



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE: DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : science et Technologie

FILIERE : Électrotechnique

OPTION : Energies renouvelables en électrotechnique

Thème

**Étude et modélisation par simulation de l'influence des conditions
Climatiques sur la production électrique d'un module
photovoltaïque.**

Réalisé par :

SOUFFI Mohammed Abdelmadjid

KAABACHE Mohammed Laid

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mr. SELMANE Naceur	MCB	Président
Mme. VILBOIS Leila Amal	MAA	Examineur
Mr. BIRANE Mouhoub	MCA	Encadreur
Mr. BELAKHDAR Aissa	MCB	Co-Encadreur

Promotion : 2020/2021

Résumé

Ce mémoire s'articule autour de l'effet de l'ombrage et de la température sur le rendement du système photovoltaïque et l'extraction de ses paramètres électriques. Dans ce cas on a utilisé le convertisseur DC/DC lié avec la commande MPPT (P & O) pour maintenir la puissance maximal du système PV. L'outil de simulation utilisé est le MATLAB Simulink. Les résultats de simulations obtenues indiquent que la température et l'ombrage ont un impact élevé sur la puissance de sortie du système photovoltaïque et par conséquent sur le rendement de conversion.

Mots clés : photovoltaïque / Ombrage / MATLAB / Simulink / Paramètres électriques / Simulation / MPPT / P & O.

ملخص

تدور هذه الأطروحة حول تأثير التظليل ودرجة الحرارة على أداء النظام الكهروضوئي واستخراج معاملاته الكهربائية. في هذه الحالة تم استخدام محول DC/DC المرتبط بنظام التحكم MPPT (P&O) للحفاظ على الطاقة القصوى للنظام الكهروضوئي. أداة المحاكاة المستخدمة MATLAB Simulink. تشير نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها إلى أن درجة الحرارة والتظليل لهما تأثير كبير على الخلايا الكهروضوئية وبالتالي على كفاءة التحويل.

الكلمات المفتاحية: الألواح الشمسية / الكهروضوئية / التظليل / المطالب / المحاكاة / المعلمات الكهربائية / المحاكاة.

Abstract

This thesis revolves around the effect of shading and temperature on the performance of the photovoltaic system and the extraction of its electrical parameters. In this case the DC / DC converter linked with the MPPT (P&O) control was used to maintain the maximum power of the PV system. The simulation tool used is the MATLAB Simulink. The simulation results obtained indicate that temperature and shading have a high impact on the output power of the photovoltaic system and therefore on the conversion efficiency.

Keywords: photovoltaic / Shading / MATLAB / Simulink / Electrical parameters / Simulation / MPPT / P & O.

Remerciements

Nos remerciements vont d'abord à Allah, le tout puissant, pour nous avoir donné la volonté et le courage pour accomplir nos études.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et notre profonde gratitude à nos encadreurs *M^r. Birane Mouhouls*, et *M^r. Bellakhdar Aïssa* de nous avoir encadrés durant la période de préparation de notre mémoire de fin d'étude.

Ainsi nous exprimons notre reconnaissance à tous les membres de jury d'avoir accepté de lire ce mémoire

M^r. Salmen Naceur, *M^{me}. Vilbois Leila Amel*

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail

Med Abdelmadjid et Med Laid

Dédicace

À

Mes parents

... qui ont tout sacrifié pour cet instant de joie et de réussite.

Qu'Allah vous protège.

Mon frère,

Mes deux sœurs

Vos encouragements m'étaient très précieux.

Mes oncles et mes tantes...

...Mes cousins et cousines

Aux amis et collègues.

Je dédie ce fruit d'un parcours du quel j'ai beaucoup acquis.

*Un modeste travail que j'espère qu'il me serait une
ouverture sur des horizons plus riches.*

H. Mohammed Laid

Dédicace

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut
Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect,
la Reconnaissance ...

Je dédie ce modeste travail à :

À mes chers et respectueux Parents

Mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est
toujours sacrifié

Pour me voir réussir à toi **Mon Père.**

À la lumière de mes jours, la source de mes efforts, ma vie et mon
bonheur ; **Maman**

À ma Grand-mère

Puisse Allah tout puissant vous garder et vous procurer santé et
bonheur

À Mon Grand Père

Que dieu le protège et le garde

À mes petits frères

À mes tantes et mes oncles

Et toute ma famille.

P. Mohammed Abdelmadjid

Liste des figures & tableaux

Liste des figures

Figure I.1 : Spectre électromagnétique solaire [1].....	5
Figure I.2 : Types de rayonnement solaire reçus au sol [8].....	6
Figure I.3 : L'effet photovoltaïque [10].....	7
Figure I.4 : Jonction P-N [11].....	8
Figure I.5 : Organigramme de Les différentes familles de matériaux photovoltaïques [12].....	9
Figure I.6 : Système photovoltaïque connecté au réseau électrique [13]	10
Figure I.7 : Système photovoltaïque hybride [14]	11
Figure I.8 : Système photovoltaïque autonomes [16].....	12
Figure I.9 : stockage de l'énergie dans les systèmes photovoltaïques [13]	12
Figure II.1 : Schéma équivalent d'une cellule idéale.	16
Figure II.2 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.	18
Figure II.3 : Caractéristique I-V d'une cellule PV	21
Figure II.4 : Caractéristique P-V d'une cellule PV	21
Figure II.5 : Caractéristique I-V d'un module PV en fonction de l'éclairement.....	22
Figure II.6 : Caractéristique P-V d'un module PV en fonction de l'éclairement.....	22
Figure II.7 : Caractéristique I-V d'un module PV en fonction de la température.....	23
Figure II.8 : Caractéristique P-V d'un module PV en fonction de la température.....	23
Figure II.9 : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle	24
Figure II.10 : Caractéristique I-V des	24
Figure II.12 : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série.....	25
Figure II.13 : Caractéristique I-V	26
des cellules PV raccordes en séries.....	26
Figure II.15 : Protection par des diodes by-pass [23].....	27
Figure II.16 : Module photovoltaïque [26].....	28
Figure III.1	29
Figure III.2 : Convertisseur Buck.....	30
Figure III.3 : Convertisseur Boost.....	31
Figure III.4 : Convertisseur DC-DC Bi-Directionnel.....	32
Figure III.5 : La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM [19]	33
Figure III.6 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque [19]	33
Figure III.7 : Recherche et recouvrement du Point Puissance Maximale (a) suite à une variation d'éclairement, (b) suite à une variation de charge, (c) suite à une variation de température. [19].....	34

Liste des figures & tableaux

Figure III.8 : Convergence vers le PPM par P&O. [19].....	36
Figure III.9 : Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O	37
la nouvelle puissance : Ppv. [19]	37
Figure IV.1 : Bibliothèque d'outils Simulink	41
Figure IV. 2 : spécification de panneau yingliyl250p-29b	42
Figure IV.3 : caractéristique I(v) P(v) dans les conditions STC.....	43
Figure IV.4 : schéma équivalent de convertisseur Boost sur Simulink	43
Figure IV.5 : la tension d'entrée de convertisseur Boost.....	44
Figure IV.6 : la tension de sortie de convertisseur Boost	44
Figure IV.7 : schéma équivalent de panneau yingli yl250-29p	45
Figure IV.8 : caractéristique i(v) et p(v) de panneaux a irradiation différent.....	46
Figure IV.9 : caractéristique i(v) et p(v) de panneaux en fonction de température	47
Figure IV.10 : schéma équivalent d'un système photovoltaïque simulé sur Matlab..	48
Figure IV.11 : courant de système à éclairage différent.....	50
Figure IV.12 : tension de système à éclairage différent	50
Figure IV.13 : puissance de système a éclairage différent	51
Figure IV.14 : courant de système en fonction de température	52
Figure IV.15 : tension de système en fonction de température	52
Figure IV.16 : puissance de système en fonction de température	53

Liste des tableaux

Tableaux 1 : résultat de changement de courant, tension et de puissance avec le rendement a une température fixe 25°C	48
Tableaux 2 : résultat de changement de courant, tension et de puissance avec le rendement l'éclairage et fixe 1000w/m ²	49

Liste d'abréviation

Liste d'abréviation

PV : Photovoltaïque

FF : Facteur de forme.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O : Perturbation et Observation.

CIS : Le séléniure de cuivre

CdTe : Le tellure de cadmium

Liste de symbole

Liste de symbole

V : La tension aux bornes de la cellule photovoltaïque en volt.

I: Le courant délivré par la photopile en Ampère.

Rs: Résistance série caractérisant les divers contacts et connexion, en Ω .

Rsh: Résistance shunt qui modélise les courants de fuites de la jonction, en Ω .

Pi : Puissance d'éclairement reçue par unité de surface.

n : nombre d'électron (électron/cm³).

p : nombre de trous (trous/cm³).

I_{ph} : la photo courant en ampère.

I_s : courant de saturation de la diode en ampère.

q : charge élémentaire en coulomb.

k : constante de Boltzmann Joule par kelvin.

T : température en kelvin.

I_{cc} : Courant de court-circuit.

V_{co}: Tension en circuit ouvert.

I_m : Courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

V_m: Tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

η : Rendement de conversion.

S : surface de la cellule photovoltaïque.

h : est la constante de Planck.

C : La vitesse de la lumière.

α : est le rapport cyclique.

Sommaire

Sommaire

Liste des figures	
Liste des tableaux.....	
Liste d'abréviation	
Liste de symbole	
Sommaire	
Introduction générale	1
1. Introduction	2
2. Définition et Historique du photovoltaïque	2
3. L'énergie solaire	3
4. Gisement solaire	4
5. Les rayonnements solaires.....	4
6. L'effet photovoltaïque	6
7. La conversion photovoltaïque	7
8. La cellule photovoltaïque :	7
9. Différents types de systèmes photovoltaïques.....	10
10. Stockage de l'énergie.....	12
11. Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque.....	12
12. Avenir du photovoltaïque	13
13. Différents domaines d'application.....	14
14. Conclusion	14
1. Introduction	16
2. Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque.....	16
.3 Paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	19
4. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque [12].....	20
5. Influence de l'éclairement	21
6. Influence de la température	22
7. Association de la cellule photovoltaïque	23
8. Protection de la cellule photovoltaïque	26
9. Le module photovoltaïque	27
10. Conclusion	28
1. Introduction	29
2. Convertisseurs DC/DC	29
2.1. Convertisseur abaisseur "Buck"	30

sommaire

2.2. Convertisseur élévateur "Boost"	31
2.3. Convertisseur bi-directionnel en courant (Buck-Boost)	32
3. Commande MPPT [19].....	32
3.2.1. Les méthodes indirectes	35
3.2.2. Les méthodes directes	35
4. La méthode Perturbe & Observe (P&O)	36
5. Conclusion.....	38
1. Introduction	40
2. Matlab /Simulink	40
3. Etapes de simulation avec Matlab :.....	41
4. Model de panneau PV : (yingli_y1250p29)	42
5. Schéma de convertisseur Boost de système :	43
6. L'influence des conditions climatique sur un seul panneau :.....	45
7. La simulation de système photovoltaïque :	47
8. L'effet d ombrage et la température sur la production électrique d'un module PV :.....	48
9. Conclusion.....	54
Conclusion général.....	56
Bibliographies	57



Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

La production d'énergie est un défi très important pour les années à venir. Les besoins énergétiques du monde en voie de développement va se multiplier. La totalité de production mondiale d'énergie vient de source fossile. [1]

La consommation de ces sources cause l'émission de gaz à effet de serre et donc augmente la pollution. En plus la consommation de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse Pour les générations futures. [1]

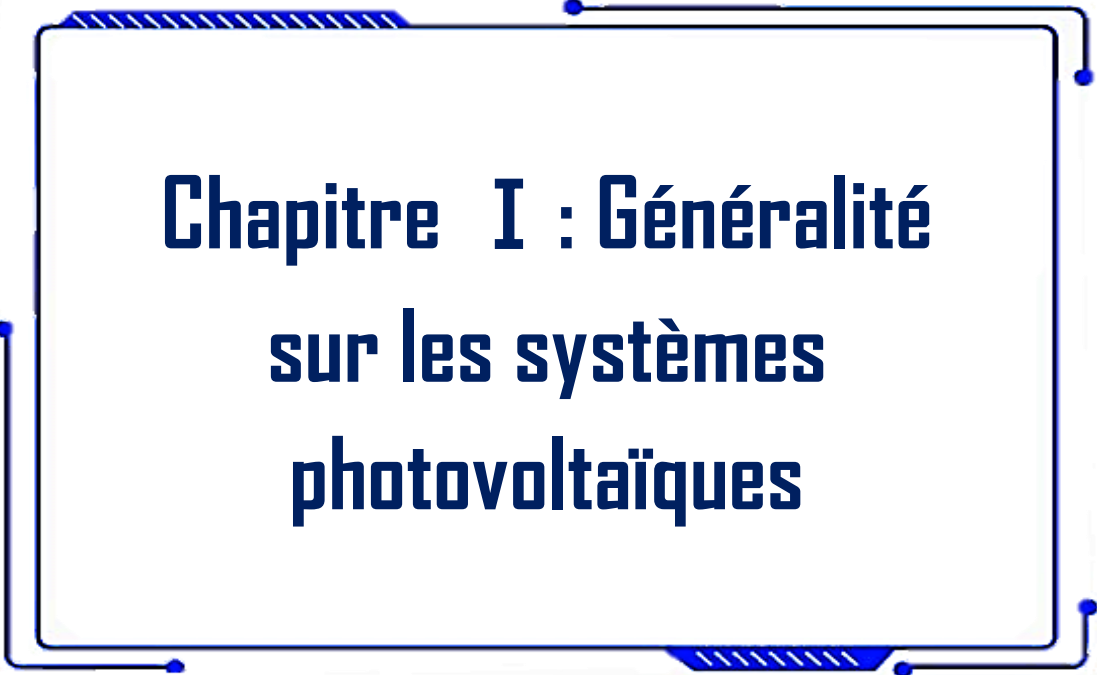
Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie biomasse et l'énergie hydroélectrique, sont des solutions prometteuse pour concurrencer les sources d'énergies de masse telle que l'énergie fossile et nucléaire est garantir un meilleur avenir pour les générations futures. [1]

Pour atteindre cet objectif tout le monde est obligé de soutenir et le encourager la recherche et le développement dans ce domaine, afin d'avoir des bons résultats avec le moins possible d'inconvénients.

Dans ce contexte nous avons étudié et modélisé par simulation l'influence des conditions climatiques sur la production électrique d'un module photovoltaïque en plus de l'effet des paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque pour le modèle à simple diode et extraire ces paramètres, ainsi on va simuler un système photovoltaïque .pour décrire cela on distingue quatre chapitre :

- Dans le premier chapitre nous avons présenté une généralité sur le système photovoltaïque. On présente le principe de l'effet photovoltaïque, les technologies des cellules photovoltaïques. Dans une deuxième partie les différents systèmes photovoltaïque abordé.
- Le deuxième chapitre présente, les paramètres électriques de cellule photovoltaïque, l'influence de l'éclairement, la température sur le panneau PV, ainsi que les différentes méthodes de protection de panneaux PV (diode bypass et anti retour).
- Dans le troisième chapitre, Le convertisseur dc/dc utilisée dans notre étude et sont type, ainsi que la commande de MPPT et sont principe de fonctionnement.
- Le quatrième chapitre, est réservé au résultat obtenu par la simulation de système photovoltaïque.

En fin nous terminant par une conclusion générale et une perspective.



Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

1. Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Cette énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 10 000 W/m² crête dans les zones tempérées et jusqu'à 14 000 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée.

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances ainsi le générateur solaire photovoltaïque et ces performances. [1]

2. Définition et Historique du photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien italien 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. [2]

2.1 Quelques dates de 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 devant 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 à l'Université de Delaware.
- **1983** : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé. [3]

3. L'énergie solaire

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire qui fait partie des énergies renouvelables.

3.1. Le Soleil

Le soleil reste jusqu'à présent la plus importante source d'énergie, malgré la distance considérable qui le sépare de la terre (149.6 x 10⁶ de kilomètres). Il s'agit d'une immense sphère lumineuse composée principalement de gaz ionisé, et du plus grand corps céleste du système solaire. Il est si grand qu'il pourrait contenir plus d'un million de planètes Terre.

La puissance émise par le soleil sous forme de rayonnement est estimée à 90x10¹⁵ GW, alors que la couche terrestre n'arrive à recevoir que 180x10⁶ GW. Arrivant à la terre, le rayonnement solaire subit de considérables modifications, dues principalement aux phénomènes d'absorption et de diffusion. De là, on introduit la notion de l'éclairement comme étant la densité de puissance reçue par une surface soumise à un flux lumineux, dans les conditions atmosphériques optimales. Cette densité de puissance atteinte 1kW/m² pour un site situé au niveau de la mer.

L'Algérie dispose d'environ 3200 heures d'ensoleillement par an, bénéficiant d'une situation climatique favorable à l'application des techniques solaires. [4]

4. Gisement solaire

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 déterminer l'énergie reçue par un système énergétique solaire et aide au dimensionnement le plus exact possible compte tenu des demandes à satisfaire.

La connaissance du gisement solaire d'une région est plus ou moins précise :

- Selon la densité des stations pour lesquelles on a des données.
- Selon le nombre d'années de mesures disponibles.
- Selon le pas de temps des données (mois, jour, heure).
- Selon la nature des données : durée d'ensoleillement, composante directe et diffuse et globale du rayonnement solaire, albédo du sol etc...

Les différentes irradiations solaires utilisées par les concepteurs de systèmes solaires, sont :

- L'irradiation directe à incidence normale.
- Les irradiations de base, la composante diffuse et la composante globale mesurées sur plan horizontal.
- L'irradiation solaire globale reçue sur des plans verticaux orientés Est, Ouest et Sud.
- L'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu et orienté Sud.

