

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : science et technique  
Département : électrotechnique  
Domaine : science et technologie  
Filière : électrotechnique  
Spécialité : électrotechnique industrielle

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

**Production de l'énergie électrique par un panneau photovoltaïque**

Présenté par : Fergani med el amine

Aissaoui med el hadi

Encadrant : BOUCHIKHA HOCINE Grade MCB

Université BADJI MOKHTA

Jury de Soutenance :

<i>Amar Omeiri</i>	Prof	Université BADJI MOKHTAR	Président
<i>Hocine bouchikha</i>	MCB	Université BADJI MOKHTAR	Encadrant
<i>AHMED OUARI</i>	Prof	Université BADJI MOKHTAR	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

### *Remerciements*

*Je me dois remercier ALLAH le Tout Puissant pour toute la volonté et le courage qu'il m'a donné pour l'achèvement de ce travail. Je tiens tout d'abord à remercier vivement Mr Hocine Bouchikha, qui a manifesté son entière disponibilité pour son aide, son orientation et sa disponibilité, aussi pour la confiance et la compréhension qu'il m'a toujours prouvée. Mes remerciements les plus sincères sont adressés à Monsieur Prof. Amar Omeiri pour me faire l'honneur de présider le jury de mon mémoire de Master 02, ainsi que les membres du jury prof. AHMED OUARI de l'intérêt dont ils font preuve à mon égard pour lire ce mémoire et en assistant à ma soutenance. Mes vifs remerciements s'adressent également à tous les membres de ma famille notamment ma chère mère (Dadci Rebha)ET (Segni Salima) et mon cher père paix a son âme(Aissaoui Abd el Krim)ET (Fergani Bachir) qui m'ont aidé et pour leur soutien précieux plus que je ne peux le dire durant les longues années de ma formation, ce qui leur fait valoir ma grande reconnaissance. Je tiens à remercier vivement mon cher frère Mr. NADIR FERGANI doctorant à l'université de Constantine pour m'avoir encouragé dans les moments critiques, et pour l'esprit d'équipe que nous avons et qui m'a permis d'échanger avec lui des idées dans le même axe de recherche. Enfin, je remercie toutes les personnes (dont le nombre est très élevé pour les citer toutes ici), qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail, je les remercie tous.*

## **Résumé :**

La puissance de sortie d'un panneau dépend d'un certain nombre de paramètres tels que l'intensité du rayonnement solaire, la température des cellules, etc. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions à base des techniques MPPT. Il existe des méthodes MPPT conventionnelles souvent utilisées, à savoir la méthode de perturbation et d'observation (P&O) et la méthode de conductance incrémentale (IncCond) et les méthodes plus avancées, telle que la MPPT floue. Ce mémoire présente une étude comparative entre ces différentes techniques MPPT afin d'analyser, simuler, et évaluer le système global d'alimentation PV sous des conditions de fonctionnement variables. Pour faire les modèles mathématiques des composants du système (panneau) ont été développés. Les résultats de simulation obtenus à l'aide de l'outil Matlab Simulink ont prouvé que le contrôleur MPPT conventionnel est performant.

**Mots clés :** PV, convertisseur DC-DC, MPPT. P&O, IncCond .

**Abstract :**

The output power of a panel depends on a number of parameters including the intensity of solar radiation, the temperature of the cells, etc. Due to the non-linear electrical characteristics of PV cells and their combinations, the efficiency of PV systems can be improved by solutions based on MPPT techniques. There are conventional MPPT methods that are often used, namely the perturbation and observation (P&O) method and the incremental conductance method (IncCond) and advanced day methods, such as fuzzy MPPT. This dissertation presents a comparative study between these different MPPT techniques in order to analyze, simulate, and evaluate the overall PV power system under varying operating conditions. To make the mathematical models of the system components (panel) were developed. The simulation results obtained using the Matlab Simulink tool have proven that the conventional MPPT controller performs.

Keywords: PV, DC-DC converter, MPPT. P&O, IncCond.

