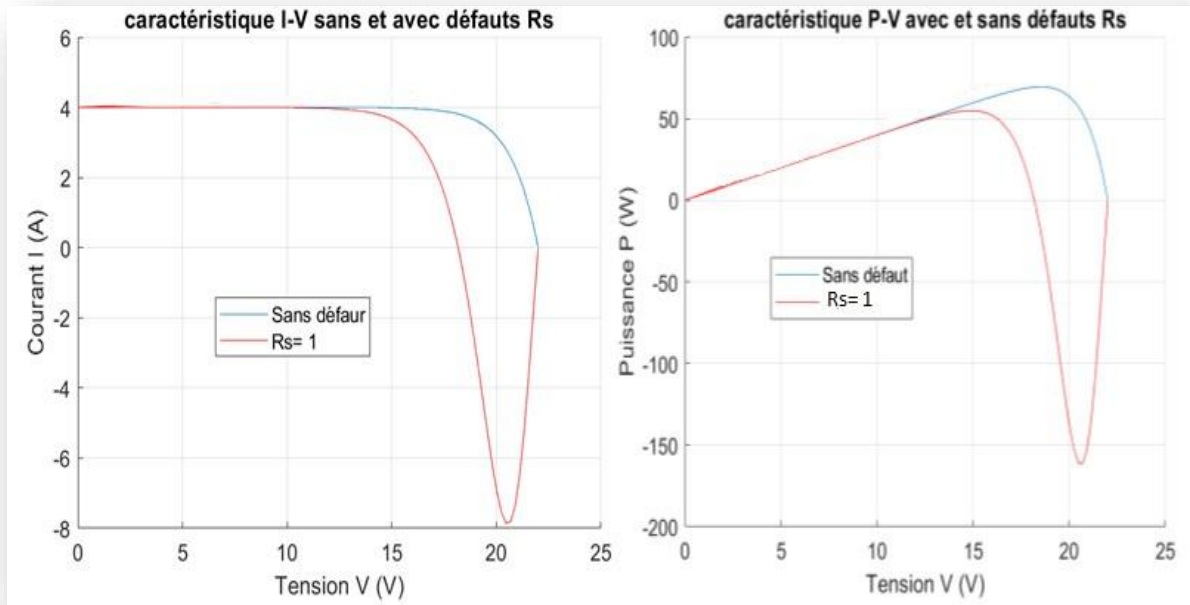
En termes de courant, on remarque également une légère diminution.

La résistance série provoque une chute de tension interne accrue, réduisant ainsi le courant disponible pour les autres composants du circuit.

Donc un défaut dans la résistance série dégrade sensiblement les performances du panneau solaire en termes de puissance et de courant, soulignant l'importance de minimiser les pertes internes pour maintenir une efficacité énergétique optimale.

Augmentation de la Résistance Série :

la figure (4.18) représente les caractéristiques de I-V (A) et P-V (B) en STC dans le cas normal et avec défaut de la résistance en série.



(A)

(B)

Figure4. 18 : caractéristique de I-V (A) et P-V (B) en STC dans le cas normal et avec défaut de la résistance en série

- **Impact sur la Tension et le Courant** : Si la résistance série est plus élevée que prévu (courbe turquoise), nous constatons qu'elle a causé une chute de tension plus importante à travers elle.

Cela réduit la tension disponible pour les autres composants, ce qui peut entraîner une sous-alimentation et une performance dégradée du circuit. Par exemple, dans un circuit d'alimentation, cela pourrait empêcher les composants de recevoir suffisamment de courant pour fonctionner correctement.

- **Dissipation de Puissance** : Une résistance série plus élevée entraîne également une dissipation de puissance accrue sous forme de chaleur, ce qui peut provoquer une surchauffe et potentiellement endommager le composant de résistance lui-même ou d'autres parties du circuit.