5. Les rayonnements solaires

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0.2 μm) à l'infrarouge lointain (2.5 μm). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1350W/m² (AM0) dans l'espace hors atmosphère terrestre. Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux provenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé. Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90° d'inclinaison) atteint 1000 W/m² du fait de l'absorption dans l'atmosphère (AM1). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration θ est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons

auront à traverser sera grande, d'où une perte d'énergie conséquente. Par exemple, l'énergie directe transportée par le rayonnement solaire atteignant le sol avec un angle de 48° avoisine les 833 W/m^2 (AM1.5). [5]

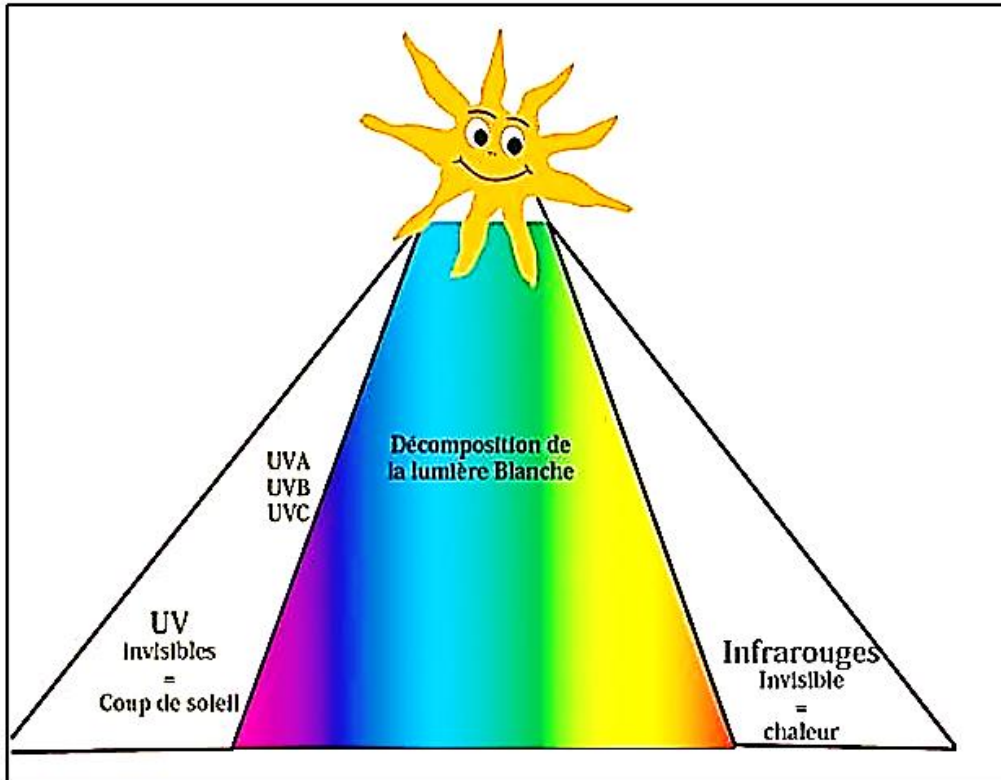


Figure I.1 : Spectre électromagnétique solaire [1]

5.1. Différents types de rayonnement solaire

Le rayonnement solaire sur une surface au sol est composé comme suit :

- **Rayonnement Direct** : la conversion du rayonnement direct est une question trigonométrique. Le rayonnement direct, sur le plan horizontal, est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus. [6]
- **Rayonnement diffus** : il est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.
- **Rayonnement Réfléchi** : C'est le rayonnement qui est 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, arbre, etc...).

- **Le rayonnement global** : le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et réfléti par le sol). Dans la figure ci-dessous figure (I.02) est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçu sur une surface terrestre. [7]

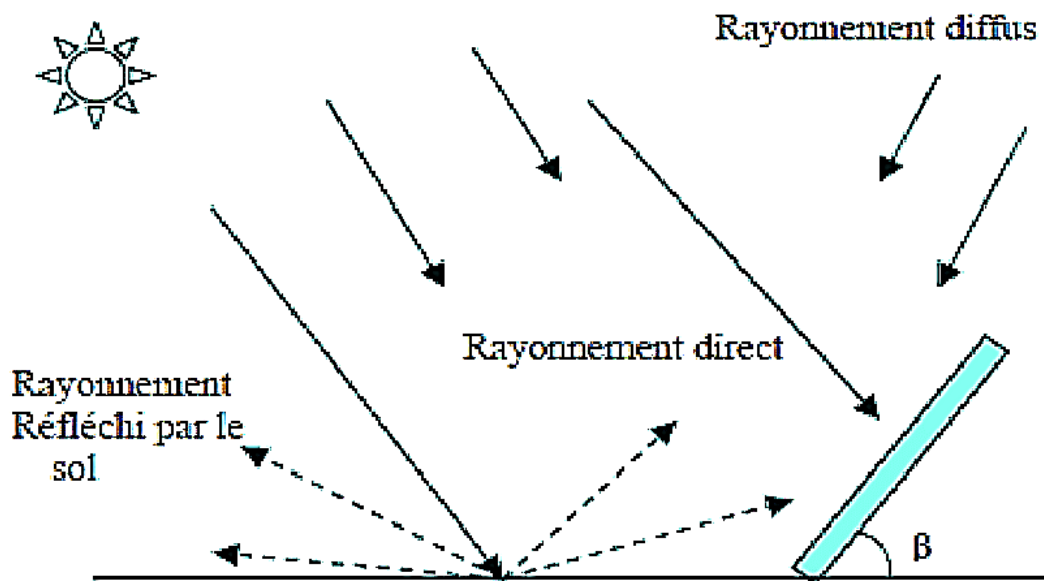


Figure I.2 : Types de rayonnement solaire reçus au sol [8]

6. L'effet photovoltaïque

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière ; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés" : Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible.

Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium.

Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire. [9]

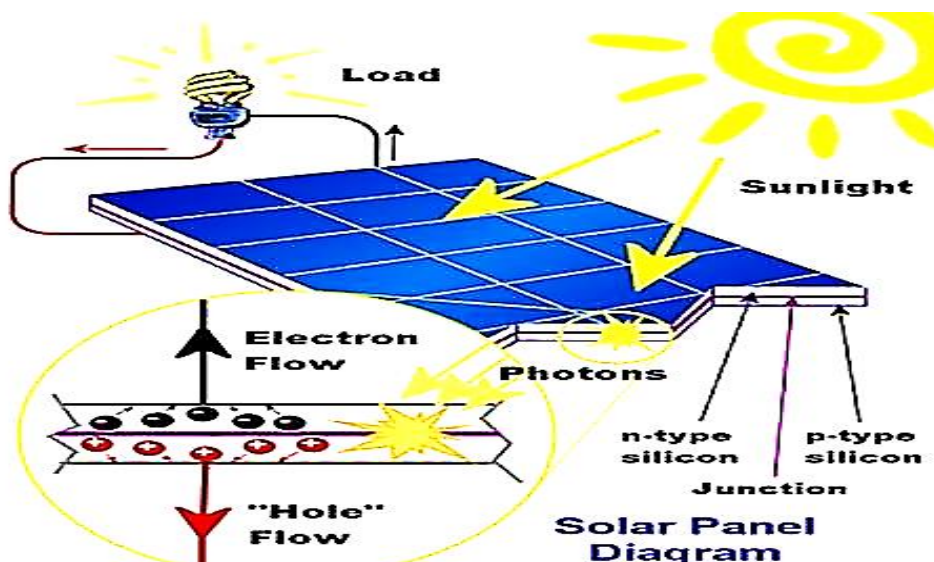


Figure I.3 : L'effet photovoltaïque [10]

7. La conversion photovoltaïque

La conversion photovoltaïque, se définit par la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu directement utilisable.

Lors de l'absorption de la lumière, la génération des paires électron-trou ainsi que la séparation de ces porteurs de charges, constituent un processus important non seulement pour les mesures et la détection de lumière (photo-détecteurs), mais aussi pour la conversion de la lumière en énergie chimique (photosynthèse) et en énergie électrique (cellules solaires).

8. La cellule photovoltaïque :

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des impuretés) sont substitués dans un réseau cristallin. Cette action est appelée dopage. Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type N (exemple : silicium dopé au phosphore).

Si au contraire, l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le silicium, le matériau sera déficitaire en électrons : il sera dit de type P (exemple : silicium dopé au bore).

La fabrication des cellules s'effectue à partir de lingots de silicium. Ces lingots sont découpés en fines couches de type P ou N en y diffusant du bore ou du phosphore.

Une cellule solaire est alors obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposé (jonction PN).

Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives. Des contacts métalliques en formes de grille, contacts avant et arrière, sont déposés.

Une cellule photovoltaïque donc est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique.

Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électrons/trous dans le matériau semi-conducteur ;
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trous créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N. [9]

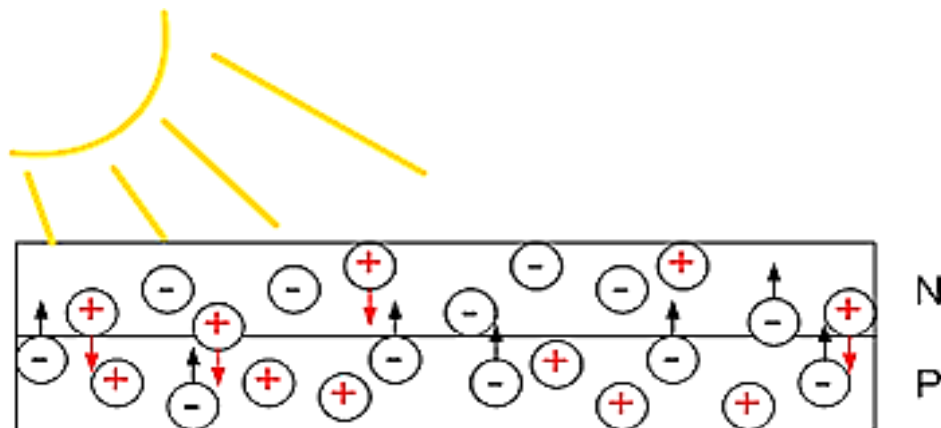


Figure I.4 : Jonction P-N [11]

Les différentes technologies de la cellule photovoltaïque

Un panneau solaire photovoltaïque, c'est avant tout un panneau composé d'un cadre mais surtout de cellules photovoltaïques. Ces dernières sont la base du panneau solaire, ce sont elles qui vont transformer la radiation solaire en électricité sous forme de courant continu. En ce qui suit, nous allons nous intéresser à étudier toutes les différentes technologies de la cellule photovoltaïque.

Ces cellules vont donc être un élément différenciateur au sein des panneaux solaires et les diviser en deux catégories :

- **Les technologies cristallines :**

À base de silicium (poly cristallin et monocristallin) sont de loin les plus utilisées aujourd'hui.

- **Les technologies "couches minces" :**

En particulier CIS et CdTe se développent de plus en plus sur le marché. D'autres filières basées sur l'utilisation de colorants ou de matériaux organiques, encore à leur balbutiements, promettent un bel avenir à l'énergie photovoltaïque.

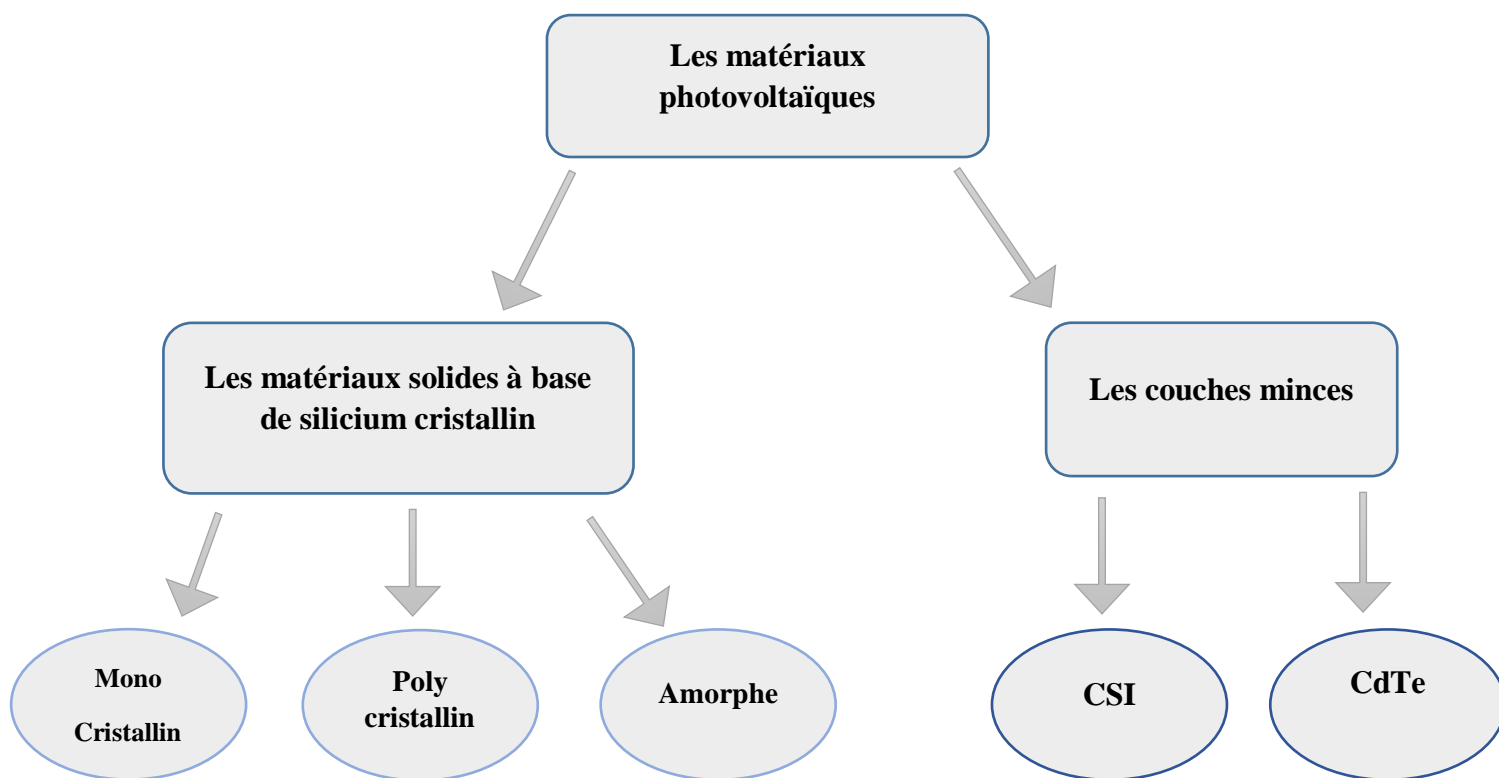


Figure I.5 : Organigramme de Les différentes familles de matériaux photovoltaïques [12]

9. Différents types de systèmes photovoltaïques

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés à un réseau qu'on a définie ci-dessous. Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées. [6]

- **Système photovoltaïque connecté au réseau électrique**

Dans ce genre de système, l'électricité est produite en courant continu par les capteurs, puis transformée en courant alternatif par un onduleur. Ce dernier contrôle la puissance injectée au réseau, le courant alternatif (converti par l'onduleur) est identique à celui qui circule sur le réseau et peut, soit être consommé sur place, soit être injecté sur le réseau.

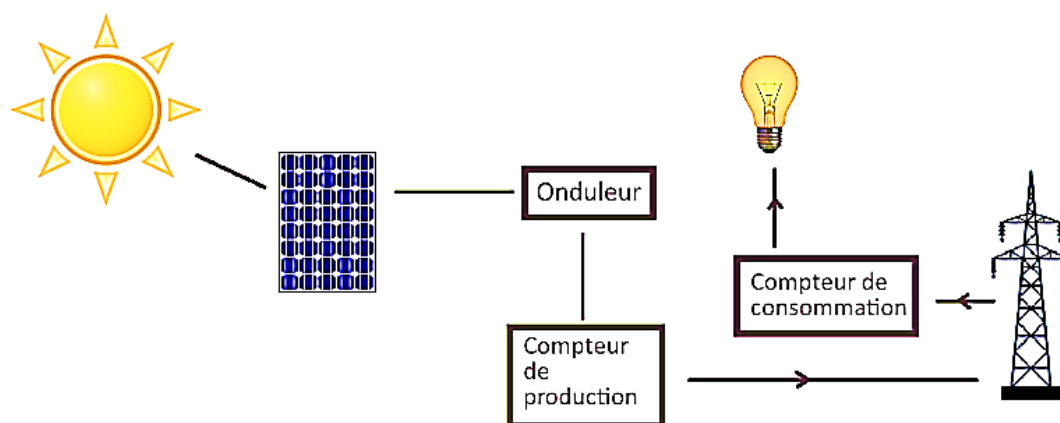


Figure I.6 : Système photovoltaïque connecté au réseau électrique [13]

- **Système hybride**

Les systèmes hybrides se sont des systèmes qui combine entre deux ou plusieurs sources d'énergies différentes, et cela afin d'assurer la continuité du service électrique et présente un double avantage afin de minimiser les perturbations de l'environnement, grâce à une consommation sur le lieu de production de ressources naturelles renouvelables et une sécurité d'approvisionnement, quelles que soient les conditions météorologiques. Les systèmes hybrides se compose généralement de sources d'énergie classique (groupe électrogène), de sources d'énergie renouvelable (éolienne, solaire, hydroélectrique, marémotrice, géothermique etc.) des convertisseurs statiques et dynamique, des systèmes de stockage (batterie, volant d'inertie, le stockage hydrogène...), et un système de surveillance.

