

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED– NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :
Énergies Renouvelables
Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

ANALYSE ET CONTRIBUTION L'AMÉLIORATION DES PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME

Présenté par :

- ADICHE SARRA
- RAHMOUNI ZOUBIDA
- BOUGUENINA HANANE

Soutenu le :29/06/2020 devant le Jury :

M. KHESSAM MEDJDOUB	MAA	Centre Universitaire Naâma	Président
M. BRAHIMI MOHAMMED	MCB	Centre Universitaire Naâma	Encadreur
M. BEN MOHAMMED FAYCEL	MAA	Centre Universitaire Naâma	Examineur

Naâma – Algérie - 2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

A decorative floral ornament is positioned on the left side of the page, partially overlapping the first word of the text. It features intricate, symmetrical patterns with multiple layers of petals and leaves, rendered in a simple black-and-white line-art style.

REMERCIEMENT

En premier lieu, Nous tenons à remercier notre DIEU, notre créateur qui nous a donné la force pour accomplir ce travail.

Nous adressons nos vifs remerciements à notre l'encadreur consultant le Dr BRAHIMI MOHAMMED Pour avoir accepté de diriger notre travail, pour ses précieux conseils, pour son esprit

D'ouverture et sa disponibilité.

Nous remercions toutes personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à la

Finalisation de ce travail, nous tenons à leur exprimer notre vive gratitude.

Enfin nos remerciements à tous les enseignants et département de technologie qui ont contribués à notre formation à Centre Universitaire de SALHI AHMED DE

Naâma

DEDICACE

*Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de
M'avoir a donné le courage et la patience pour réaliser
Ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.*

Je dédie ce modeste travail:

*A mes très chers parents, que dieu les garde et les
Protège pour leur soutien moral et financier, pour
Leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés..*

A mes sœurs et mon frère

A tout ma famille

Aux chers amis Hanane et Zoubida

A tous ce que j'aime et qui m'aiment

A tous mes collègues d'études

Adiche Sarra

Dédicace

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail :

- *A ma très chère mère, qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de prier pour moi.*
- *A mon très cher père, pour ses encouragements, son soutien, surtout pour son amour et son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de mes études.*
- *A mes chères sœurs (Amina , Radja) pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.*
- *A mes chers frères pour leur appui et leur encouragement.*
- *A toute la famille Rahmouni et brahimi.*
- *A tous les enseignants de centre l'université SALHI AHMED.*
- *A mes meilleurs amis (Sarra ,Hanane).*
- *A Tous ceux que j'aime et je respecte.*

Rahmouni Zoubida

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A ma très chère Mère et mon très cher Père

Ainsi qu'à mes cher frères Mohamed et HABIB

Et mes chères sœurs.

A toute la famille BOUGUENINA et BENNACEUR

A ceux qui m'ont toujours encouragé pour que je réussisse dans mes études.

A ceux qui ont veillé pour mon bien être.

A ceux qui m'ont soutenu dans les moments les plus difficiles de ma vie.

A ceux que j'aime et je respecte infiniment.

Le jour est venu pour leur dire Merci...

*A tous mes amis qui ont toujours été présents et qui n'ont ménagé aucun effort
pour me bénéficier avec leur aide et leurs suggestions, en particulier : sarra
,zoubida.*

Bouguenina Hanane

Résumé

Résumé

L'énergie photovoltaïque est une opportunité de développement efficace et durable. C'est pourquoi la recherche scientifique a évolué dans le sens de généraliser, d'améliorer et d'exploiter les systèmes solaires. L'optimisation des systèmes solaires dépend des normes de mise à l'échelle et de la maximisation de l'énergie générée pour une bonne efficacité. Plusieurs méthodes ont été adoptées pour développer un système photoélectrique destiné à alimenter les consommateurs. En conséquence, l'objectif de ces travaux est d'étudier et de modéliser une petite centrale photovoltaïque indépendante destinée à alimenter en électricité le pôle littéraire du centre universitaire Salhi Ahmed de Naâma.

Mots clés: L'énergie, système photovoltaïque, solaires, Rayonnement, MPPT, Modélisation.

Abstract

Photovoltaic energy is an opportunity for efficient and sustainable development. This is why scientific research has evolved in the direction of generalizing, improving and exploiting solar systems. Optimizing solar systems depends on scaling standards and maximizing the energy generated for good efficiency. Several methods have been adopted to develop a photoelectric system intended to supply consumers. Consequently, the objective of this work is to study and model a small independent photovoltaic power station intended to supply electricity to the literary pole of the Salhi Ahmed university center of Naâma.

Keywords: Energy, photovoltaic system, solar, Radiation, MPPT, Modeling.

ملخص

الطاقة الكهروضوئية هي فرصة للتنمية الفعالة والمستدامة. هذا هو السبب في تطور البحث العلمي بمعنى تعميم وتحسين واستغلال الأنظمة الشمسية. يعتمد تحسين أنظمة الطاقة الشمسية على معايير التحجيم وتعظيم الطاقة المولدة للحصول على كفاءة جيدة. تم اعتماد العديد من الطرق لتطوير نظام كهروضوئي لتزويد المستهلكين. وبالتالي فإن الهدف من هذا العمل هو دراسة ونمذجة محطة طاقة كهربائية ضوئية مستقلة صغيرة تهدف إلى تزويد الكهرياء للقطب الأدبي في مركز الجامعة صالح أحمد بالنعامة.

الكلمات المفتاحية: الطاقة ، النظام الكهروضوئي ، الطاقة الشمسية ، الإشعاع ، تتبع أقصى نقطة للطاقة ، النمذجة

Sommaire

Sommaire

Remerciement	i
Dédicaces	ii
Résumé.....	v
Sommaire	vi
Liste des figures	xii
Liste des tableaux.....	xv
Nomenclature.....	xvi
Introduction générale.....	1
Chapitre I: Généralités sur les systèmes solaires photovoltaïques	
I.1. Introduction	3
I.2. Historique de l'énergie photovoltaïque	3
I.3. Energie solaire photovoltaïque	4
I.4. Gisement solaire	4
I.4.1. Rayonnement solaire.....	4
I.4.1.1. Soleil	4
I.4.1.2. Spectre solaire	5
I.4.2. Types de rayonnement	6
I.4.2.1. Rayonnement direct	6
I.4.2.2. Rayonnement diffus	6
I.4.2.3. Rayonnement Réfléchi	6
I.4.2.4. Rayonnement global.....	7
I.4.3. Caractéristiques du soleil	7
I.4.4. Les coordonnées.....	8
I.4.4.1. Coordonnées géographiques	8
I.4.4.1.1. Longitude	8
I.4.4.1.2. Latitude (\emptyset)	8
I.4.4.1.3. L'altitude (Z).....	8

I.4.4.2. Coordonnées locales (horizontales)	9
I.4.4.2.1. Hauteur (h)	9
I.4.4.2.2. Azimut.....	9
I.4.4.3. Coordonnées horaires	9
I.4.4.3.1. Angle horaire.....	10
I.4.4.3.2. Déclinaison.....	10
I.4.5. Epaisseur de l'atmosphère	11
I.4.6. Orientation et inclinaison d'un module photovoltaïque.....	12
I.5. Gisement solaire en Algérie	12
I.6. Principe de la conversion photovoltaïque.....	14
I.7. Physique de Semi-conducteur	15
I.7.1. Dopage du silicium	15
I.7.2. Dopage de type N.....	15
I.7.3. Dopage de type P	16
I.7.4. Formation de la jonction PN	16
I.8. Cellule photovoltaïque	17
I.9. Technologies des cellules solaires.....	18
I.9.1. Silicium monocristallin.....	18
I.9.2. Silicium polycristallin.....	19
I.9.3. Silicium amorphe	19
I.9.4. Multi jonctions	19
I.9.5. Organique	20
I.10. Module Photovoltaïque.....	21
I.11. Paramètres photovoltaïques.....	22
I.11.1. Courant de court-circuit (I_{cc}).....	22
I.11.2. Tension de circuit ouvert (V_{co})	22
I.11.3. Facteur de forme FF	23
I.11.4. Rendement	23

I.12. Fiche technique du panneau solaire.....	23
I.13. Caractéristiques électriques d'un module solaire	24
I.13.1. Influence de l'éclairement sur les modules photovoltaïques	24
I.13.2. Influence de la température sur module photovoltaïque.....	24
I.13.3. Association des modules photovoltaïque	25
I.13.3.1 En série.....	25
I.13.3.2 En parallèles.....	27
I.14. Différent type de système photovoltaïque.....	28
I.14.1. Système photovoltaïque connecté au réseau.....	28
I.14.2. Système hybrides	28
I.14.3. Système photovoltaïque autonomes.....	29
• Système autonome sans stockage électrochimique.....	29
• Système autonome avec stockage électrochimique	29
I.15. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	29
I.15.1. Avantages.....	29
I.15.2. Inconvénients	30
I.16. Conclusion.....	30
CHAPITRE II: Modélisation d'un Systèmes photovoltaïques autonomes	
II.1. Introduction.....	31
I.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque	31
I.2.1. Modèles électriques d'une cellule photovoltaïque.....	31
I.2.2. Modèle à une diode.....	32
II.3. Modèle de rayonnement solaire.....	33
II.3.1. Rayonnement solaire sur un plan horizontal	33
a) Rayonnement direct.....	34
b) Rayonnement diffus	34
c) Rayonnement réfléchi.....	34
d) Rayonnement global(θ_G)	34

II.3.2. Rayonnement solaire sur un plan incliné.....	34
a) Rayonnement direct.....	34
b) Rayonnement diffus	34
c) Rayonnement réfléchi.....	35
d) Rayonnement global incliné.....	35
II.4. Modèle de la température.....	35
a) Température de jonction	35
b) Température ambiante	35
c) Variation du courant de saturation	36
d) Variation du courant court- circuit.....	36
e) Variation de la tension à circuit ouvert	36
f) Rendement énergétique maximum	36
II.5. Modélisation de stockage.....	37
a) Modèle de la charge de la batterie.....	37
b) Modèle de la décharge de la batterie.....	37
c) La tension de la batterie	38
d) Courant de batterie	39
e) Rendement de la Batterie	39
II.6. Commande MPPT	40
II.6.1. Principe du MPPT	40
II.6.2. Classification des commandes MPPT	40
II.6.2.1. MPPT directs	40
II.6.2.2. MPPT Indirect.....	40
II.6.3. Différents Algorithmes de MPPT.....	40
II.7. Structures des systèmes photovoltaïques	41
II.7.1. Structure avec hacheur et onduleur.....	41
II.7.2. Structures des systèmes à connexion directe.....	41
II.7.2.1. Installation mono-onduleur (onduleur central).....	42

II.7.2.2. Installation avec un onduleur pour chaque string (onduleur string)	42
II.7.2.3. Installation multi-onduleurs (Onduleur modulaire)	42
II.8. Etude de l'adaptation de l'énergie photovoltaïque	42
II.9. Conclusion	43
CHAPITRE III: Résultats de simulation	
III.1. Introduction	44
III.2. Application des systèmes PV autonomes	44
III.3. Formulation du problème	44
III.3.1. Zone d'installation	44
III.3.1.1. Spécification de la zone de Naâma	45
III.3.1.2. Charge	45
III.3.1.3. L'irradiation journalière	47
III.4. Présentation de la structure du modèle	47
III.5. Composants principaux du modèle	47
III.5.1. Partie DC	48
III.5.1.1. Fiche technique du panneau solaire	49
III.5.2. Convertisseur DC-DC	49
III.5.3. Onduleur triphasé	50
III.5.4. Filtre	50
III.5.5. Modèle de contrôleur d'onduleur triphasé	50
III.5.5.1. Contrôleur MPPT	51
III.5.5.2. Régulateur VDC	52
III.5.5.3. Régulateur de courant	52
III.5.5.4. PLL & Mesures	53
III.5.5.5. Générateur PWM	54
III.6. Résultats de simulation et discussion	54
III.6.1. Paramètres de simulation	55
III.6.2. Scénario de Simulation	55
III.7. Conclusion	64
Conclusion générale	65
Références Bibliographie	66

Liste
des figures

Liste des figures

CHAPITRE I: Généralités sur les systèmes solaires photovoltaïques

Figure (I.1): Composition du soleil par différents éléments chimiques	5
Figure (I.2): Spectre solaire à la surface de l'atmosphère terrestre (AM0) et au sol (AM1.5D et AM1.5G).....	6
Figure (I.3): Composante du rayonnement global sur un plan horizontal	7
Figure (I.4): Coordonnées géographiques d'un lieu	8
Figure (I.5): Coordonnées horizontales du soleil	9
Figure (I.6): Coordonnées horaires	10
Figure (I.7): Déclinaison solaire	11
Figure (I.8): Le rayonnement solaire et le nombre Epaisseur de l'atmosphère	11
Figure (I.9): Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.....	12
Figure (I.10): Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel	13
Figure (I.11): Le Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu et Répartition territoriale des stations météorologique en A	14
Figure (I.12): Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque	14
Figure (I.13): Dopage de type N	16
Figure (I.14): Dopage de type P	16
Figure (I.15): Génération de la paire électron-trou	17
Figure (I.16): La jonction PN	17
Figure (I.17): Silicium Monocristallin	18
Figure (I.18): Silicium Polycristallin.....	19
Figure (I.19): Silicium Amorphe.....	19
Figure (I.20): Cellule multi jonction	20
Figure (I.21): Structure générale d'une cellule photovoltaïque organique.....	20
Figure (I.22): Module PV en groupement série - parallèle des cellules	22
Figure (I.23): Caractéristique I-V et P-V du module PV selon l'éclairement	24
Figure (I.24): Caractéristique I-V et P-V du module PV selon la température	25
Figure (I.25): Schéma bloc de la générateur PV en MATLAB-SIMULINK	26
Figure (I.26): Caractéristique résultant d'un groupement de Ns modules en série	26
Figure (I.27): Schéma bloc de la générateur PV en MATLAB-SIMULINK	27

Figure (I.28): Caractéristique résultant d'un groupement de N_p modules en parallèle	27
Figure (I.29): Système photovoltaïque raccordé au réseau	28
Figure (I.30): Système d'alimentation autonome hybride photovoltaïque/ groupe électrogène	28
Figure (I.31): Système photovoltaïque avec stockage	29
CHAPITRE II: Modélisation d'un système photovoltaïque autonome	
Figure (II.1): Cellule solaire idéale	32
Figure (II.2): Schéma électrique équivalent du modèle à une diode.....	33
Figure (II.3): Schéma électrique de batterie	38
Figure (II.4): Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé	41
Figure (II.5): Connexion directe GPV-charge via une diode anti-retour	43
Figure (II.6): Système photovoltaïque autonome avec convertisseur d'adaptation MPPT	43
CHAPITRE III: Résultats de simulation	
Figure (III.1): Position de pole I	46
Figure (III.2): Structure du pole I	46
Figure (III.3): Un schéma du circuit électrique du modèle de système PV autonome de 140 kW	47
Figure (III.4): L'organigramme détaillé de l'algorithme P&O avec convertisseurs de puissance	50
Figure (III.5): Structure d'un régulateur PI	52
Figure (III.6): Diagramme de blocs d'une PLL	53
Figure (III.7): Variation Eclairément en W/m^2	56
Figure (III.8): La tension de sortie du champ PV sous $E=1000W/m^2$ et $E=300W/m^2$	57
Figure (III.9): La tension de PV-MPPT	57
Figure (III.10): La puissance de PV-MPPT	58
Figure (III.11): Courant de sortie du champ PV sous $E=1000W/m^2$ et $E=300W/m^2$	58
Figure (III.12): Courbe de tension de référence.....	59
Figure (III.13): Courbe de courant I_d de référence	59
Figure (III.14): Courant I_d	60
Figure (III.15): Courant I_q	60
Figure (III.16): Duty cycle du convertisseur	61
Figure (III.17): La tension de sortie du champ PV sans et avec la commande MPPT	61

Figure (III.18): La puissance de sortie du champ PV sans et avec la commande MPPT	62
Figure (III.19): La tension de sortie du transformateur de 25KV	62
Figure (III.20): Le courant de sortie du transformateur	63
Figure (III.21): La tension de phase de l'onduleur	63

Liste
des tableaux

Liste des tableaux

CHAPITRE I: Généralités sur les systèmes solaires photovoltaïques

Tableau (I.1): Les caractéristiques principales du soleil	7
Tableau (I.2): Ensoleillement reçu en Algérie par région climatique	13
Tableau (I.3): Différentes technologies des cellules photovoltaïques	21
Tableau (I.4): Fiche technique de PV Module SPR-415E-WHT-D Détails	23

CHAPITRE II: Modélisation d'un système photovoltaïque autonome

Tableau (II.1): Différentes paramètres pour les modes de charge et de décharge	39
---	----

CHAPITRE III: Résultats de simulation

Tableau (III.1): Spécification de la zone de Naâma	45
Tableau (III.2): Le tableau montre ses Caractéristiques électriques et mécaniques	49

Nomenclature

Nomenclature

\emptyset : Latitude.

Z: L'altitude.

δ : Est la déclinaison.

ω : Est l'angle horaire.

V_{oc}: Tension de circuit ouvert.

I_{cc}: Courant de court-circuit.

I_{PV}: Courant délivré par la cellule (A).

I_D: Courant dans la diode (A).

V_T: Potentiel thermique.

K: La constante de Boltzmann est égale à $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K.

A: Le facteur d'idéalité de la jonction.

T_j: La température de jonction (°C).

I_S: Le Courant de saturation de la diode (A).

q: La charge de l'électron est égale à $1,6 \cdot 10^{-19}$.

V_{PV}: Tension délivré par la cellule (V).

V_D: La tension aux bornes de la diode (V).

h_v: Énergie de la bande de valence (J).

E_s: Ensoleillement incident (w/m^2).

P₁ (Am^2/w), **P₂** (m^2/w), **P₃** (K^{-1}), **P₄** (AK^{-3}): Paramètres constante.

R_S: Résistance série (Ω).

R_{sh}: Résistance shunt (Ω).

E_g: Énergie de gap ($1,76 \cdot 10^{-19}$ J).

T_C: Est la température absolue.

P_{max}: La puissance maximale (W).

I_{mp}: Le courant à la puissance maximal de fonctionnement de la cellule photovoltaïque (A).

V_{mp}: La tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque (V).

P_i: La puissance d'éclairement reçue par unité de surface (W).

S: La surface de la cellule photovoltaïque.

S_H(i): Flux direct horizontal.

C(j): La correction de la distance terre soleil.

h(i): Hauteur du soleil.

- T_L : Facteur de trouble.
- $M(i)$: Nombre d'aire masse.
- R : Rapport du flux global.
- R_b : Rapport de flux direct.
- S_B : Flux direct pour un plan d'inclinaison
- ϕ_{GH} : Flux global horizontal.
- ξ : Albédo du sol.
- TL_L : L'heure du lever de soleil.
- T_{moy} : La température moyenne journalière.
- T_{max} : La température maximale journalière.
- T_{min} : La température minimale.
- G_0 : L'éclairement de référence (1000 w/m²).
- T_0 : La température de référence (298 K).
- α : Coefficient de variation de courant à circuit ouvert en fonction de la température (A/°C).
- β : Coefficient de variation de la tension de court-circuit en fonction de la température (V/°C).
- ΔT : La variation de la température (°C).
- η_{ond} : Rendement de l'onduleur.
- η_{bat} : Rendement de batterie.
- C_{bat} : La capacité de stockage de la batterie.
- N_a : Le nombre de jours d'autonomie.
- V_b : La tension du système.
- P_{incid} : Puissance du générateur.
- $R_{electrode}$: La résistance d'électrode.
- $R_{electrolyte}$: La résistance de électrolyte.
- $V_{bat}(t)$: Est la tension de circuit ouvert au temps(t)
- $R_{bat}(t)$: Est la résistance interne de batterie, Ohms
- E_c : Le besoin électrique journalier.
- I_T : L'irradiation journalière.
- P_c : Puissance crête.
- I_q : Courant réactif.
- I_d : Courant actif.

Introduction
Générale

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution [1].

Les énergies renouvelables apparaissent comme une solution potentielle pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Il y a beaucoup d'énergie comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne, etc. La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie solaire photovoltaïque.

Il existe de nombreux sites isolés dans le monde, alimentés par des systèmes autonomes de génération d'électricité. Ces générateurs utilisent les sources renouvelables locales. On y trouve des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des micros turbines. L'électricité provenant des sources renouvelables est intermittente, et dépendante des conditions climatiques [2].

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé dans la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale.

Le générateur renouvelable sélectionné pour notre étude est un champ photovoltaïque (PV) avec un système de stockage, le stockage est assuré par des batteries. Ce système, appelé systèmes PV autonomes.

Ce mémoire est composé de trois chapitres:

Au premier chapitre, on fait une description générale, Nous décrivons le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales et les différents types des cellules. Et finalement nous décrivons les avantages et les inconvénients.

Le second chapitre est très important, car il présente la modélisation de chaque élément du système.

Le troisième chapitre nous avons étudié la modélisation et simulation d'une installation photovoltaïque autonome, les résultats de simulation sont obtenus par logiciel MATLAB/SIMULINK.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I:

Généralités sur les systèmes

solaires

photovoltaïques

I.1.Introduction

Le photovoltaïque est le processus de conversion directe du soleil en électricité à l'aide de cellules solaires. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV). Il utilise pour se faire des modules photovoltaïques composés de cellules. Ces cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se) ...etc. Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule[3].

De nos jours et selon le besoin, l'énergie électrique produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau [4].

I.2.Historique de l'énergie photovoltaïque

Mot « photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien italien Le terme« photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque, c'est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée effet photovoltaïque [5].

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque:

- **1839:** Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- **1875:** Werner Von Siemens expose de vante l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- **1954:** Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- **1958:** Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- **1973:** La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite l'Université de Delaware.

- **1983:** La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque par court une distance de 4000 km en Australie [6].
- **2001:** Schmidt-Mende réalisèrent une cellule solaire auto-assemblée à base de cristaux liquides de hexabenzocoronène et pérylène, et quelques années plus tard, les avancées scientifiques et technologiques sont telles qu'en **2008**, l'entreprise Fuji Kura (fabriquant de composés électroniques) est parvenue à faire fonctionner une cellule photovoltaïque organique de type DSSC (Dye-Sensitized Solar Cell ou cellule Gratzel) en continu à une température et à un taux d'humidité de 85% pendant 1000 heures.

I.3.Énergie solaire photovoltaïque

L'expression « énergie solaire » est généralement associée aux méthodes qui permettent d'utiliser l'énergie produite par le soleil. Situé à 146 millions de kilomètres de la terre, le soleil est une source d'énergie extraordinairement puissante. Pour s'en faire une idée, il faut savoir que le soleil envoie 1,6 milliards de kilowatts à la terre chaque année. Toutefois, 40 % seulement de cette énergie atteint effectivement la surface terrestre, le reste étant réfléchi par les couches supérieures de l'atmosphère. Ce pourcentage relativement faible que l'homme peut récupérer et transformer en énergie utilisable est de plusieurs centaines de fois supérieur à la consommation d'énergie mondiale annuelle. L'énergie solaire peut être utilisée de deux manières: comme source de chaleur et comme source d'électricité. Le processus de transformation du rayonnement solaire en électricité est appelé « photovoltaïque » (ou PV) [7].

I.4. Gisement solaire

I.4.1. Rayonnement solaire

I.4.1.1.Soleil

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il est composée presque totalement d'hydrogène ; soit pratiquement tous les éléments chimiques (figure (I.1)). Son diamètre est de 1391000 km (50 fois celui de la terre). Toute l'énergie du soleil provient des réactions thermo nucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde 564,106 tonnes d'hydrogène en 560,106 tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement. Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre [8].

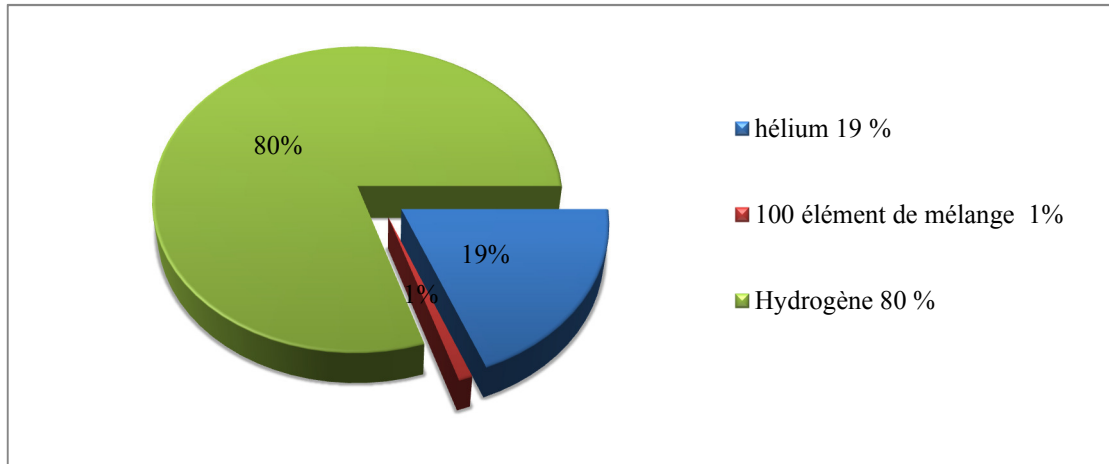


Figure (I.1): Composition du soleil par différents éléments chimiques.

I.4.1.2. Spectre solaire

La lumière solaire est composée de toutes sortes de rayonnements, de couleurs différentes, caractérisées par différentes longueurs d'onde. Des photons, grains de lumière composent ce rayonnement électromagnétique. En 1924, Louis de Broglie a confirmé la nature à la fois corpusculaire et ondulatoire de la lumière : présence de corpuscules (photons) et propagation d'ondes avec une fréquence de vibration et une longueur d'onde.