4.7.2 Défaut dans la résistance shunt (Parallèle)

La figure (4.19) illustre l'impact de la résistance shunt (R_p) sur les caractéristiques (I-V) et (P-V)

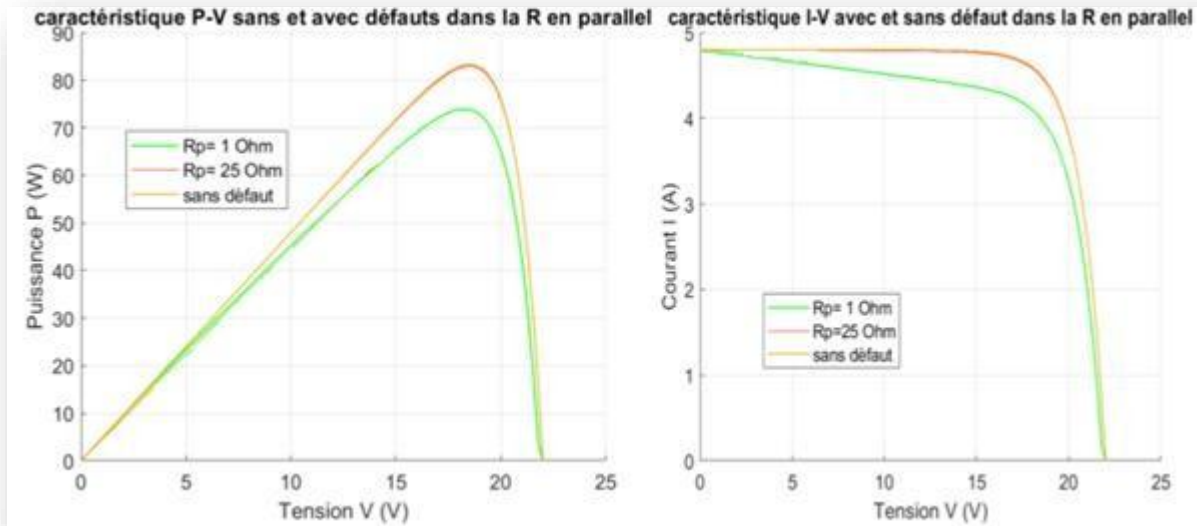


Figure 4. 19 : caractéristique de P-V en STC dans le cas normal et avec défaut de la résistance shunt.

Dans le cas normal (résistance shunt $R_p=415$ Ohms), les courbes I-V (Courant-Tension) et P-V (Puissance-Tension) indiquent les résultats de fonctionnement optimal du panneau solaire.

Le système fonctionne efficacement, permettant une conversion maximale de l'énergie solaire en énergie électrique.

Cependant, lorsque la résistance shunt diminue (à $R_p=1$ Ohm ou $R_p=25$ Ohms), une dégradation notable des courbes I-V et P-V est observée. Cette dégradation est due aux fuites de courant à travers les défauts représentés par une faible résistance shunt. En présence de ces fuites, une partie du courant généré par le panneau solaire est dérivée à travers la résistance shunt plutôt que de contribuer au courant disponible pour la charge.

- **Courbe I-V :** La baisse de la résistance shunt conduit à une diminution du courant maximal. Le courant produit par le panneau est partiellement court-circuité par la résistance shunt, réduisant ainsi le courant qui peut être acheminé vers la charge.

- **Courbe P-V :** La puissance maximale disponible chute significativement. Comme le courant effectif diminué est utilisé pour calculer la puissance (Puissance = Tension x Courant), les fuites de courant dues à une faible résistance shunt diminuent également la puissance maximale que le panneau solaire peut fournir.

Ainsi nous pouvons dire que la diminution de la résistance shunt provoque une dégradation des performances du système photovoltaïque en raison des fuites de courant.

Cela réduit la quantité de courant disponible pour la charge, diminuant ainsi l'efficacité et la puissance globale du panneau solaire.