## ملخص

تعتمد الطاقة الخارجة للوحة على عدد من المعلمات بما في ذلك شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة الخلايا وما إلى ذلك. نظراً للخصائص الكهربائية غير الخطية القوية للخلايا الكهروضوئية ومجموعاتها، يمكن تحسين كفاءة الأنظمة الكهروضوئية تقليدياً تُستخدم غالباً، وهي طريقة الاضطراب والمراقبة MPPT. هناك طرق MPPT من خلال الحلول القائمة على تقنيات الضبابي. تقدم هذه الرسالة دراسة MPPT المتقدمة، مثل (DIY) وطرق (IncCond) وطريقة التوصيل المتزايدة (P&O) المختلفة من أجل تحليل ومحاكاة وتقييم نظام الطاقة الكهروضوئية الشامل في ظل ظروف تشغيل MPPT مقارنة بين تقنيات مختلفة. لعمل النماذج الرياضية لمكونات النظام (لوحة) تم تطويرها. أثبتت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها باستخدام Matlab Simulink أن وحدة التحكم MPPT التقليدية تعمل.

الكلمات الرئيسية: PV ، DC-DC ، MPPT. P&O ، IncCond ، محول

**Sommaire**

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes photovoltaïques .....</b>	<b>2</b>
1.1 Introduction.....	2
1.2 L'énergie solaire.....	3
1.2.1 L'énergie solaire thermique:.....	3
1.2.2 L'énergie solaire photovoltaïque: .....	3
1.3 L'énergie solaire dans le monde.....	4
1.3.1 La nature de l'énergie solaire .....	4
1.3.2 Le gisement solaire en Algérie.....	5
1.4 Semi conducteur.....	7
1.4.1 Formation de la jonction PN .....	7
1.4.2 Description du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	8
1.4.3 La cellule photovoltaïque.....	8
1.4.4 Différentes technologies de cellules solaires .....	9
1.4.5 Technologies de la première génération à base de silicium cristallin ..	9
1.4.6 Technologie de la deuxième génération à base de couche-mince .....	10
1.5 Conclusion .....	11
<b>Chapitre 2 : modélisation et simulation d'un panneau solaire .....</b>	<b>12</b>
2.1 Introduction.....	12
2.2 Circuit équivalent d'une cellule solaire.....	12
2.2.1 Cas d'une cellule idéale.....	12
2.2.2 Cas d'une cellule réelle.....	13
2.2.3 Caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau sanyo ...	15
2.3 Les paramètres qui influent sur la caractéristique $I=f(V)$ .....	16
2.3.1 Influence de l'éclairement.....	16
2.3.2 Influence de la température.....	17
2.3.3 Influence de la résistance série.....	19
2.3.4 Influence de la résistance shunt .....	20
2.4 Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV).....	22

2.4.1 Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle .....	22
2.4.2 Association des Cellules Photovoltaïques en Série .....	23
2.4.3 Association des Cellules Photovoltaïques mixte .....	24
2.5 Paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque .....	25
2.5.1 Courant de court-circuit $I_{cc}$ .....	25
2.5.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$ .....	25
2.5.3 Le facteur de forme FF .....	26
2.6 Conclusion .....	26
<b>Chapitre 3 : Convertisseurs et techniques d'optimisation .....</b>	<b>27</b>
3.1 Introduction.....	27
3.2 Convertisseur continu- continu (DC-DC) .....	27
3.2.1 Hacheur série ou Buck (dévolteur).....	29
3.2.2 Convertisseur Boost (survolteur).....	31
3.3 Les convertisseurs DC-AC (Onduleurs) .....	34
3.3.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur.....	34
3.3.2 Onduleur autonome .....	36
3.4 Conclusion .....	36
<b>Chapitre 4 : Commande MPPT maximam power point .....</b>	<b>37</b>
4.1 Introduction.....	37
4.2 Commande MPPT .....	38
4.2.1 Principe de la recherche du point de puissance maximal.....	38
4.3 différent commande MPPT .....	40
4.3.1 commande perturbation et observation (P and O simple).....	40
4.3.2 commande par incrémentation de conductance .....	41
4.3.3 Commande en circuit ouvert.....	42
4.3.4 Commande en court circuit.....	43
4.4 Conclusion .....	43
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>44</b>

## Liste des figures

### chapitre 1

Figure 1.1 la carte d'éclairement solaire de l'Algérie .....	5
Figure 1.2 Génération de la paire électron-trou. ....	7
Figure 1.3 La jonction PN .....	7
Figure 1.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	8