Le rayonnement émis par le soleil correspond à celui du corps noir à la température de 6000°C. L'intensité du rayonnement au dessus de l'atmosphère est de 1.35 kW/m² avec un spectre centré au voisinage de $\lambda=0.48\mu\text{m}$. A la surface du sol, la densité de puissance n'est plus que de 0.9kW/m² en raison de l'absorption essentiellement par l'ozone, l'eau et le gaz carbonique. En outre, le spectre n'est plus continu mais présente des bandes d'absorption.

Pour mesurer l'effet de l'atmosphère on utilise l'air masse, défini par $AM=1/\cos \alpha$, où α représente l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale. AM0 est utilisé pour préciser les conditions au dessus de l'atmosphère. AM 1.5 étant celui atteignant le sol par temps clair (surface d'un mètre carré faisant un angle de 48° avec l'équateur). De plus, on distingue les spectres AM1.5D et AM1.5G qui correspondent respectivement au flux direct et au flux global (direct et diffus). La figure donne ces spectres. Elle indique quelques semi-conducteurs utilisés pour les applications photovoltaïques ainsi que leur énergie de E_g correspondantes [8].

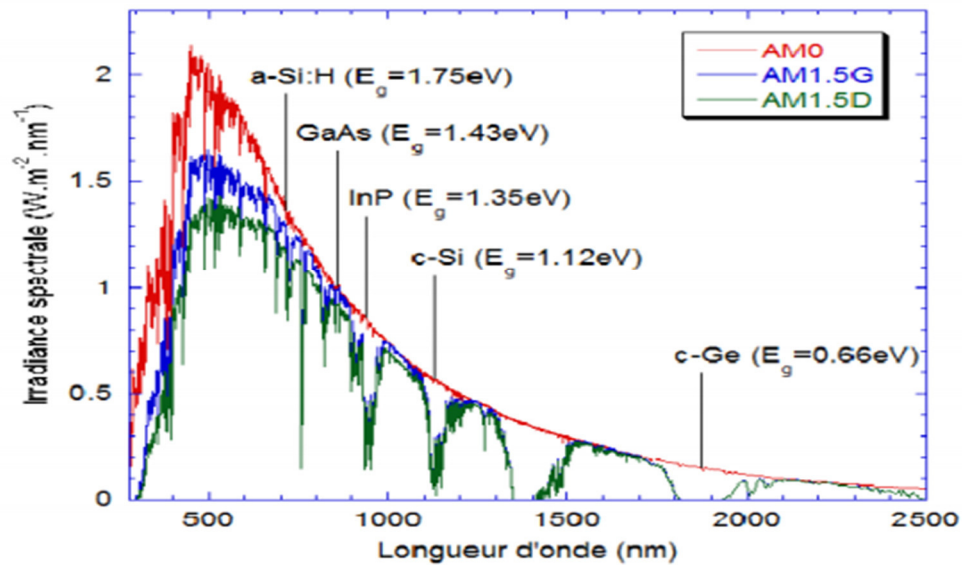


Figure (I.2): Spectre solaire à la surface de l'atmosphère terrestre (AM0) et au sol (AM1.5D ETAM1.5G) [8].

I.4.2. Types de rayonnement

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2 et 4.10⁻⁶ m sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent [9].

I.4.2.1. Rayonnement direct

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère. Il peut être mesuré par un pyr-héliomètre.

I.4.2.2. Rayonnement diffus

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet éclatement des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.

I.4.2.3. Rayonnement réfléchi (L'albédo)

Réfléchi c'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement Réfléchissant (eau, neige).

I.4.2.4. Rayonnement global

Qui est la somme du rayonnement direct et diffus ; y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un Solari mètre sans écran. Les stations météorologiques généralement mesurent le rayonnement global horizontal par un Pyromètre placé horizontalement à l'endroit requis [9].

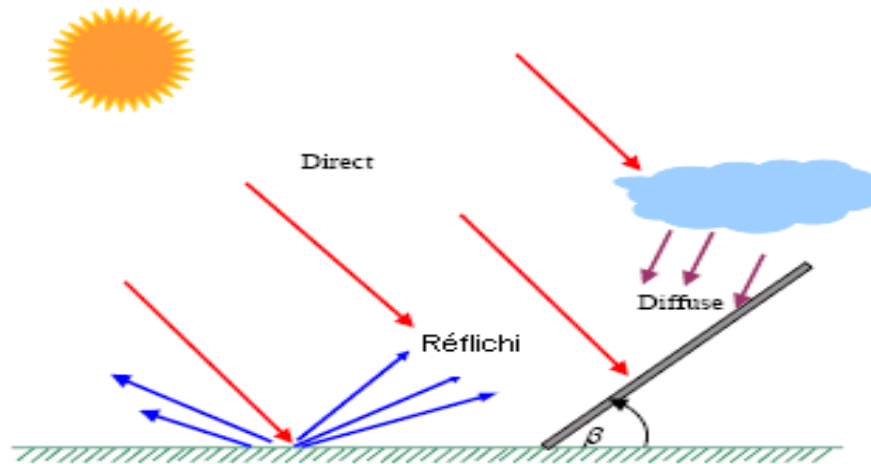


Figure (I.3): Composante du rayonnement global sur un plan horizontal [9].

I.4.3. Caractéristiques du soleil

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre. La deuxième étoile la plus proche est Proxima de sépare de cette étoile fait que le soleil soit la seule étoile qui assure la vie sur terre .sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques [10].

Tableau (I.1): Les caractéristiques principales du soleil

Diamètre (km)	1392000
Masse (kg)	$2 \cdot 10^{30}$
Surface (Km ²)	$6,09 \cdot 10^{12}$
Volume (Km ³)	$1,41 \cdot 10^{18}$
Masse volumique moyenne (Kg /m ³)	1408
Vitesse (Km /s)	217
Distance du centre de la voie lactée (Km)	$2,5 \cdot 10^{17}$

I.4.4. Coordonnées

Pour un lieu donné, la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents:

- Par rapport au plan équatorial de la terre (repère équatorial).
- Par rapport au plan horizontal du lieu (repère horizontal).

I.4.4.1. Coordonnées géographiques

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre (figure (I.4)) [11].

I.4.4.1.1. Longitude

C'est l'éloignement par rapport au méridien de Greenwich, mesuré en degré. Elle est comptée positivement vers l'est et négativement vers l'ouest, à partir du méridien Greenwich.

I.4.4.1.2. Latitude (ϕ)

C'est l'éloignement d'un point sur la surface de la terre par rapport à l'équateur, mesuré en degré (mesurée à partir du centre de la terre), permettent de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle varie de 0° à 90° dans l'hémisphère nord et de -90° à 0° dans l'hémisphère sud.

I.4.4.1.3. L'altitude (Z)

C'est l'altitude d'un point correspondant à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (le niveau de la mer = 0), elle est exprimée en mètre.

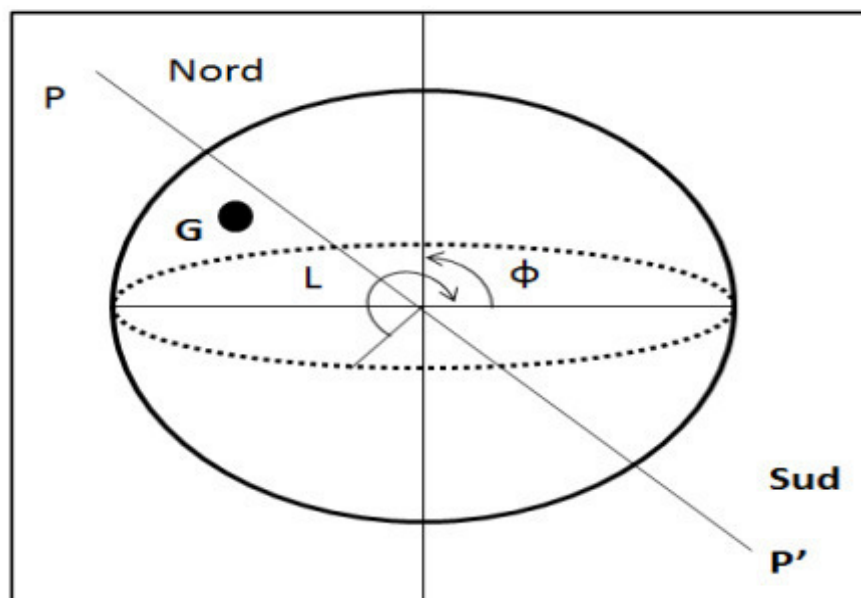


Figure (I.4): Coordonnées géographiques d'un lieu [11].

I.4.4.2. Coordonnées locales (horizontales)

I.4.4.2.1. Hauteur (h)

La hauteur du soleil est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan horizontal (c'est-à-dire tangent au sol), elle est donnée par la relation suivante:

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \tag{I.1}$$

L'azimut correspondant à l'angle que fait le plan du méridien local avec le plan vertical passant par le soleil. L'azimut est compté négativement vers l'est et positivement vers l'ouest.

I.4.4.2.2. Azimut

L'azimut correspondant à l'angle que fait le plan du méridien local avec le plan vertical passant par le soleil. L'azimut est compté négativement vers l'est et positivement vers l'ouest.

$$\sin a = \frac{\cos \delta \sin h}{\cos h} \tag{I.2}$$

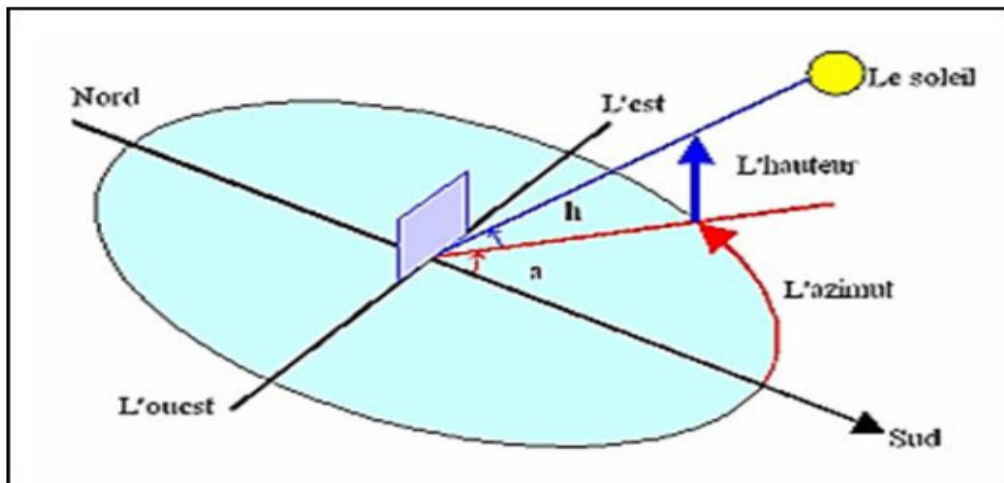


Figure (I.5): Coordonnées horizontales du soleil [11].

Remarquons que ces coordonnées dépendent du lieu d'observation et que pour cela elles sont appelées aussi coordonnées locales. Des calculs solaires effectués en un lieu donné avec ces coordonnées ne pourront donc pas être transposable directement en un autre lieu.

I.4.4.3. Coordonnées horaires

Le déplacement des astres du fait du mouvement diurne rend intéressant l'utilisation des coordonnées horaires, qui est un système de coordonnées locales "mixtes", dans lequel les plans de référence sont l'équateur céleste et le plan méridien du lieu de l'observation.

La position d'un objet sur la voûte céleste est définie par l'angle horaire et la déclinaison. Notons que la sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, qui admet pour centre la terre, et pour rayon la distance (Terre – Soleil). On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste.

I.4.4.3.1. Angle horaire

L'angle horaire ω est l'angle que fait le plan contenant le cercle horaire de l'astre (soleil) avec le plan contenant le méridien céleste. Il est compté sur l'équateur, positivement à l'ouest, négativement à l'est (la figure (I.6)).

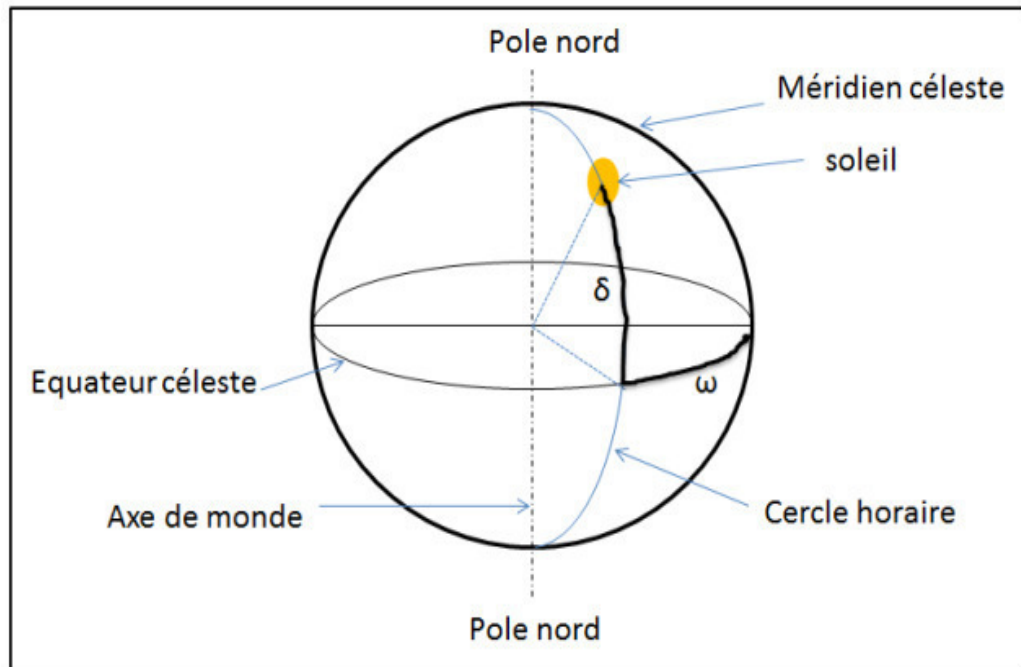


Figure (I.6): Coordonnées horaires[11].

I.4.4.3.2. Déclinaison

L'angle que fait le plan de l'équateur terrestre avec la direction Terre-soleil est appelé la déclinaison. Cet angle varie tout au long de l'année de façon symétrique de $-23^{\circ}26'$ à $+23^{\circ}26'$ (figure(I.7)).

La valeur de la déclinaison peut être obtenue avec une bonne précision par la formule suivante

$$\delta = 23,45. \sin 360 \frac{(284+n)}{365} \quad (I.3)$$

Avec:

n: numéro du jour.

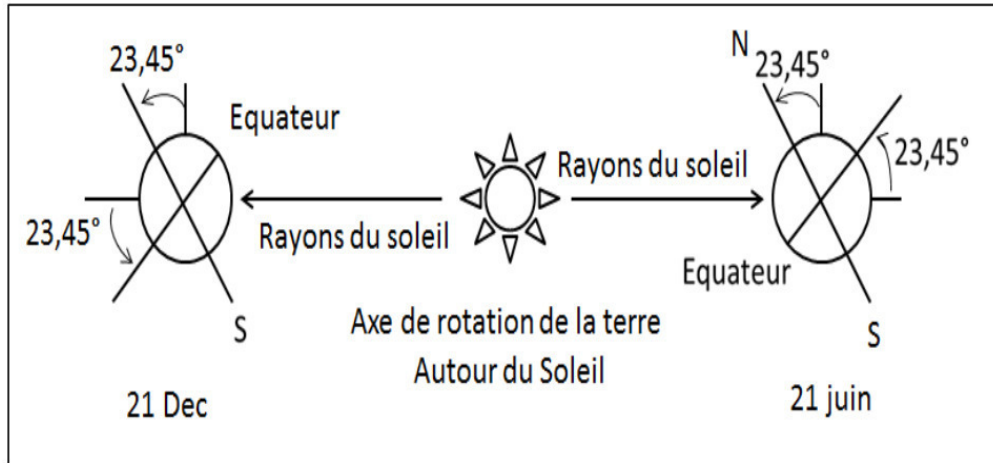


Figure (I.7): Déclinaison solaire [11].

I.4.5. Epaisseur de l'atmosphère

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus son rayonnement est modifié.

On appelle «Epaisseur de l'atmosphère», m , la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement directe pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer (figure (I.8)).

Cela dépend de la hauteur angulaire du soleil (h). à l'aide des points O, A et M, on écrit la longueur du trajet du soleil travers l'atmosphère : $OM = OA / \sin h$

On appelle m le rapport OM / OA , soit $1/\sin h$. A une pression P différente de 1013 mbar et à une altitude z (en km), on désigne par masse atmosphérique ou nombre d'air masse, le nombre [12]:

$$m = \frac{P}{1013 \sin(h)} \exp\left(-\frac{z}{7.8}\right) \tag{I.4}$$

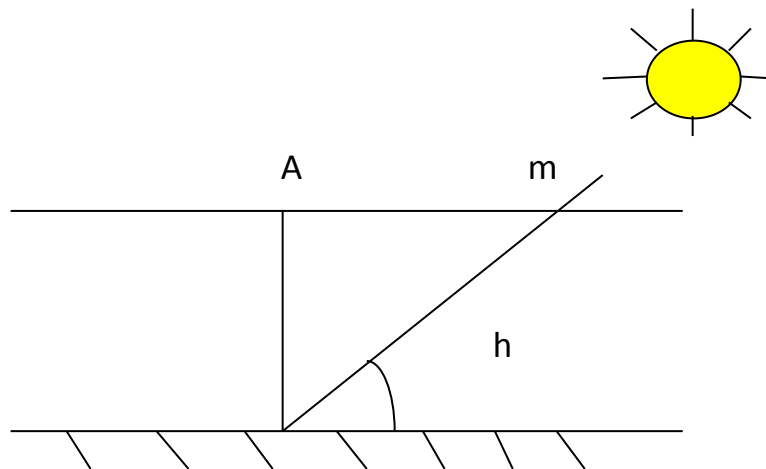


Figure (I.8): Le rayonnement solaire et le nombre Epaisseur de l'atmosphère [12].

Exemple:

- Rayonnement hors atmosphère: AM 0
- Soleil au zénith, niveau de la mer: AM 1
- Soleil à 42° sur l'horizon: AM 1.5
- Soleil à 30° sur l'horizon: AM 2

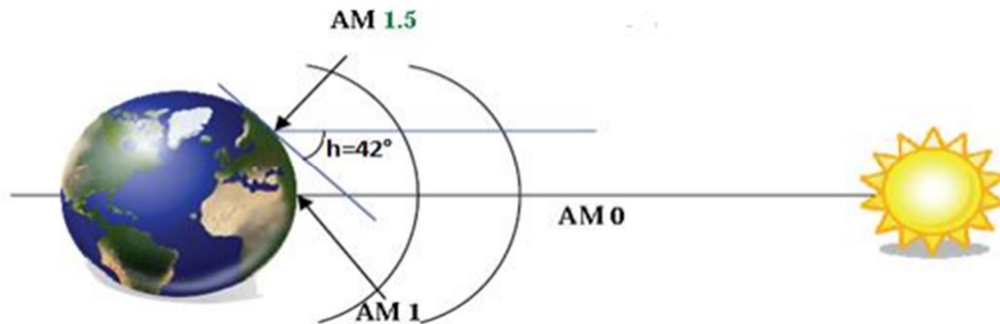


Figure (I.9): Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM [12].

I.4.6. Orientation et inclinaison d'un module photovoltaïque

La position du soleil vis-à-vis des modules photovoltaïques influe directement sur leur production énergétique. Leurs placement est très important à fin de profiter au maximum de leurs possibilités.

On appelle l'orientation le point cardinal vers lequel est tournée la face active du panneau (Sud, Nord, Sud-ouest...). Quant à l'inclinaison elle indique l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal, elle se compte donc en degrés.

L'orientation idéale d'un module photovoltaïque est : vers l'équateur, ce qui donne :

- Orientation vers le sud dans l'hémisphère Nord;
- Orientation vers le nord dans l'hémisphère sud.

On déduit de ce fait que l'inclinaison idéale est égale à la latitude du lieu $+10^\circ$ (pour une orientation sud) [13].

I.5. Gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [14].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre (Figure (I.10)):

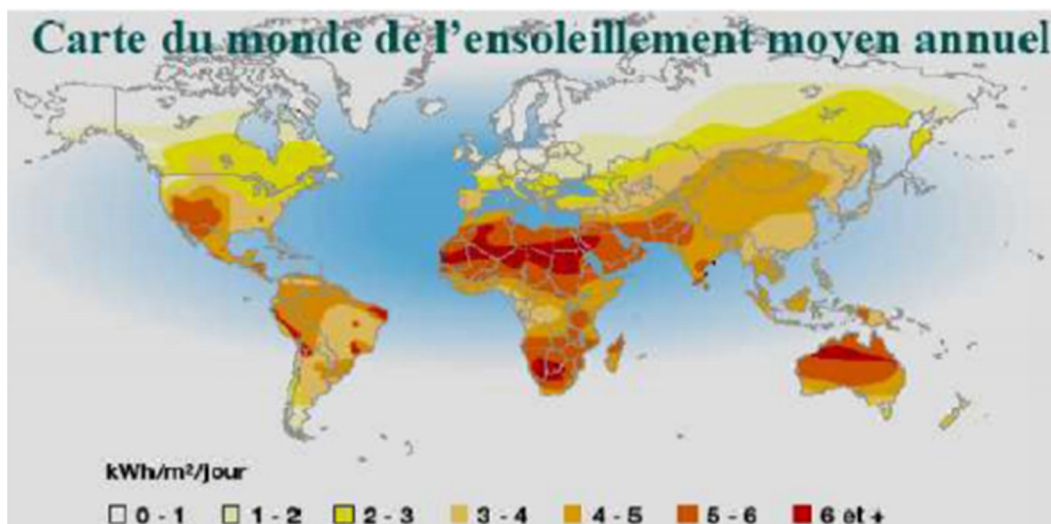


Figure (I.10): Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [14].

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh /an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à HassiR'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau de territoire algérien est représentée dans (le tableau (I.2)) selon l'ensoleillement reçu annuellement [15]:

Tableau (I.2): Ensoleillement reçu en Algérie par région climatique

Régions	Région côtière	Haute plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale.

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie.

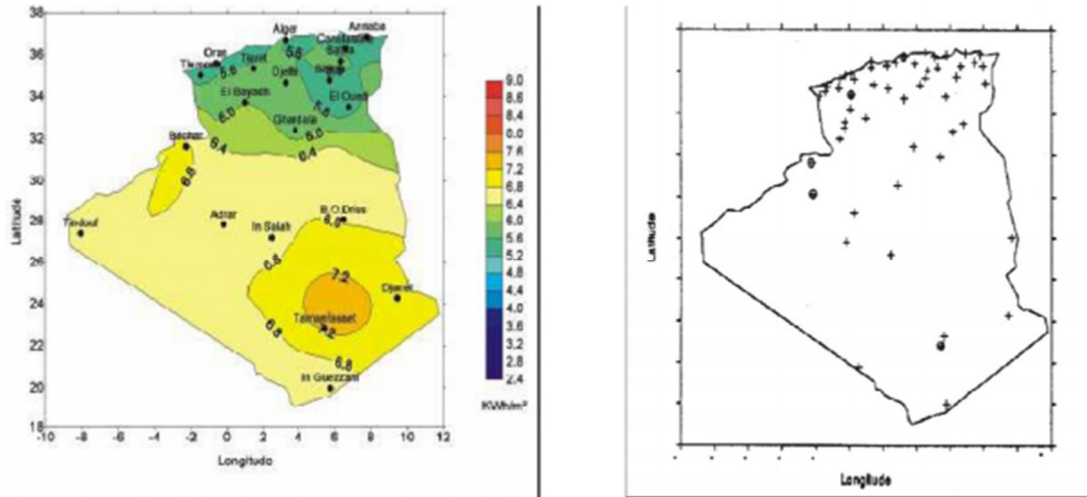


Figure (I.11) : le Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu et Répartition territoriale des stations météorologique en A [15].

En Algérie, il existe un réseau de 78 stations de mesure météorologiques de l'O.N.M réparties sur tout le territoire algérien. Cependant, seules 7 stations météorologique assurent la mesure des composantes diffuses et globales du rayonnement solaire reçu sur un plan horizontal en raison, soit du manque de fiabilité des appareilles des mesures, ou bien, du coût élevé d'un tel appareillage. La durée d'insolation quant à elle, est mesurée par un héliographe dans la majorité des stations de (O.N.M) à cause de la facilité de sa mise en œuvre.

I.6. Principe de la conversion photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule.

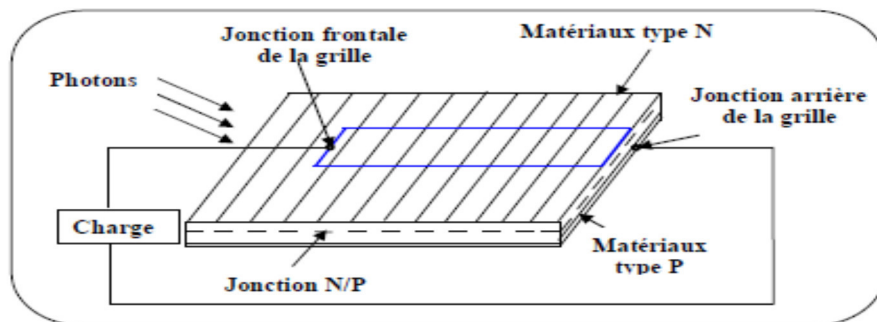


Figure (I.12): Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque [16].