4.7.3 Défaut de Mismatch

Le graphe suivant démontre l'impact de Mismatch sur la caractéristique P-V dans le cas STC

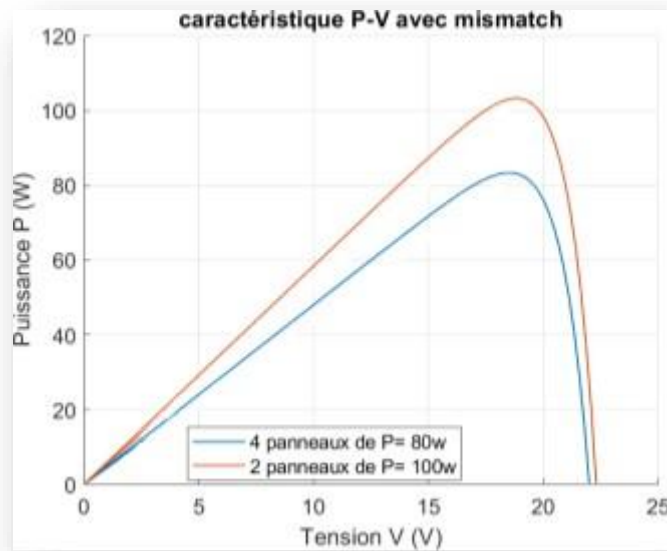


Figure 4. 20 : caractéristique P-V en STC avec défaut Mismatch.

Le graphe suivant démontre l'impact du **mismatch** sur la caractéristique P-V (Puissance- Tension) dans les conditions standards de test (STC). Le système comprend six panneaux solaires au total, dont quatre partagent des paramètres identiques mais qui se distinguent des deux autres panneaux restants du même type.

Le graphe montre la différence entre les résultats de ces deux groupes de panneaux : la puissance des deux panneaux similaires est plus grande (Puissance nominale d'un panneau = 100W) que celle des quatre autres panneaux (Puissance nominale d'un panneau = 80W).

Lorsque les panneaux ont des paramètres différents, en particulier des puissances nominales différentes, le courant circulant dans le système est limité par le panneau le plus faible. Ce phénomène, connu sous le nom de mismatch, crée un déséquilibre dans le système photovoltaïque.

Le courant produit par les panneaux les plus puissants (100W) est réduit au niveau du courant des panneaux les plus faibles (80W), ce qui entraîne une diminution de la puissance globale

générée par le système.

Ce déséquilibre dégrade fortement les performances globales du générateur photovoltaïque. Les panneaux plus puissants ne peuvent pas fonctionner à leur capacité maximale car ils sont limités par les panneaux plus faibles.

L'impact de ce mismatch sur le système est similaire à l'effet d'ombrage, où la performance du générateur est dictée par le panneau le plus affecté.

La présence de mismatch entre les panneaux solaires conduit à une réduction significative de l'efficacité du système photovoltaïque.

Pour optimiser les performances, il est crucial de veiller à une correspondance étroite des paramètres des panneaux, notamment leur puissance nominale, afin de minimiser les pertes dues au déséquilibre.

4.7.4 Défaut d'ombrage

La figure (4.21) illustre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique (P-V) d'un système photovoltaïque, avec et sans défaut d'ombrage.