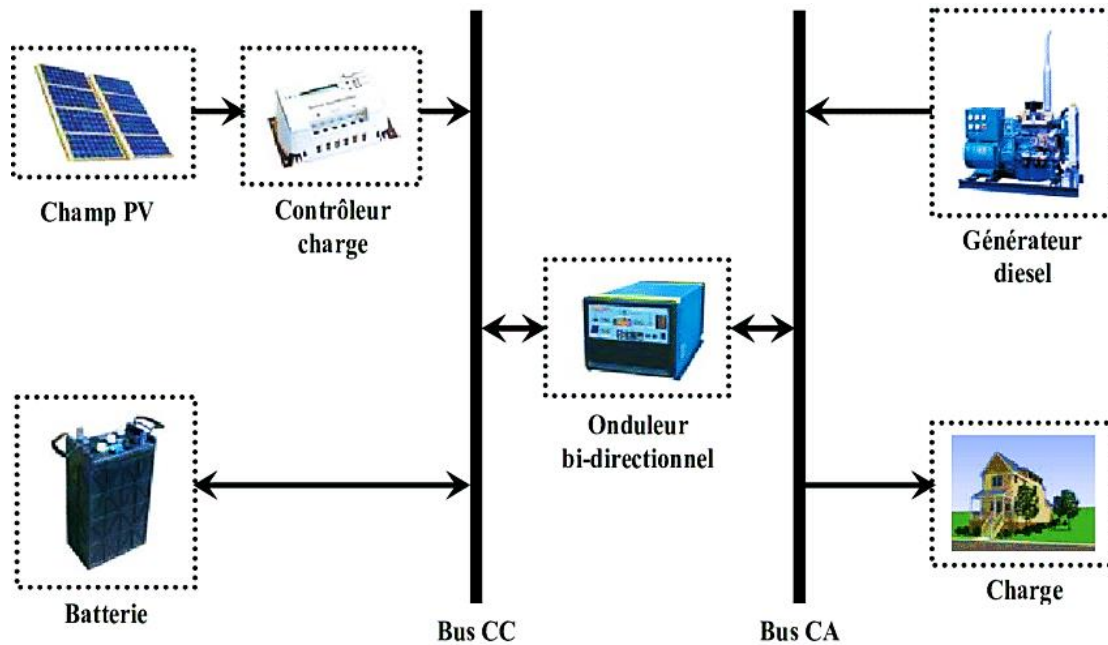


Figure I.7 : Système photovoltaïque hybride [14]

- **Systèmes autonomes**

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour le stockage d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique. [15]

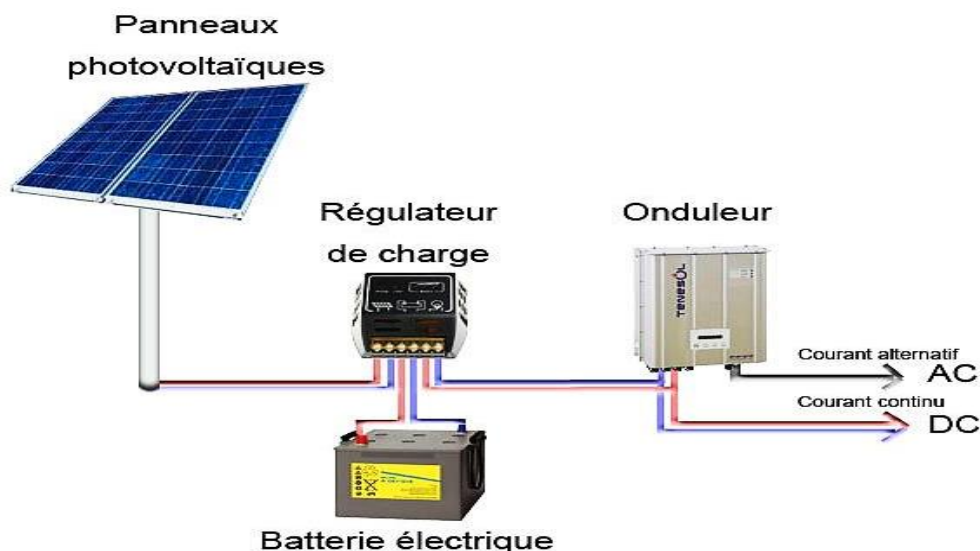


Figure I.8 : Système photovoltaïque autonome [16]

10. Stockage de l'énergie

Il existe plusieurs types de stockage de l'énergie dans les systèmes photovoltaïques. La batterie au plomb acide est la technologie la plus utilisée, à cause de son faible coût et sa disponibilité. La réaction de ces batteries n'est pas la même suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, c'est pour cela qu'on ne trouve pas un modèle unique pour tous les cas.

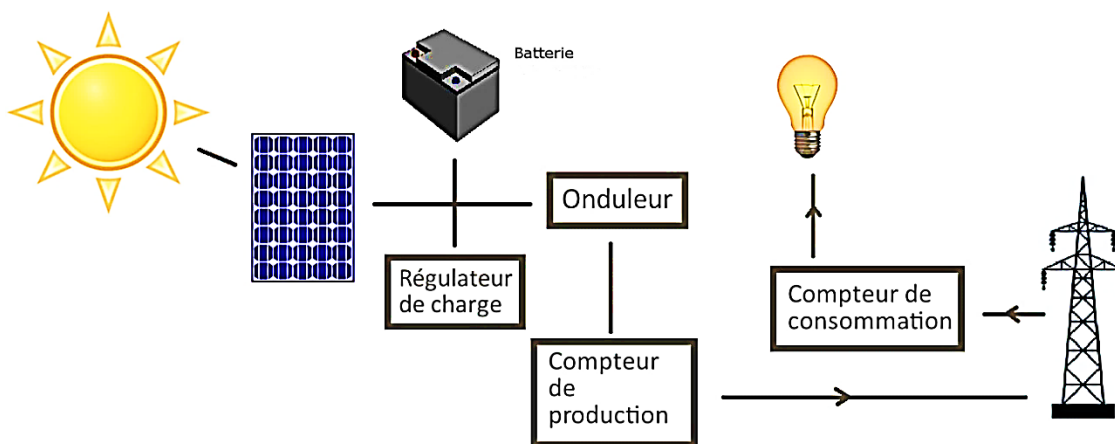


Figure I.9 : stockage de l'énergie dans les systèmes photovoltaïques [13]

11. Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque

1.1. Avantages

Les avantages de l'électricité solaire photovoltaïque sont multiples :

- La production de cette électricité renouvelable est propre, n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.

- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- L'électricité solaire photovoltaïque a pour qualité sa fiabilité, la durée de vie des capteurs supérieure à 25 ans, son autonomie, son faible impact sur l'environnement.
- Le coût de fonctionnement des panneaux photovoltaïques est très faible, car leur entretien est très réduit, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement. Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes. [17]

1.2. Inconvénients

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- Le rendement électrique diminue avec le temps (20 % de moins au bout de 20 ans) [17]

12. Avenir du photovoltaïque

Source d'énergie 100% propre et faible pour des usages très variés, elle figurera à l'avenir parmi les principales sources mondiales. Son handicap majeur reste un coût encore élevé comparée aux sources conventionnelles et aux filières renouvelables. Ce coût diminue de 10% par an, et pour accélérer cette baisse, les autorités nationales et internationales doivent engagés une politique de soutien à long terme de la filière photovoltaïque.

C'est précisément l'objectif des programmes lancés depuis quelques années dans plusieurs pays industrialisés. Dans notre pays, l'application du PV reste encore modeste. La première utilisation été dans le domaine des télécommunications. A nos jours, quelques dizaines de village saharien des régions de Tamanrasset et Adrar jouissent des avantages de cette source d'énergie. [17]

13. Différents domaines d'application

- Domaine spatial
- Habitation isolée
- Industrie isolée
- Centrale de puissance
- Résidence urbaine

14. Conclusion

Dans ce chapitre on a présente une vue générale sur l'évolution des systèmes photovoltaïque, les différent matériaux et technologies utilisé dans la fabrication, ainsi on a expliqué l'effet photovoltaïque et la chaine de conversion photovoltaïque commencent par un rayonnement jusqu'à la production de courant.

Finalement, nous avons décrit les avantages et inconvénients de l'énergie et l'avenir du photovoltaïque.



Chapitre II : Modélisation d'un générateur solaire photovoltaïque

1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules ou de photopiles fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible qui réalisent cette transformation d'énergie. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (PV) qui a une caractéristique statique courant-tension $I(V)$ non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. [18]

2. Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque

2.1. Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connecté à une charge peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (II.1), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale. [20]

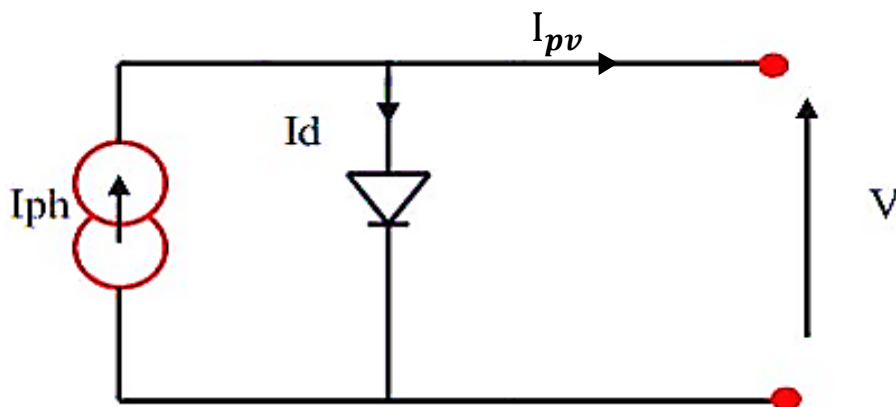


Figure II.1 : Schéma équivalent d'une cellule idéale.

- ◆ Les équations retenues de ce modèle sont :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (II.1)$$

- ◆ Le courant I_{ph} est assimilé au courant I_{sc} avec $V_{pv} = 0$, courant de court-circuit obtenu en court circuitant la charge.

$$I_{ph} = I_{sc} \quad (II.2)$$

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (II.3)$$

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode.

$$V_t = \frac{nkT}{q} \quad (II.4)$$

V_t : Tension thermique

n : Facteur d'idéalité de la photopile

k : Constant de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$)

q : Charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19} C$)

2.2.Cas d'une cellule réelle

La figure (II.2) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairage. Il correspond à un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma. Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule. [21]

- La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles

- La résistance shunt (R_{sh}) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

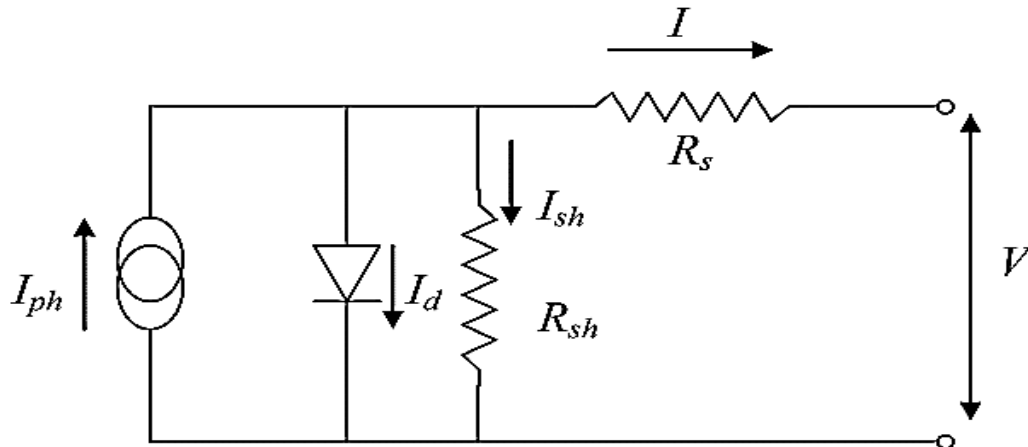


Figure II.2 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle. [21]

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{e(V_{pv} + (I_{pv} \times R_s))}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + (I_{pv} \times R_s)}{R_{sh}} \quad (\text{II.5})$$

I_{sat} : Est le courant de saturation,

k : est la constante de Boltzmann ($1,38. 10^{-23} \text{ j/k}$),

T : est la température effective des cellules en Kelvin(K),

e : est la charge de l'électron ($e = 1,6. 10^{-19} \text{ C}$),

n : est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n < 3$),

I_{pv} : est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur,

V_{pv} : est la tension aux bornes de cette même cellule,

I_{ph} : est le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court-circuit),

R_{shu} : est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction,

R_{ser} : est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

3. Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique.

Les plus usuels sont les suivantes :

3.1. Courant de court-circuit (I_{cc}) :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$ dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (\text{II.6})$$

3.2. Tension de circuit-ouvert (V_{co}) :

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$V_{co} = 0 = I_{cc} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{eV_{pv}}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_{shu}} \quad (\text{II.7})$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_T \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (\text{II.8})$$

3.3. Rendement énergétique :

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule P_{max} (I_{opt}, V_{opt}) et la puissance solaire incidente. Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt} \times V_{opt}}{P_{inc}} \quad (\text{II.9})$$

Avec P_{inc} est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique

3.4. Facteur de forme :

Ce coefficient représente le rapport entre, la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et, la puissance formée par le rectangle ($I_{cc} \times V_{co}$) Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Le facteur de forme indique la qualité de la cellule

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_{opt} \times V_{opt}}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (\text{II.10})$$

4. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque [12]

4.1. Caractéristique courant-tension

La figure ci-dessous représente la courbe $I = f(V)$ d'une cellule photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

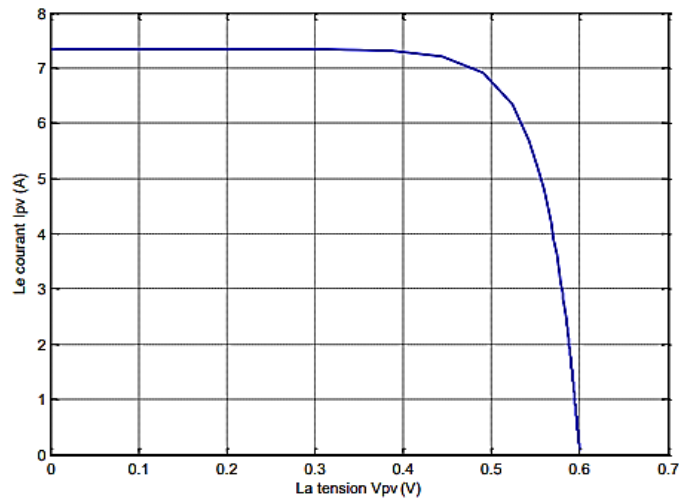


Figure II.3 : Caractéristique I-V d'une cellule PV

4.2. Caractéristique puissance-tension

La puissance délivrée par la cellule a pour expression $P = V.I$. Pour chaque point, on peut calculer la puissance P et tracer la courbe $P = f(V)$. Figure (II.4)

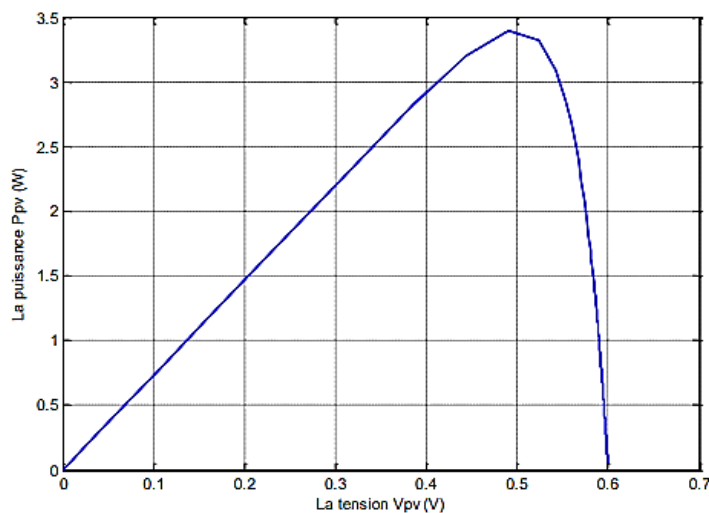


Figure II.4 : Caractéristique P-V d'une cellule PV

5. Influence de l'éclairement

Pour plusieurs intensités de rayonnement solaire. On remarque que le courant électrique, est directement proportionnel au rayonnement à ces niveaux d'éclairement. Par contre la tension est dégradée légèrement par rapport au courant, lorsque l'intensité de la lumière baisse.

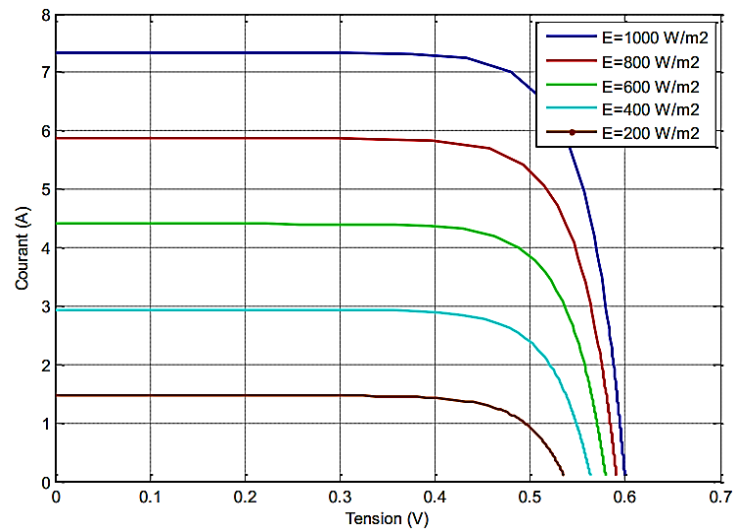


Figure II.5 : Caractéristique I-V d'un module PV en fonction de l'éclairement

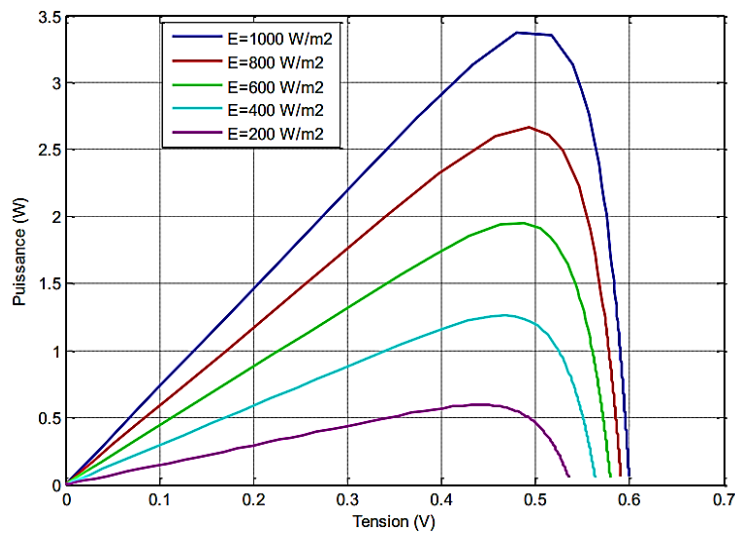


Figure II.6 : Caractéristique P-V d'un module PV en fonction de l'éclairement

6. Influence de la température

L'influence de la température est très significative, ce qui nous conduit à une considération soigneuse, lors de la mise en marche des systèmes photovoltaïques. Sur la Figure (II.7), on illustre l'effet de la température sur le comportement des photopiles. Elle montre une diminution considérable de la tension électrique délivrée avec l'augmentation de la température. Tandis que, le courant gagne quant à lui de l'intensité. Ceci peut être expliqué par la baisse du gap, ce qui provoque l'accroissement de la concentration des porteurs de charge, puisque la transition entre les niveaux devienne plus probable.