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au Bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore), créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel.

Lorsque les photons sont absorbés par les semi-conducteurs, ils transmettent leurs énergies aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons (charges N) et des trous (charges P) créent alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connections des bornes positive et négative de la cellule.

La tension maximale de cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul, cette tension est nommée tension de circuit ouvert V_{OC} . Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit I_{SC} et dépend fortement du niveau d'éclairement [16].

I.7. Physique de Semi-conducteur

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charge libre est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est l'énergie du «bande gap», E_g en électronvolt (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1.0 à 1.8 eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1.1 eV pour le silicium cristallin (c - Si), et 1.7eV pour le silicium amorphe (a -Si). Le spectre du rayonnement solaire est la distribution des photons particules de lumière en fonction de leur énergie (inversement proportionnelle à la longueur d'onde). Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera à travers l'épaisseur de la cellule [17]. Les photons absorbés dont l'énergie est supérieure à l'énergie de la bande gap vont libérer un électron négatif, laissant un 'trou' positif derrière lui. Pour séparer cette paire de charges électriques de signes opposés (positive et négative) et recueillir un courant électrique, il faut introduire un champ électrique, de part et d'autre de la cellule [18].

I.7.1. Dopage du silicium

Les atomes de Si ont quatre électrons de valence, chacun étant lié à un atome Si voisin, par une liaison covalente [19].

I.7.2. Dopage de type N

Si un atome ayant cinq électrons de valence (le phosphore (P)), est incorporé dans le réseau cristallin, alors cet atome présentera quatre liaisons covalentes et un électron libre. Cet

électron faiblement lié à l'atome peut être facilement excité vers la bande de conduction. Dans ce genre de matériau, le nombre d'électrons dépasse le nombre de trous.

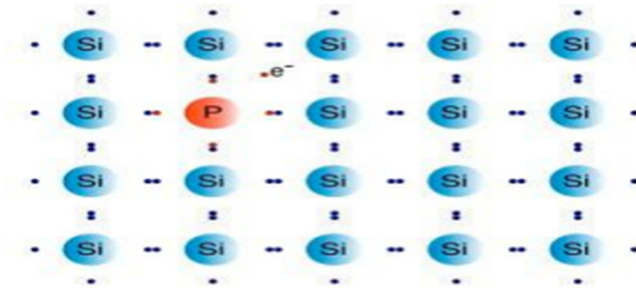


Figure (I.13): Dopage de type N[20].

I.7.3. Dopage de type P

Si un atome trivalent (bore (Br)) est substitué à un atome de silicium dans le réseau cristallin, alors il manquera un électron pour l'une des quatre liaisons covalentes des atomes de silicium adjacents et l'atome trivalent peut accepter un électron pour compléter cette quatrième liaison, formant ainsi un trou. Quand le dopage est suffisant, le nombre de trous dépasse le nombre d'électrons.

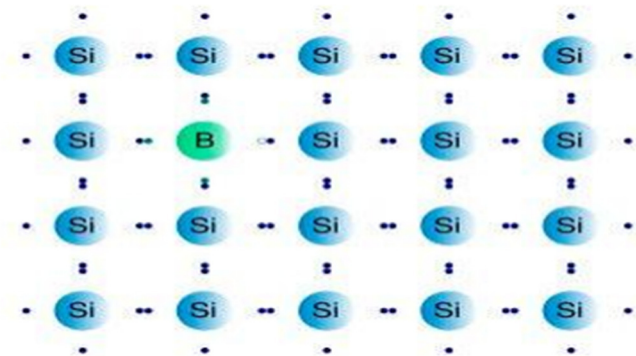


Figure (I.14): Dopage de type P[20].

I.7.4. Formation de la jonction PN

Le silicium, comme tous les semi-conducteurs, a une bande de valence pleine et une bande de conduction vide. Mais grâce à un apport énergétique suffisant, il est possible de faire passer des électrons de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC), d'où la génération d'électrons libres, (figure (I.15)).

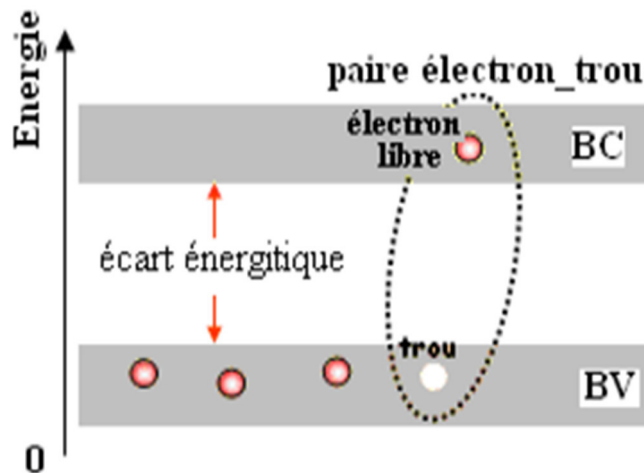


Figure (I.15): Génération de la paire électron-trou [20].

La présence d'électrons libres dans la bande de conduction d'un matériau n'est pas suffisante pour générer un courant : il est nécessaire de créer une différence de potentiel aux bornes du photo- générateur afin d'entraîner les charges positives d'un côté et les charges négatives de l'autre. Cette opération est possible par dopage du Silicium. Une jonction PN est créée par l'assemblage de deux barreaux de Silicium de type N et P [20].

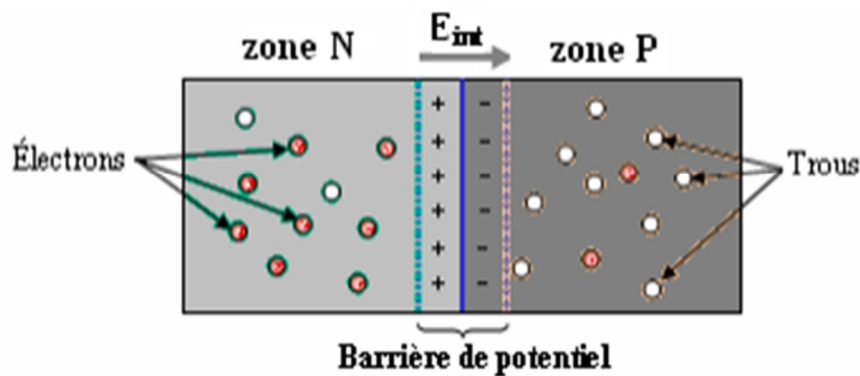


Figure (I.16): La jonction PN[20].

I.8. Cellule photovoltaïque

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériau semi-conducteur et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possède une bande interdite, qui joue le rôle de la barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement [21].

I.9. Technologies des cellules solaires

Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de cellules a un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible: de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle.

I.9.1. Silicium monocristallin

Les cellules monocristallines sont des photopiles élaborées à partir de silicium cristallisé en un cristal unique. Leur rendement est de 10 à 16 %, mais leur fabrication est complexe et consommatrice d'énergie.



Figure (I.17): Silicium Monocristallin [22].

I.9.2. Silicium polycristallin

Les cellules polycristallines sont fabriquées à partir d'un bloc de silicium cristallisé sous forme de cristaux multiples. Leur rendement moyen est de 11 à 13 %, et leur coût de production est un peu moins élevé que celui des cellules monocristallines.

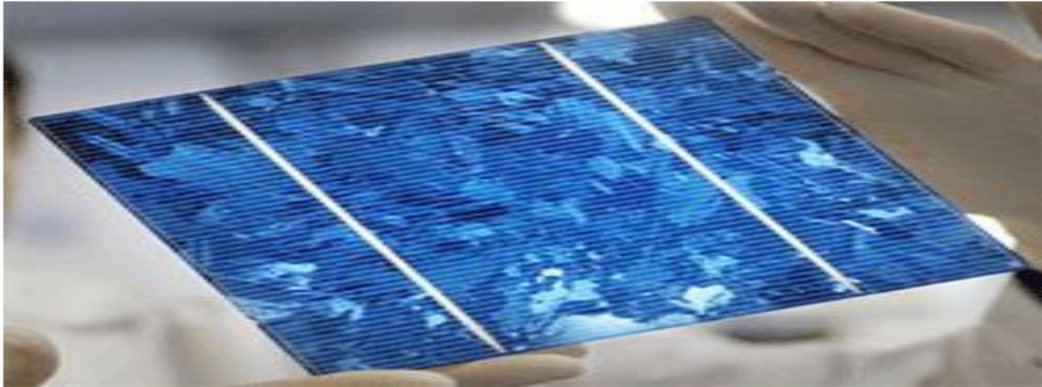


Figure (I.18): Silicium Polycristallin [22].

I.9.3. Silicium amorphe

Les cellules amorphes se composent de couches de silicium très minces appliquées sur un support en verre, en plastique souple ou en métal. A l'origine, leur rendement était plus faible (6 à 10%), mais la technologie évolue rapidement, ils fonctionnent avec un éclairage faible ou diffus (même par temps couvert, y compris sous éclairage artificiel de 2 à 3000 lux) [22].



Figure (I.19): Silicium Amorphe[22].

I.9.4. Multi jonctions

Les cellules multi-jonction ayant une grande efficacité qui permet d'augmenter le rendement, ont été développées pour des applications spatiales, ils sont constitués de plusieurs couches minces de nature différente (utilisant des bandes d'énergie différente) [23].

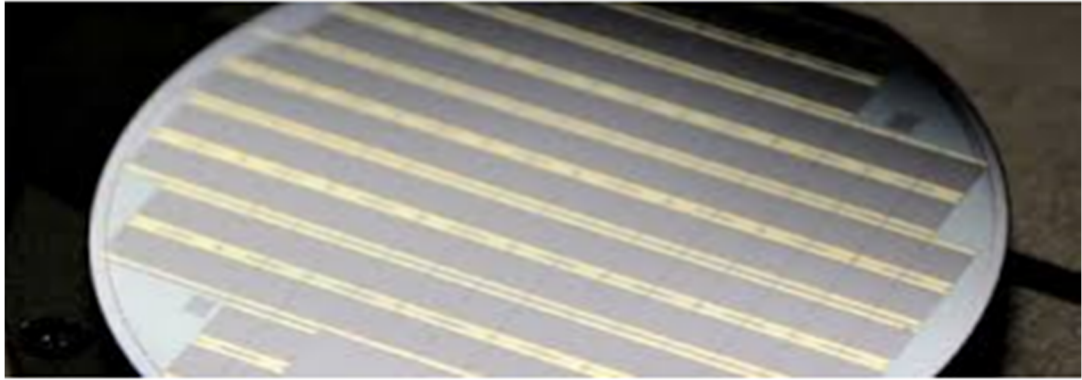


Figure (I.20): Cellule multi jonction[23].

I.9.5. Organique

Les cellules PV à base des molécules organiques ou polymères offrent de grandes opportunités à la conversion d'énergie de faible cout dues à plusieurs avantages technologiques des semi-conducteurs organiques. Cette génération offre une grande flexibilité aux applications solaires, mais le rendement maximum obtenu en laboratoire (11.2%) reste faible [24].

Structure des cellules photovoltaïques organiques La cellule photovoltaïque de base est constituée d'une ou plusieurs couches actives entourées par des électrodes. Chaque couche de l'empilement doit vérifier certains critères. La représentation de cet empilement est schématisée sur (la figure (I.21)) [25].

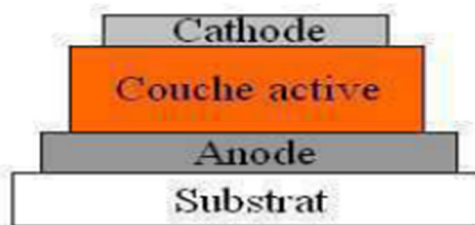


Figure (I.21): Structure générale d'une cellule photovoltaïque organique [25].

Les types et technologies de cellules photovoltaïques citées ci-dessus diffèrent et ces différences nous ont permis d'élaborer un tableau comparatif. Nous montrons dans ce tableau (Tableau (I.3)) les caractéristiques des différentes cellules classées par leur rendement, longévité et leurs principales utilisations.

Tableau (I.3): Différentes technologies des cellules photovoltaïques [26].

Technologie	Rendement	Durée de vie	Principales utilisation
Silicium monocristallin	12 à 20 %	30 ans	Spatiales, modules, pour toits, façades
Silicium polycristallin	11 à 15 %	30 ans	Modules pour toits, façades, générateurs, fermes au sol...
Amorphe	5 à 10 %	10 ans	Appareils électroniques (montres, calculatrices), intégration dans le bâtiment
CIS	9 à 11%	>20 ans	Intégration dans le bâtiment
Multi jonctions	Jusqu'à 40 %		Spatiales
CdTe	9 à 11%	>20 ans	Appareils électroniques (montres, calculatrices), intégration dans le bâtiment, fermes au sol
CIGS	19.9 % En laboratoire	-	Spatiales, intégration dans le bâtiment
Organique	5.9 % En laboratoire	-	En cours de développement

I.10. Module Photovoltaïque

La tension générée par une cellule étant très faible, pour avoir des tensions compatibles avec des charges à alimenter, il faudra associer en série-parallèle plusieurs cellules. Celles-ci sont encapsulées dans une même structure pour former un module.

L'encapsulation ainsi réalisée va avoir deux rôles principaux :

- Protection des cellules contre les agressions extérieures (chocs, humidité,...etc).
- Contrôle de température des cellules qui va permettre une bonne dissipation vers l'extérieur de la partie de l'énergie incidente qui n'est pas transformée en énergie électrique [5].

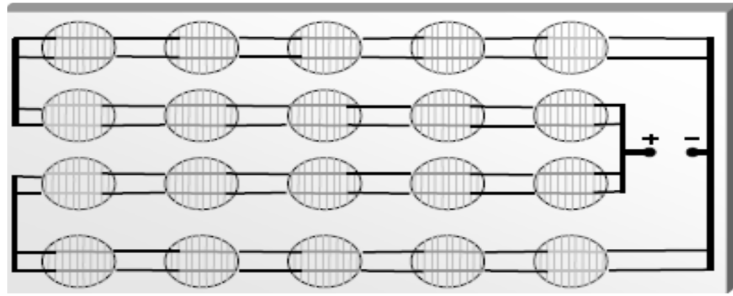


Figure (I.22): Module PV en groupement série - parallèle des cellules[5].

I.11. Paramètres photovoltaïques

Une cellule solaire est caractérisée par un ensemble de paramètre appelé paramètres photovoltaïques.

I.11.1. Courant de court-circuit (I_{cc})

On obtient ce courant quand le potentiel appliqué à la cellule est nul. C’est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Ce courant est en fonction de la température, la longueur d’onde du rayonnement, la surface active de la cellule et de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l’intensité lumineuse reçue.

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{(R_s I_{cc})}{V_T}} - 1 \right) - \left(\frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \right) \tag{I.15}$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme $I_s \left(e^{\frac{(R_s I_{cc})}{V_T}} - 1 \right)$ devant I_{ph} on obtiendra cette expression approcher des courant de court circuit

$$I_{cc} = \left(\frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \right) \tag{I.16}$$

I.11.2. Tension de circuit ouvert (V_{co})

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

$$V_{OC} = \frac{KT_C}{q} \text{Log} \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \tag{I.17}$$

Avec:

$\frac{KT_C}{q}$: Représentant la potentielle thermodynamique.

I.11.3. Facteur de forme FF

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d’une cellule ou d’un générateur PV: c’est le facteur de remplissage ou Facteur de forme (FF). Et représente aussi Le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{CC} * V_{OC}$. Quand la puissance exploitable sera grande donc le facteur est grand. L’objet qui fait compromis technologie pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales c’est des meilleures cellules. Ce facteur est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{CC} \times V_{OC}} \tag{I.18}$$

I.11.4. Rendement

Le rendement des cellules photovoltaïques désigne le rendement de conversion en puissance. On le considère comme le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_i .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i \cdot S} = \frac{FF \times I_{CC} \times V_{OC}}{P_i \cdot S} \tag{I.19}$$

Pour un bon rendement, on augmente le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. La seule connaissance de la valeur qui permet d’évaluer les performances de la cellule est le rendement de conversion qui est un paramètre essentiel.

I.12. Fiche technique du panneau solaire

Tableau (I.4): Fiche technique de PV Module SPR-415E-WHT-D

Paramètre	Valeur
$P_{mpp}(STC)$	415 W
I_{mpp}	5.69A
V_{mpp}	72.9V
I_{cc}	6.09A
V_{oc}	85.3V
Nombre du cell	72
Type du cell	Mono

I.13.Caractéristiques électriques d’un module solaire

I.13.1.Influence de l’éclairement sur les modules photovoltaïques

En faisant varier l’éclairement entre 200w/m², 400 w/m², 600 w/m², 800w/m²et 1000 w/m², la caractéristique ($I_{pv} = f(V_{pv})$) est donnée par (les figures (I.23)) qui représente l’influence de l’éclairement sur la caractéristique I-V et P-V à une température fixe. L’augmentation de l’éclairement influence sur le courant beaucoup plus que la tension et La puissance optimale P_m augmente avec l’augmentation de l’éclairement.

L’irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m² et une température de 25 °C.

Avec : $I_{cc} = 13A$ et $V_{oc} = 16.5V$

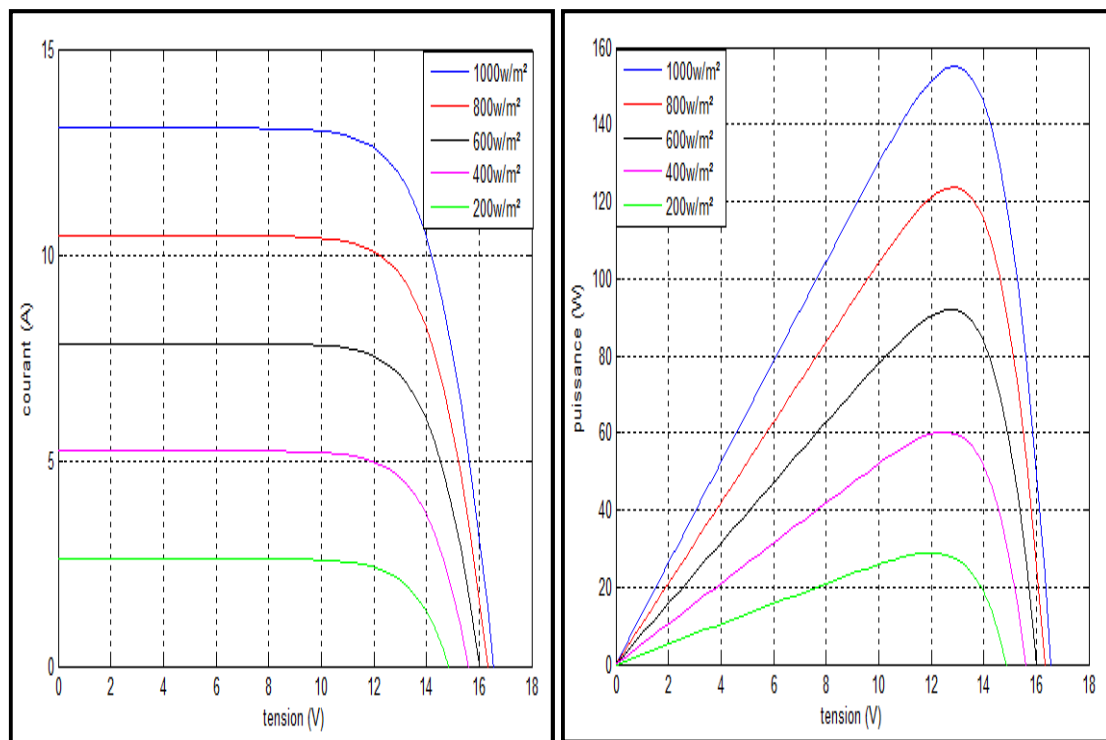


Figure (I.23): Caractéristique I-V et P-V du module PV selon l’éclairement.

I.13.2.Influence de la température sur module photovoltaïque

La température est un paramètre important puisque les modules sont exposés au rayonnement solaire. Les courbes suivantes représentent l’évolution du courant et de la tension en fonction de la température de la cellule durant le même éclairement.

Figure (I.24) montre l’influence pour différentes valeurs de température (25°C, 50°C et 75°C). Lors du dimensionnement d’une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte.

Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25 °C.

Avec : $I_{cc} = 25A$ et $V_{oc} = 22V$

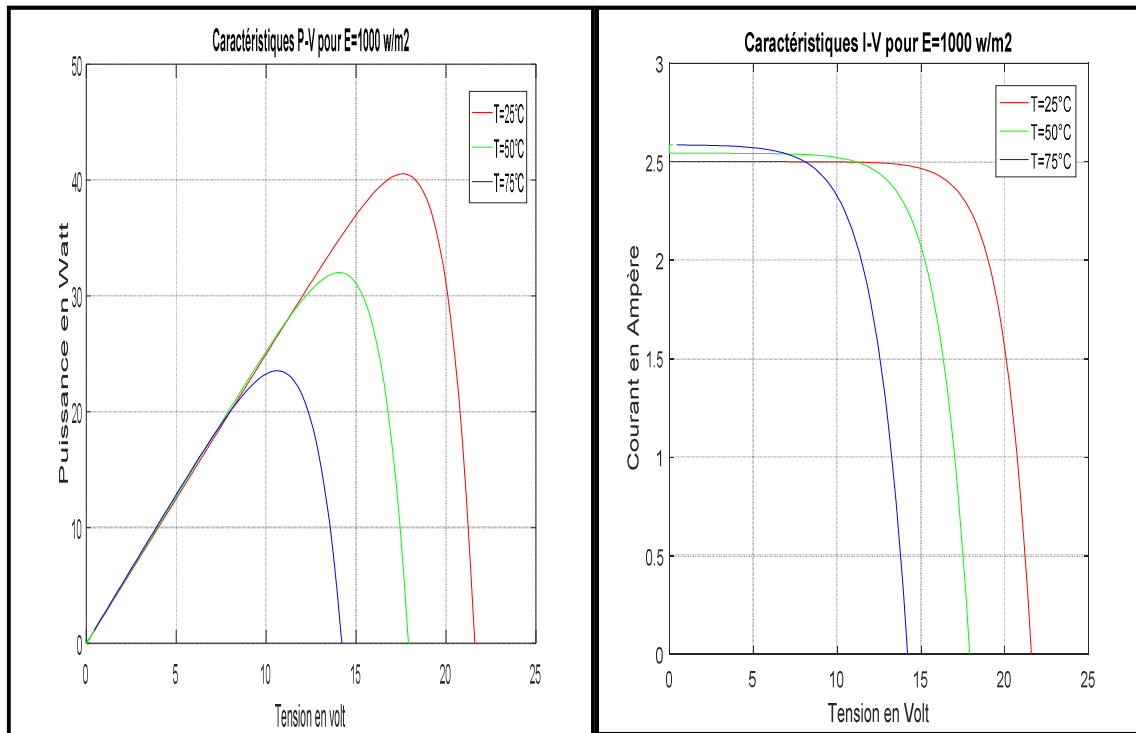


Figure (I.24): Caractéristique I-V et P-V du module PV pour différentes valeurs de température

I.13.3. Association des modules photovoltaïque

I.13.3.1. En série

Figure (I.26) montre caractéristique résultant d'un groupement de N_s modules en série. En faisant varier le nombre de module en série ($N_s=1, N_s=3, N_s=6$ et $N_s=9$). Dans un groupe dans une chaîne, les unités sont traversées par le même courant et la propriété résultante d'un groupe dans une chaîne est obtenu en additionnant les tensions dans un courant donné.

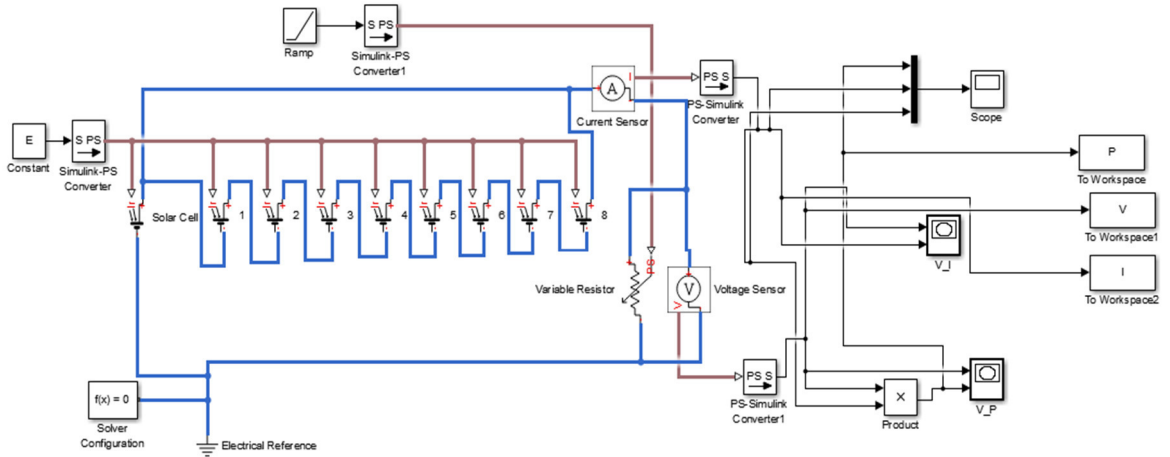


Figure (I.25): Schéma bloc de la générateur PV en MATLAB-SIMULINK

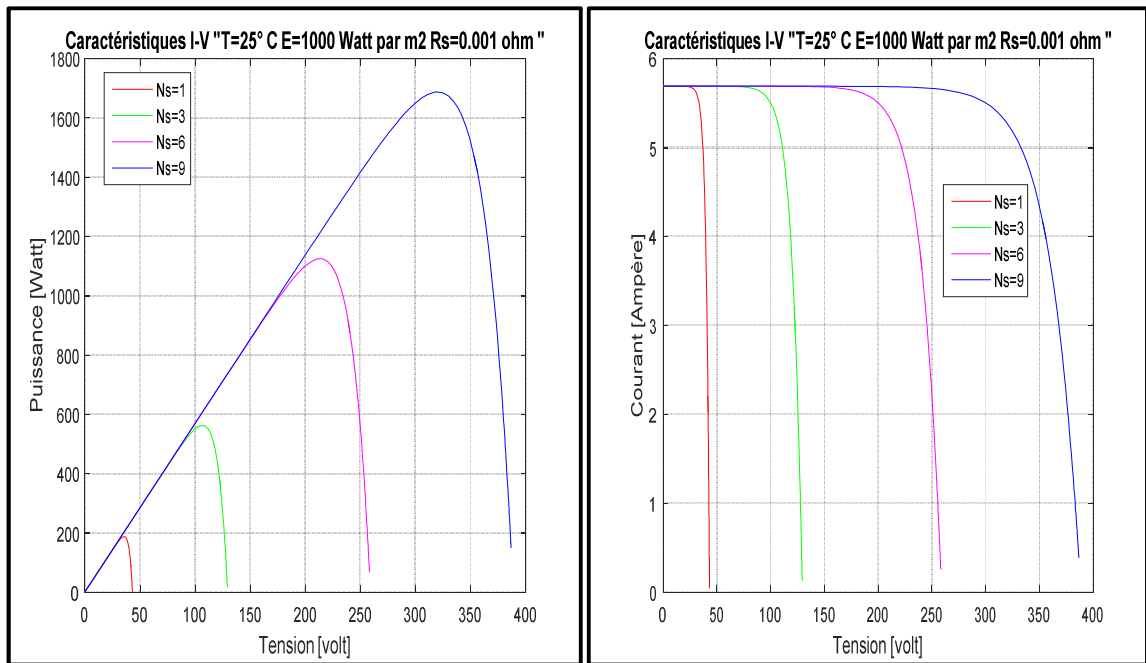


Figure (I.26): Caractéristique résultant d'un groupement de Ns modules en série.