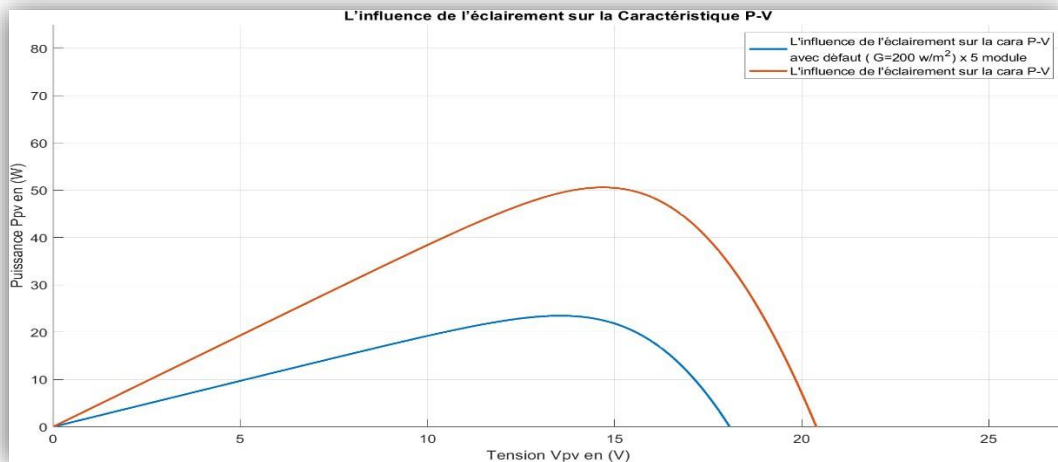


Figure 4. 21 : caractéristique de I-V en STC dans le cas normal et avec défaut d'ombrage

En analysant ces résultats, on peut dresser les remarques suivantes :

La courbe bleue représente le comportement du système avec un défaut d'ombrage ($G=200\text{W}/\text{m}^2$ sur 5 modules), tandis que la courbe orange montre le comportement sans défaut.

En examinant ces résultats, plusieurs observations importantes peuvent être faites : Le défaut d'ombrage réduit significativement la puissance maximale du système, passant d'environ 50 W à 23 W.

- La courbe présentant le défaut montre une diminution de la pente, indiquant une perte d'efficacité globale.

- La tension de circuit ouvert est légèrement réduite en présence le du défaut d'ombrage.
- Le point de puissance maximale se déplace vers des tensions plus basses avec le défaut.

Ainsi, le défaut d'ombrage a un impact négatif significatif sur les performances du système PV, réduisant à la fois sa puissance de sortie et son efficacité globale. Cette analyse souligne l'importance cruciale d'éviter les ombrages partiels dans les installations photovoltaïques pour maintenir des performances optimales.

4.7.5 Défaut dans la Diode

La figure (4.22) illustre les caractéristiques I-V et P-V d'une installation photovoltaïque avec et sans défaut de diode.

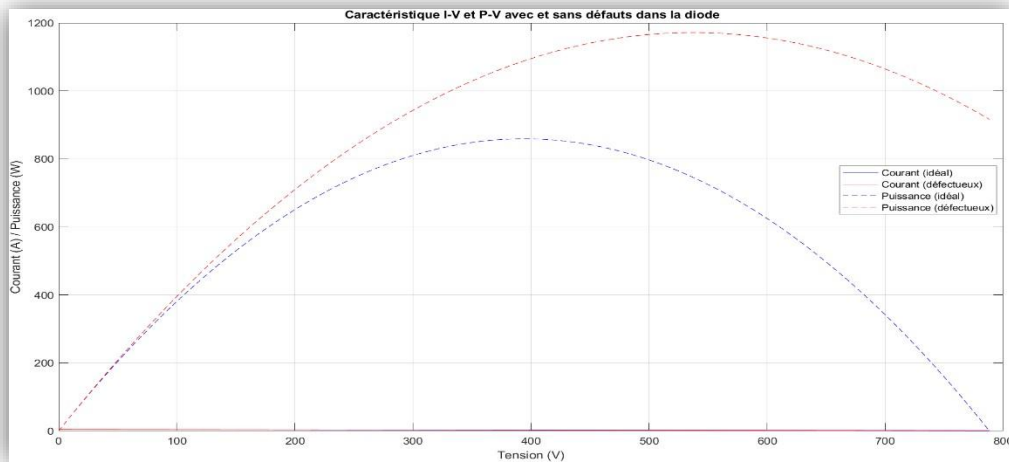


Figure 4.22 : caractéristique de I-V en STC dans le cas normal et avec défaut de la diode

En analysant ces résultats, plusieurs observations importantes peuvent être faites :

- La courbe de puissance (en rouge) avec le défaut de diode bypass montre une production d'énergie nettement inférieure à celle de la courbe sans défaut, indiquant une perte significative de rendement.
- Les courbes avec défaut présentent une forme "en escalier" ou avec des paliers, caractéristique d'un défaut de diode bypass. Cette structure contraste avec les courbes lisses observées sans défaut.
- La courbe I-V avec défaut révèle des chutes de courant à certaines tensions, expliquant la forme en escalier de la courbe de puissance.
- Bien que la tension de circuit ouvert reste relativement constante, le comportement du système est altéré sur toute la plage de tension.
- Le point de puissance maximale est significativement réduit et déplacé par rapport au système sans défaut.