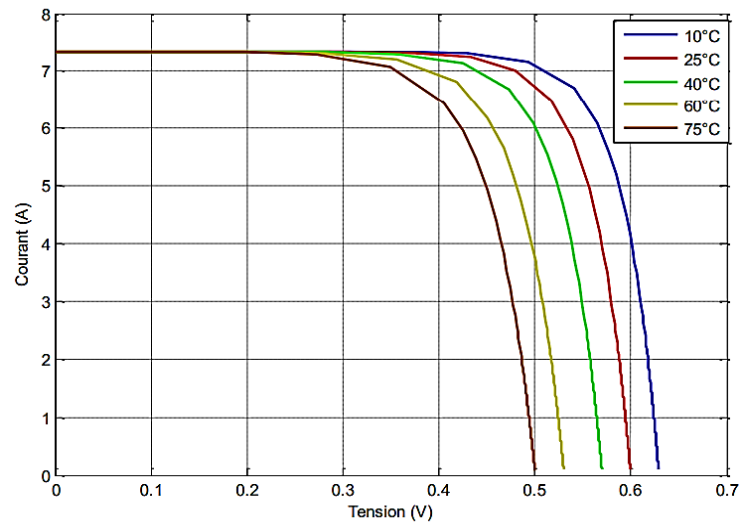


Figure II.7 : Caractéristique I-V d'un module PV en fonction de la température

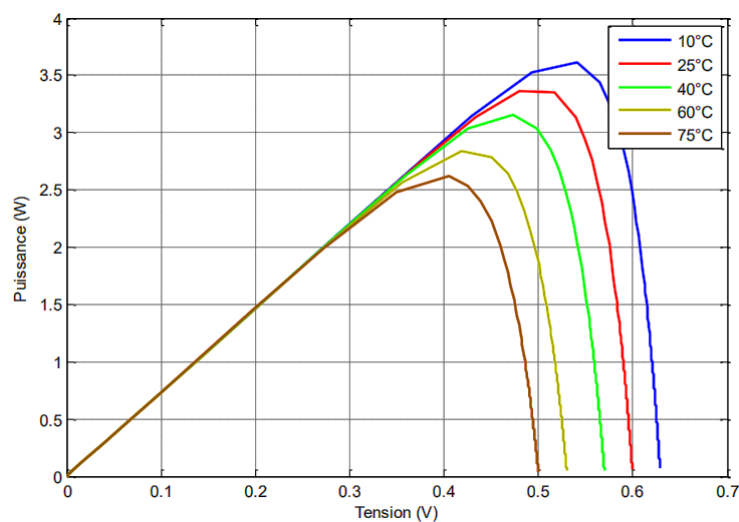


Figure II.8 : Caractéristique P-V d'un module PV en fonction de la température

7. Association de la cellule photovoltaïque

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera comme représentés sur les figures suivantes. [22]

7.1. Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement des cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est

obtenue par addition des courants à tension donnée. Les figures. (II.10, II.11) montrent les caractéristiques résultantes (I_{pcc}, V_{pco}) obtenues en parallèle (indice p) N_p cellules identiques :

$$I_{scc} = I_{cc} \quad \text{et} \quad V_{sco} = N_s \times V_{co} \quad (\text{II.11})$$

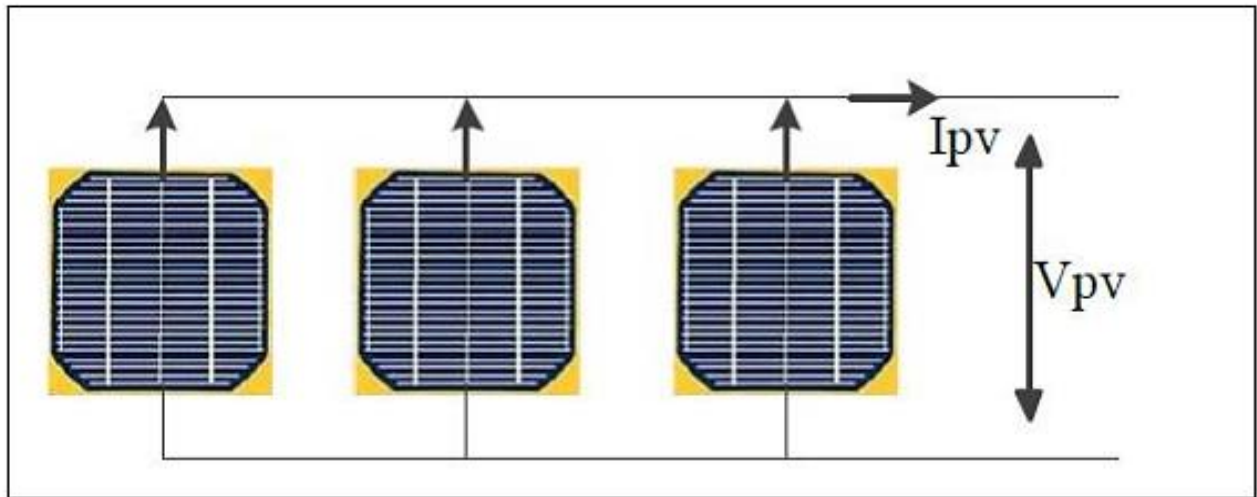


Figure II.9 : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle

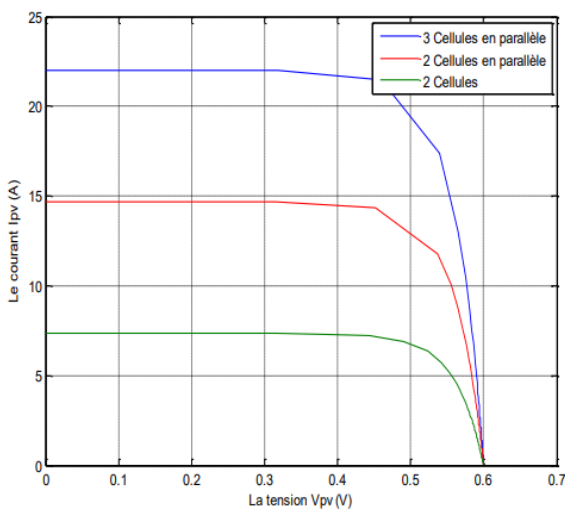


Figure II.10 : Caractéristique I-V des cellules PV raccordées en parallèle.

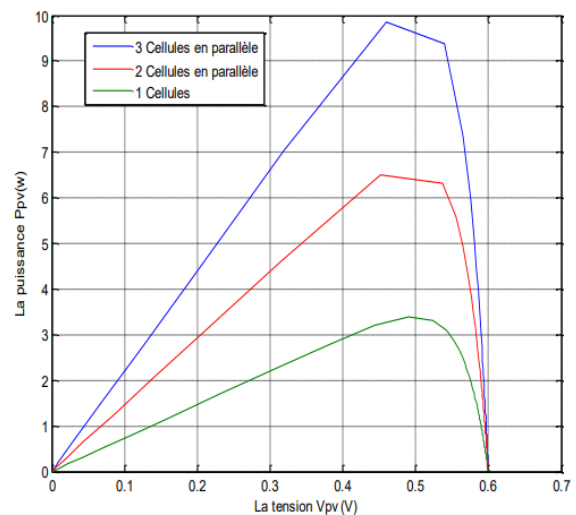


Figure II.11 : Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en parallèle

7.2. Association des Cellules Photovoltaïques en Série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. Les figures (II.13, II.14) montrent la caractéristique résultante (I_{scc}, V_{sco}) obtenue en associant en série (indice s) N_s cellules identiques (I_{cc}, V_{co}) :

$$I_{scc} = I_{cc} \quad (\text{II.12})$$

$$V_{sco} = N_s \times V_{co} \quad (\text{II.13})$$

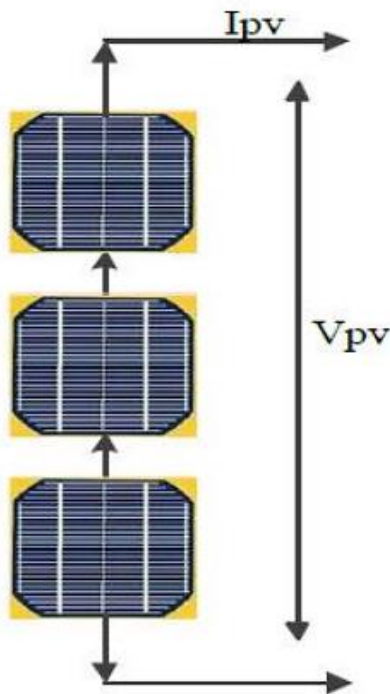


Figure II.12 : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série

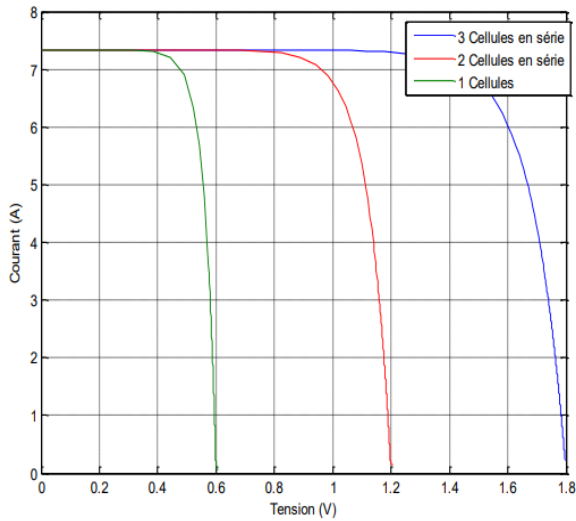


Figure II.13 : Caractéristique I-V des cellules PV raccordées en séries

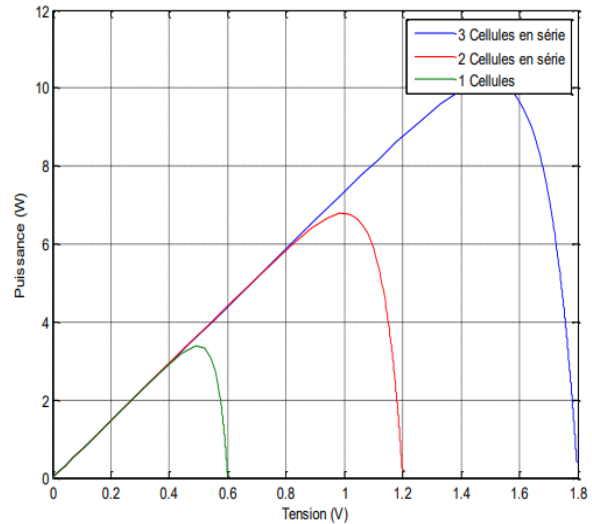


Figure II.14 : Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en séries

8. Protection de la cellule photovoltaïque

8.1. Protection par diode by-pass

Comment pouvons-nous protéger une cellule photovoltaïque, un panneau ou même un réseau complet des effets destructeurs d'un ombrage partiel ou total. Un moyen simple et efficace de protéger les cellules photovoltaïques contre les effets destructeurs de l'ombrage des cellules consiste à connecter ce que l'on appelle une diode de by-pass sur chaque cellule photovoltaïque d'une chaîne connectée en série.

Les diodes by-pass sont connectées à l'extérieur et en parallèle inverse avec une cellule photovoltaïque pour fournir un chemin électrique alternatif pour le courant généré, car il ne peut pas traverser la cellule lorsqu'il est ombragé. Cela permet de préserver les performances de la chaîne en série en limitant la tension de polarisation inverse générée sur toute cellule partiellement ombragée et donc de réduire la puissance électrique qui peut être dissipée par la cellule. [23]

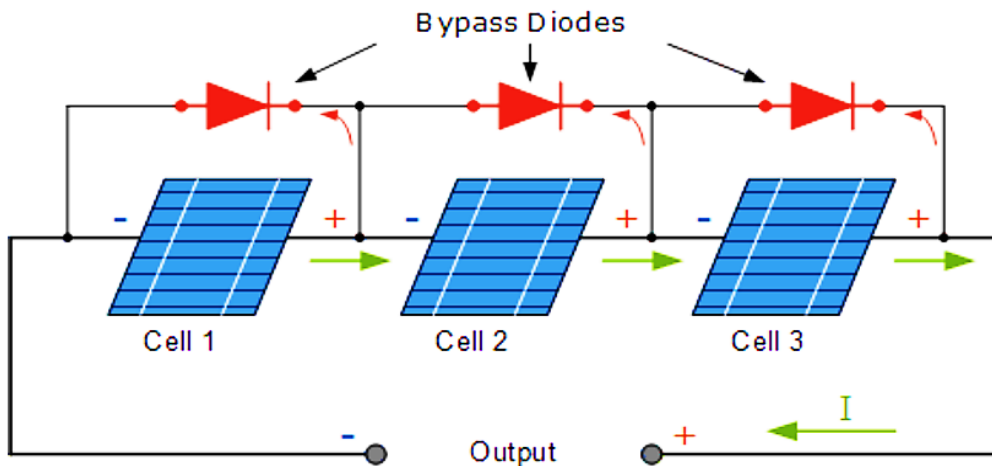


Figure II.15 : Protection par des diodes by-pass [23]

8.2. Protection par diode anti-retour

Il faut connecter une diode en série sur chacune des branches pour empêcher un ensemble de cellules reliées en série dans une branche de recevoir de l'énergie électrique provenant d'autres branches mises en parallèle. Ces diodes doivent supporter le courant généré par la branche quand elle fonctionne normalement. Elles ont aussi le rôle d'empêcher le retour de l'énergie stockée lorsque les conditions atmosphériques sont défavorables où durant la nuit.

9. Le module photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module Figure (II.16). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène -vynilacétate) Figure (II.16) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène. [24]

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation.

A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant 2 diodes antiparallèles Figure (II.16). Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre. [25]

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

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

Les modules en silicium monocristallin (c-si, 64% de marché), poly cristallin ou multi cristallin (xc-Si, 28% du marché) ou silicium amorphe (a-si, 13% du marché), délivrent des tensions normalisées (12, 24, 48) et des puissances entre 10 et 100 Wc (watt-crête : puissance obtenue pour l'ensoleillement maximal). [24]

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, le courant de sortie, et la puissance seront proportionnels à la surface du module. Ils ont une efficacité de conversion (énergie électrique produite/énergie solaire incidente)

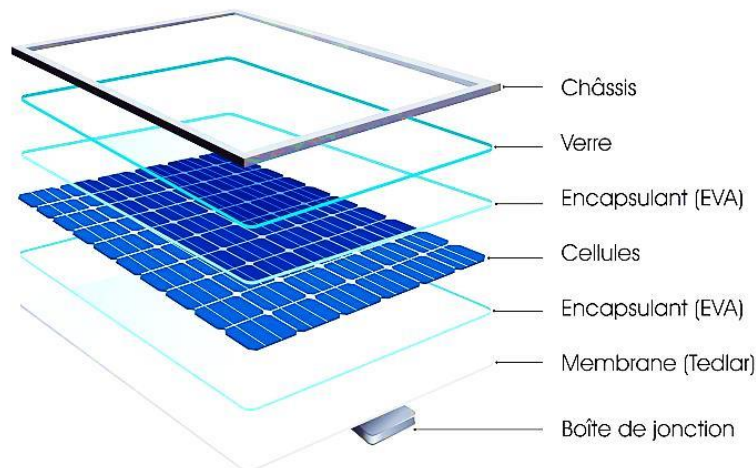


Figure II.16 : Module photovoltaïque [26]

10. Conclusion

Ce chapitre s'est consacré à présenter les différents composants d'un système photovoltaïque. On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. Ensuite on fait un rappel sur les systèmes PV et leurs performances.

Dans le qui suit, on présenter une étude sur les convertisseurs DC-DC (hacheurs) et leurs commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.



Ch. III : Étage d'adaptation DC-DC

1. Introduction

Le coût élevé des générateurs photovoltaïques peut justifier l'adjonction d'un appareillage annexe, même sophistiqué, permettant de gérer au mieux l'énergie disponible. En particulier, sur la caractéristique courant-tension du générateur (qui dépend des conditions d'éclairement, de température, de vieillissement) il existe un point de fonctionnement où la puissance débitée est maximale.

L'optimisation consiste à réaliser ce point en permanence en agissant de façon automatique sur la charge vue par le générateur. Cette adaptation de charge, dont le principe est maintenant classique, s'effectue en général à l'aide d'un convertisseur statique dont les pertes doivent être aussi faibles que possible et qui peut, par ailleurs, assurer une fonction de mise en forme d'une grandeur de sortie (conversion continu-alternatif ou continu-continu) avec modification de tension par exemple.

Dans ce chapitre on va étudier les différents convertisseurs qui assure le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque, d'abord on va voir la problématique de la connexion directe entre le GPV et la charge et en suite nous présentons les différentes méthodes (directes et indirectes) pour optimiser la puissance avec les différents types des convertisseurs statiques qu'on peut utiliser dans le système photovoltaïque. On terminera par une conclusion.

2. Convertisseurs DC/DC

Un convertisseur de tension continue DC/DC est un module (ou mini module) générant une tension de sortie régulée, isolée de la tension d'entrée. Cette conversion d'énergie s'effectue grâce à un "découpage" haute fréquence caractérisée par un rendement élevé jusqu'à 94%.

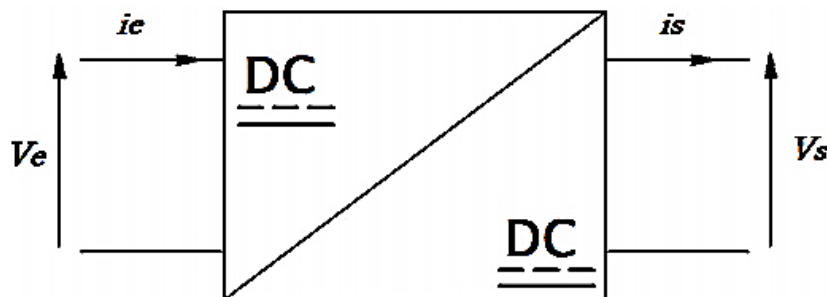


Figure III.1 : Convertisseur Continu-Continu

Dans la littérature il y a plusieurs types des convertisseurs DC/DC, le choix de l'un par rapport à l'autre dépend de l'application. Ci-dessous quelques types de convertisseurs :

2.1. Convertisseur abaisseur "Buck"

Hacheur abaisseur, hacheur dévolteur, hacheur série, hacheur de type BUCK, Buck chopper

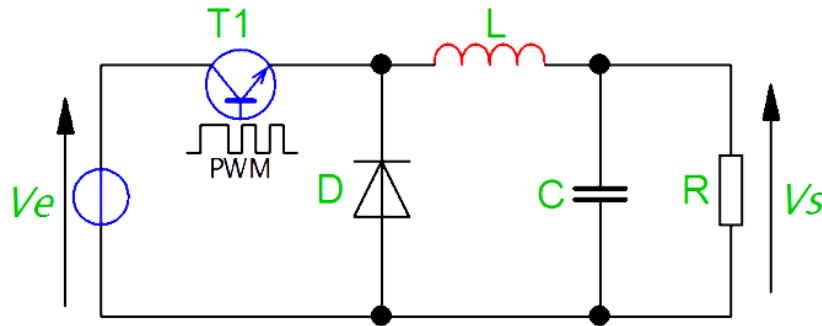


Figure III.2 : Convertisseur Buck

Le hacheur série est un convertisseur direct DC–DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur T1 peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). L'interrupteur T1 est fermé pendant la fraction αT de la période de découpage T. La source d'entrée fournit l'énergie à la charge R au travers de l'inductance L. Lors du blocage du transistor, la diode D assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge. La valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle [28]. La tension de sortie est donnée par la relation suivante :

$$\mathbf{Vs} = (v_s) = (v - v_L) = (v) = \alpha V_e \quad (\text{III.1})$$

Par définition, $0 < \alpha < 1$, ce qui induit que le montage est abaisseur de tension (dévolteur)

α : est le rapport cyclique.