I.13.3.2. Association des modules en parallèles

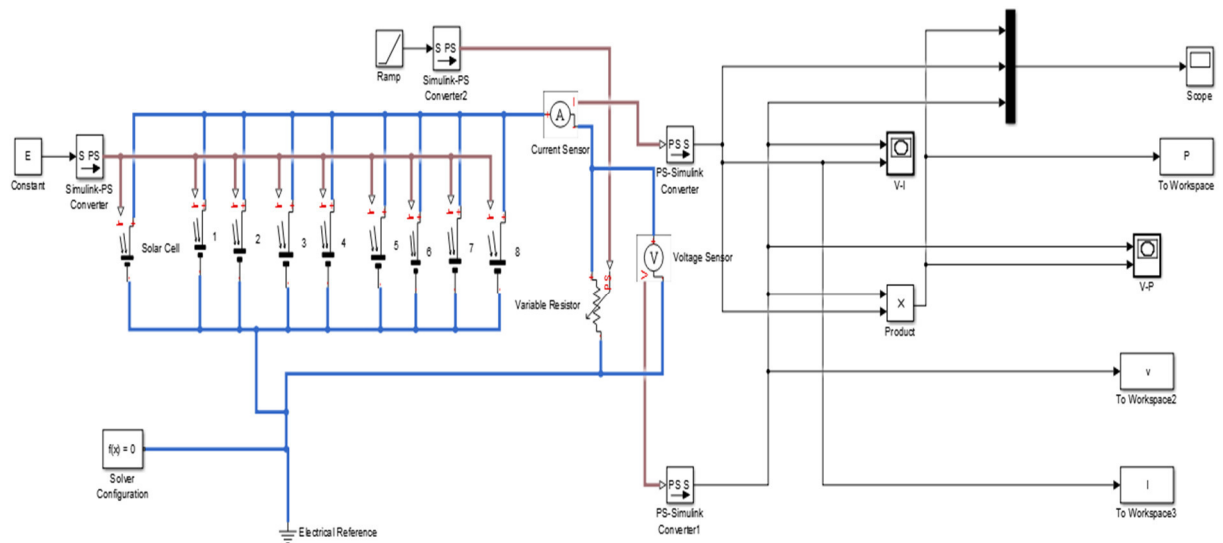


Figure (I.27): Schéma bloc de la générateur PV en MATLAB-SIMULINK

Figure (I.28) montre caractéristique résultant d'un groupement de N_p modules en parallèle. En faisant varier le nombre de module en parallèle ($N_p=1, N_p=3, N_p=6$ et $N_p=9$). Le courant de court-circuit augmente quand le nombre de cellule en parallèle augmente, la valeur de La tension de circuit ouvert n'influe pas par l'augmentation du nombre de cellule en parallèle alors que la puissance augmente.

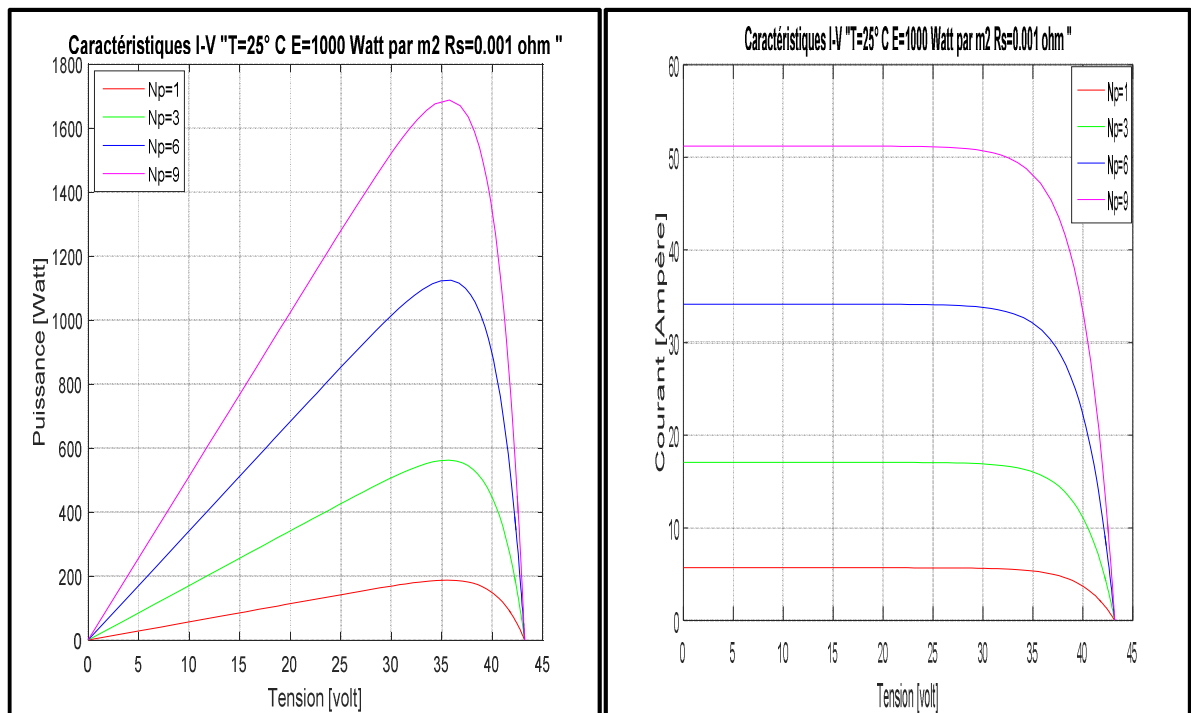


Figure (I.28): Caractéristique résultant d'un groupement de N_p modules en parallèle.

I.14. Différents type de système photovoltaïque

I.14.1. Système photovoltaïque connecté au réseau

Le générateur photovoltaïque connecté au réseau est l'application la plus envisagée en zone urbaine avec l'installation de module sur les toits et les façades de bâtiments.

L'intégration d'élément photovoltaïque dans les structures de bâtiment a de nombreux Atouts. En étant connecté au réseau, ces systèmes permettent d'éviter des problèmes de stockage et de transport de l'électricité. L'excès de production après transformation en alternatif à l'aide d'un onduleur, est injecté dans le réseau. En période de non production (la nuit), l'électricité est prélevée sur le réseau. Le compteur tourne alors dans les deux sens [27].

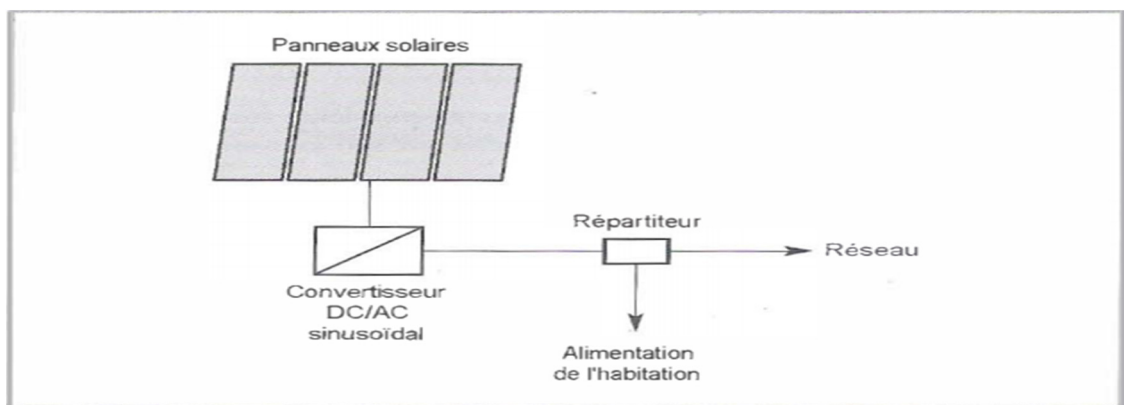


Figure (I.29): Système photovoltaïque raccordé au réseau [27].

I.14.2. Système hybrides

Les systèmes hybride est la combinaison de deux ou plusieurs sources d'énergies renouvelables. On prend comme exemple l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne, ce qui permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique et économique [7].

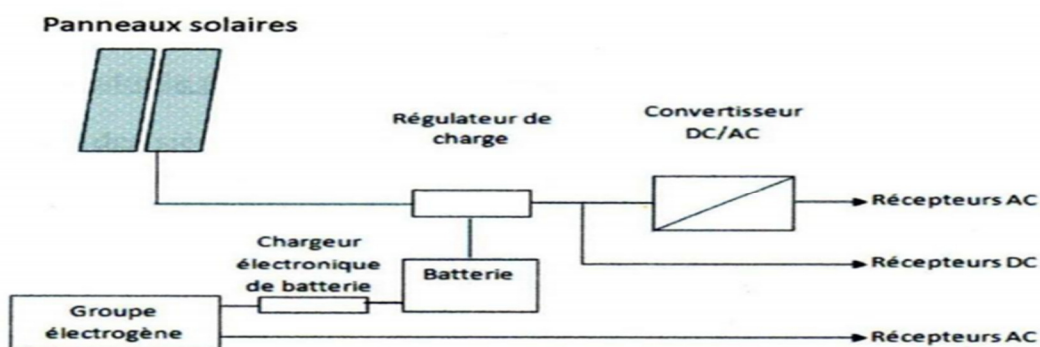


Figure (I.30): Système d'alimentation autonome hybride photovoltaïque/groupe électrogène [7].

I.14.3. Système photovoltaïque autonome

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Selon l'utilisation ou non du stockage électrochimique, les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit:

- **Système autonome sans stockage électrochimique**

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairage solaire suffisant pour son démarrage. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de l'éclairage solaire. Mais il faut bien dimensionner le générateur photovoltaïque de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairage le plus faible. Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de système autonome.

- **Système autonome avec stockage électrochimique**

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes. Elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque au cours de la journée. Donc, le stockage électrochimique est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques [27].

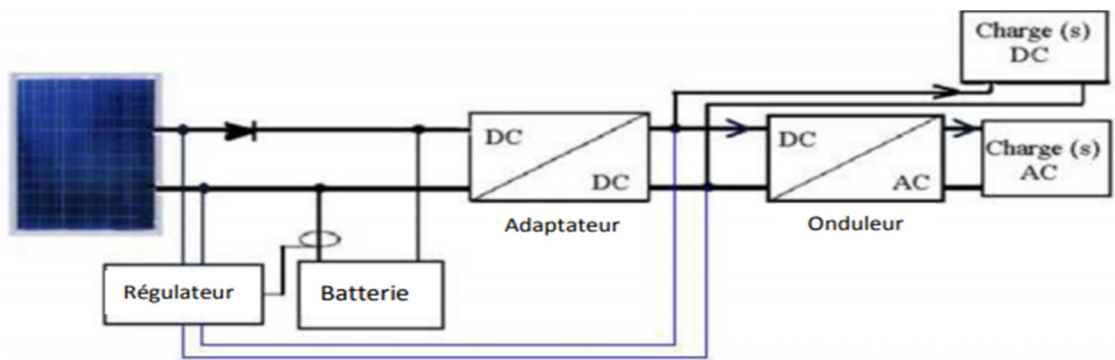


Figure (I.31): Système photovoltaïque avec stockage [27].

I.15. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

I.15.1. Avantages

- Une haute fiabilité, elle n'est pas composée par des pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées.
- Les panneaux photovoltaïques ont le caractère modulaire qui permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétique divers. Ils résistants à des applications de grand puissances.

- L'énergie photovoltaïque est une source d'énergie gratuite qui n'a pas besoin ni de combustion ni transport.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

I.15.2. Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes [20].

I.16. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu général sur l'énergie solaire photovoltaïque suite aux différentes technologies d'une cellule photovoltaïque et sa modélisation et d'un module photovoltaïque, dont l'objet est de faire ressortir les performances électriques et physiques de cette cellule photovoltaïque dans différentes conditions climatiques.

Chapitre II:

Modélisation

d'un Systèmes

photovoltaïques autonomes

II.1. Introduction

Après avoir étudié et citer les différents composants du système photovoltaïque, aussi que l'influence des paramètres de ses composants sur le système, nous procédons à la modélisation du système.

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié. La condition nécessaire c'est de connaître les données météorologiques au site, les données relatives (aux utilisations et aux équipements). Dans ce chapitre, nous représenterons le modèle de rayonnement solaire sur un plan horizontal, et sur un plan incliné, le modèle du système de stockage (batterie) et aussi les structures des systèmes photovoltaïques. Finalement la modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux [2].

II.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément, ou prenant plus ou moins de détails. Plusieurs modèles ont été proposés pour représenter la cellule photovoltaïque [28].

I.2.1. Modèles électriques d'une cellule photovoltaïque

On peut décrire une cellule photovoltaïque de manière simple (voir figure (II.1)) comme source idéale de courant qui produit un courant I_{CC} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule photovoltaïque, Si l'on connecte une charge résistive aux bornes du générateur photovoltaïque, Ce dernier débite une part de courant I_{CC} et le reste du courant I_D dans la diode, ce qui nous donne la relation suivant [29].

$$I_{PV} = I_{CC} - I_D \quad (II.1)$$

Le circuit électrique équivalent correspondant à une cellule solaire est:

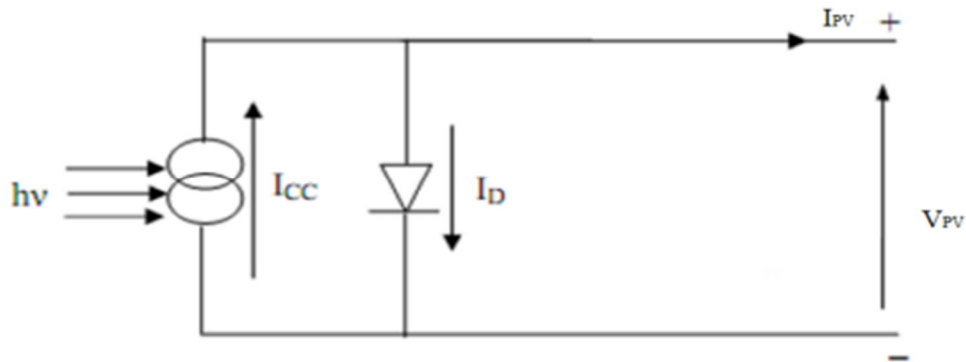


Figure (II.1): Cellule solaire idéale [29].

La caractéristique $I(V)$ d'une diode est une caractéristique non linéaire donnée par la relation:

$$I_D = I_S \left(\exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

$$I_{PV} = I_{CC} - I_D = I_{CC} - I_S \left(\exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

Avec

$$V_T = A \cdot K \cdot q \quad (\text{II.4})$$

Le modèle idéal est un modèle parfait par contre il reste toujours théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellule photovoltaïque dans des conditions réelles. Il reste toujours valable sous certaines hypothèses (on ne prend pas en considération les pertes de tension, courant de fuite...).

I.2.2. Modèle à une diode

Le modèle à une diode est le plus pratique dans littérature, on ajoute deux résistances une en série (R_S) et l'autre en parallèle (R_{sh}) au modèle idéal. Une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite (figure (II.2)). Donc on modélise cette perte de tension par la résistance (R_S) et le courant de fuite par la résistance (R_{sh}) [30].

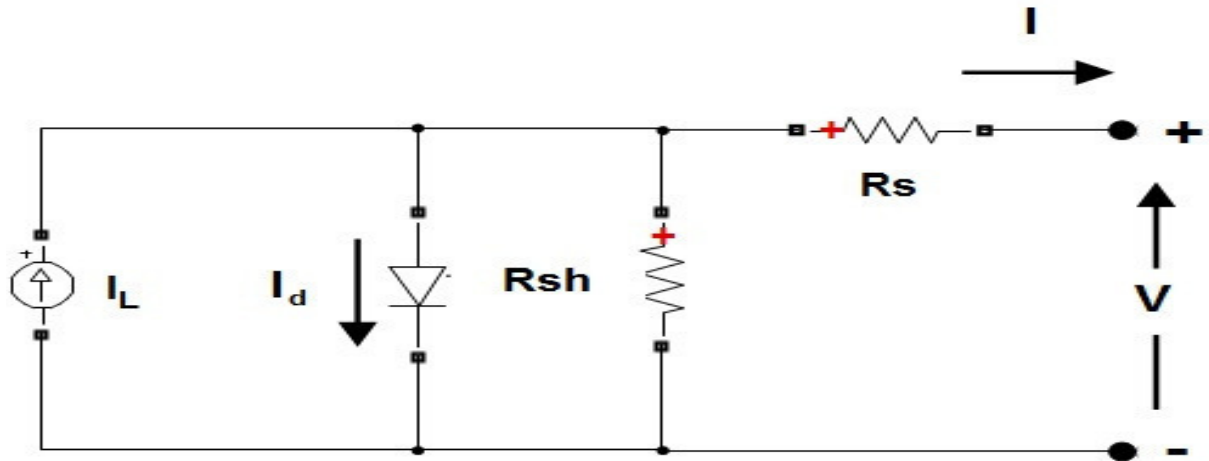


Figure (II.2): Schéma électrique équivalent du modèle à une diode [30].

On a:

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_D - I_{Sh} \quad (II.5)$$

Avec:

$$I_{Sh} = \frac{V_D}{R_{sh}} = \frac{V_{PV} + R_s \cdot I_{PV}}{R_{sh}} \quad (II.6)$$

D'où l'équation du courant qui est donnée par l'expression suivante :

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_S \left(\exp \frac{V_D}{V_T} \right) - 1 - \frac{V_{PV} + R_s \cdot I_{PV}}{R_{sh}} \quad (II.7)$$

Avec:

$$I_{Ph} = P_1 \cdot E_s \cdot [1 + P_2 \cdot (E_s - G_0) + P_3 \cdot (T_j - T_{ref})] \quad (II.8)$$

$$I_S = P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp \left(\frac{-E_g}{K \cdot T_j} \right) \quad (II.9)$$

Ainsi l'équation globale modélisant le générateur photovoltaïque est la suivante:

$$I_{PV} = P_1 \cdot E_s \cdot [1 + P_2 \cdot (E_s - G_0) + P_3 \cdot (T_j - T_{ref})] - P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp \left(\frac{-E_g}{K \cdot T_j} \right) \cdot \left(\exp \left(\frac{q(V_{PV} + R_s \cdot I_{PV})}{A \cdot K \cdot T_j} \right) - 1 \right) - \frac{V_{PV} + R_s \cdot I_{PV}}{R_{sh}} \quad (II.10)$$

La photopile a une résistance série \$R_s\$ dont l'influence est plus forte l'orsque l'appareil fonctionne dans la région de source de tension et une résistance parallèle \$R_{sh}\$ ayant une influence plus grande dans la région de fonctionnement en source de courant.

II.3. Modèle de rayonnement solaire

II.3.1. Rayonnement solaire sur un plan horizontal

Au niveau du sol rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales:

a) Rayonnement direct

Après des mesures des heures (i) nous avons l'équation statique pour le rayonnement direct.

$$S_H(i) = 1367. C(j). \sin \left[h(i). \exp \left(\frac{-T_L}{0.9 \times 9.41 \times M(i)} \right) \right] \quad (\text{II.11})$$

b) Rayonnement diffus

Pour un observateur le rayonnement diffus (D) par l'heure (i) est statistiquement donné par:

$$D_{H(i)} = \frac{1367}{3} . C(j) - \sin[h(i) - 2]. \exp[-0.5. \log^2 \left(\frac{T_c}{22.M(i)^{-0.65}} \right)] \quad (\text{II.12})$$

c) Rayonnement réfléchi

Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé Albédo ξ $0 \leq \xi \leq 1$.

d) Rayonnement global (ϕ_G)

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi:

$$\phi_G = S + D + R \quad (\text{II.13})$$

II.3.2. Rayonnement solaire sur un plan incliné

Une surface inclinée rapport à l'horizontale avec l'angle B reçoit une puissance énergétique répartie entre le direct, le diffus, et le réfléchi.

a) Rayonnement direct

Soit un lieu de latitude φ , le flux est défini par:

$$R_b = \frac{S_B}{S_H} = \frac{\cos(\varphi - \beta). \cos(\delta). \cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta). \sin(\delta)}{\cos(\varphi). \cos(\delta). \cos(\omega) + \sin(\varphi). \sin(\delta)} \quad (\text{II.14})$$

Alors le flux direct pour le plan incliné B.

$$S_B = R_b . S_H \quad (\text{II.15})$$

$$R_b = \frac{S_B}{S_H} = \frac{\cos(\varphi - \beta). \cos(\delta). \cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta). \sin(\delta)}{\cos(\varphi). \cos(\delta). \cos(\omega) + \sin(\varphi). \sin(\delta)} S_H \quad (\text{II.16})$$

b) Rayonnement diffus

Le flux à une inclinaison β et l'attitude φ capté par une surface orientée face au Sud-est donné par le modèle suivant:

Pour l'heure i : utilisons le modèle « WILLMOTT »

$$D_b = D_H. \left[F(i). \frac{1 + \cos \beta}{2} + 1 - F(i). \frac{\cos \theta(i)}{\sinh(i)} \right] \quad (\text{II.17})$$

Avec:

$$F(i) = 1 - K_T(i). \left[1 - \frac{S_H}{G_H} \right] \quad (\text{II.18})$$

$$K_T(i) = \frac{|\theta_{GH}(i)|}{\theta(i)} \quad (\text{II.19})$$

$K_T(i)$: Coefficient de sérénité.

$\theta(i)$: Angle d'incidence du rayon direct par rapport au incliné.

c) Rayonnement réfléchi

La fraction du flux réfléchi par le sol sur la surface inclinée est proportionnelle au flux global horizontal.

$$R_B = \phi_{GH} \left[\xi \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \right] \quad (\text{II.20})$$

d) Rayonnement global incliné

Il est la superposition des flux direct, réfléchi et refus dont il est la somme des trois composantes:

$$\phi_{GH} = S_B + D_\beta + R_B \quad (\text{II.21})$$

On peut calculer le flux solaire global par la relation suivante pour un plan incliné d'angle B.

$$\phi_{GH} = R \cdot \phi_{GH} \quad (\text{II.22})$$

D'où:

$$R = \frac{\phi_{GH}}{\phi_{GH}} = \left(1 - \frac{D_H}{\phi_{GH}} \right) \cdot R_b \frac{D_H}{\phi_{GH}} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \xi \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (\text{II.23})$$

On connaissant le flux global et les composantes du flux pour un plan horizontal on peut déterminer le flux global incliné reçu par un plan [31].

$$\phi_G = R \cdot \phi_{GH} \quad (\text{II.24})$$

II.4. Modèle de la température

a) Température de jonction

La température de la jonction T_C de la cellule est donnée par la relation suivant:

$$T_C = T_a + \frac{NOCT-20}{800} E_G \quad (\text{II.25})$$

Avec:

NOCT: la température nominal de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal operating Cell temperature) et T_a est La température ambiante.

b) Température ambiante

Le modèle de la température ambiante est représenté grâce aux données température maximale et minimale de la journée.

Nous supposons que la température maximale se produit toujours deux heures après midi et la température minimale quand il commence à faire jour (levé de soleil). Entre ces deux points extrêmes, une fonction a été utilisée pour caractériser la variation de cette température. Le profil journalier de température ambiante est déterminé à partir des températures minimale et

maximale de la journée, cette température s'exprime à une heure TL de la par l'équation suivante:

$$T_a = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \cos \left[\frac{14 - TL}{14 - TL_L} \pi \right] + T_{\text{moy}} \quad (\text{II.26})$$

c) Variation du courant de saturation

Le courant de saturation I_0 dépend de la température de jonction et peut être exprimé par la relation suivante:

$$I_0 = A_0 T_c^3 e^{(-E_g / (K \cdot T_c))} \quad (\text{II.27})$$

Pour le silicium monocristallin $A_0 = 2.110.10^3$

d) Variation du courant court-circuit

Le courant de court-circuit I_{cc} dépend de la température de jonction, de ce fait elle est représentée par la relation empirique suivante:

$$I_{cc} = K_1 \cdot G \cdot [1 + K_2(G - G_0) + K_3(T_c - T_0)] \quad (\text{II.28})$$

Avec:

T_0 : La température de référence (298 K).