Ainsi, les défauts dans la diode bypass entraînent une diminution notable du courant et de la puissance générée par le système photovoltaïque. Cette réduction se traduit par une moindre efficacité et un rendement énergétique réduit de l'installation. Il devient donc essentiel de diagnostiquer et de corriger ces défauts pour maintenir des performances optimales des installations photovoltaïques.

4.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté une analyse approfondie d'un système photovoltaïque autonome avec stockage à Bouzareah, en utilisant les outils MATLAB et PVsyst. L'étude a englobé l'évaluation du gisement solaire, la modélisation des composants du système, ainsi que l'impact de divers paramètres et défauts sur ses performances.

La comparaison des résultats obtenus avec MATLAB et PVsyst a démontré une bonne cohérence entre les deux méthodes de simulation.

Cette approche intégrative, combinant l'étude du fonctionnement normal et l'analyse des situations a permis d'obtenir une vision complète des performances du système photovoltaïque autonome.

Elle met en lumière l'importance cruciale d'une conception précise ainsi que d'une maintenance appropriée pour maximiser le rendement énergétique et assurer la durabilité de l'installation.

En conclusion, l'énergie solaire photovoltaïque constitue une composante essentielle du mix énergétique futur. Elle joue un rôle significatif dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre, à la diversification des sources d'énergie et la sécurité énergétique. Pour maximiser son potentiel, il est indispensable de continuer les efforts en matière de recherche et développement, d'optimiser les politiques de soutien, et de sensibiliser davantage le public aux avantages de cette technologie. Ce travail a permis de mettre en lumière les fondements et les perspectives de l'énergie solaire photovoltaïque, ouvrant la voie à une adoption plus large et à une transition énergétique réussie vers un avenir durable.

Notre étude s'est concentrée sur la modélisation et la simulation détaillées de tous les composants du système photovoltaïque avec stockage. Nous avons développé un programme de simulation capable de prédire avec précision le comportement global du système sous diverses conditions opérationnelles. Pour valider notre approche, nous avons appliqué notre modèle au site de Bouzareah, sélectionné en raison de sa richesse en données météorologiques, incluant le rayonnement solaire et la température, et de la présence d'un banc d'essai réel. Cette configuration nous a permis de comparer nos simulations à des mesures empiriques, renforçant ainsi la fiabilité et l'exactitude de notre modèle.

Après avoir modélisé en détail chaque composant du système photovoltaïque avec stockage, nous avons analysé les caractéristiques spécifiques de la charge sélectionnée, ainsi que le bilan et la consommation énergétique du site. De plus, nous avons simulé divers défauts susceptibles d'affecter notre installation, tels que les défauts de résistance série, de résistance shunt, de mismatch et de diode. Ces simulations nous ont permis d'évaluer l'impact de ces défauts sur les performances du système et d'identifier les points critiques nécessitant une attention particulière lors de la conception et de la maintenance des installations photovoltaïques. Cette approche exhaustive nous a également fourni des données précieuses pour optimiser la fiabilité et l'efficacité énergétique du système, contribuant ainsi à son développement durable et à sa résilience face aux conditions variables du terrain et aux perturbations possibles.

En combinant l'analyse des performances en conditions normales et en présence de défauts, notre approche globale nous a permis non seulement d'évaluer les performances du système, mais aussi d'identifier la configuration optimale répondant aux besoins spécifiques de l'utilisateur tout en anticipant les problèmes potentiels. En intégrant la modélisation théorique, la simulation numérique, la validation sur un site réel, et l'analyse des défauts, notre étude offre une perspective complète sur l'optimisation et la fiabilité des systèmes photovoltaïques avec stockage dans des conditions réelles d'utilisation.