2.2. Convertisseur élévateur "Boost"

Hacheur élévateur, hacheur survolteur, hacheur parallèle, hacheur de type BOOST, boost chopper

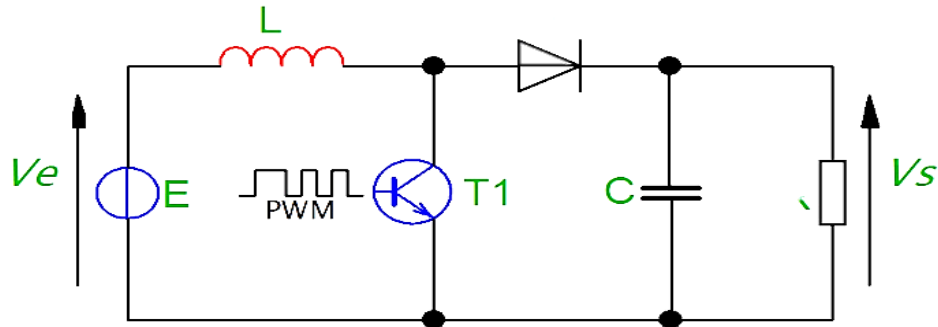


Figure III.3 : Convertisseur Boost

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur T1 peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). L'interrupteur T1 est fermé pendant la fraction αT de la période de découpage T. La source d'entrée fournit l'énergie à la charge R au travers de l'inductance L. Lors du blocage du transistor, la diode D assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge [28]. En régime permanent, la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, ce qui impose la relation suivante :

$$V_e = (v_e) = (V_t) = (1 - \alpha)V_s \quad (\text{III.2})$$

Soit,

$$V_s = \frac{V_e}{1-\alpha}$$

Par définition, $0 < \alpha < 1$, ce qui induit que le montage est élévateur de tension (survolteur).

2.3. Convertisseur bi-directionnel en courant (Buck-Boost)

L'idée de ce type de convertisseur est d'associer un hacheur série et un hacheur parallèle pour obtenir un hacheur réversible en puissance.

- La tension du récepteur (E_1) est inférieure à celle de la source (E).
- Quand $I_R > 0$, la puissance va de la "source" vers le "récepteur", seul le hacheur dévolteur fonctionne.
- Quand $I_R < 0$, la puissance va du "récepteur" vers la "source", seul le hacheur survolteur fonctionne.

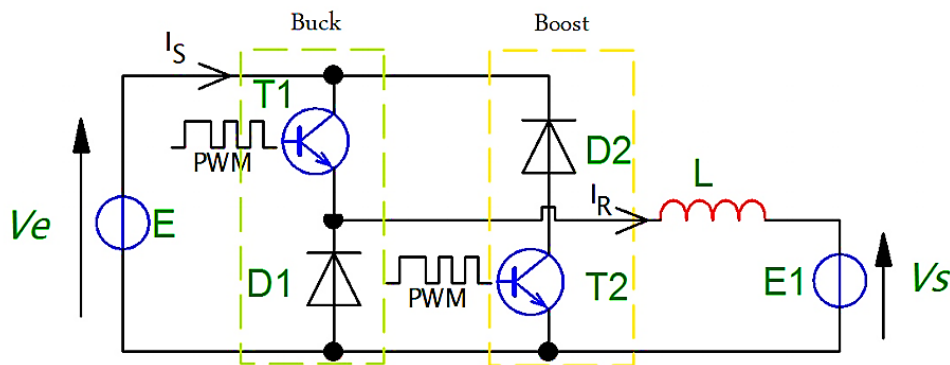


Figure III.4 : Convertisseur DC-DC Bi-Directionnel

-Les tensions aux bornes de la source (E) et récepteur (E_1) sont toujours positives, et seul les courants sans le récepteur (I_R) et dans la source (I_S) peuvent changer de sens, donc si tous ces critères sont valident on parle d'un hacheur réversible en courant

3. Commande MPPT [19]

3.1. Principe de fonctionnement de MPPT

Un MPPT, de l'anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant. La figure (III.5) représente la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur.

La Figure (III.6) présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie servant de stocke l'énergie pour une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension.

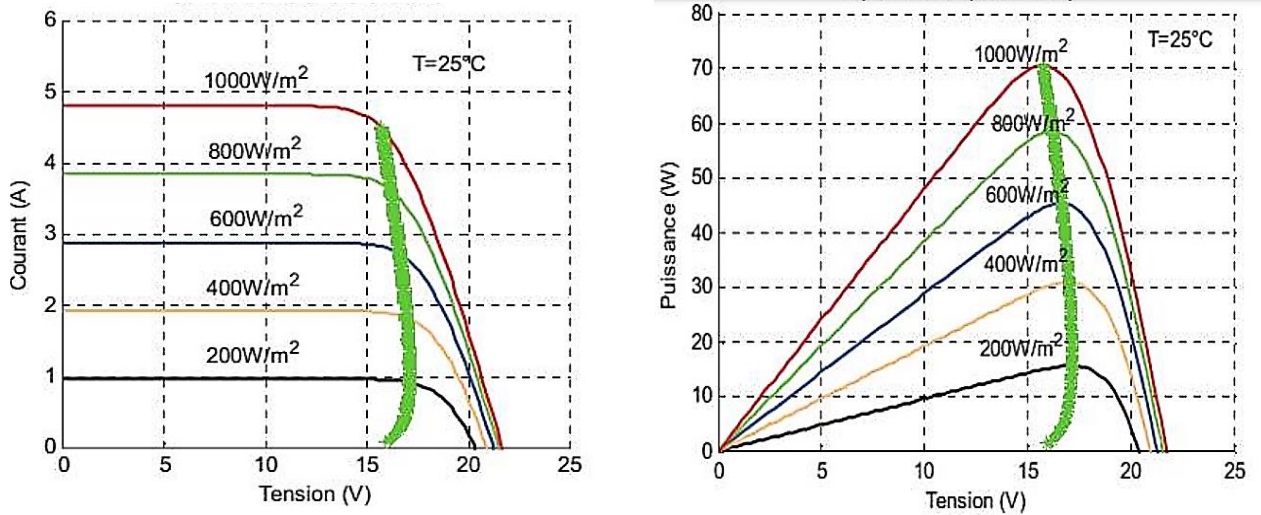


Figure III.5 : La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM [19]

Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé [29]

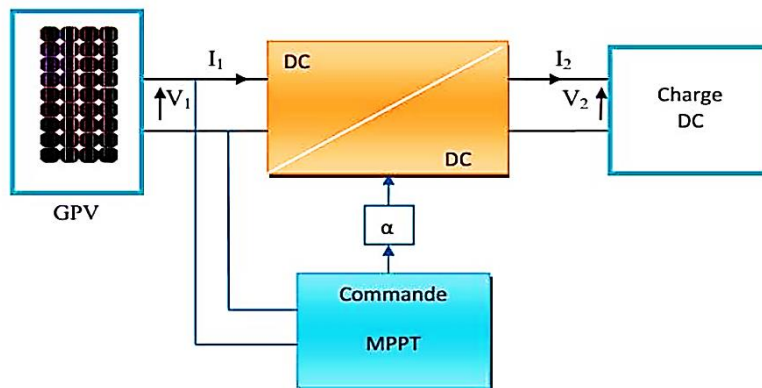


Figure III.6 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque [19]

La figure (III.7) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximale PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

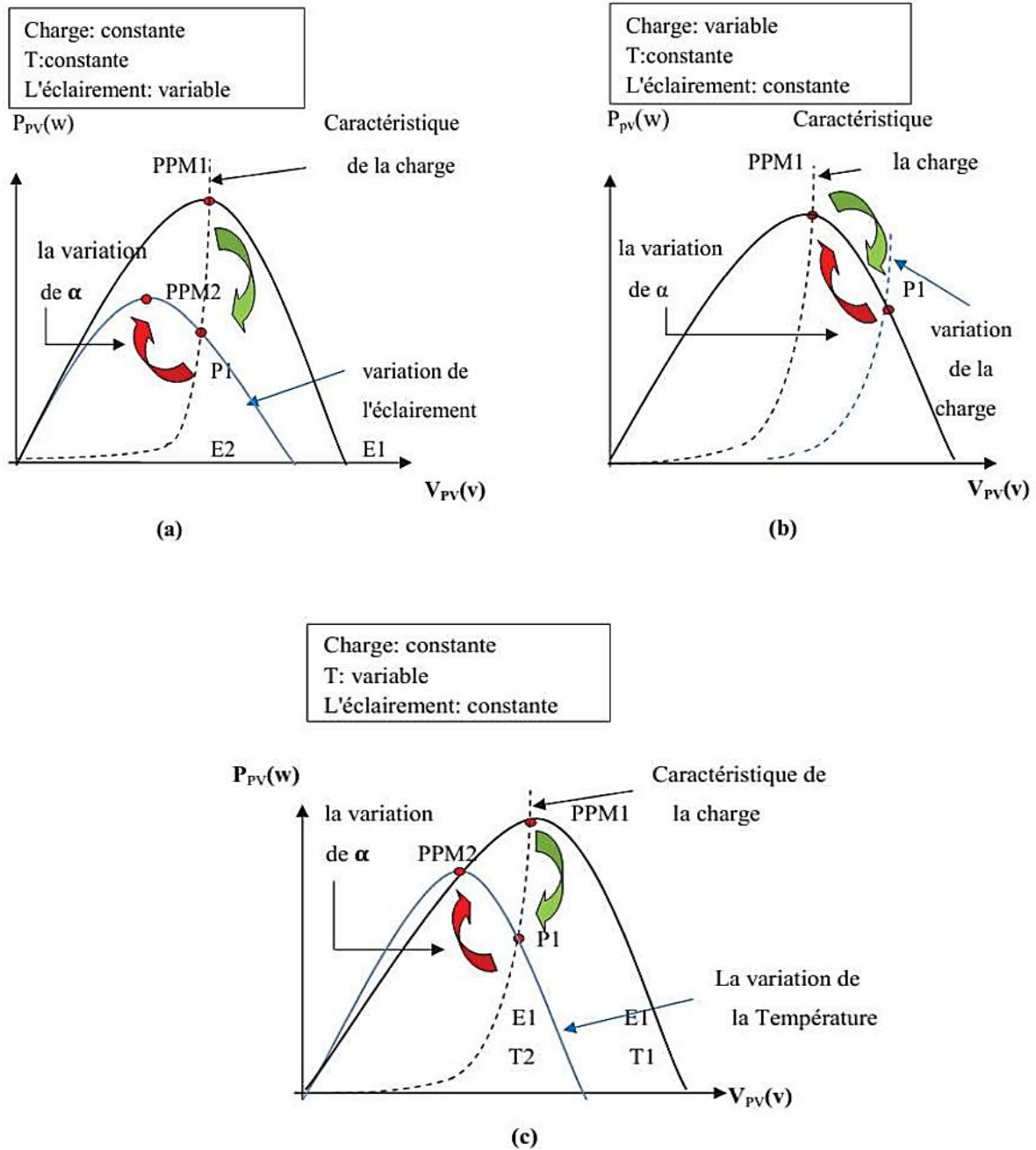


Figure III.7 : Recherche et recouvrement du Point Puissance Maximale (a) suite à une variation d'éclairement, (b) suite à une variation de charge, (c) suite à une variation de température. [19]

Dans ce cas est pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Dans le cas b pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Enfin dans le dernier cas c de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV .Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande [30].

3.2. Classification de l'algorithme de suiveur la puissance max

La classification des algorithmes du suiveur peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées :

3.2.1. Les méthodes indirectes

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. Parmi ces méthodes :

- 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.

3.2.2. Les méthodes directes

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures.

L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Parmi ces méthodes :

- la méthode de différenciation
- La méthode Perturbe & Observe (P&O)
- La méthode incrémentation de la conductance

4. La méthode Perturbe & Observe (P&O)

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure (III.8), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande.

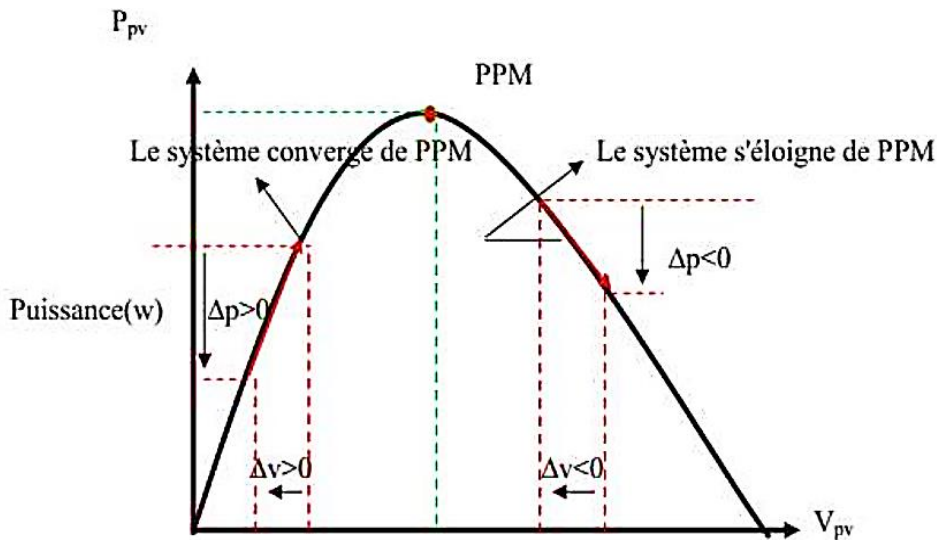


Figure III.8 : Convergence vers le PPM par P&O. [19]

La figure (III.9) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

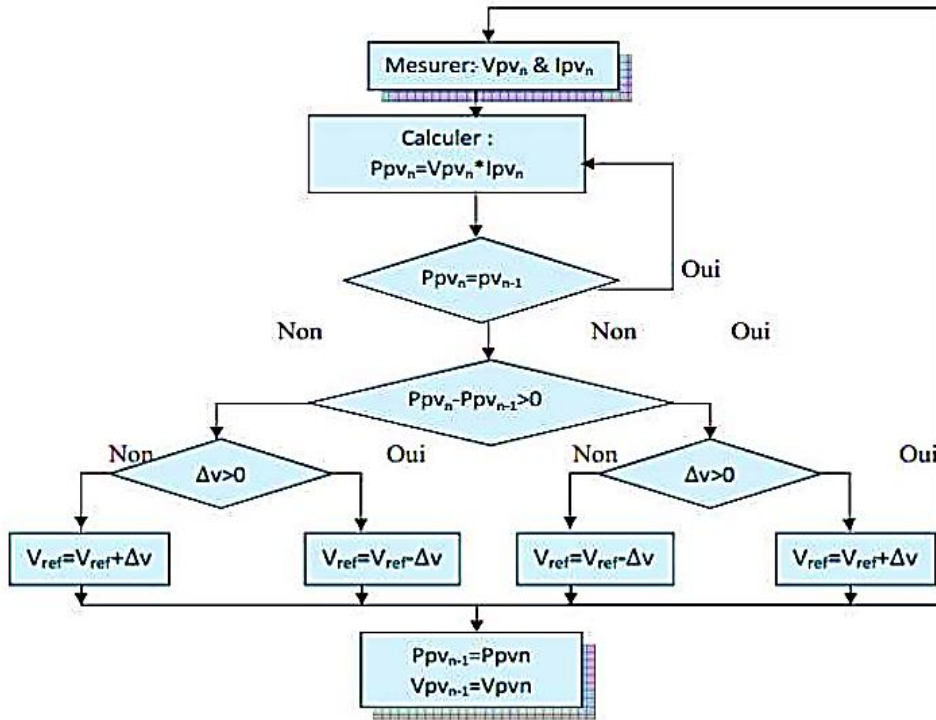


Figure III.9 : Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O

la nouvelle puissance : P_{pv_n} . [19]

Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant [31].

$P_{pv_{n-1}}$: L'enceint puissance dans le temps (t-1)

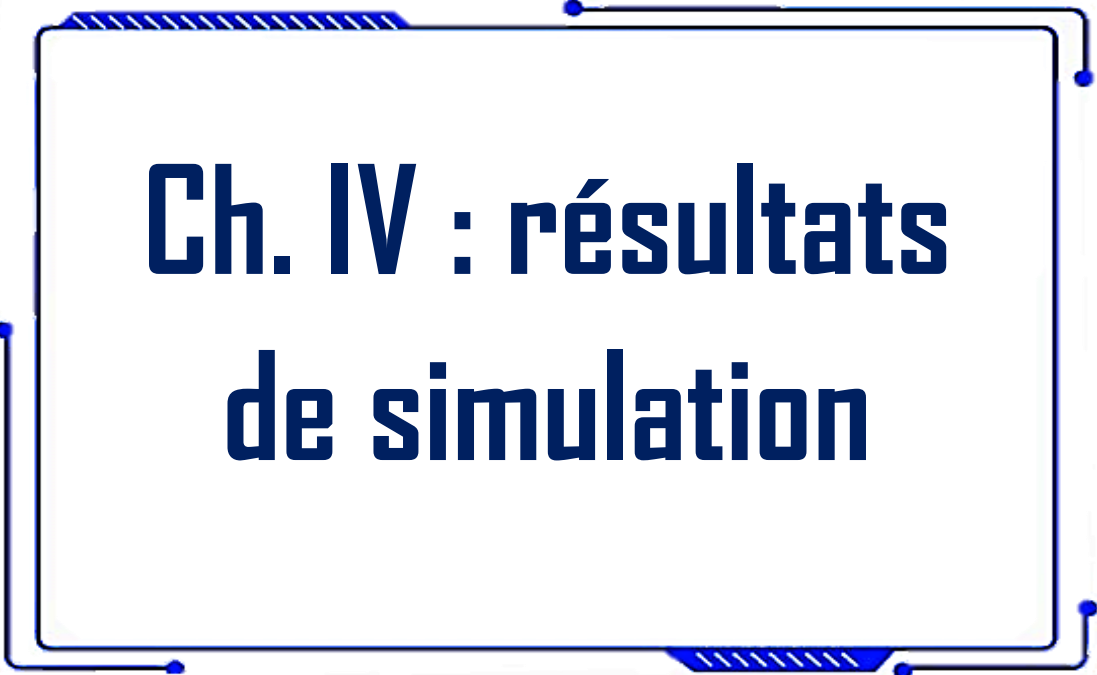
$$\begin{aligned} \Delta V &= V_{pv_n} - V_{pv_{n-1}} \\ \Delta P &= P_{pv_n} - P_{pv_{n-1}} \end{aligned} \quad (III.3)$$

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de part sa facilité d'implémentation cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée

périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralenti la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser [31].

5. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les différents convertisseurs utilisés dans la conversion d'énergie électrique produite par le panneau PV, adaptés à l'aide du hacheur et la commande MPPT et ses différents algorithmes utilisés.



Ch. IV : résultats de simulation

1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats obtenus. La procédure comprend la mesure des caractéristiques courant-tension (I-V), et la Tension d'alimentation (P-V) pour différentes configurations.

Le but est d'étudier l'effet des différents paramètres comme l'ombrage, la poussière et la température sur les différentes propriétés des dispositifs photovoltaïques. On obtient ce résultat à l'aide de Matlab, un programme très connu dans le milieu électronique. Avec la bibliothèque de l'outil Simulink, on peut simuler notre environnement.

2. Matlab /Simulink**2.1.MATLAB :**

Est un groupe dédié au traitement de signal. En plus du noyau de calcul Matlab, l'environnement y compris des modules optionnels parfaitement intégrés à la collection :

- Bibliothèque complète de fonctions dédiées (boîte à outils).
- Simulink, un environnement de modélisation puissant basé sur des diagrammes et simulation de systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Bibliothèque de blocs de simulation dédiée (jeu de blocs).
- D'autres modules, notamment des compilateurs, des générateurs de code C et des accélérateurs.
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du signal : DSP Workshop.

2.2.SIMULINK :

Est une plateforme de simulation et de modélisation multi-domaines Système dynamique. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de modules qui permettent une conception, une simulation et une mise en œuvre précises. Et contrôler le système de communication et de traitement du signal.

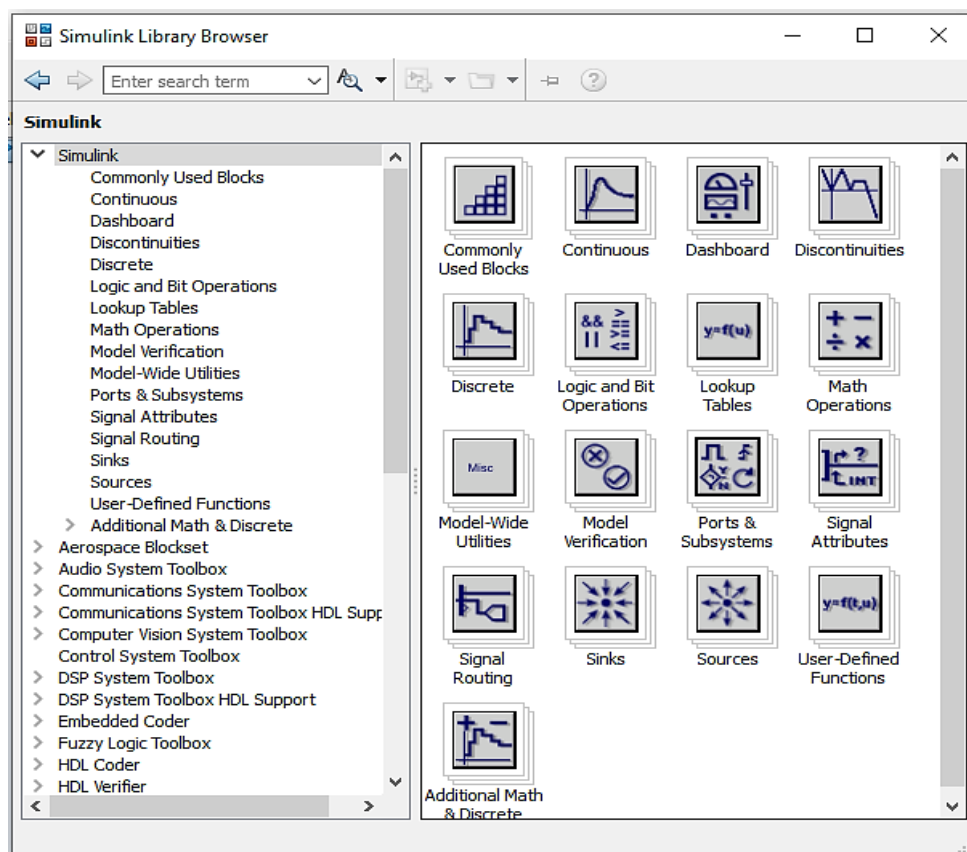


Figure IV.1 : Bibliothèque d'outils Simulink

3. Etapes de simulation avec Matlab :

1. Lancer Matlab.
2. Ouvrir l'icône du Simulink Library.
3. On clique sur file après choisie New Model on trouve la page de travail.
4. Ajouter les éléments dont on a besoin.
5. Modélisation de module photovoltaïque.
6. Indiquer la mesure (la caractéristique) à simuler.
7. Exécutions des résultats.
8. Afficher les courbes de simulation

4. Model de panneau PV : (yingli_yl250p29)

C'est un panneau à base de silicium poly cristallin, Nombre de cellules : 60 cellules (10 en série et 6 en parallèles) ça caractéristique :

- Puissance max : $P_{max}=250.496$ w
- Tension de circuit ouvert : $V_{oc}=38.4$ v
- Tension de point max : $V_{pm}=30.4$ v
- Courant de point max : $I_{mp}=8.24$ A
- Courent de court-circuit : $I_{sc}=8.79$ A

4.1.Modèle de panneaux dans Simulink :

Module data		Model parameters	
Module:	Yingli Energy (China) YL250P-29b	Light-generated current I_L (A)	8.8002
Maximum Power (W)	250.496	Diode saturation current I_0 (A)	1.2723e-10
Cells per module (Ncell)	60	Diode ideality factor	0.9985
Open circuit voltage V_{oc} (V)	38.4	Shunt resistance R_{sh} (ohms)	364.6382
Short-circuit current I_{sc} (A)	8.79	Series resistance R_s (ohms)	0.42475
Voltage at maximum power point V_{mp} (V)	30.4		
Current at maximum power point I_{mp} (A)	8.24		
Temperature coefficient of V_{oc} (%/deg.C)	-0.33701		
Temperature coefficient of I_{sc} (%/deg.C)	0.0438		

Figure IV. 2 : spécification de panneau yingliyl250p-29b

Caractéristique $i(v)$ et $p(v)$ de panneau :

Les caractéristiques courants- tensions $I(V)$ et puissance- tension $P(V)$ simulées sous les conditions standards ; irradiation $G = 1000$ w/m², et Température ; $T = 25$ C° sont Présentées sur la figure :

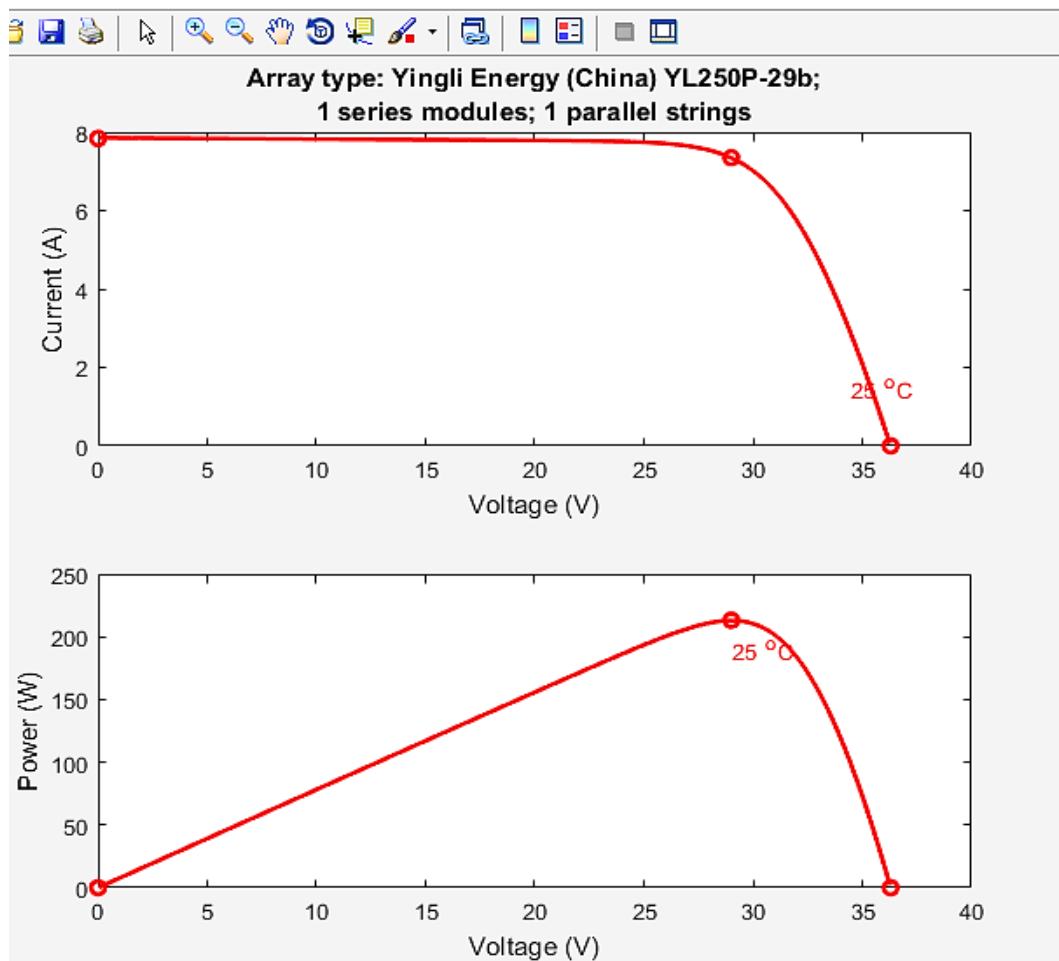


Figure IV.3 : caractéristique I(v) P(v) dans les conditions STC

5. Schéma de convertisseur Boost de système :

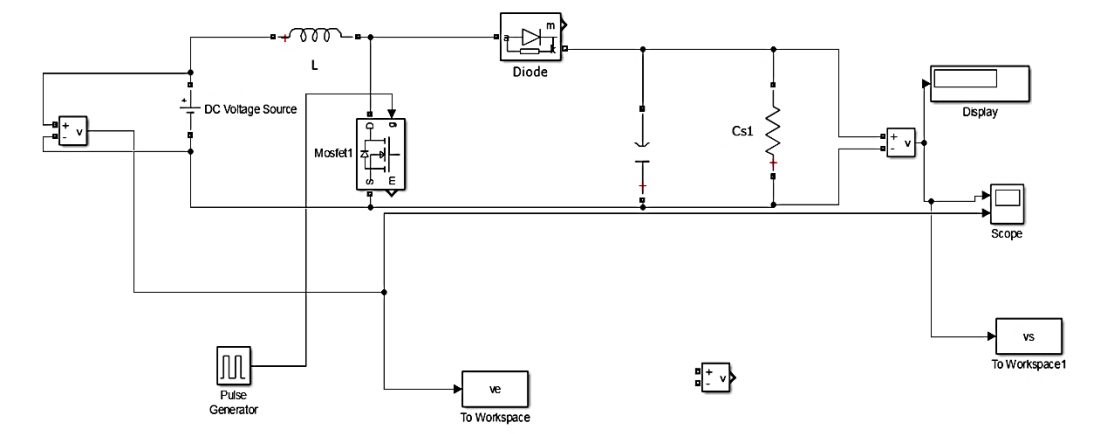


Figure IV.4 : schéma équivalent de convertisseur Boost sur Simulink

La tension d'entrée (V_e) :

$$V_e = 100\text{V}$$

La source de tension d'entrée est stable.

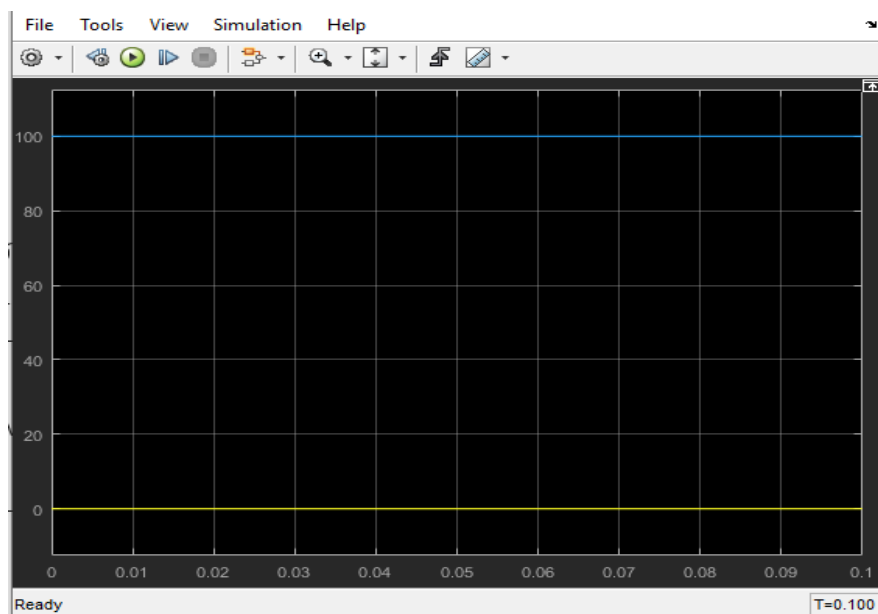


Figure IV.5 : la tension d'entrée de convertisseur Boost

Tension de sortie (V_s) :

Le résultat montre une perturbation dans le régime transitoire puis il se stabilise dans le régime permanent. égale 335V.

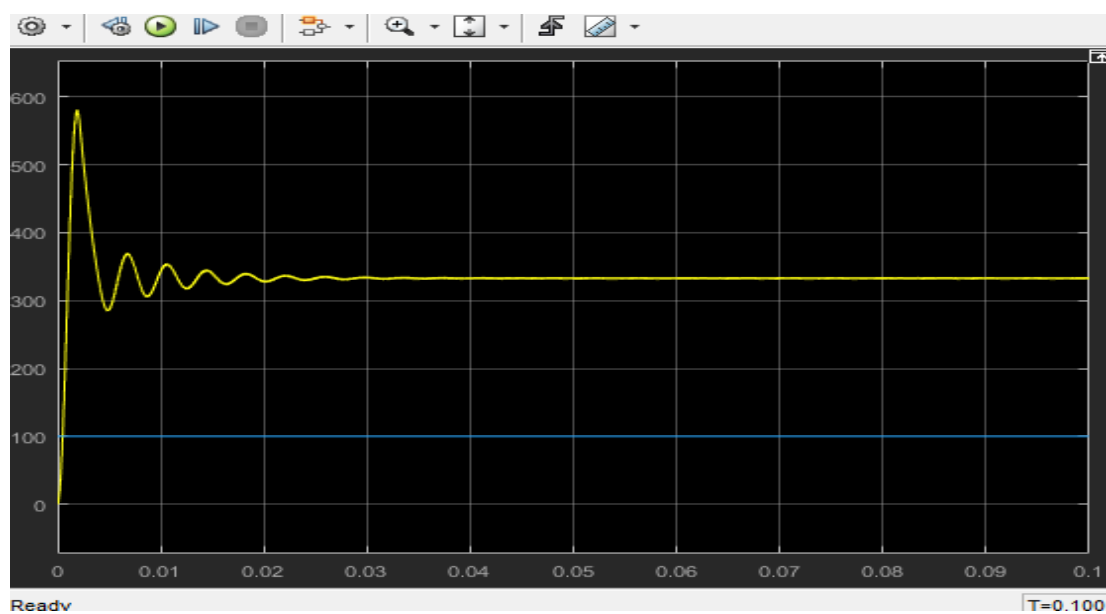


Figure IV.6 : la tension de sortie de convertisseur Boost

6. L'influence des conditions climatique sur un seul panneau :

Schéma de panneau solaire étudié :

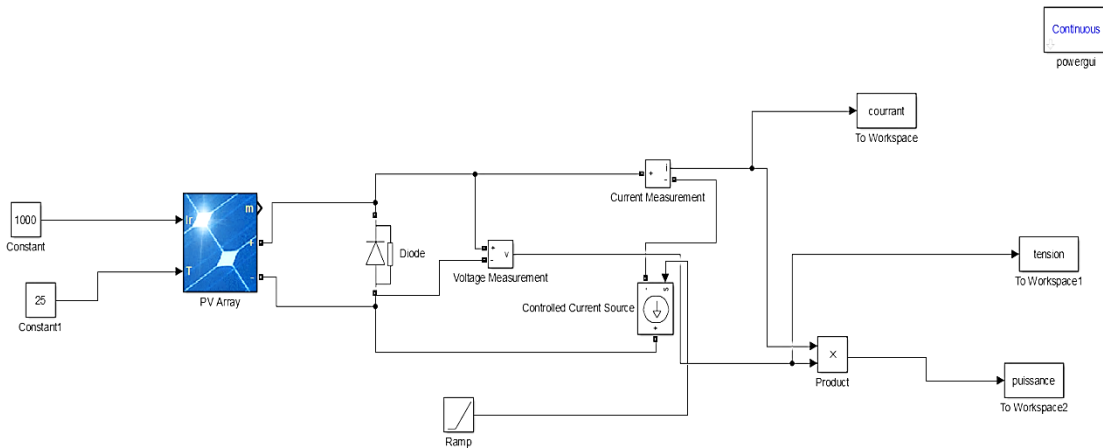


Figure IV.7 : schéma équivalent de panneau yingli yl250-29p

6.1.L'effet d ombrage :

La température est fixée à 25°C

On varie l'éclairement :

L'irradiation : 1kw/m² ,0.7kw/m² ,0.4kw/m² ,0.25kw/m² ,0.09kw/m²

D'après les deux courbes ci-dessous, nous remarquons que l'irradiation a un impact très remarquable sur l'intensité du courant photovoltaïque I, donc aussi sur la puissance de panneau ($P=V.I$).