K_1 , K_2 et K_3 sont des constantes dépendant de la nature de matériau de la cellule et déterminées expérimentalement par le constructeur.

e) Variation de la tension à circuit ouvert

De la tension de circuit ouvert dépend de la température du module et de l'éclairement sont données par l'équation suivante [2]:

$$V_{co} = V_{co} + \beta \cdot \Delta T + \alpha(G - G_0) \quad (\text{II.29})$$

f) Rendement énergétique maximum

Le rendement énergétique maximum d'un générateur photovoltaïque est le rapport de la puissance P_m maximale dissipée dans la charge et la puissance du rayonnement solaire incident.

$$\eta_{pv} = \frac{P_m}{\phi_s \cdot S} \quad (\text{II.30})$$

Avec:

ϕ_s : Flux globale [W/m^2].

S : Surface de générateur [m^2].

Ce rendement dépend plusieurs facteurs :

- Réflexion à la surface
- Température de jonction des cellules.
- Type de matériau utilisé et technique de fabrication.

- d. La résistance série et parallèle responsables des pertes par effet Joule.
- e. Absorption incomplète et excès d'énergie des photons absorbés [31].

II.5. Modélisation de stockage

Il existe de nombreux types d'éléments de batterie ainsi le nombre très varié de paramètres qui interviennent, une représentation très empirique du comportement de la batterie peut être établie. Dans une installation photovoltaïque est utilisée une batterie d'accumulateur au plomb. Jusqu'à maintenant, il existe plusieurs modèles de la charge de batterie ont été proposés.

Le modèle le plus utilisé pour dimensionner le parc de batteries est celui de Bogdan et Salameh 1996 qui permet de calculer la capacité de la batterie en fonction de la puissance produite par le GPV et la puissance requise par la charge.

a) Modèle de la charge de la batterie

Dans l'état de charge la puissance de générateur PV est plus grande que la charge, la capacité des batteries au temps t peut être décrite par:

$$C_{bat}(t) = C_{bat}(t-1) \cdot (1 - \sigma) + \left(P_{pv}(t) - \frac{P_L(t)}{\eta_{inv}} \right) \cdot \eta_{bat} \quad (\text{II.31})$$

$C_{bat}(t)$ et $C_{bat}(t-1)$ sont les quantités de la charge et la décharge des batteries au temps t et $(t-1)$ respectivement, σ est le taux horaire de la charge spontanée, P_{pv} est la puissance du générateur PV, P_L est la charge demandée au temps t , η_{ond} et η_{bat} sont les rendements de l'onduleur et de batterie successivement.

Le rendement pendant la charge de la batterie est 0.65-0.85 selon le chargeant courant, par contre le rendement pendant la décharge a été mis égal à 1.

b) Modèle de la décharge de la batterie

Quand la demande de charge est plus grande que la puissance produite, la capacité des batteries au temps (t) peut être exprimée comme suite:

$$C_{bat}(t) = C_{bat}(t-1) \cdot (\sigma - 1) + \left(\frac{P_L(t)}{\eta_{inv} - P_{pv}} \right) \quad (\text{II.32})$$

A tout moment, la quantité de charge des batteries est sujette aux contraintes suivantes:

$$C_{batmin} \geq C_{bat}(t) \geq C_{batmax}$$

Ici, la capacité de la batterie maximale prend la valeur de la capacité nominale de la batterie ($C_{batmin} \geq C_{batmax}$), et la capacité minimum est déterminée par le profondeur de la charge (DOD):

$$C_{batmin} = DOD \cdot C_{bat.N} \quad (\text{II.33})$$

SOC (La valeur maximale de l'état de charge) est égal à 1, et le minimum est déterminé par le maximum de profondeur de décharge:

$$\text{SOC}_{\min} = 1 - \text{DOD} \quad (\text{II.34})$$

La durée de vie de la batterie peut être maximisée si le DOD prend des valeurs de 30 à 50% selon les spécifications du fabricant.

La capacité de stockage est une fonction de la charge demandée et de son autonomie.

Elle peut être estimée par la relation suivante:

$$C_{\text{bat}} = \frac{E_L \cdot N_a}{\eta_{\text{bat}} \cdot F_{\text{déch}} \cdot \text{DOD}} [\text{Wh}] \quad (\text{II.35})$$

Avec:
$$C_{\text{bat}} [\text{Ah}] = \frac{C_{\text{bat}}}{V_b} [\text{Wh}] \quad (\text{II.36})$$

DOD : La profondeur de décharge.

c) La tension de la batterie

Le modèle suivant, décrit la relation entre le voltage, courant et l'état de charge. Ce modèle basé sur le schéma électrique de (figure (II.3)).

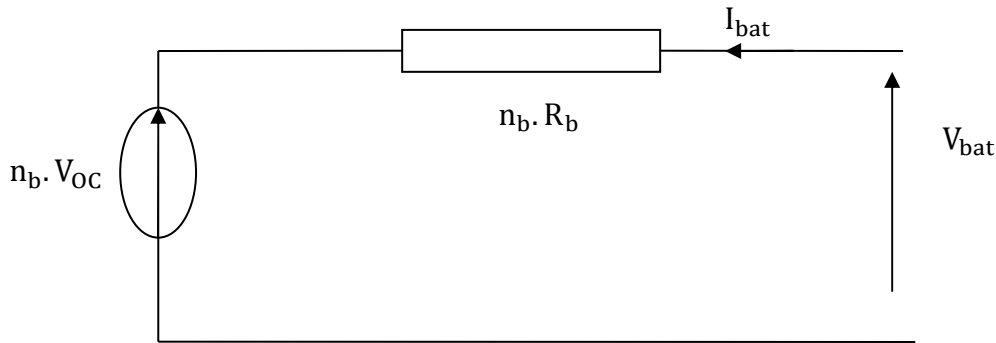


Figure (II.3): Schéma électrique de batterie.

Pour n batteries en séries, nous pouvons écrire l'équation:

$$V_{\text{bat}}(t) = \eta_b \cdot V_{\text{co}}(t) + \eta_b \cdot I_{\text{bat}}(t) \cdot R_{\text{bat}}(t) \quad (\text{II.37})$$

$V_{\text{co}}(t)$: la tension de circuit ouvert est exprimée comme un logarithme de la fonction de l'état de charge.

$$V_{\text{co}}(t) = VF + b \cdot \log(\text{SOC}(t)) \quad (\text{II.38})$$

Où:

VF: est la force électromotrice.

b: est un constant empirique.

$R_{\text{bat}}(t)$: est principalement dû à deux composants, à savoir, la résistance de électrode, $R_{\text{électrode}}$ et la résistance de électrolyte, $R_{\text{électrolyte}}$.

$$R_{\text{bat}}(t) = R_{\text{électrode}} + R_{\text{électrolyte}} \quad (\text{II.39})$$

La variation de $R_{\text{électrode}}$ et $R_{\text{électrolyte}}$ en fonction de l'état de charge SOC peut être exprimée par:

$$R_{\text{électrode}} = r_1 + r_2 \cdot (\text{SOC}(t)) \quad (\text{II.40})$$

$$R_{\text{électrolyte}} = [r_3 - r_4(\text{SOC}(t))]^{-1} \quad (\text{II.41})$$

Sont Pour les constantes expérimentales des batteries au plomb, ces paramètres ont des valeurs différentes pour les modes de charge et de décharge. Les paramètres sont regroupés dans le tableau suivant:

Tableau (II.1): Différentes paramètres pour les modes de charge et de décharge

Paramètre	Mode de charge	Mode de décharge
VF	13.250 V	12.662 V
B	0.810	0.724
r₁	0.062 Ohms	0.055 Ohms
r₂	0.046 Ohms	-0.010 Ohms
r₃	95.638 Ohms ⁻¹	4.270 Ohms ⁻¹
r₄	52.671 Ohms ⁻¹	-100.730 Ohms ⁻¹

d) Courant de batterie

Quand la puissance du générateur PV est plus grande que la charge, les batteries sont à l'état de charge, le courant de charge des batteries au temps (t) peut être décrit par:

$$I_{\text{bat}}(t) = \frac{P_{\text{bat}}(t)}{V_{\text{bat}}(t)} - \frac{E_L(t)/\eta_{\text{inv}}}{V_{\text{bat}}} \quad (\text{II.42})$$

Si la puissance du générateur PV ne peut pas répondre à la demande de charge, le courant de décharge de la batterie est [32].

$$I_{\text{Bat}}(t) = -\frac{(E_L(t)/\eta_{\text{inv}})}{V_{\text{Bat}}(t)} \quad (\text{II.43})$$

e) Rendement de la Batterie

Le rendement de la batterie se calcule par la relation suivante:

$$\eta_{\text{inv}} = \frac{P_{\text{fourni}}}{P_{\text{incid}}} \quad (\text{II.44})$$

Dans le cas le rendement est égal à 85%, la tension nominale est de 2V et la capacité à aménager est de 100A/h. Ainsi la puissance fournie par la batterie peut s'écrire comme suit [40]:

$$P_{\text{fourni}} = \eta_{\text{inv}} \cdot P_{\text{incid}} \quad (\text{II.45})$$

II.6. Commande MPPT

MPPT, (Maximum Power Point Tracking), son nom indique le point de puissance maximale du générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés aux générateurs PV ou même aux éoliennes.

II.6.1. Principe du MPPT

La commande MPPT est liée à l'étape adaptative intermédiaire, le générateur photoélectrique peut fonctionner pour produire une puissance maximale en continu. Ainsi, la commande du convertisseur place le système à son point de fonctionnement maximum (V_{mpp}, I_{mpp}), quelles que soient conditions météorologique (température et éclairage).

II.6.2. Classification des commandes MPPT

II.6.2.1. MPPT directs

Ces méthodes utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des GPV.

Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode « Perturb & Observe », l'incrément de conductance... [33].

II.6.2.2. MPPT Indirect

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement...) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum. Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et donc difficile à généraliser : la méthode d'ajustement de courbe, la méthode « look-up table », la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court circuit [34].

II.6.3. Dérivant Algorithmes de MPPT

- 1) La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche de MPPT, parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et de courant du PV, V_{pv} et I_{pv} respectivement [35].
- 2) L'algorithme d'incrément de la conductance est basé sur le fait que le point de puissance maximale (MPP) n'est atteint que si est nulle.
- 3) La commande à base de la logique floue a été utilisée dans les systèmes de suivi pour le point de puissance maximale. C'est une chose puissante qui ne nécessite pas une connaissance précise du modèle mathématique du système [36].

- 4) Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension V_{oc} Cet algorithme est basé sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert et la tension optimale [37].
- 5) Algorithme à Base de la Mesure d'une Fraction du Courant I_{cc} Cette technique est basé sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant optimal [38].

II.7. Structures des systèmes photovoltaïques

II.7.1. Structure avec hacheur et onduleur

Le générateur photoélectrique est connecté à un bus DC via un convertisseur DC-DC. L'onduleur donne une tension nominale. Il existe plusieurs architectures pour les dispositifs permettant de convertir la tension continue issue du générateur photovoltaïque en une tension sinusoïdale utilisable.

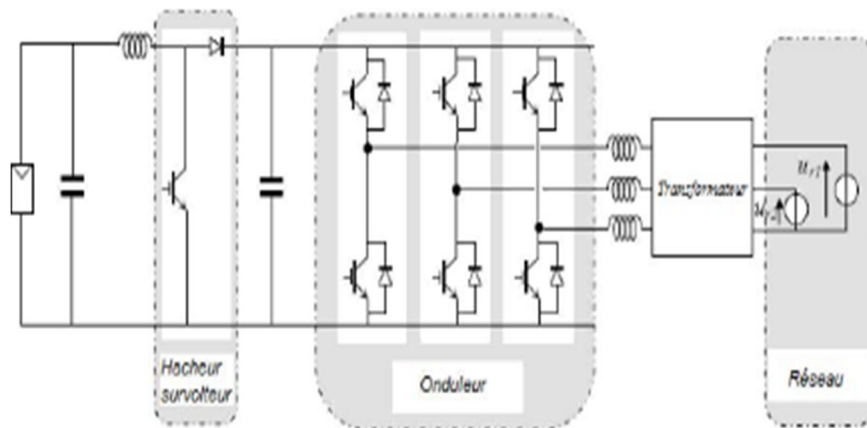


Figure (II.4): Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé [1].

Figure(II.4) représente un hacheur qui élève la tension. Il est difficile d'élever la tension de sortie des modules plus de 4 à 5 fois pour obtenir une tension continue suffisamment grande, en raison de la résistance de l'inductance. Nous ajoutons un onduleur pour avoir une sortie sinusoïdale, est un transformateur pour élever cette tension au niveau désiré (selon le réseau) et pour assurer l'isolation entre la partie production et la partie utilisation.

L'avantage de ce système c'est que les batteries peuvent être facilement connectées au bus continu pour obtenir un système autonome.

II.7.2. Structures des systèmes à connexion directe

Les onduleurs ne se limitent plus seulement à transformer la puissance continue générée par les panneaux solaires en puissance alternative sous forme d'une tension (DC) de fréquence souhaitée mais ils exploitent sinusoïdale délivrée par le GPV en le forçant à fonctionner à son point de également la puissance assurent une surveillance fiable* du réseau -*pour puissance maximum.

II.7.2.1. Installation mono-onduleur (onduleur central)

Cette configuration est utilisée dans les petites installations avec des unités du même type ayant la même exposition. Le fait d'avoir un réflecteur présente des avantages économiques, ce qui réduit les coûts d'investissement et de maintenance initiale.

La panne de l'onduleur peut entraîner l'arrêt complet de l'installation. Cette solution n'est pas très adaptée pour étendre l'installation photoélectrique, car elle augmente les problèmes de protection contre les surintensités.

II.7.2.2. Installation avec un onduleur pour chaque string (onduleur string)

Dans une installation de taille moyenne, chaque chaîne peut être connecté directement à son onduleur et fonctionne donc selon son indicateur de puissance maximale. Dans cette configuration, la diode, qui empêche la source de circuler en sens inverse, est généralement incluse dans l'onduleur. Ce dernier diagnostique la production et garantit également la protection.

II.7.2.3. Installation multi-onduleurs (Onduleur modulaire)

Chaque unité possède un seul réflecteur. Pour les installations plus importantes, tous les onduleurs sont connectés en parallèle côté AC. Des onduleurs modulaires sont installés à proximité immédiate de l'unité.

Dans les grandes installations, le champ photoélectrique est généralement divisé en plusieurs parties (sous-champs). Par rapport à la configuration précédente, le nombre d'onduleurs est dans ce cas inférieur, entraînant une réduction conséquente de l'investissement et des coûts d'entretien.

De plus, la défaillance d'un onduleur n'implique pas la perte de production de l'ensemble de l'installation (comme dans le cas de l'onduleur unique) mais du sous-champ correspondant [1].

II.8. Etude de l'adaptation de l'énergie photovoltaïque

Actuellement, la connexion directe du panneau solaire photovoltaïque à la charge est la forme de principe de fonctionnement la moins chère et la plus répandue (figure (II.5)). Il faut vérifier au préalable que la charge accepte un contact direct avec le générateur. Cela continue le panneau photovoltaïque.

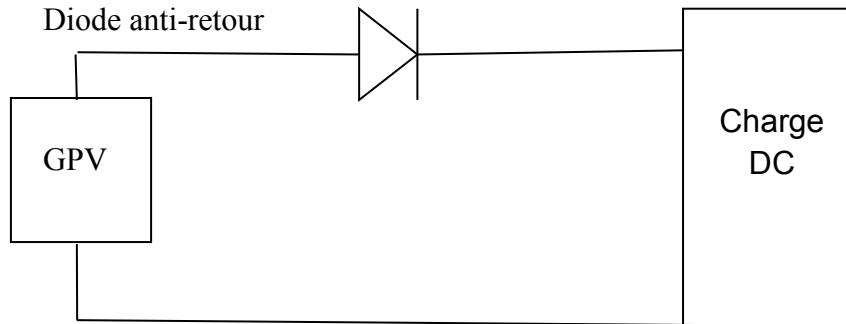


Figure (II.5): Connexion directe GPV-charge via une diode anti-retour.

Une connexion directe ne permet pas de faire fonctionner un panneau photovoltaïque à sa tension optimale (puissance maximale). Cela nécessite une adaptation entre la source photovoltaïque et la charge (figure (II.6)). Les convertisseurs statiques adaptés à l'énergie photovoltaïque sont souvent appelés « convertisseurs solaires ». Ils ont comme objectif d'adapter l'énergie électrique qui provient des panneaux photovoltaïques pour pouvoir alimenter des charges continues ou alternatives ou bien alors de charger des batteries [39].

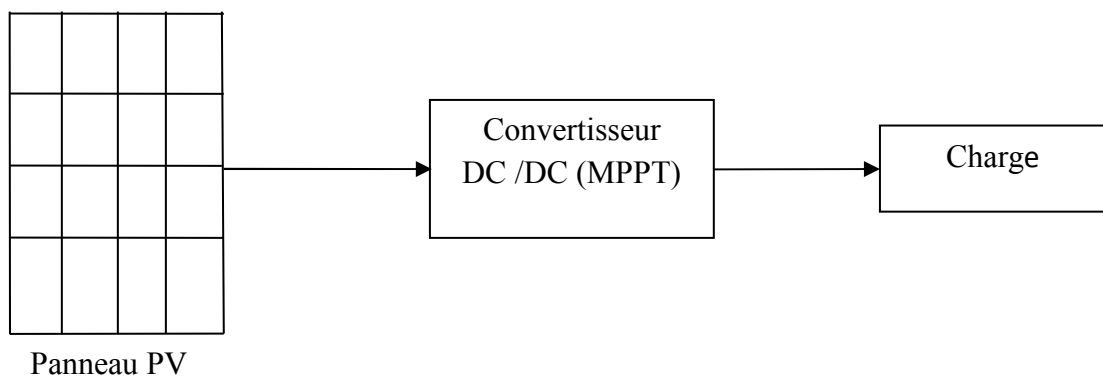


Figure (II.6) : Système photovoltaïque autonome avec convertisseur d'adaptation MPPT

II.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la partie de la modélisation de chaque composant du système photovoltaïque autonome complète des modèles élaborés (rayonnement solaire, température, stockage, batteries, le MPPT, structures des systèmes PV).

Cette modélisation est une étape fondamentale permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi les paramètres constituants. Dans un système énergétique photovoltaïque, on désire toujours travailler au voisinage du point de puissance maximale MPP, afin de minimiser au maximum les pertes en énergie produite.

Chapitre III:

*Résultats
de simulation*

III.1. Introduction

Je me souviens que dans les deux chapitres précédents, nous avons présenté une étude sur le système photovoltaïques et tout ce qui s'y rapporte et la modélisation de chaque composant du système.

Dans ce cadre nous avons utilisé un outil informatique Matlab qui permet de déterminer à chaque instant le fonctionnement et la caractérisation des différents éléments qui constitue le système photovoltaïques.

III.2. Application des systèmes PV autonomes

On peut distinguer les systèmes photovoltaïques autonomes selon leur puissance et leurs applications:

- Alimentation autonome de produits grand public (lampes solaires, bornes de jardin,...) par énergie photovoltaïque de faible puissance.
- Electrification de bâtiments (quelques centaines de watts à quelques kW) : résidence secondaire, écoles et centres de santé dans les pays en développement,...
- Alimentation pour des applications professionnelles (quelques dizaines de watts à quelques kW) : signalisation, protection cathodique, télécom [40].

III.3. Formulation du problème

Un modèle de système photovoltaïque triphasé autonome de 140 kW est envisagé pour l'analyse l'amélioration des performances énergétiques système PV autonome. À cet égard, plusieurs questions doivent être examinées. Premièrement, Nous devons calculer la besoin électrique journalier pour le pôle 1 et la puissance et il doit connaître le nombre de panneaux nécessaires pour répondre à l'exigence. Deuxièmement, présentation de la structure du modèle et composants principaux du modèle. Troisièmement, un modèle de simulation dans le cadre de référence d-q est essentiel pour la commodité de la conception du contrôleur. Enfin, certains paramètres clés du modèle doivent être analysés et ajustés en fonction du résultat de la simulation.

III.3.1. Zone d'installation

Le centre universitaire Salhi Ahmed à Naâma se situe au côté ouest de chemin de fer au centre ville Naâma.

Lat: 33.275

Long:-0.321

Alt: 1173m

III.3.1.1. Spécification de la zone de Naâma

Tableau(III.1): Spécification de la zone de Naâma[41].

Mois	Température de l'air (°C)	Rayonnement solaire quotidien oriental (Kwh/m ² /j)	Pression atmosphérique (kPa)	Vitesse de vent (m/s)	Température du sol (°C)	Degrés-jours de chauffage 18°C (°C – j)	Degrés-jours de climatiseur 10°C (°C – j)
Janvier	5,2	2,79	89,4	4,2	4,7	397	0
Février	7,0	3,88	89,2	4,2	6,9	308	0
Mars	10,4	4,98	89,1	4,4	10,9	236	12
Avril	13,6	6,36	88,8	4,5	14,7	132	108
Mai	18,3	7,20	88,9	4,3	19,8	0	257
Juin	23,9	7,64	89,1	4,1	25,8	0	417
Juillet	28,1	7,72	89,2	3,9	30,0	0	561
Aout	27,6	6,73	89,2	3,8	29,5	0	546
Septembre	22,4	5,52	89,2	3,7	23,8	0	372
Octobre	16,7	3,96	89,2	3,8	17,2	40	208
Novembre	10,2	2,89	89,2	4,2	10,1	234	6
Décembre	6,4	2,46	89,3	4,2	6,0	360	0
Annuel	15,9	5,18	89,1	4,1	16,7	1706	2487

III.3.1.2. Charge

Au centre de l'Université de SALHI AHMED Deux pôles, quant au Pôle 1, il contient plusieurs équipements pédagogiques en plus de l'administration et quelques autres équipements comme les salles et laboratoires et la bibliothèque... .

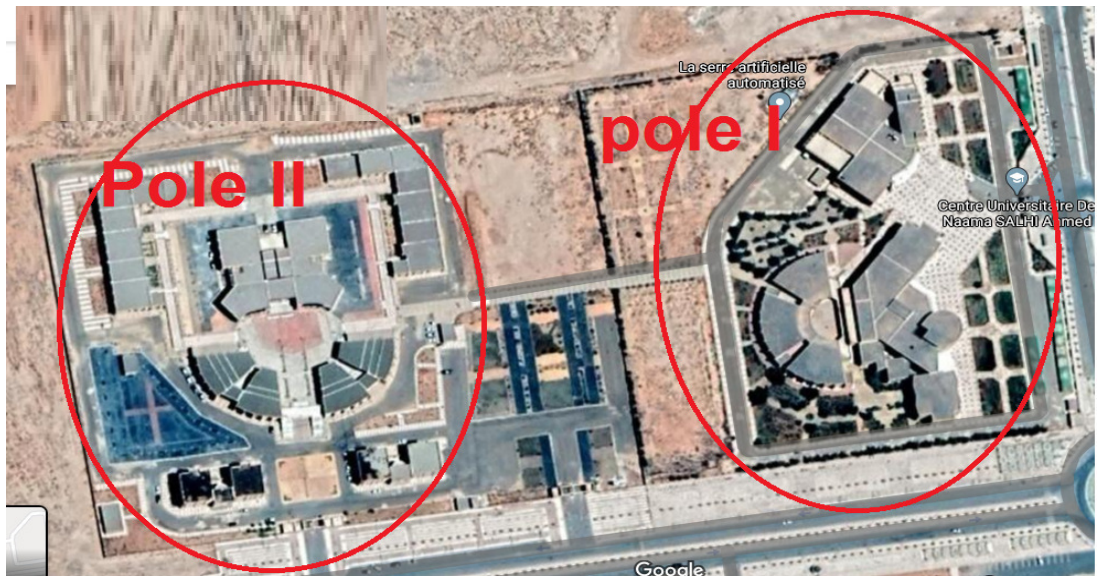


Figure (III.1): Position de pole I.



Figure (III.2): Structure du pole I.

En fonction de la facture d'électricité de l'année 2019 du centre, nous avons pu déterminer approximativement la valeur de la charge consommée par le Pole 1 par jour.

Donc le besoin électrique journalier: $E_c = 568.76 \text{Kwh/j}$.

III.3.1.3. L'irradiation journalière

Selon Logiciel PVGIS nous avons découvert l'irradiation journalière de la ville de Naâma pour l'année 2019.

L'irradiation journalière: $I_r = 6.2486 \text{ Kwh/m}^2/\text{j}$.

Puissance crête:

$$P_c = \frac{E_c * G_0}{C_p * I_r} = \frac{568.76 * 1000}{0.65 * 6.2486} = 140.034 \text{ Kw}_c \quad (\text{III.1})$$

III.4. Présentation de la structure du modèle

Compte tenu de certains systèmes photovoltaïques triphasés typiques connectés au réseau [42, 43, 44], le système photovoltaïque proposé de 140 kW autonome est conçu pour comprendre trois parties: une partie DC (y compris les cellules photovoltaïques et les convertisseurs DC-DC (Boost)), des onduleurs triphasés, et Filtres LC. La partie DC a des capacités de récupération de l'électricité à partir de l'énergie solaire et du suivi du point de puissance maximale (MPPT), qui est le même qu'un système PV monophasé. Les onduleurs triphasés et les filtres LC sont utilisés pour convertir le courant continu et la tension d'alimentation en courant alternatif triphasé. Enfin, le courant alternatif alimente une charge triphasée basse tension.