Bibliographie

- [1] Agence Internationale de l'Énergie, "Perspectives mondiales des énergies renouvelables 2022", 2022.
 - [2] Renewable and Sustainable Energy Reviews, "Photovoltaic systems: Status and perspectives", 2020.
 - [3] Guezgouz Mohammed, Jakub Jurasz, Mohamed Chouai, Hannah Bloomfield, Benaissa Bekkouche, "Assessment of solar and wind energy complementarity in Algeria", Energy Conversion and Management, Volume 238, 2021
 - [4] Ahmed Bouraiou, Ammar Necaibia, Nadir Boutasseta, Saad Mekhilef, Rachid Dabou, Abderrezzaq Ziane, Nordine Sahouane, Issam Attoui, Mohammed Mostefaoui, Oussama Touaba, "Status of renewable energy potential and utilization in Algeria", Journal of Cleaner Production, Volume 246, 2020.
 - [5] Soomar, Arsalan Muhammad, et al. "Solar photovoltaic energy optimization and challenges." Frontiers in Energy Research 10 (2022): 879985.
 - [6] BOUCHAREB, Abdelkader. Etude et dimensionnement optimale d'un système photovoltaïque autonome. Diss. university Ghardaia, 2023.
 - [7] <<INSTALLATIONS PHOTOPVOLTAIQUE : Système PV non raccordé au réseau >>
 - [8] CHERFAOUI AZOUAOU <<SIMULATION D'UN SYSTEME HYBRIDE PHOTOVOLTAIQUE EOLIENNE TOTALEMENT AUTONOME>> ING D'ETAT ETH, 2010.
 - [9] Luque, A., & Hegedus, S. (2011). Handbook of Photovoltaic Science and Engineering (2nd ed.). Wiley.
 - [10] Renewable Energy Market Update 2023 – IEA.
 - [11] Messenger, R. A., & Ventre, J. (2010). Photovoltaic Systems Engineering (3rd ed.). CRC Press.
 - [12] MARK HANKINS <<Installations solaires photovoltaïques autonomes Technique et Ingénierie>> Paris, édition Dunod 2012.
 - [13] Vignola, F., Michalsky, J., & Stoffel, T. (2012). Solar and Infrared Radiation Measurements. CRC Press.
 - [14] Pearce, J. M. (2002). Photovoltaics—a path to sustainable futures. Futures, 34(7), 663-674.
- Bibliographie :
- [15] Notes de cours, Azoui, Master Energies renouvelables 2019/2020,
https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/azzoui_boubaker/files/chapitre2_systeme_photovoltaique- partie1.pdf
 - [16] A. Ricard, "modules et systèmes photovoltaïques", université de Savoie (Polytech' Savoie), sept 2008.
 - [17] <https://www.power-africa.com/systemes-denergies-solaires-photovoltaiques-autonomes-et-hybrides/>
 - [18] <https://www.edfenr.com/guide-solaire/inconvenient-panneau-solaire/>
 - [19] <https://www.ecolodis-solaire.com/conseils/autoconsommation-avantages-et-inconvenients- de-l- autoconsommation>
 - [20] <https://www.quelleenergie.fr/magazine/avantages-inconvenients-autoconsommation>
 - [21] L. Bun, "Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV", thèse de doctorat, université de Grenoble, France, 2011.
 - [22] Centre de Développement des Énergies Renouvelables. "Rénovation de la station V. A.