### chapitre 2

Figure 2.1. Schéma équivalent d'une cellule idéale.....	12
Figure 2.2 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.....	13
Figure 2.3 Algorithm of the method used to adjust the I-V model .....	15
Figure 2.4. Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ .....	17
Figure 2.5. Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$ . ....	17
Figure 2.6. Influence de la température sur la caractéristique $I(V)$ .....	18
Figure 2.7. Influence de la température sur la caractéristique $P(V)$ .....	18
Figure 2.8. L'influence de la résistance série $R_s$ sur la caractéristique $I(V)$ .....	19
Figure 2.9. L'influence de la résistance série $R_s$ sur la caractéristique $p(V)$ . ....	20
Figure 2.10. L'influence de la résistance shunt $R_{sh}$ sur la caractéristique $I(V)$ .....	21
Figure 2.11. L'influence de la résistance shunt $R_{sh}$ sur la caractéristique $P(V)$ .....	21
Figure 2.12 schéma de deux (02) cellules photovoltaïque associée en parallèle .....	22
Figure 2.13 caractéristique $I(V)$ de deux (02) cellules PV raccordées en parallèle .....	22
Figure 2.14 schéma de deux (02) cellules photovoltaïque associée en série .....	23
Figure 2.15 caractéristique $I(V)$ de deux (02) cellules PV raccordées en série .....	23
Figure 2.16 schéma mixte des cellules photovoltaïque .....	24

### Chapitre 3

Figure 3.1 Convertisseur DC-DC.....	28
Figure 3.2 Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.....	28
Figure 3.3 Convertisseur Buck.....	29
Figure 3.4 Schéma de convertisseur Buck état.....	30
Figure 3.5 Schéma de convertisseur Buck état OFF .....	31
Figure 3.6 Convertisseur Boost.....	32



Figure 3.7 Schéma de convertisseur Boost état ON.....	32
Figure 3.8 Schéma de convertisseur Boost état OFF .....	33
Figure 3.9 Symbole de convertisseur Continu - Alternative (DC – AC) Les onduleurs.....	34
Figure 3.10 Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC).....	34
Figure 3.11 Fonctionnement de l'onduleur dans le 1er demi-cycle.....	35
Figure 3.12 Fonctionnement de l'onduleur dans le 2ème demis cycle.....	35
Figure 3.13 Signal complet de l'onduleur.....	36

## Chapitre 4

Figure 4.1 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec CS contrôlé par une Commande MPPT sur charge DC .....	39
Figure 4.2 Relation entre le rapport cyclique d'un CS et la puissance du GPV. ....	39
Figure 4.3 Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation .....	40
Figure 4.4. Organigramme de l'algorithme incrémentation de conductance. ....	42
Figure 4.5 Méthode avec Contre-réaction de tension. ....	43

## Liste des tableaux

### Chapitre 1

Tableau 1 .1 Performance des différentes technologies des cellules photovoltaïques.....	11
---	----

### Chapitre 2

Tab 2.1 Caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau Sanyo .....	15
Tab 2.2. Valeurs des paramètres de simulation.....	24

## Liste des symboles

**I**: Courant générer par la cellule photovoltaïque

**I<sub>pv</sub>** : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)

**I<sub>d</sub>** : Le courant circulant dans la diode.

**I<sub>or</sub>** : est le courant de court-circuit de la cellule à la température de référence T<sub>n</sub> et l'éclairement de référence.

**T** : Température de la jonction des cellules PV [°K]

**T<sub>n</sub>** : Température de référence des cellules PV [°K]

**a** : facteur d'idéalité de la jonction

**E<sub>g</sub>** : Énergie de gap [ev]

**RS** : résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules

**V**: La tension de sortie

**I<sub>p</sub>** : Le courant circulant dans la résistance RP

**RP** : Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues impuretés

**W<sub>C</sub>** : Puissance crête mesuré

**V<sub>MPP</sub>** : Tension optimale mesuré

**I<sub>MPP</sub>** : Courant optimale mesuré

**n** : Facteur d'idéalité de la diode

**K** : constante de Boltzmann (1,381.10<sup>-23</sup> Joule/Kelvin).

**T** : Température de la jonction p-n des cellules.

**q** : Charge d'électron (1,602.10<sup>-19</sup> C)

**E** : Eclairement reçu.

**E<sub>0</sub>** : Eclairement de référence

**I<sub>cc</sub>** : Courant continu de la cellule

**I<sub>s</sub>** : Courant de saturation de la diode

**FF** : Facteur de forme

**V<sub>co</sub>** la puissance maximale d'une cellule idéale

**T<sub>s</sub>** : est la période de commutation qui est égale à  $\frac{1}{f_s}$

**α** : Le rapport cyclique du commutateur

### **Introduction générale**

Depuis plusieurs années l'humanité fait face à une demande en énergie croissante due à l'augmentation de la population et à la qualité de vie exigeante en matière de consommation d'énergie.