III.5. Composants principaux du modèle

Un schéma du circuit électrique du modèle de système PV autonome de 140 kW est illustré à sur (la figure (III.3)), nous pouvons voir que les cellules PV, l'onduleur triphasé, le filtre LC, et la charge sont physiquement connectés. Dans cette section, le modèle et la conception des paramètres pour les pièces principales, y compris la partie DC, l'onduleur triphasé, et le filtre LC sont présentés et discutés.

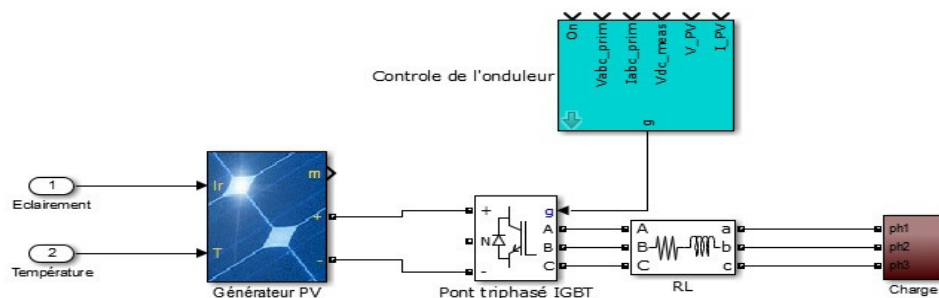


Figure (III.3): Un schéma du circuit électrique du modèle de système PV autonome de 140 kW.

III.5.1. Partie DC

La partie DC comprend principalement des modèles de cellules PV et un modèle de convertisseur DC-DC (Boost) dans lequel un algorithme de contrôle MPPT Perturber et Observer (P&O) est intégré. Comme le montre (la figure (III.3)), les variables d'entrée du module de modèle PV sont l'éclairement et la température ambiante, tandis que la sortie du module de modèle PV est un signal de tension. Les signaux de tension étant différents des tensions physiques dans l'environnement de simulation Power Sim basé sur la physique, une source d'alimentation à tension contrôlée est ajoutée pour convertir le signal de tension de sortie PV en tension de sortie physique. Une topologie de suralimentation DC-DC composée de condensateurs, d'inductances, d'IGBT / diode et de diodes est conçue.

De plus le convertisseur peut augmenter la tension de sortie DC ($V_{mpp} = 729 \text{ V}$) du générateur photovoltaïque. Sans perte de généralités, un algorithme P&O MPPT est utilisé pour suivre le point de puissance maximale de la récupération d'énergie d'un panneau PV. L'organigramme détaillé de l'algorithme P&O avec convertisseurs de puissance est illustré à (la figure (III.4)). Comme le montre l'organigramme, le contrôleur MPPT peut modifier la (tension / le courant) de sortie du générateur photovoltaïque. La partie DC comprend principalement des modèles de cellules PV et un modèle de convertisseur DC-DC boost dans lequel un perturber et l'algorithme de contrôle MPPT d'observation (P&O) est intégré. L'organigramme détaillé de l'algorithme P&O avec convertisseurs de puissance est illustré à (la figure (III.4)). Comme le montre l'organigramme, le contrôleur MPPT peut modifier la tension / le courant de sortie du générateur photovoltaïque en fonction d'une stratégie de recherche de puissance maximale. En comparant la puissance générée P_k à l'instant courant avec la puissance générée précédemment P_{k-1} au dernier instant, la tension / le courant est diminué ou augmenté en une seule fois jusqu'à ce que le point de puissance de pointe soit localisé. Les paramètres des principaux composants de cette topologie de convertisseur boost sont répertoriés ci-dessous.

- a) Capacité de filtrage DC: $1500 \mu\text{F}$.
- b) Inductance de suralimentation DC: 1 mH .
- c) Capacité du bus DC: $3000 \mu\text{F}$.
- d) Commutateur: IGBT / Diode.

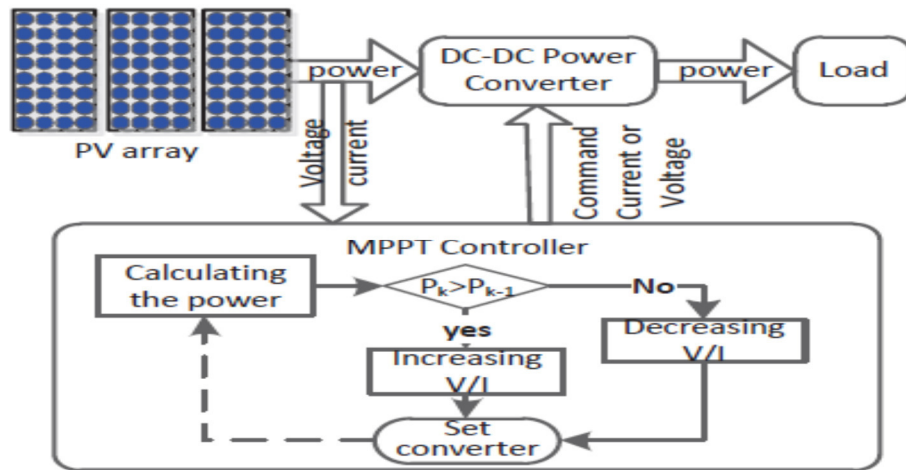


Figure (III.4): L'organigramme détaillé de l'algorithme P&O avec convertisseurs de puissance [45].

III.5.1.1. Fiche technique du panneau solaire

Pour notre travail on va choisir une module photovoltaïque de type monocristallin parce que il contient des avantages pour (les prix des modules moins cher et un rendement moyen). SunPower SPR-445J-WHT-D, est choisi pour une MATLAB modèle de simulation. Le module fournit 445W de puissance nominale maximale.

Tableau (III.2): Le tableau montre ses Caractéristiques électriques et mécaniques.

Caractéristiques électriques	Valeurs	Caractéristiques mécaniques	Valeurs
Puissance Maximum	445W	Longueur	2067.0 mm
Tension à P_{max}	76.7V	Largeur	1046.0 mm
Courant à P_{max}	5.8A	Zone du module	2.16m ²
Tension à circuit-ouvert V_{oc}	90.5V	-	-
Courant à court-circuit I_{cc}	6.21A	-	-

Le générateur photovoltaïque se compose de 37 chaînes parallèles. Chaque chaîne possède 5 modules Sun Power SPR-445J-WHT-D connectés en série [46].

III.5.2. Convertisseur DC-DC

Le convertisseur est modélisé à l'aide d'un pont IGBT à 3 niveaux contrôlé par PWM. Le starter inverseur LC et un petit filtre d'harmoniques C sont utilisés pour filtrer les

harmoniques générées par le pont IGBT. Un transformateur triphasé 250 kVA 250 V / 25 kV est utilisé pour connecter l'onduleur au réseau de distribution.

III.5.3. Onduleur triphasé

L'onduleur triphasé est utilisé pour convertir la tension DC en AC triphasé. De plus, le module PLL (Phase Lock Loop) à l'intérieur est utilisé pour mesurer la phase principale du réseau et contrôler l'entrée PWM pour l'onduleur. Les principaux paramètres de configuration de l'onduleur triphasé sont répertoriés ci-dessous.

- 1) Nom du module: Pont universel.
- 2) Nombre de bras de pont: 3.
- 3) Commutateur: IGBT / Diode.

III.5.4. Filtre

L'inductance de l'onduleur LC et un petit filtre d'harmoniques C sont utilisés pour filtrer les harmoniques générées par le pont IGBT. Ce filtre est utilisé pour filtrer le signal PWM d'origine de la sortie de l'onduleur et améliorer la qualité de l'énergie de la sortie de puissance de l'onduleur.

III.5.5. Modèle de contrôleur d'onduleur triphasé

Étant donné que les générateurs d'énergie renouvelable distribuée tels que le PV et les éoliennes sont sensibles aux facteurs ambiants tels que l'éclairage, la vitesse du vent et d'autres facteurs météorologiques, leur valeur de puissance de sortie est non constante et discontinue.

Ainsi, l'objectif principal de ces énergies renouvelables est de maximiser leur récupération d'énergie. Par conséquent, une solution générale pour une commande de puissance renouvelable est la commande PQ, qui suit les courants de référence en contrôlant le courant de puissance active et le courant de puissance réactive.

Si la tension de phase de sortie de l'onduleur lié au réseau est notée u (également la tension de réseau), et U_m est notée comme l'amplitude de la tension de phase, nous obtenons:

$$\begin{bmatrix} \mu_a \\ \mu_b \\ \mu_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m \cos(\omega t) \\ U_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ U_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{III.2})$$

La transformation d-q (ou nommé transformation du Park) est défini comme:

$$T_{abc \rightarrow dq} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

La conversion avec la transformation d-q fournit:

$$\begin{bmatrix} \mu_d \\ \mu_q \end{bmatrix} = T_{abc \rightarrow dq} \begin{bmatrix} \mu_a \\ \mu_b \\ \mu_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

Comme le montre l'équation (III.4), les deux éléments du référentiel d-q ne sont pas couplés. U_d est une constante, tandis que $u_q = 0$.

Définir le courant de sortie de l'onduleur triphasé comme i , le composant d'axe d et le composant d'axe q par transformation d-q sont i_d et i_q individuellement. Parce que $u_q = 0$:

$$\begin{cases} i_{dref} = P_{ref} / \mu_d \\ i_{qref} = Q_{ref} / \mu_q \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Comme on peut le déduire de l'équation (III.5), la référence active et la puissance réactive peut en fait être suivie en suivant i_{ref} de référence. De plus, la puissance active dépend de i_d (courant de puissance active) et la puissance réactive dépend de i_q (courant de puissance réactive). Sans perte de généralité, le système PV power génère uniquement de la puissance active (le facteur de puissance de l'onduleur est défini sur 1) et la puissance active de référence suit le point de puissance maximale des panneaux PV.

Sur la base des déclarations ci-dessus, un PWM sinusoïdal (SPWM) Le contrôleur PQ basé est conçu pour le modèle de simulation PV proposé, le module de contrôle PQ prend la sortie de puissance active des panneaux PV comme commande de puissance de référence, puis la convertit dans une commande actuelle de coordonnées dq et entrée dans le module de contrôle actuel. Le module de détection et de verrouillage de phase (SPLL) est utilisé pour suivre l'angle de phase de la tension du réseau et convertir la tension du réseau et le courant de l'inductance dans le cadre d-q. De plus, le module de contrôle actuel prend en entrée toutes les variables de sortie du contrôle PQ et du SPLL. Plus loin, il convertit le signal PWM correspondant en une forme d'onde triphasée AC.

Le système de contrôle contient cinq sous-systèmes principaux basés sur Matlab-Simulink:

III.5.5.1 Contrôleur MPPT

Le contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking) est basé sur la technique de perturbation et d'observation. Ce système MPPT fait varier automatiquement le signal de référence V_{DC} du régulateur V_{DC} de l'onduleur afin d'obtenir une tension continue qui extrait la puissance maximale du générateur photovoltaïque.

La méthode Perturbé & Observe (P&O) est l'une des méthodes les plus utilisées. C'est une méthode itérative permettant d'obtenir le MPP : on mesure les caractéristiques du panneau PV

puis on induit une petite perturbation sur la tension (ou le courant) afin d'analyser la variation de puissance qui en résulte [47].

III.5.5.2. Régulateur V_{DC}

Ce module permet de déterminer la référence I_d (courant actif) requise pour le régulateur de courant. Le régulateur V_{DC} de tension positive disponible dans différents formats d'encapsulation pour s'adapter à toute exigence de conception [48].

Régulateur de type PI

Les régulateurs Proportionnel-Intégral « PI » sont largement utilisés dans l'industrie en raison de leur performance et de leur rapidité de calcul. Leur principe de fonctionnement est de comparer les valeurs réelles mesurées avec les valeurs de référence et de stabiliser le système à réguler [49].

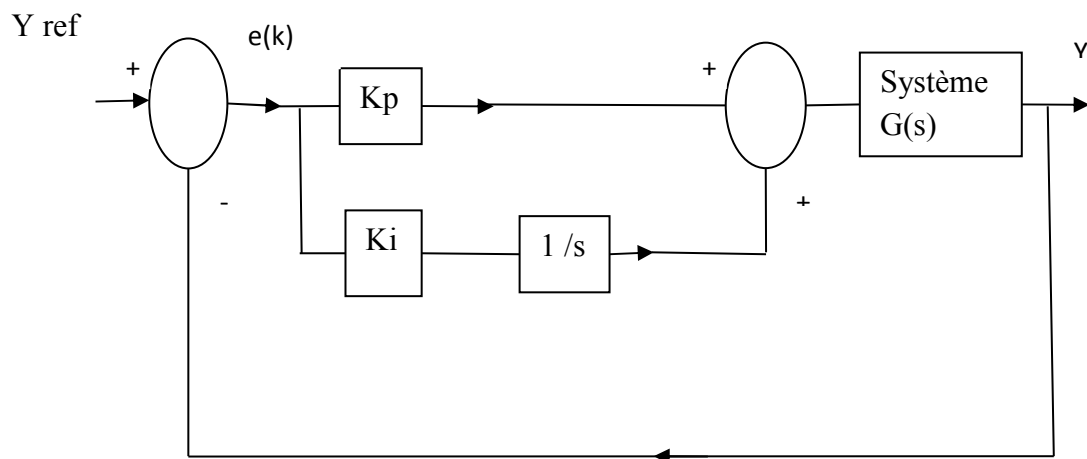


Figure (III.5): Structure d'un régulateur PI.

`Kp_VDCreg=2;` % Proportional gain

`Ki_VDCreg= 400;` % Integral gain

III.5.5.3. Régulateur de courant

Sur la base des références de courant I_d et I_q (courant réactif), le régulateur détermine les tensions de référence requises pour l'onduleur. Dans notre exemple, la référence I_q est définie sur zéro.

Le régulateur de courant est destiné à asservir le courant de charge, soit par un réglage manuel soit par l'intermédiaire d'un servomécanisme. Dans le cas particulier où cette grandeur de référence est maintenue constante, le système se comporte comme un stabilisateur de courant [50].

$Kp_IDCreg=0.3;$ % Proportional gain

$Ki_IDCreg= 20;$ % Integral gain

III.5.5.4. PLL & Mesures

PLL (Phase Locked Loop) est utilisée pour synchroniser la transformation de Park sur la pulsation de la tension mesurée sur le réseau. Ainsi, lorsque le système est dans un régime établi, la composante directe V_d en sortie de la transformation de Park est une image de l'amplitude de la tension mesurée, et la composante quadratique V_q est nulle. Ainsi que

$$i_{dr} - r_{ef} = \frac{2}{3} \frac{(P_r \cdot V_{dr} + Q_r \cdot V_{qr})}{(V_{dr}^2 + V_{qr}^2)} \quad (\text{III.6})$$

$$i_{qr} - r_{ef} = \frac{2}{3} \frac{(P_r \cdot V_{qr} - Q_r \cdot V_{dr})}{(V_{dr}^2 - V_{qr}^2)} \quad (\text{III.7})$$

Avec:

Les puissances et la mesure de tension au point de connexion sont calculées dans le référentiel de Park

$$P_r = \frac{3}{2} (V_{dr} \cdot i_{dr} + V_{qr} \cdot i_{qr}) \quad (\text{III.8})$$

$$Q_r = \frac{3}{2} (V_{dr} \cdot i_{qr} - V_{qr} \cdot i_{dr}) \quad (\text{III.9})$$

Font apparaitre $I_d - r_{ef}$ comme une image directe de la puissance active et $I_q - r_{ef}$ comme une image de la puissance réactive.

Le PLL contrôle et assure que, l'erreur dans la phase entre l'entrée et la sortie est gardée au minimum, et que la fréquence de l'entrée et la sortie est la même. Le circuit PLL de base se compose souvent de trois composants, d'un détecteur de phase, d'un filtre de boucle et d'un oscillateur commandé en tension. Ce circuit de base est montré sur (la figure (III.6))

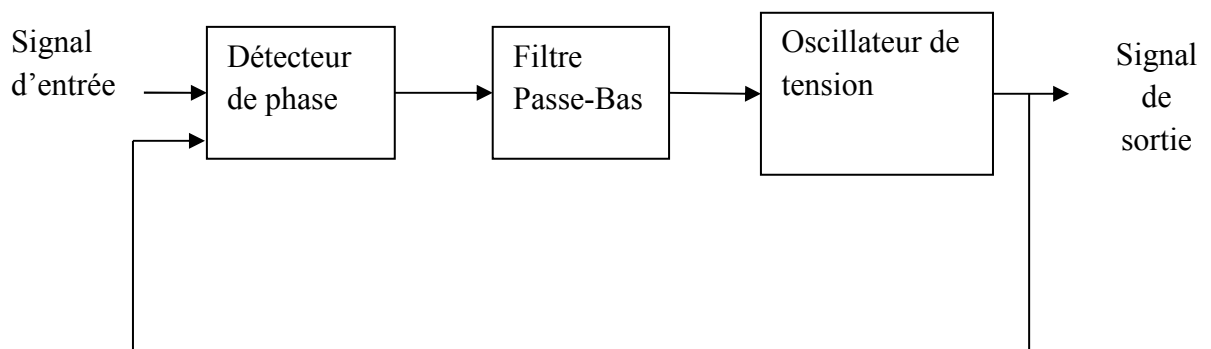


Figure (III.6): Diagramme de blocs d'une PLL.

Les multiples blocs de contrôle du système photovoltaïque connecté au réseau électrique se fondent sur les informations fournies par le PLL pour régler leurs signaux de commande. Le PLL calcule la fréquence du réseau par la transformation des trois tensions dans le domaine de Park à ces composants d_q , et puis force la composante quadrature V_q à être nulle pour éliminer le couplage dans les termes des puissances active et réactive. Un contrôleur proportionnel-intégral (PI) est employé pour effectuer cette tâche [51].

III.5.5.5. Générateur PWM

Génère des signaux de tir vers les IGBT en fonction des tensions de référence requises. Dans notre exemple, la fréquence porteuse est réglée sur 1650 Hz. une technique spéciale de modulation de largeur d'impulsion (PWM) pour stabiliser une entrée DC non stable en utilisant un inverseur IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) à pont en H qui est adaptatif et capable d'envoyer et de recevoir des messages rapidement. La tension de sortie de cet onduleur est une sortie AC stable. L'application de tels onduleurs est importante pour les systèmes alimentés par des panneaux photovoltaïques où leur puissance peut fluctuer sur de courtes périodes [52].

III.6. Résultats de simulation et discussion

Il s'agit d'un système solaire photovoltaïque autonome, ici un module solaire de 140kW via un convertisseur élévateur DC-DC et un convertisseur de source de tension triphasée à trois niveaux. MPPT (Maximum Power Point Tracking) est implémenté dans le convertisseur boost au moyen d'un modèle Simulink utilisant la technique P&O.

Le modèle détaillé contient les composants suivants:

Champ photovoltaïque délivrant un maximum de 140 kW à un rayonnement solaire de $1000\text{W}/\text{m}^2$. Convertisseur boost DC-DC 5 kHz augmentant la tension naturelle (383.5 V DC à la puissance maximale) à 583.1 V DC (figure (III.9)).

Le rapport cyclique de commutation est optimisé par le contrôleur MPPT qui utilise la technique P&O. Ce système MPPT fait varier automatiquement le rapport cyclique afin de générer la tension requise pour extraire la puissance maximale.

1980 Hz 3 niveaux triphasé VSC. Le VSC convertit la tension de liaison de 383.5V en $583.1V_{Ac}$ et conserve le facteur de puissance unitaire.

Le système de contrôle VSC utilise deux boucles de contrôle qui régulent la tension du circuit intermédiaire et des boucles de contrôle internes qui régulent le courant de réseau I_d (composant de courant actif) et I_q (composants de courant réactif). La référence de courant I_d est la sortie du contrôleur externe de tension DC. I_q la référence de courant est mise à zéro

afin de maintenir le facteur de puissance unitaire. Les sorties de tension V_d et V_q du contrôleur de courant sont converties en trois signaux de modulation $U_{abc-ref}$ utilisés par le générateur PWM. Le système de contrôle utilise un temps d'échantillonnage de 100 microsecondes pour les contrôleurs de tension et de courant ainsi que pour l'unité de synchronisation PLL. Les générateurs d'impulsions des convertisseurs boost et VSC utilisent un temps d'échantillonnage de micro seconde afin d'obtenir une résolution appropriée des formes d'onde PWM.

III.6.1. Paramètres de simulation

Le champ PV est connecté à un réseau électrique (alimentation de distribution 25 kV + système de transmission équivalent 120kV). Le générateur photovoltaïque de 140 kW utilise 350 modules.

Le champ PV se compose de 70 chaînes de 5 modules connectés en série connectés en parallèle.

Le paramètre Module du bloc de panneaux photovoltaïques vous permet de choisir parmi différents types de panneaux du modèle NREL System Advisor.

Les spécifications du fabricant pour un module sont les suivantes:

- Nombre de cellules connectées en série: 128.
- Tension en circuit ouvert: $V_{oc} = 90.5 \text{ V}$.
- Courant de court-circuit: $I_{sc} = 6.21 \text{ A}$.
- Tension et courant à puissance maximale: $V_{mp} = 76.7 \text{ V}$, $I_{mp} = 5,80 \text{ A}$.

Le bloc de panneaux photovoltaïques possède deux entrées qui vous permettent de faire varier l'éclairement solaire (entrée 1 en W/m^2) et la température (entrée 2 en degré C).

Les profils d'éclairement et de température sont définis par le bloc générateur de signal qui est connecté aux entrées du générateur photovoltaïque.

III.6.2. Scénario de Simulation

Exécutez le modèle et observez la séquence d'événements suivante sur les étendues. La simulation commence avec une condition de test standard (25 degrés C, $1000 \text{ W}/\text{m}^2$).

De $t = 0 \text{ sec}$ à $t = 0.562 \text{ sec}$, les impulsions de boost et les convertisseurs VSC sont bloqués. La tension PV atteint 472.5 V (figure (III.9)).

À $t = 0,562 \text{ sec}$, les convertisseurs boost et VSC sont débloqués. MPPT est activé. Le régulateur MPPT commence à réguler la tension PV en faisant varier le rapport cyclique afin d'extraire la puissance maximale. La puissance maximale (99,56 kW) est obtenue lorsque le rapport cyclique est $D = 0,89$ (figures (III.10) et (III.16)).

L'état d'équilibre est atteint à $t = 9,63$ s jusqu'à $t = 81.11$ sec. La tension PV résultante est donc 548.3 V. La puissance de sortie du générateur photovoltaïque est de 112 kW tandis que la puissance maximale spécifiée avec un rayonnement de 1000 W/m^2 est de 117,1 kW (figure (III.10)).

De $t = 81$ s à 100 s, l'irradiation solaire est réduite de 1000 W/m^2 à 300 W/m^2 . MPPT continue de suivre la puissance maximale (figure (III.9)).

À $t = 100$ s lorsque l'éclairement a diminué à 300 W/m^2 le rapport cyclique est $D = 0,73$.

La tension et la puissance PV correspondantes sont $V_{\text{mean}} = 583$ V et $P_{\text{mean}} = 35,16$ kW. Notez que le MPPT continue de suivre la puissance maximale pendant ce changement d'éclairement rapide (figure (III.9) et (III.10)).

De $t = 204.3$ sec à $t = 229.1$ sec, l'éclairement solaire est rétablie à 1000 W/m^2 . La puissance de sortie du champ rétablie à 117.1 kW (figure (III.11)).

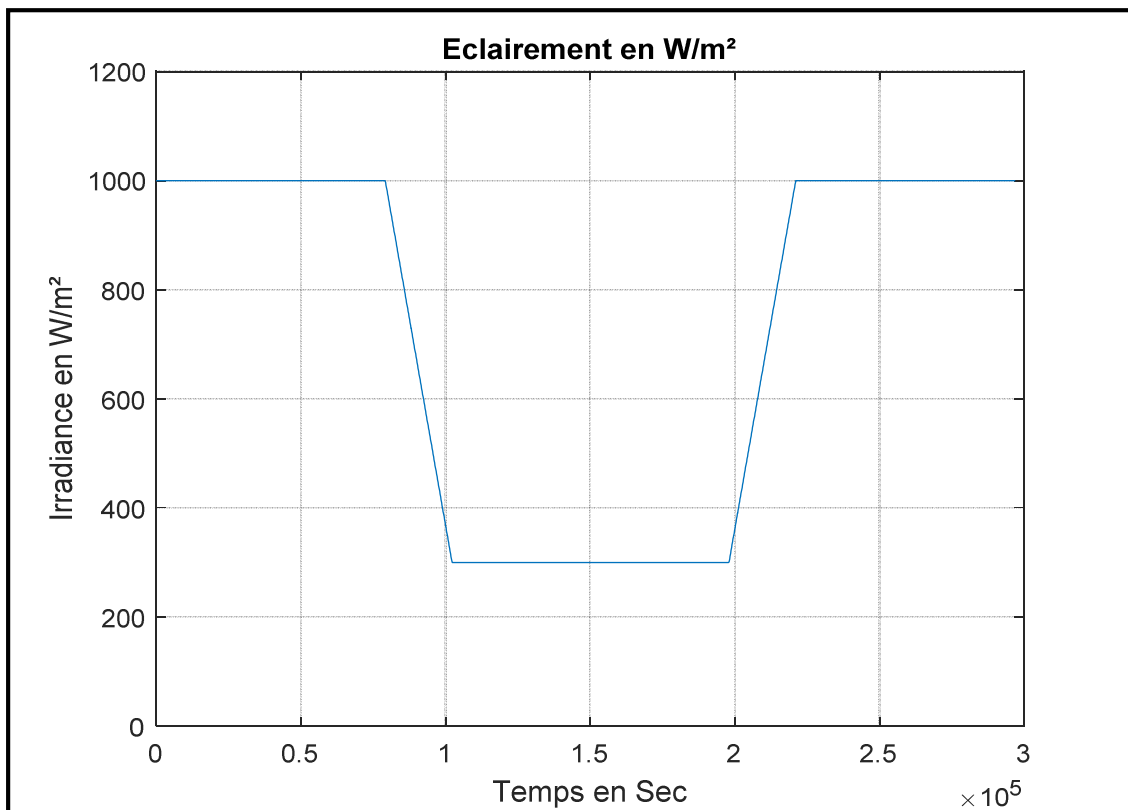


Figure (III.7): Variation éclairement en W/m^2 .