Quand l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant photovoltaïque croît, les courbes I(V) se décalent vers les valeurs croissantes permettant au module de produire une puissance électrique plus importante. La caractéristique courant-tension du module fait apparaître un point de puissance maximale à 25°C et 1000 W/m². Nous pouvons conclure que le rendement d'un module PV augmente proportionnellement avec l'augmentation de l'irradiation.

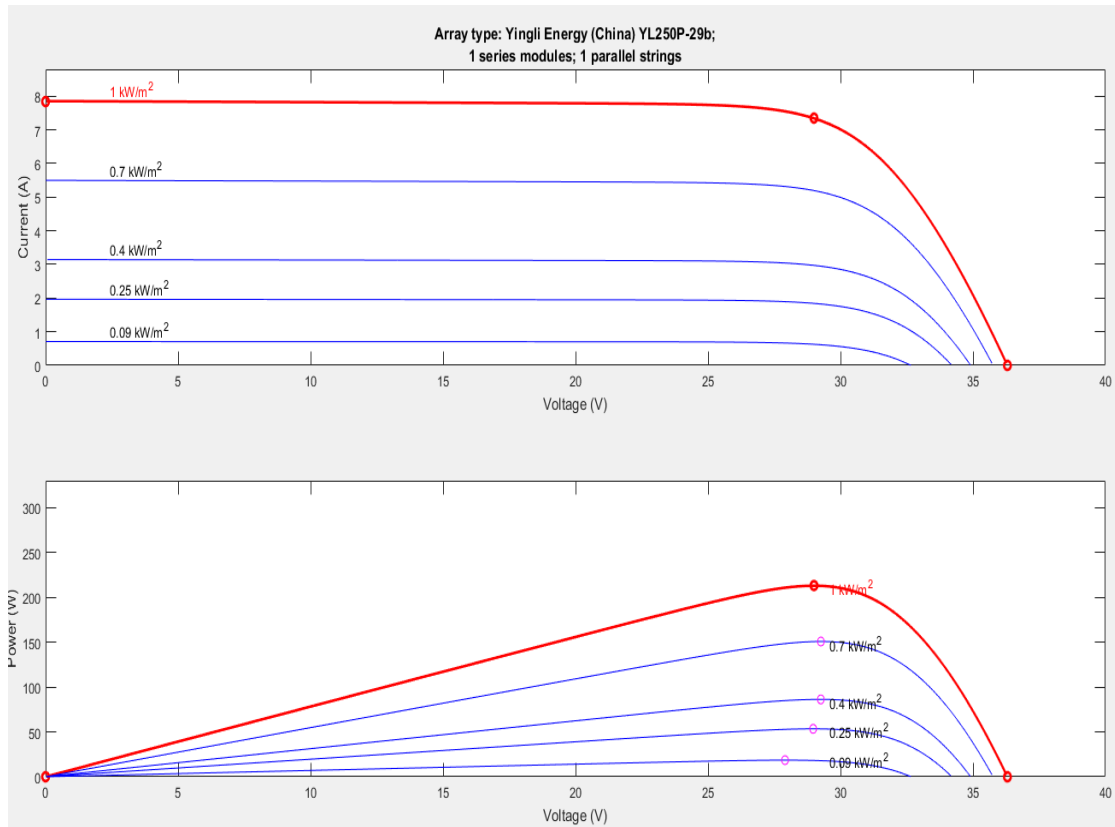


Figure IV.8 : caractéristique $i(v)$ et $p(v)$ de panneaux a irradiation différent

6.2.L'effet de température :

L'irradiation = 1000w/m^2 A température de 5°C , 15°C , 25°C , 35°C , 50°C .

L'évolution de la caractéristique $I(V)$ en fonction de la température montre que le courant augmente très lentement lorsque la température s'élève et engendre une décroissance de la tension de circuit ouvert V_{CO} comme le démontre la courbe ci-dessous. Ce qui donne une variation importante des courbes de puissance. Nous pouvons conclure que la température a un impact négatif sur le rendement d'un module PV.

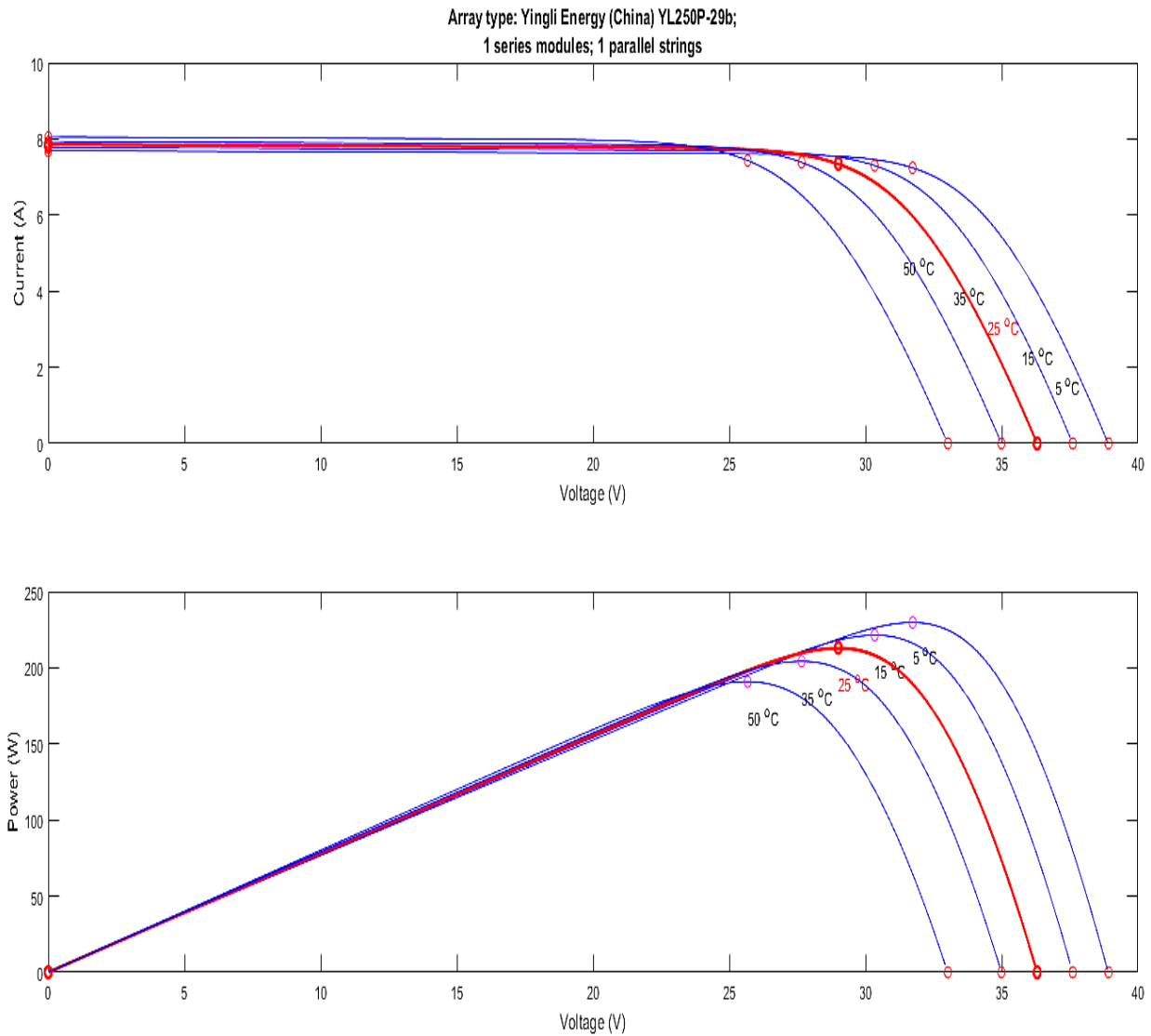


Figure IV.9 : caractéristique $i(v)$ et $p(v)$ de panneaux en fonction de température

7. La simulation de système photovoltaïque :

Le schéma Simulink contient un module PV et un convertisseur (Hacheur Boost) et une commande Mppt p&o.

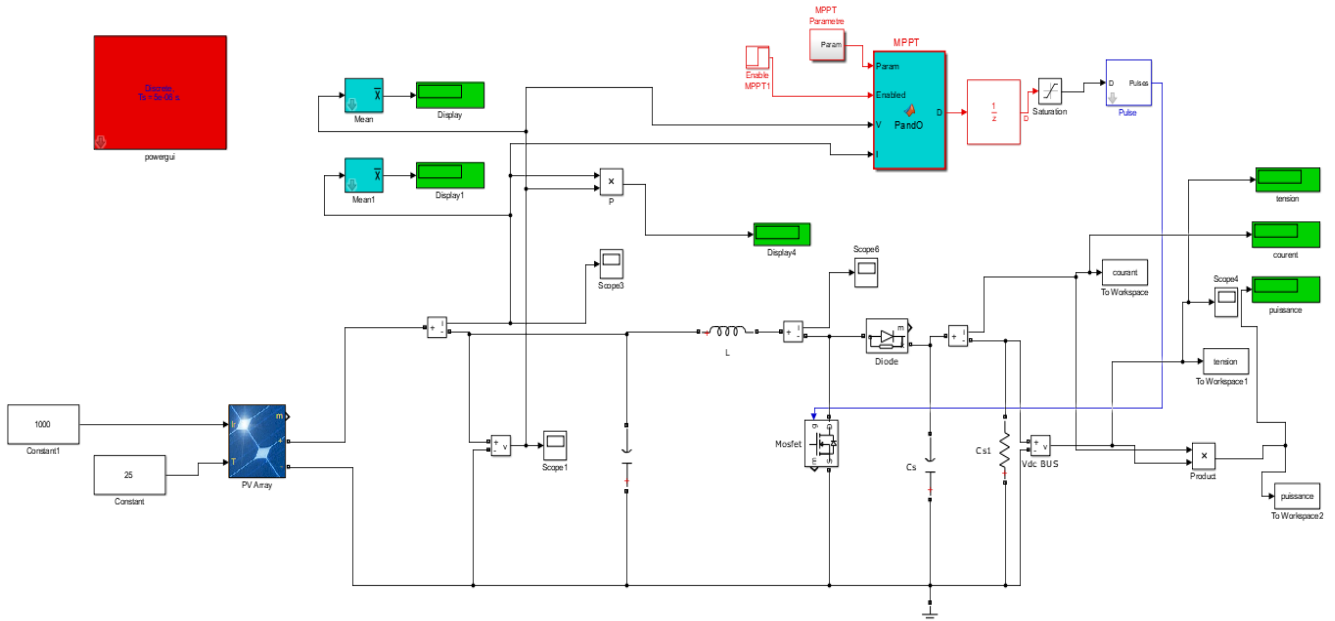


Figure IV.10 : schéma équivalent d'un système photovoltaïque simulé sur Matlab

8. L'effet d ombrage et la température sur la production électrique d'un module PV :

Quand on dit l'éclairement ça veut dire le différent paramètre comme l'ombrage, la poussière sur les panneaux etc...

Donc se graph représente le changement de l'éclairement a une température fixe 25°C.

Tableaux 1 : résultat de changement de courant, tension et de puissance avec le rendement a une température fixe 25°C

E (w/m ²)	1000	800	600	400	200
I(A)	4.51	4.46	4.40	4.32	4.19
v(V)	382.6	379.1	374.5	368.1	355.6
P(W)	1722	1691	1650	1594	1496
η	1	0.98	0.95	0.92	0.86

Quand l'ensoleillement diminué, l'intensité du courant, ça cause de notre système de perdre de sa puissance

Tableaux 2 : résultat de changement de courant, tension et de puissance avec le rendement l'éclairément et fixe 1000w/m²

T (°C)	15	25	35	45	55
I(A)	4.58	4.51	4.34	4.18	3.95
v(V)	389.3	382.6	369.5	333.8	335.6
P(W)	1784	1722	1605	1480	1325
η	1.03	1	0.93	0.85	0.77

Le changement de température a un effet essentiellement sur la tension et donc sur la puissance de système, à chaque fois la température augmente le rendement va ce diminué.

8.1.L'influence de l'ombrage sur le courant, tension et la puissance de sortie système PV :

L'oscillation dans les courbes suivant dans le régime transitoire c'est à cause du passage de courant de module PV dans les différentes composants de convertisseur DC/DC, qui est commandé par le Mppt.

D'après les courbes ci-dessous, on conclue que le changement de l'irradiation à un impact important sur la production électrique dans le système.

L'influence de l'ombrage sur le courant de sortie système PV :

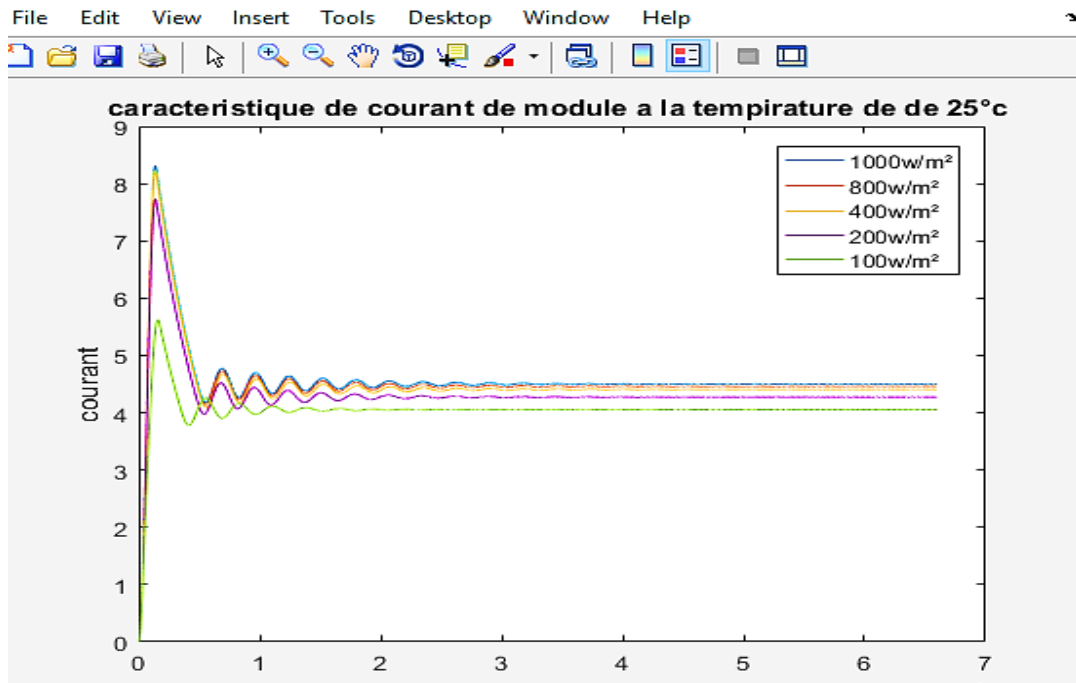


Figure IV.11 : courant de système à éclairment différent

L’influence de l’ombrage sur la tension de sortie système PV :

Dans le régime transitoire la tension ce varie entre 0 et 700V, après il se stabilise dans le régime transitoire a l enivrent de 390V.

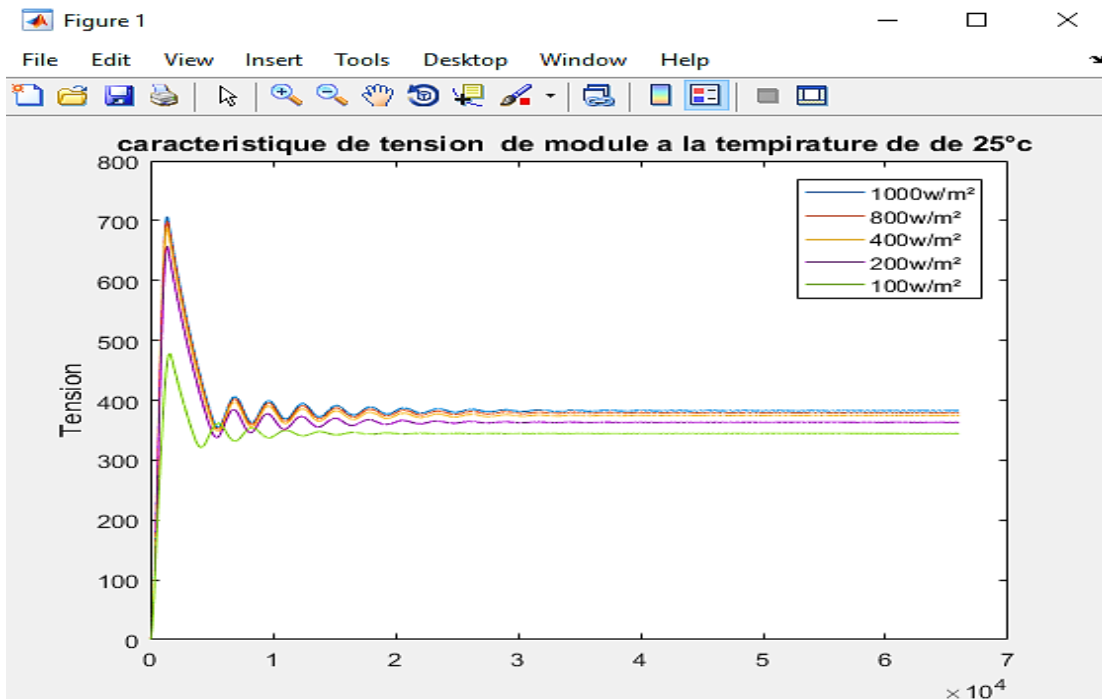


Figure IV.12 : tension de système à éclairment différent

L'influence de l'ombrage sur la puissance de sortie système PV :

La puissance est instable dans le régime transitoire, Dans le régime permanent ($T=2.4$) la puissance est à l'environnement de 1800W.