- [23] ER2 Filiale du CDER. Présentation CDER ER2. Centre de Développement des Énergies Renouvelables.
- [24] IRENA - Renewable Energy Capacity Highlights 2023.
- [25] European Commission - Renewable Energy Targets (Energy)
- [26] A. Kalogirou, Solar Energy Engineering Processes and Systems, Oxford London : Academic Press is an imprint of ELSEVIER, 2009.
- [27] N. BOUDOUMI, C. BOUSALEM, «Conception et réalisation expérimentale d'une installation solaire thermique pour la production d'eau chaude sanitaire.» Projet de Fin.
- [28] M.L. LOUAZENE, «Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes – Application zone de Ouargla.» Thèse de Doctorat , UNIVERSITE EL HADJ LAKHDAR - BATNA, 2015.
- [29] William A. Beckman, John A. Duffie, « Solar Engineering of Thermal Processes », University of Wisconsin–Madison: WILEY, 2006.
- [30] B. KERBOUA, «Développement des énergies renouvelable en Algiers, stabilité socio-économique de l'Algiers, Editions universitaires européennes, » 2020.
- [31] R.ROUAS, «Etude d'un système hybride éolien-photovoltaïque,» THÈSE DE DOCTORAT,UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU, 2018.
- [32] Lounis OURZIK, « Etude et analyse du comportement d'un système PV – Batteries autonomes secourues par réseau électrique » Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI- OUZOU, 2023.
- [33] T. Muneer, « Solar Radiation and Daylight Models », Napier University, Edinburgh:ElsevierButterworth-Heinemann, 2004.
- [34] D. Rekioua, E. Matagne, « Optimization of Photovoltaic Power Systems Modelization, Simulation and Control », University of Bejaia, Université Catholique de Louvain: Springer,2012
- [35] <https://www.solaris-store.com/content/43-principe-de-fonctionnement-d-une-batterie- solaire>
- [36] <http://blog.seatronic.fr/fiches-pratiques/energie/stockage/batteries-marines/theorie/>.
- Bibliographie**
- [37] https://fr.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/scripts.html?s_tid=srchtitle_site_search_1_matlab%20script
- [38] <https://www.pvsyst.com/fr/>
- [39] Z. MERDAOUI, «Caractérisation radiométrique des sites de Bouzareah et de Ghardaïa,» Mémoire de Magister, univ-blida1, 2007
- [40] <https://www.guichetdusavoir.org/question/voir/10456>, <https://www.netatmo.com/fr-fr/weather-guide/sunlight>
- [41] K. KAABECHE, «Etude comparative entre le stockage à hydrogène et les batteries au plomb dans un système hybride (Photovoltaïque / Eolien) autonome,» Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2012.

ANNEXE A

- Le tableau suivant présente les caractéristiques techniques du générateur photovoltaïque (80S5 Green Light Energy) :

La Puissance nominale Maximale	80.0 W
Tension à Pmax (Vmax)	18.0 V
Courant à Pmax (Imax)	4.45 A
Tension de circuit ouvert (Vco)	22.0 V
Courant de court-circuit (Icc)	4.80 A
Nombre de cellules	36 Cellule

- Le tableau suivant présente les paramètres électriques de la batterie :

Capacité	200 Ah
Courant	20 A
Temps de décharge	10 h
Tension	12 Volts

Résumé

Notre travail explore les aspects théoriques et pratiques de l'énergie solaire photovoltaïque, en soulignant son importance dans la transition énergétique mondiale vers des solutions durables. On commence par une introduction générale au contexte énergétique mondial et aux enjeux environnementaux, avant de détailler les bases théoriques de l'énergie photovoltaïque, y compris les types de cellules solaires et les modèles de conversion de l'énergie solaire en électricité. On examine également les défauts possibles dans les systèmes photovoltaïques et on propose une modélisation spécifique de chaque composant, intégrant des simulations réalisées avec les logiciels MATLAB et PVsyst. La comparaison des résultats obtenus avec ces outils souligne l'importance de la prise en compte des pertes pour une modélisation précise des systèmes solaires.

Abstract

Our work explores the theoretical and practical aspects of photovoltaic solar energy, highlighting its importance in the global energy transition towards sustainable solutions. We begin with a general introduction to the global energy context and environmental issues, before detailing the theoretical foundations of photovoltaic energy, including the types of solar cells and models for converting solar energy into electricity. We also examine potential defects in photovoltaic systems and propose specific modeling for each component, incorporating simulations performed with MATLAB and PVsyst software. The comparison of the results obtained with these tools underscores the importance of accounting for losses in the accurate modeling of solar systems.