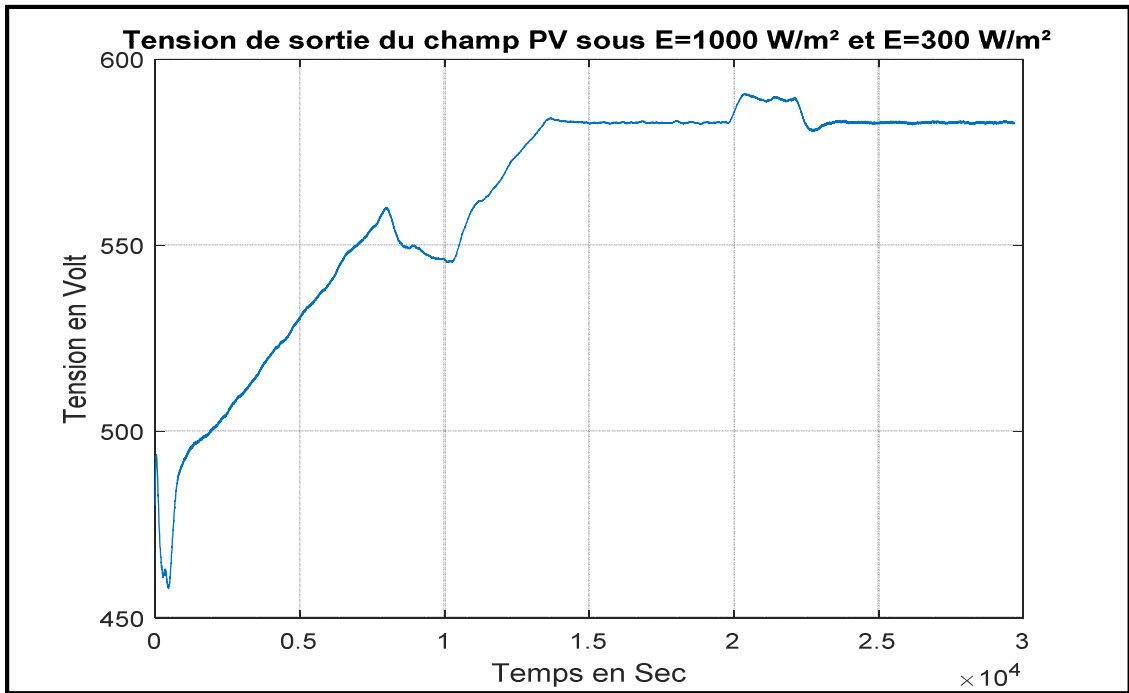


Figure (III.8): La tension de sortie du champ PV sous $E = 1000 \text{ W/m}^2$ et $E = 300 \text{ W/m}^2$.

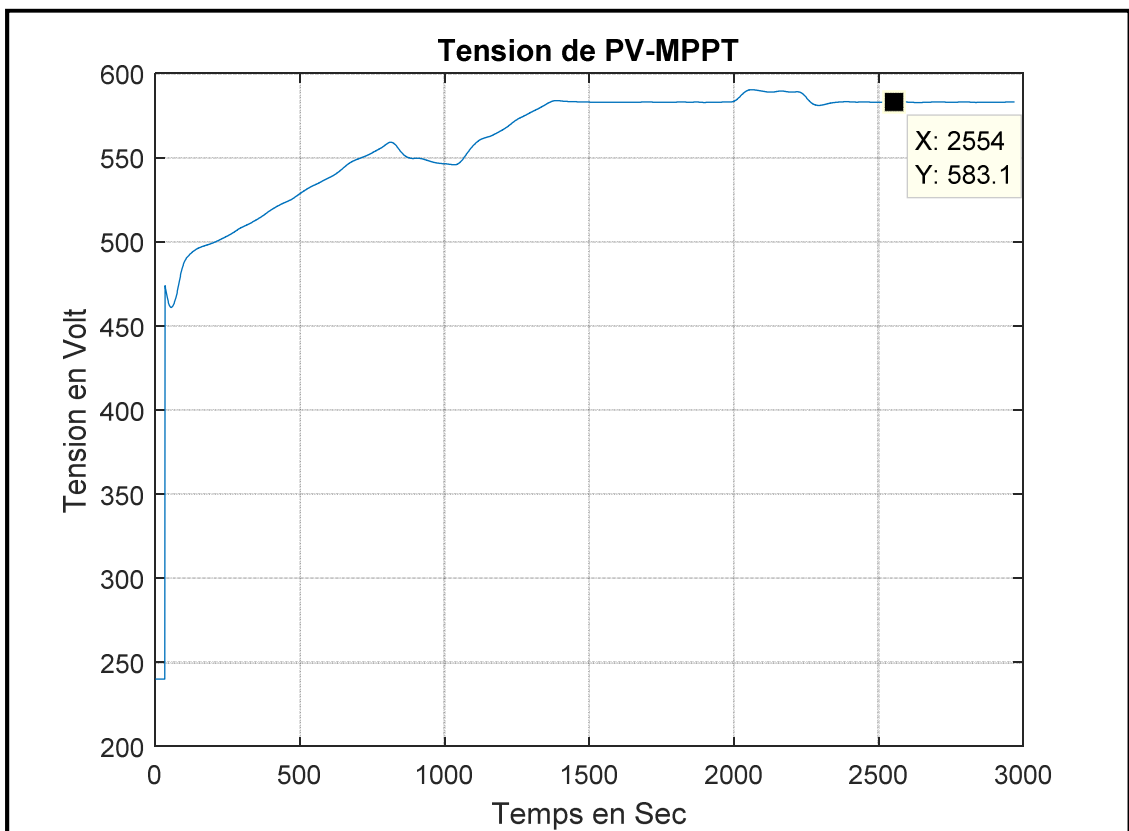


Figure (III.9): La tension de PV-MPPT.

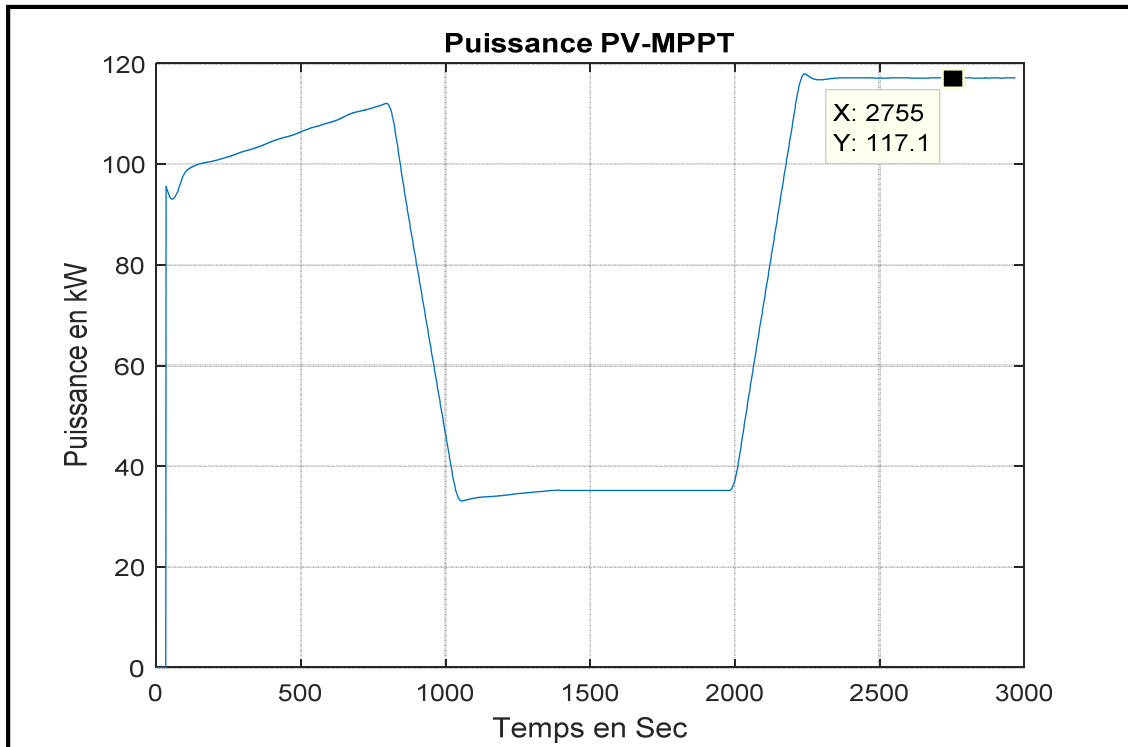


Figure (III.10): La puissance de PV-MPPT.

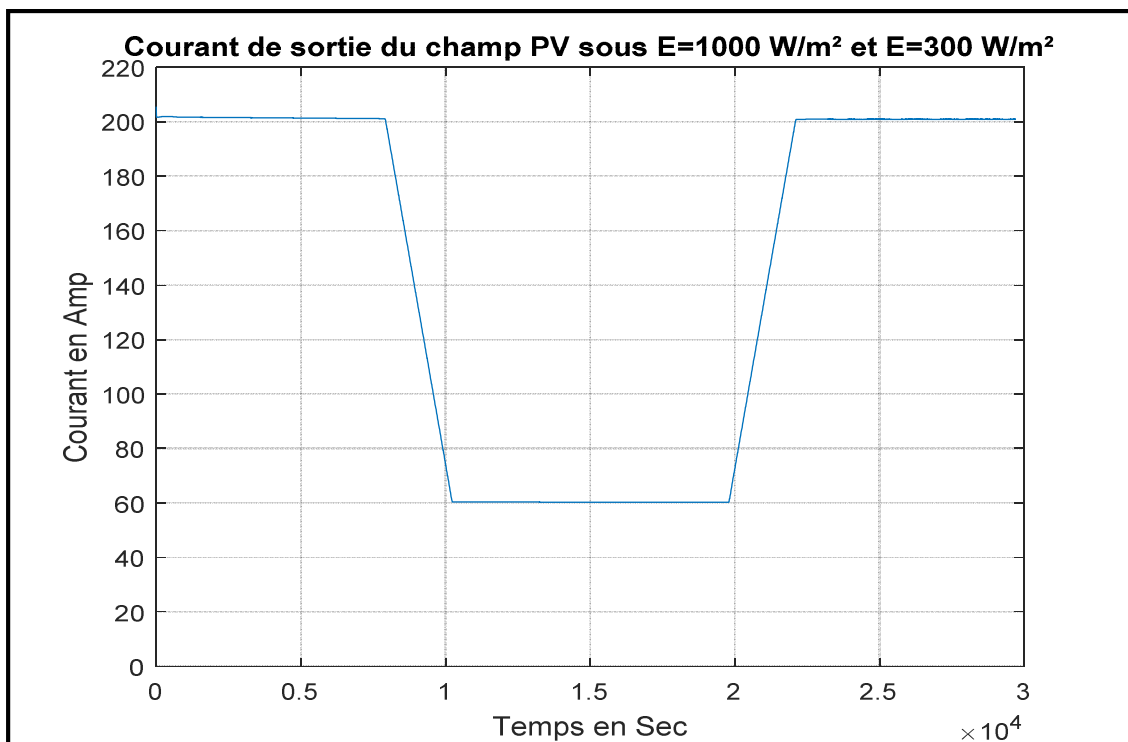


Figure (III.11): Courant de sortie du champ PV sous $E = 1000 \text{ W/m}^2$ et $E = 300 \text{ W/m}^2$.

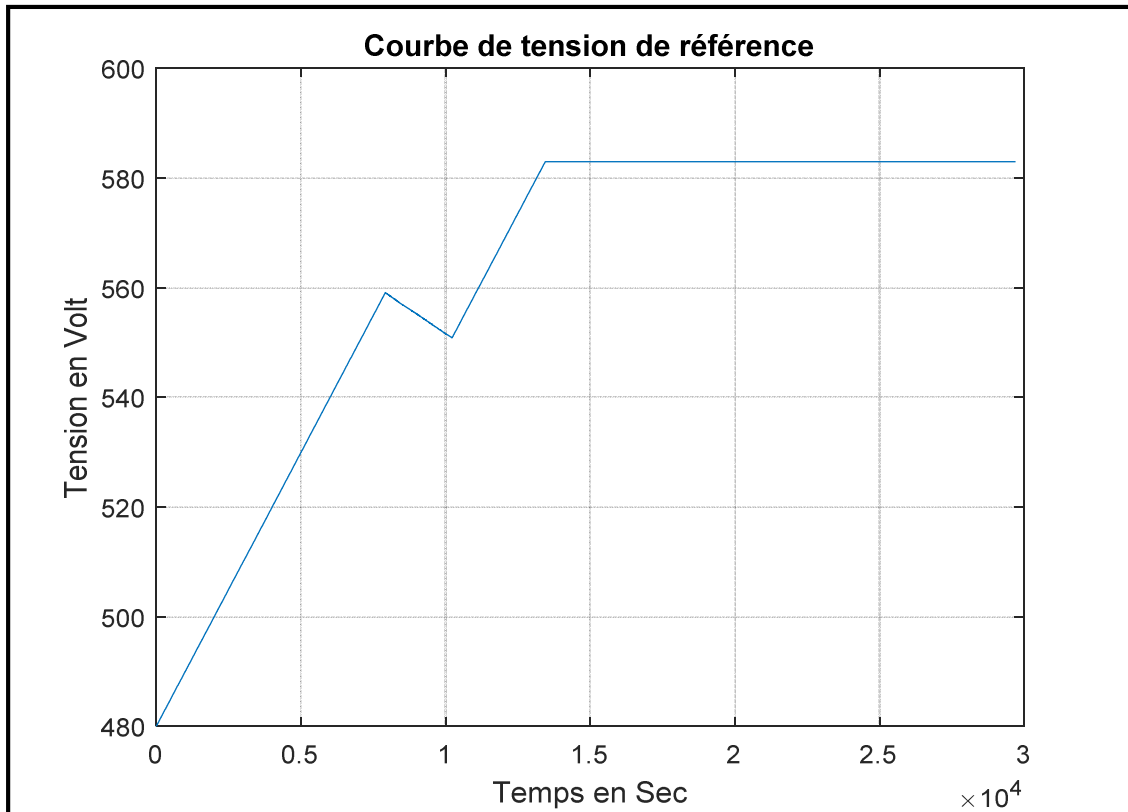


Figure (III.12): Courbe de tension de référence.

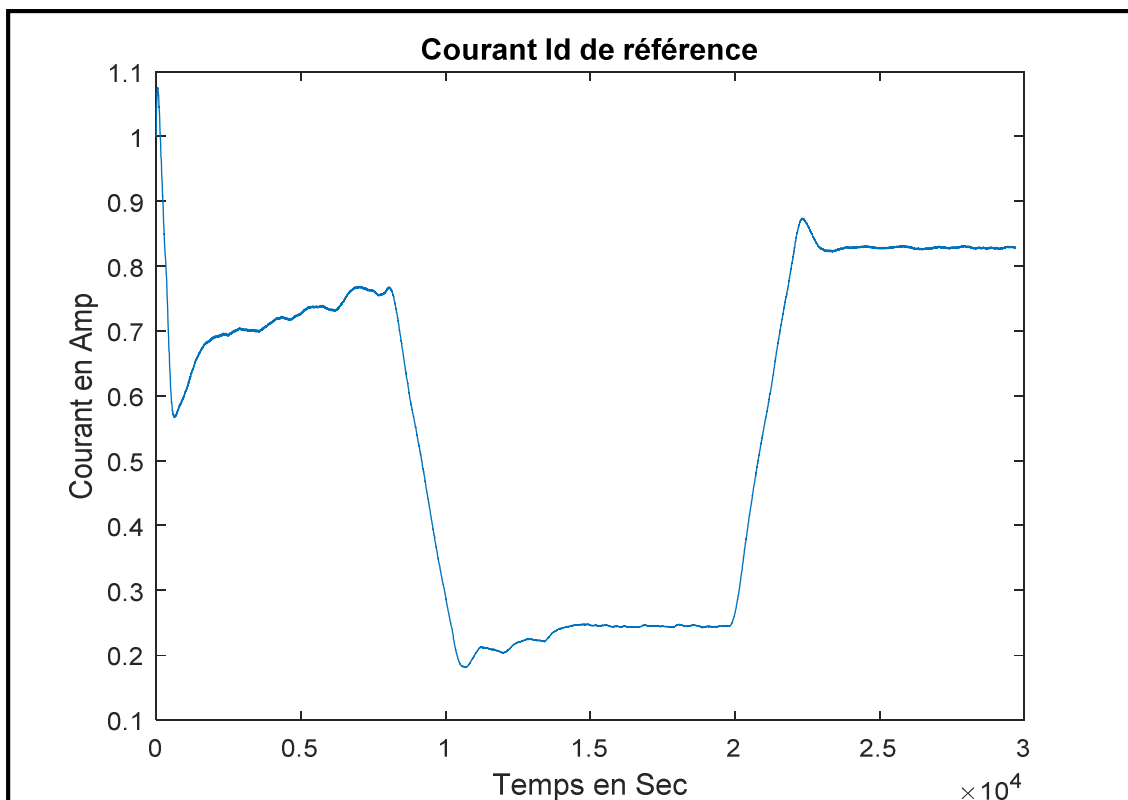
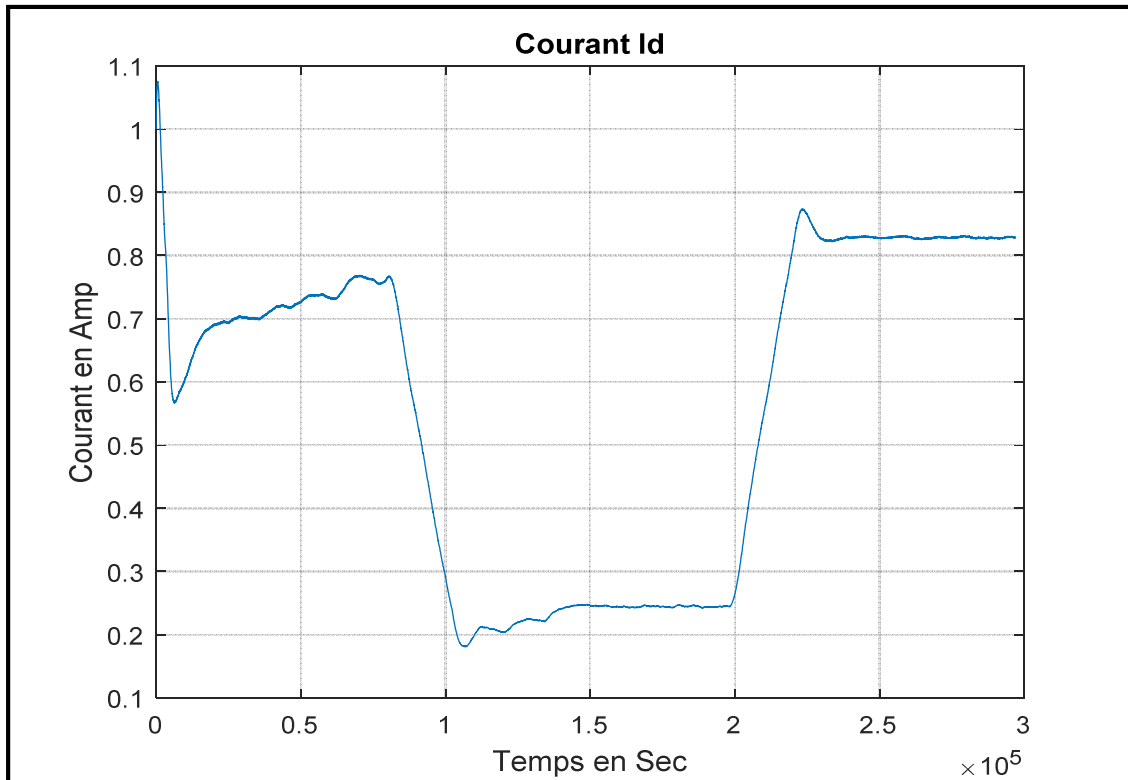
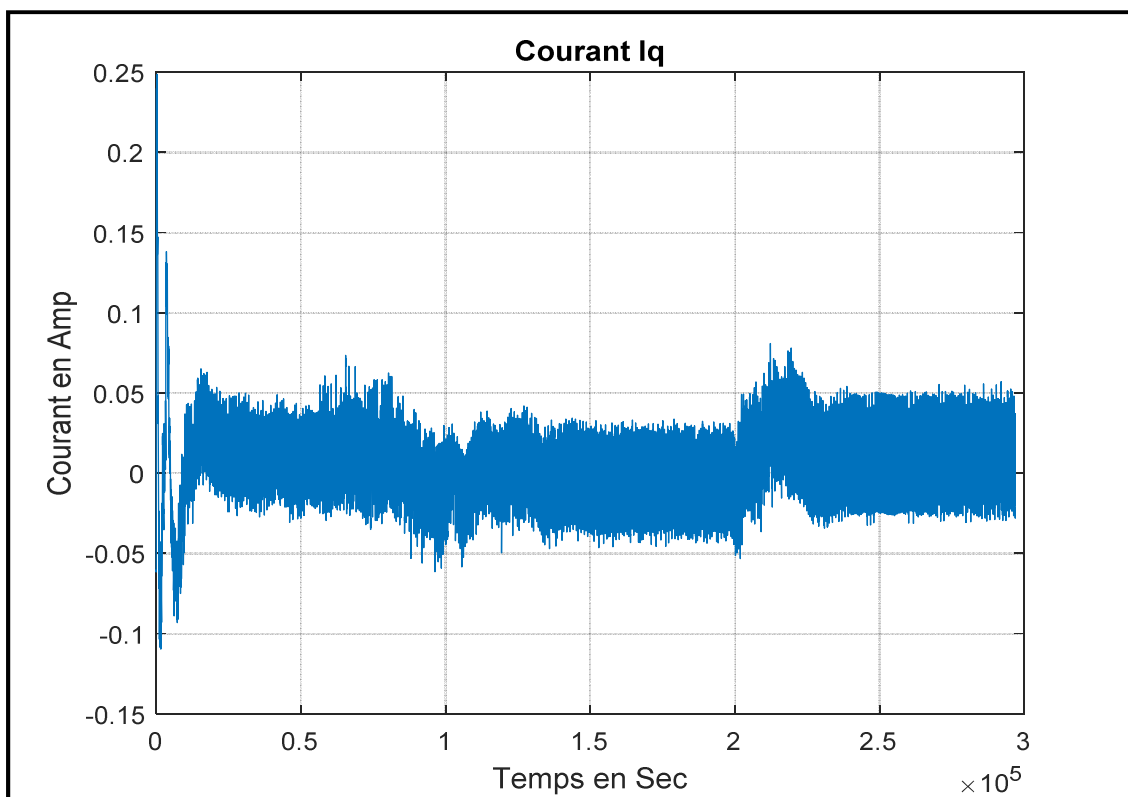


Figure (III.13): Courbe de courant I_d de référence.

**Figure (III.14):** Courant I_d .**Figure (III.15):** Courant I_q .

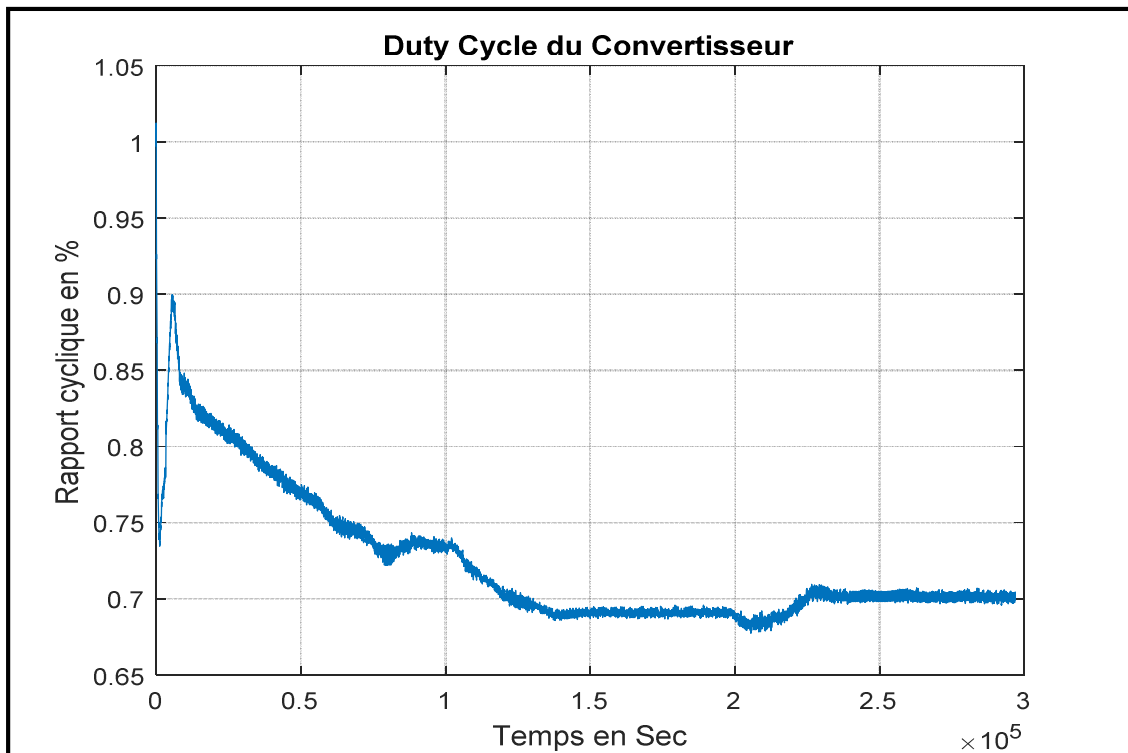


Figure (III.16): Duty cycle du convertisseur.