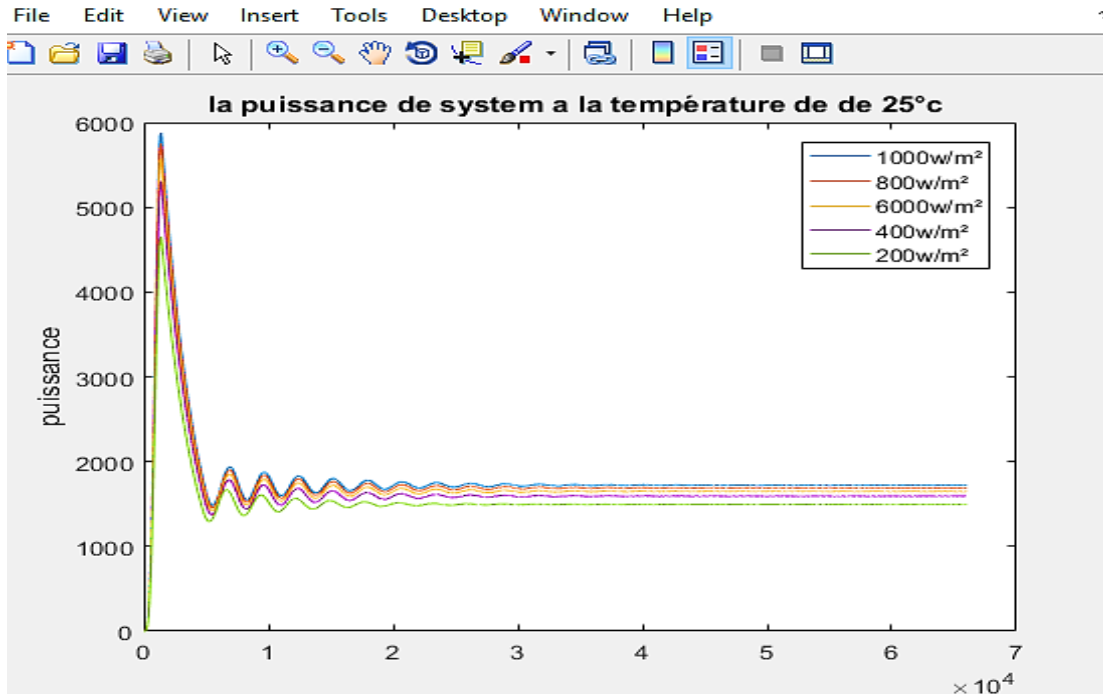


Figure IV.13 : puissance de système à éclairage différent

8.2.L'effet de température sur la production électrique d'un module PV :

Dans cette simulation de système photovoltaïque on a fixé l'éclairement pour voir l'effet de température sur les panneaux électriques on a conclu lorsque on augmente la température l'impact sur la tension et fort dans le régime permanent.

L'influence de la température sur le courant de sortie système PV :

Dans cette courbe le courant se varie dans le régime transitoire à $T=0$ à $T=2$ après il se stabilise dans le régime permanent à $T=2.5$ la valeur du courant est à l'environnement de 4.2A.

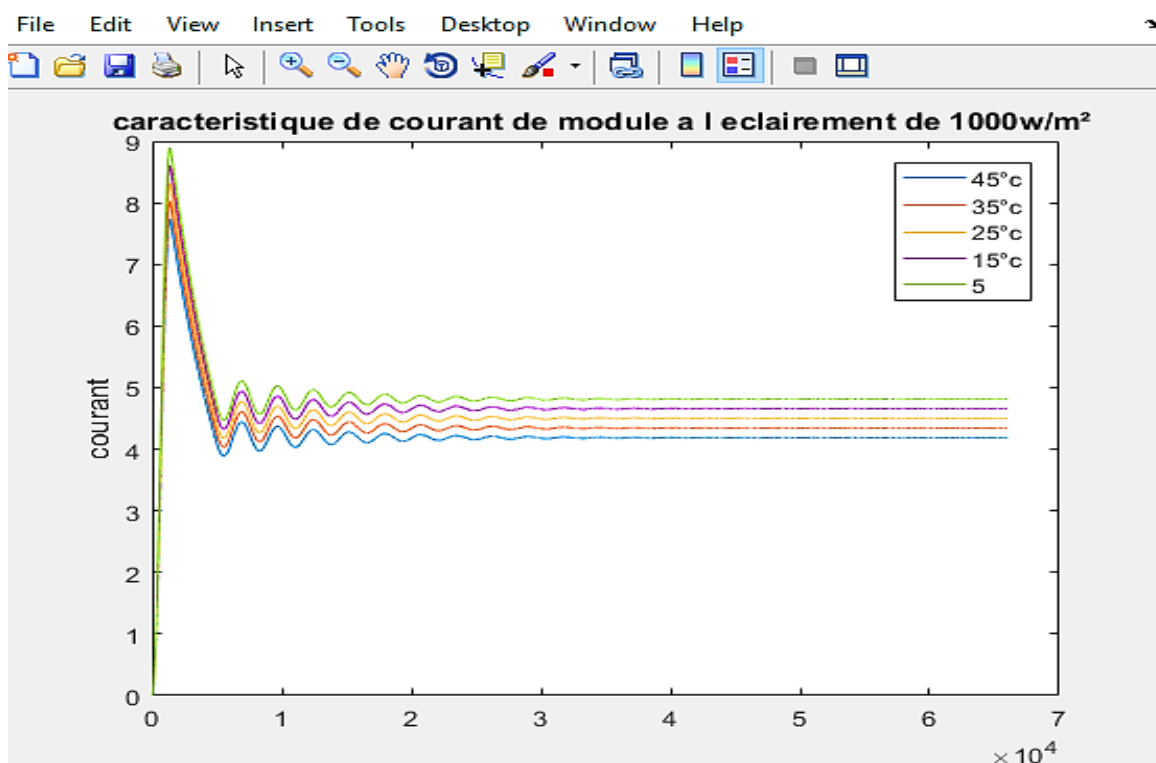


Figure IV.14 : courant de système en fonction de température

L'influence de l'ombrage sur tension de sortie système PV :

a valeur de tension dans le régime permanent est à l'environnement de 380v qui commence à T=2.8

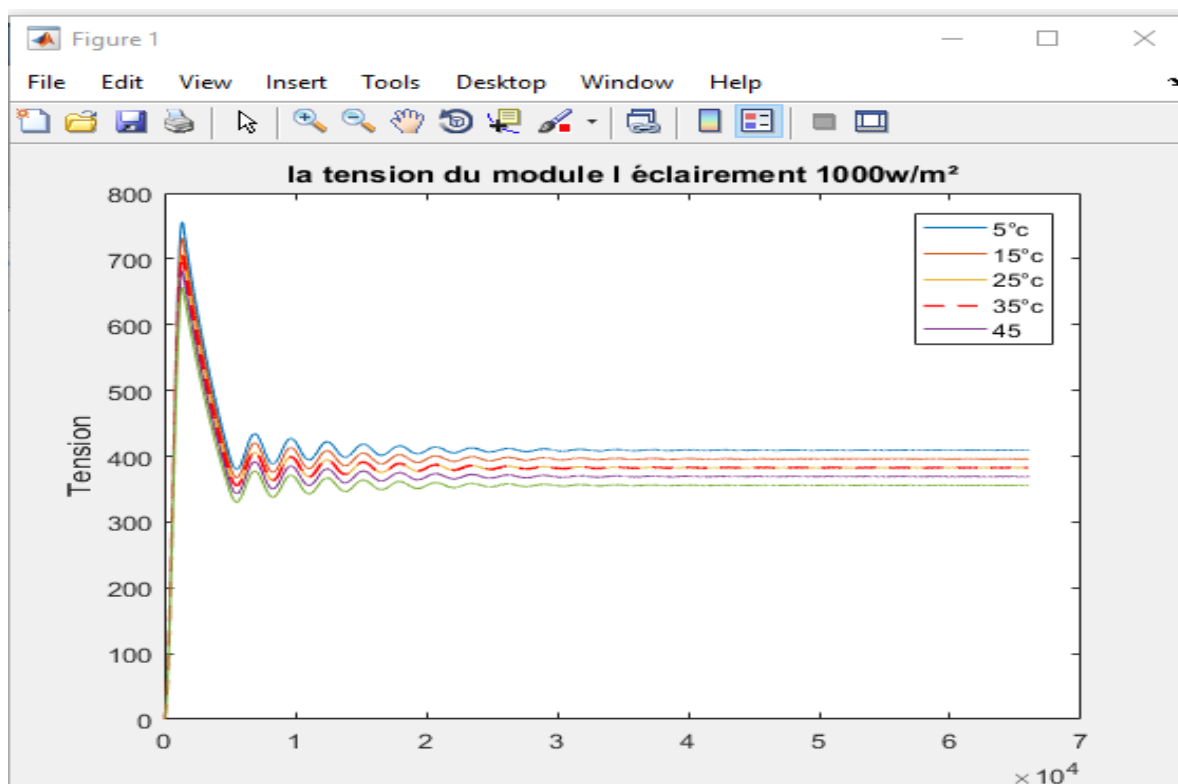


Figure IV.15 : tension de système en fonction de température

L'influence de la température sur puissance de sortie système PV :

La puissance est instable dans le régime transitoire,

Dans le régime permanent (T=2) la puissance est à l'environnement de 1700W

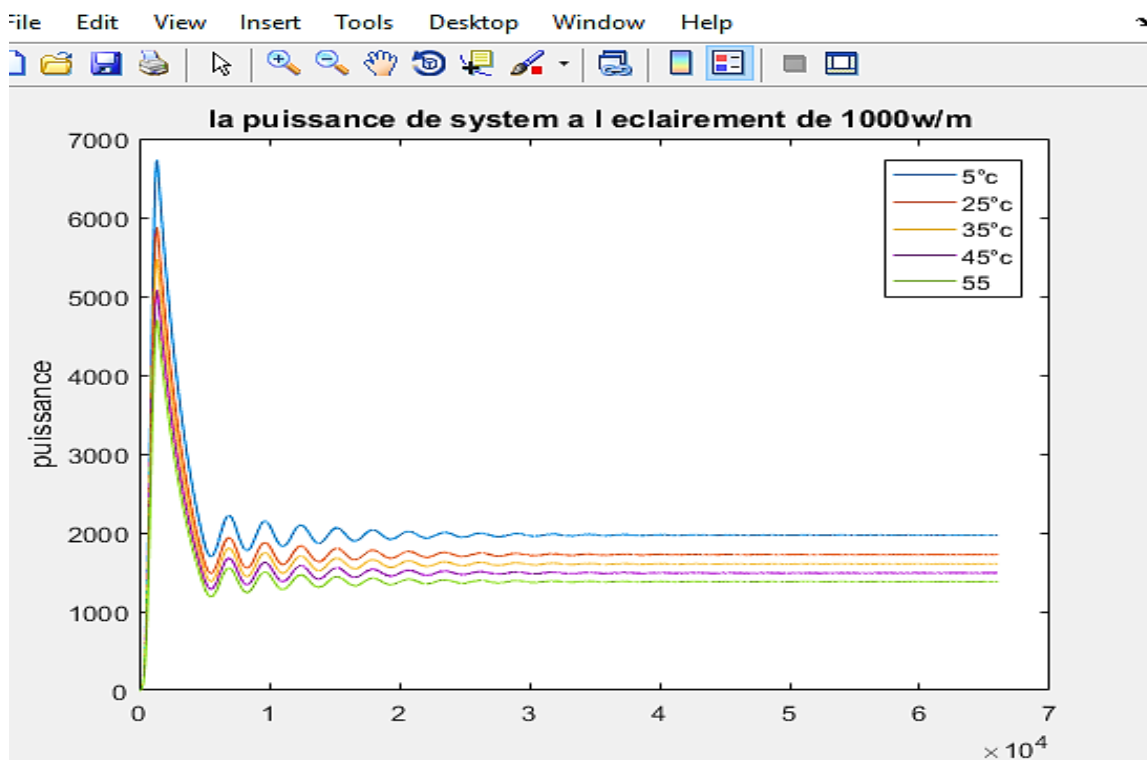


Figure IV.16 : puissance de système en fonction de température

- La courbe représente l'influence de température sur la puissance de sortie
- Les fortes températures à un impact élevé sur la production électrique de système

9. Conclusion

Dans ce travail, on a modélisé et simulé un système photovoltaïque avec un module photovoltaïque de modèle yingli yl250-29p et un convertisseur boost commandé par MPPT.

Les modules photovoltaïques sont fortement influencés par les conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module PV. La simulation du comportement d'une cellule solaire à base de silicium poly cristallin sous Simulink nous indique que les comportements des cellules solaires sont liés à la température et à l'éclairement de fonctionnement. Les résultats obtenus permettent de visualiser les effets des différentes pertes sur la puissance (rendement).

L'effet d'ombrage produit une perte importante de production électrique.

L'augmentation de température sur le module pv cause une déformation de tension, courant et puissance.



Conclusion générale

Conclusion général

Cette étude est consistée à l'effet de condition climatique sur un système de production d'électricité photovoltaïque.

Notre étude a apporté une analyse des performances d'un module photovoltaïque sous des conditions d'ombrages, et la température L'expérimentation adoptée a été conduite sur un module photovoltaïque à base de silicium (poly cristallin).

L'objectif et de variée dans l'éclairement afin de simuler l'influence de l'effet d'ombrage sur les performances du système.

Ensuite varié dans la température pour analyser l'effet de la température sur le système photovoltaïque, d'après cette étude on a conclu que :

Le rendement du module photovoltaïque augmente progressivement avec l'augmentation de l'irradiation, et ce diminue progressivement avec l'augmentation de température.

Dans la présence des phénomènes qui diminue le rendement de système, il est très important d'utilise un étage d'adaptation, ce qui compense l'instabilité dans le module PV, comme le convertisseur dc/dc et la commande MPPT.

Comme résultats important de notre étude, on conclue que la commande MPPT (P&W) joue un rôle principal dans la chaine de système PV car cette dernière maintien la puissance maximal de module, à chaque fois l'effet de l'ombrage et très présent et la variation de la température et élevé.

L'utilisation des systèmes PV dans les sites isoles est le meilleur choix, à condition de faire un bon dimensionnement.

On doit procéder à une installation photovoltaïque avec des diodes by-pass et les diodes anti retour pour protégée notre panneaux solaires.

Comme perspective, amélioration de la commande MPPT par proposé des différentes technique de commande mieux que les méthode classique pour avoir les meilleur performance de système, parmi ces technique la commande MPPT a base de réseau de neurone artificiel.

Bibliographies

- [1] K.Touafek, "Etude d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique", mémoire de magister, école nationale polytechnique, Alger, 2005
- [2] A. Zerga, B. Benyoucef and J.P. Charles, "Insufficiencies of the Single Exponential Model and Efficiency of the Double Exponential Model in the Optimization of Solar Cells Efficiency", Active and Passive Electronic Components, 21, (1998) 26
- [3] (2010) <http://www.solarserver.de/?gclid=CJWA1ruS-K4CFS4NtAodSzY7xw>
- [4] B. Chaouki, B. Tarek "Optimisation floue neuronale et génétique d'un système photovoltaïque connecté au réseau", Mémoire d'ingénieur. Univ. Biskra, 2007.
- [5] Mr. MAHAMMEDI Abdellatif, «Etude et optimisation d'un système hybride éolien photovoltaïque», MAGISTER, UNIVERSITE FERHAT ABBAS –SETIF1-UFAS (ALGERIE), Année : 2014
- [6] Mr : HOCINI Nassim, Mr : TAZAMOUCHE Elyazid, «Sur la maîtrise de l'insertion des ressources renouvelables aux réseaux électriques», MEMOIRE MASTER, UNIVERSITE ABDERAHMANE MIRA DE BEJAIA, Année : 2016
- [7] Djarallah, Mohamed, "CONTRIBUTION A L'ETUDE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES RESIDENTIELS COUPLES AU RESEAU ELECTRIQUE," UNIVERSITE DE BATNA Thèse de Doctorat en Science, 2008
- [8] Foued Chabane ; www.researchgate.net
- [9] S. Bellakehal, «Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables», thèse de Doctorat, Université de Constantine, Algérie, 2010.
- [10] <http://fpenvironnement.fr/energie-solaire-photovoltaique>
- [11] Sarah guenou, «THE PHOTOVOLATIC SYSTEM CHANNEL» 2019/2020
- [12] BOUKHALKHAL Feriha Afrah, « Etude et simulation des caractéristiques d'un module photovoltaïque a base de silicium (poly cristallin /mono cristallin) sous l'influence de l'effet d'ombrage »,laghouat 2019

Bibliographie

- [13] <https://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/schema-panneau-photovoltaïque.html>.25.06.2021/19:05
- [14] [G. Notton](https://www.researchgate.net/), <https://www.researchgate.net/>
- [15] Mr Chelabi Anis, Mr Ibelhoulen Aziz « Etude d'un système hybride autonome », master, Université Abderrahmane Mira– Béjaia, Année 2011 / 2012
- [16] http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Installation_photovolta%C3%AFque_autonome 25.06.2021,10 :30
- [17] LOUZAZNA Brahim, MADI Salim ,thème « Etude et caractérisation d'un panneau photovoltaïque type Condor » 2014/2015
- [18] M : FERRAH BILLEL, «Etude d'un système Hybride (photovoltaïque –éolien) », MEMOIRE MASTER, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR, ANNABA Année : 2014/2015
- [19] Touil Nacer Eddine, « Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque », El-Oued, 2015
- [20] M. Z. F.Z. Zerhoun, "Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique," revue des énergies renouvelables, vol. 11 , no. N°1, p. 41–49, 2008.
- [21] S. M. Ait-Cheikh, «Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [22] BENSACI Wafa , thème : Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT ,thèse Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla 2011/2012
- [23] <https://www.alternative-energy-tutorials.com/photovoltaics/bypass-diode.html>, 25.06.2021,10 :35
- [24] T. Fogelman, « Système photovoltaïque pour les pays en déventement », manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'énergie, (AFME), 1982
- [25] C .Bernard, J .Chauvin, D .Lebrun, J. F . Muraz, P. Stassi, « Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'Observatoire Pierre Auger » 2006.

Bibliographie

- [26] <https://www.jade-technologie.com/composition-dun-panneau-solaire>, 25.06.2021,10 :50
- [27] HADJAISSA Aboubakeur , « La gestion optimisée d'énergie électrique hybride Photovoltaïque/Pile à combustible, Thèse de Doctorat, École Nationale Polytechnique », Alger, Algérie,2016
- [28] Thierry LEQUEU, Cours d'Electronique De Puissance. Support du cours,Université de Froncois-Rabelais,Tours, IUT-EDP-9.DOC, 2005.
- [29] S.ABADA ,, Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic" Mémoire Maître es Sciences , Université laval, 2011.
- [30] C. CABAL ,,Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque Thèse de doctorat université de Toulouse III ,2008.
- [31] M.ARROUF ,,Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branche sur un générateur photovoltaïque", thèse doctorats université de Constantine,2007