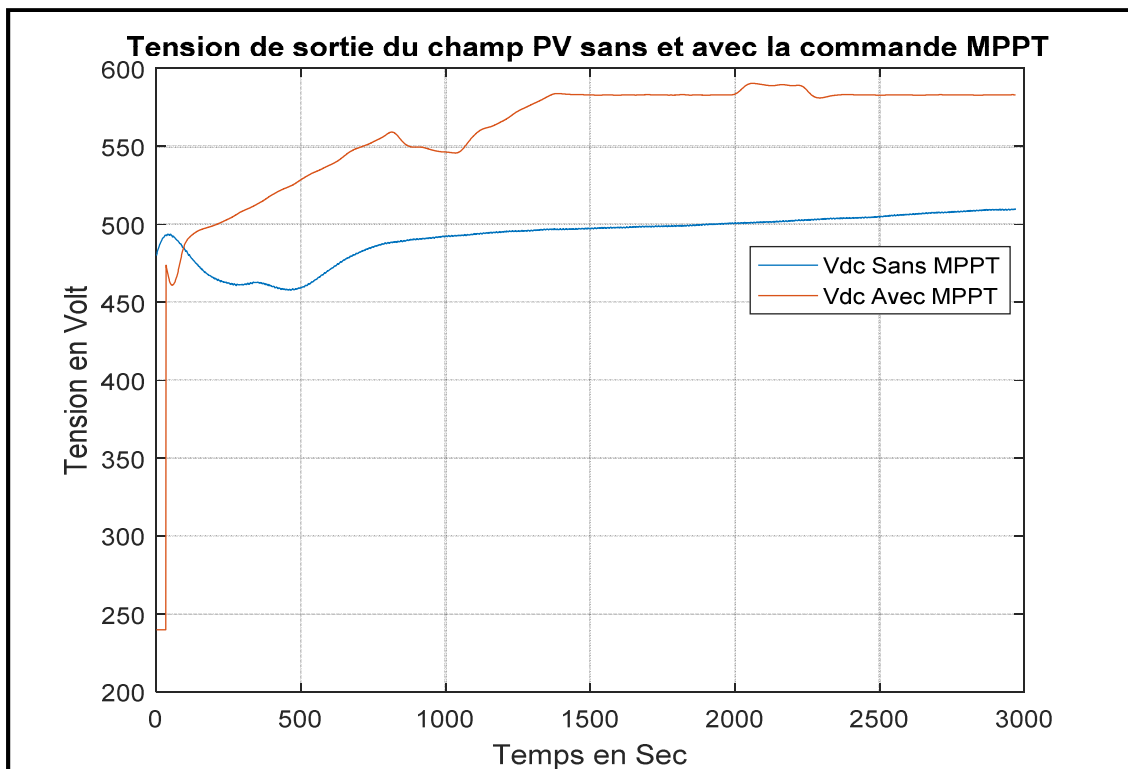


Figure (III.17): La tension de sortie du champ PV sans et avec la commande MPPT.

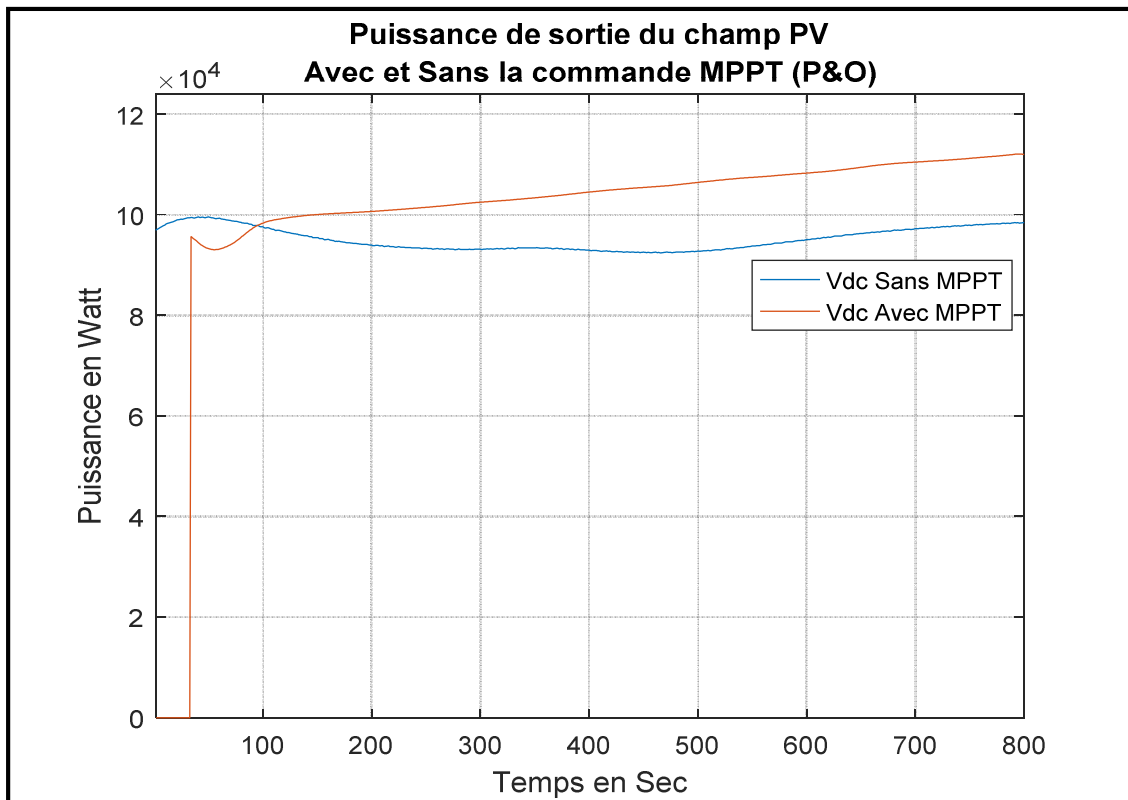


Figure (III.18): La puissance de sortie du champ PV sans et avec la commande MPPT.

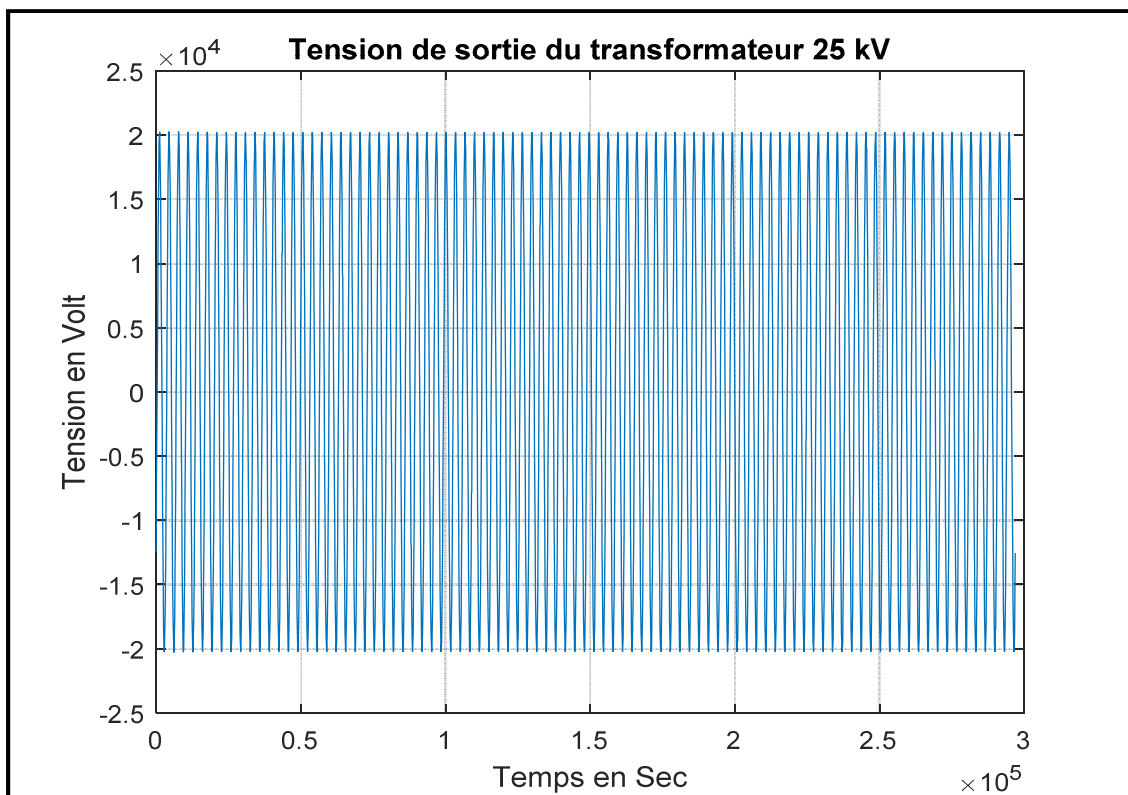


Figure (III.19): La tension de sortie du transformateur de 25KV.

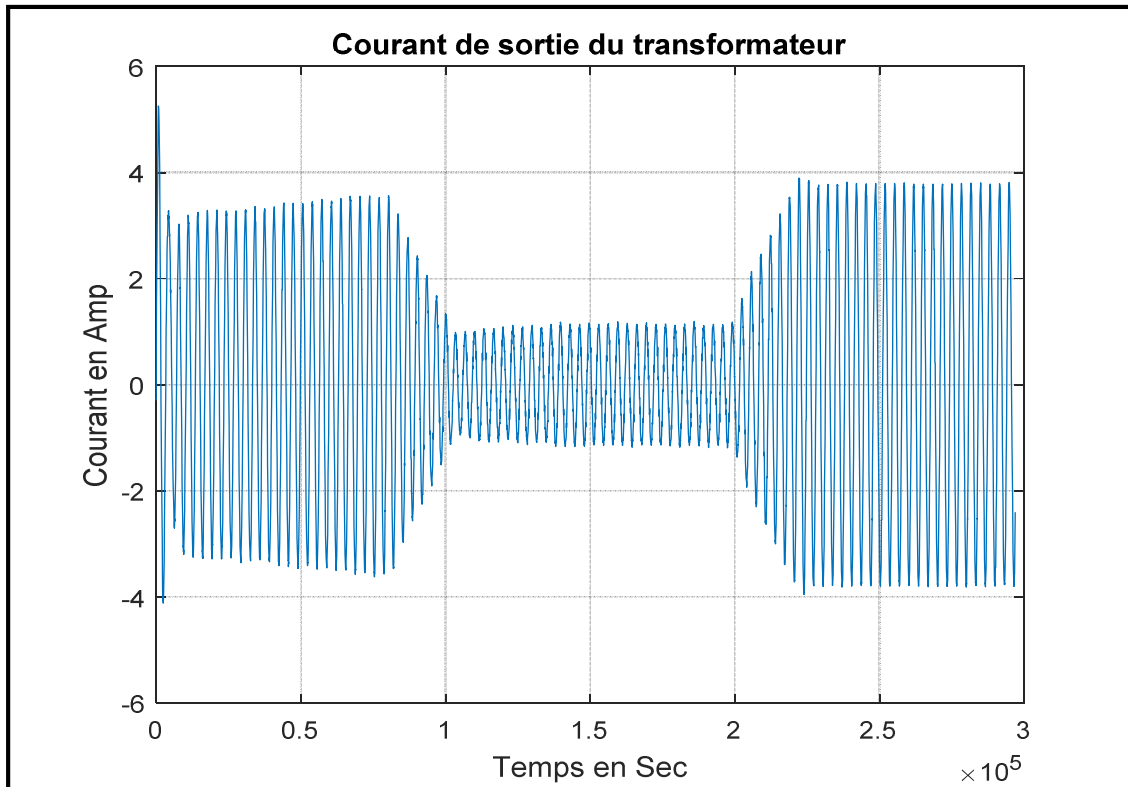


Figure (III.20): Le courant de sortie du transformateur.

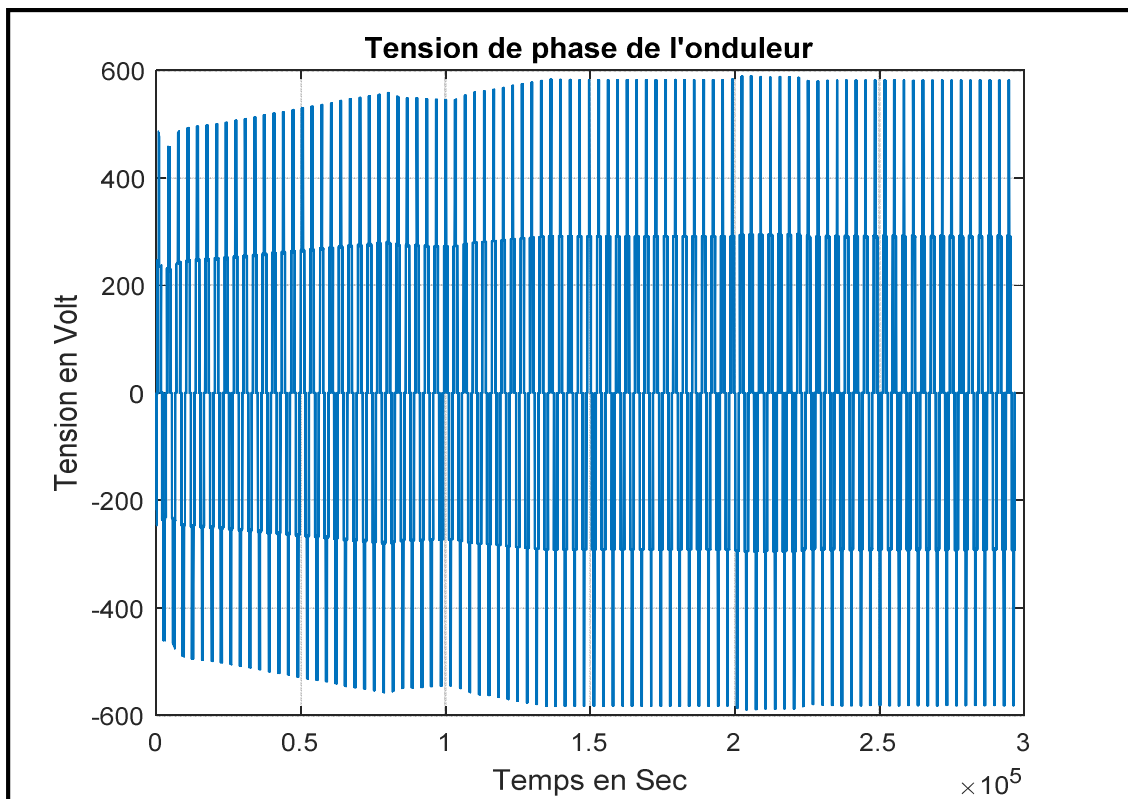


Figure (III.21): La tension de phase de l'onduleur.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons procédé a une modélisation et simulation d'une mini centrale photovoltaïque autonome a l'aide de logiciel MATLAB SIMULINK .Nous avons présenté les résultats de simulation du système étudié.

Conclusion
Générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire intitulé «analyse et contribution l'amélioration des performances énergétique d'un système photovoltaïque autonome », notre étude a apporté sur l'analyse des systèmes photovoltaïques autonomes pour répondre aux besoins électriques journaliers de pole littéraire du centre de l'Université de Salhi Ahmed à Naâma.

L'énergie solaire photovoltaïque présente donc un intérêt particulier pour les pays en voie de développement: elle est susceptible d'améliorer très rapidement et moyennant un coût optimal les conditions de vie et de productivité des habitations géographiquement dispersées.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté un aperçu général sur l'énergie solaire photovoltaïque est les différentes technologies d'une cellule photovoltaïque dont l'objet de faire ressortir les performances électriques et physiques de cette cellule photovoltaïque. Dans le deuxième chapitre, la modélisation de chaque composant du système photovoltaïque (champ PV, convertisseurs, le MPPT, le stockage batteries) est élaborée. Cette modélisation est une étape fondamentale qui permet d'introduire un certain nombre de modèles puis d'évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation dans un système énergétique photovoltaïque, on espère toujours travailler au voisinage du point de puissance maximale MPP, afin de minimiser au maximum des pertes. Dans le troisième chapitre nous avons procédé a une modélisation et simulation d'une installation photovoltaïque autonome sous un environnement MATLAB SIMULINK dont l'objet d'optimiser la production de la puissance électrique de cette installation.

Références

Bibliographiques

- [1]: T. Nacer Eddine, G. Slimane, « Modélisation et simulation d'un système Photovoltaïque », Mémoire de master, Université Echahid HamaLakhder d'El-Oued Faculté des Sciences et de la Technologie, **2015**.
- [2]: B. Ibrahim, « Modélisation et commande d'un système de stockage Photovoltaïque », Mémoire de magister, Université Abou-BakrBelkaid-Tlemcen, **2012**.
- [3]: O. Katia et M. Houria, « Modélisation et Contrôle d'un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau », Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, **2015**.
- [4]: S. Fateh, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques Inter connectés au réseau électrique », Mémoire de magister, Université de Sétif, **2011**.
- [5]: S. Smail, « Etude de l'électrification d'un village avec de l'énergie solaire Photovoltaïque », Mémoire de magister, Université de Ouargla, **2004**.
- [6]: K. Touafek, « Etude d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique », mémoire de magister, école nationale polytechnique, Alger, **2005**.
- [7]: B. Mohamed djallal, O. Mokhtar, « Gestion d'un système photovoltaïque avec stockage », Mémoire de master, université de Bejaïa, **2016**.
- [8]: H. Amar, « Propriétés électriques de cellule solaire à base de Sélénure de Cuivre Indium Galium $CuIn(1-x)Ga_xSe_2$ (CIGS) », Mémoire de magister, Biskra, **2014**.
- [9]: N. Touil, S. Ghenbazi, «Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque», Mémoire de master, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, **2015**.
- [10]: B .Wahiba, « Analyse des pertes thermiques de l'utilisation des matériaux sélectifs des convertisseurs de l'énergie solaire ». Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, **2014**.
- [11]: I. Nabila, « Détermination de l'angle optimale d'inclinaison de capture solaire à M'sila », Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, **2016**.
- [12]: M. Faiza, « Conception d'un programme de calcul du rayonnement solaire », Mémoire de magister, université de Mostaganem, **2013**.
- [13]: labouret, M. Viloz, « Energie solaire photovoltaïque », 3ème édition Dunod, Paris (France), **2006**.
- [14]: M, Capderou. Atlas solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger. **1985**.
- [15]: M. Mefti, Y. Bouroubi , H. Mimouni , « Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des Energies Renouvelables », N°2, p 12,, **2002**.
- [16]: B. Equer « Le Pompage Photovoltaïque Manuel de cours », énergie solaire photovoltaïque ellipses **1993**.

- [17]: B. Robyns, P. Bastard, « Production décentralisée d'électricité : contexte et enjeux techniques », La revue 3EI n°39, Décembre **2004**.
- [18]: S. Belakehal, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », Thèse Doctorat, Université de Constantine, **2010**.
- [19]: H. Boukli, « Conception et Réalisation d'un Générateur photovoltaïque Muni d'un convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique », Mémoire de magister, Université Abou-Baker Blkaid, Tlemcen, **2011**.
- [20]: M. Slama Fateh, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas, Setif, **2012**.
- [21]: A. Karima, « Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension », Mémoire de magister, Tizi-Ouzou, **2015**.
- [22]: B. Allal El Moubarak, « Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour l'alimentation d'une ferme (Etude de l'onduleur triphasé li a cette application) », Mémoire d'ingénieur d'état, université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, **2008**.
- [23]: A. Abderrahim, M. Ahmed, « Extraction des Paramètres d'une Cellule Photovoltaïque », Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, **2017**.
- [24]: B. Boualem, « Une nouvelle approche de modélisation et de commande des systèmes photovoltaïques autonomes », Doctorat en Sciences Setif, **2017**.
- [25]: E. Zouhair, « Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques », Physique [physics], Université d'Angers, Français, **2016**.
- [26]: B. Robyns, A. Davigny, B. Francois, A. Henneton, J. Sprooten, « Production d'énergie électrique à partir des sources renouvelables », Hermes Science Publications, France, **2012**.
- [27]: L. Chahla, I. Laria, « Etude d'un système de pompage photovoltaïque avec stockage », Mémoire de master, université de Bejaïa, **2018**.
- [28]: K. Helali, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque: étude comparative », Mémoire de magister, Université de Tizi-Ouzou, **2012**.
- [29]: T. Bouguer, « Optimisation d'un système photovoltaïque: application en continue et en alternatif », Mémoire de magister, Université de Constantine, **2014**.
- [30]: M. Hamidouche, B. Mokhtari, « Etude d'un système photovoltaïque », Mémoire de master, Université de Bejaia, **2016**.

- [31]: B. Mohammed, « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome », Mémoire de magister, Centre Universitaire de Bechar, **2008**.
- [32]: M. Salah eddine, « Etude de dimensionnement optimal d'une station autonome en site isolé », Mémoire de master, Université Abou-Bakr Belkaid-Tlemcen, **2014**.
- [33]: Z. soria, M. cheyma, « Etude et simulation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleur gestion énergétique », Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, **2017**.
- [34]: V. Boitier, P. Maussion, C. CABAL, « Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques », université de Toulouse, revue 3E.I, N°54, pp 90-96, **2008**.
- [35]: B. Wafa, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », Mémoire de master, université kasdi Marbah Ouargla, **2012**.
- [36]: S. Youcef et N. Hatem, « Implémentation de l'algorithme P&O pour un système photovoltaïque », Mémoire de master, université kasdi merbah-Ouargla, **2016**.
- [37]: C. Cabal, « Optimisation Energétique de l'Etage d'Adaptation Electronique dédié à la Conversion Photovoltaïque », Thèse de Doctorat, LAAS, Université de Toulouse, **2008**.
- [38]: B. Ankaiah and J. Nageswararao, « Enhancement of Solar Photovoltaic Cell by Using Short-Circuit Current MPPT Method », International Journal of Engineering Sciences Invention, Vol. 2, N°2, pp. 45 - 50, **2013**.
- [39]: A. Amel, H. Kenza, « Maximisation de l'Energie d'un Système Photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Abderahmane Mira de Béjaia, **2015**.
- [40]: <http://www.ssf-asso.org/systemes-pv-autonomes/> /consulté le **12/03/2020**.
- [41]: <https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-publications/outils/logiciels-danalyse-de-donnees-ou/retscreen/7466> /consulté le **29/02/2020**.
- [42]: L. Hassaine, E. OLias, J. Quintero, V. Salas , « Overview of power inverter topologies and control structures for grid connected photovoltaic systems », Renewable and Sustainable EnergyReviews 30 (**2014**), 796–807.
- [43]: W. Libo, Z. Zhengming and L. Jianzheng, « A singlestage threephase grid-connected photovoltaic system with modified mppt method and reactive power compensation ». IEEE Transactions on Energy Conversion 22, 4 (**2007**), 881–886.
- [44]: Lin, F.-J., Lu, K.-C., Ke, T.-H., Yang, B.-H., Chang, Y.-R. « Reactive power control of three-phase grid connected PV system during grid faults using takagi–sugeno–kang

- probabilistic fuzzy neural network control ». IEEE Transactions on Industrial Electronics 62, 9 ,**2015**, 5516–5528.
- [45]: Z. Cen, « An ultrafast maximum power point setting scheme for photovoltaic arrays using model parameter identification Journal », international de la photo énergie,**2015**.
- [46]:<http://solarhub.com/product-catalog/pvmodules/34529SPR445JWHTDSunPower> /consulté le **02/06/2020**.
- [47]: S. Youcef, N. Hatem, « Implémentation de l'algorithme P&O pour un système photovoltaïque », Mémoire de master, université kasdi merbah-Ouargla, **2016**.
- Middle east power systems conference (MEPCON ,10), cairo university ,Egypt, **2010**.
- [48]: <https://www.bricotecno.com/fr/25-regulateurs-de-tension/>consulté le **05/06/2020**.
- [49]: E. Ikhlas Hanane et B. Islem, « Étude et simulation un filtre active parallèle dans un réseau triphasé intégrant une éolienne », Mémoire de Master, **2015**.
- [50]: A. Gabet, J. Taieb, « régulateur de courant pour stabilisation de générateur électrostatique », rapport c. E. A. N° 46 ,**1950**.
- [51]: B. Khalid ,M. Djamel Eddine, « Etude la connexion d'une central photovoltaïque au réseau électrique », Mémoire de master, Ain-Temouchent, **2015**.
- [52]: I. Etier, A . Al Tarabsheh , R. Alqaisi, « Optimization and Simulation of IGBT Inverter Using PWM Technique », Université Hashemite, Département de génie électrique ,13115 Zarqa, Jordanie.