Actuellement, la production d'énergie dans le monde est basée presque totalement sur les sources fossiles, sources qui présentent l'inconvénient d'être limitées et qui constituent un grand danger écologique à cause des émissions de gaz à effet de serre. Étant donné le danger que représentent les énergies fossiles, trouver une solution économique et peu polluante pour la production d'énergie est devenu primordial, à ce sujet, les énergies renouvelables (énergie solaire, géothermique, biomasse, éolienne, hydraulique, etc.) qui sont des énergies illimitées contrairement aux énergies fossiles. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. L'exploitation de l'énergie solaire au moyen de capteurs relève de deux technologies bien distinctes l'une produit ces calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre, l'énergie solaire photovoltaïque qui produit de l'électricité et qui fera l'objet d'étude de ce mémoire. Habituellement, la recherche et le développement photovoltaïque ont été axés sur l'analyse des rayonnements, les stratégies d'exploitation efficace, la conception et le dimensionnement de ces systèmes oubliant certains aspects critiques et les conditions externes qui peuvent affecter le fonctionnement du système du module photovoltaïque. Le vieillissement des cellules photovoltaïques et des modules est un processus qui évolue naturellement avec les années de fonctionnement du module dans les conditions de terrain (le vent, la pluie, la neige, la chaleur, la lumière...) et qui par conséquent affecte le rendement du module.

Dans ce travail nous allons essayer de voir la production de l'énergie électrique par un panneau photovoltaïque.

Dans le premier chapitre, nous allons voir quelques notions de base sur l'énergie ainsi que le gisement solaires en Algérie. Dans le deuxième chapitre, nous allons voir la modélisation et la simulation d'un panneau photovoltaïque. Dans le troisième et le quatrième chapitre nous allons voir le convertisseur statique (DC-DC) (DC-AC) et les différents types de commande MPPT. Nous achevons ce travail par une conclusion générale.

## **Chapitre 1 :**

# **Généralités sur les systèmes photovoltaïques**

### Chapitre 1 :

### Généralités sur les systèmes photovoltaïques

#### 1.1 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, on a arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque. Le nom Photovoltaïque vient du Grec, il est composé de deux parties : **Photos** : Lumière ; **Volt** : Unité de tension électrique, du nom Alessandro Volta. Ce phénomène fut découvert au 19ème siècle par le physicien Alexandre Edmond Becquerel. La première cellule photovoltaïque fut développée début 1954 pour l'alimentation en énergie des satellites. Depuis 1958, les cellules photovoltaïques alimentent seulement le système énergétique des satellites jusqu'à ses premières applications terrestres au début des années 70. Le photovoltaïque fut utiliser pour l'alimentation en énergie de petites maisons isolées et d'équipements de télécommunications. Aujourd'hui, grâce à sa fiabilité et à son concept respectueux de l'environnement, le photovoltaïque prend une place prépondérante. Pour comprendre ce phénomène, nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur le rayonnement solaire et les propriétés des semi-conducteurs ; matériaux de base des cellules photovoltaïques. Une fois ces rappels théoriques sont faits, il nous sera facile d'expliquer le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque en passant au système photovoltaïque complet et à ses trois types à savoir :

- Les systèmes autonomes.
- Les systèmes connectés au réseau.
- Les systèmes fonctionnant au fil du soleil (Pompage PV).

### 1.2 L'énergie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la Surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 Fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une Puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kW/m<sup>2</sup>) Répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre Planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme L'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés :

#### 1.2.1 L'énergie solaire thermique

Qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux solaires. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

#### 1.2.2 L'énergie solaire photovoltaïque

Qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de modules solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels Que les hydrocarbures ou le charbon.

**L'énergie solaire passive** : est une autre forme d'utilisation de l'énergie Solaire qui consiste à utiliser directement la lumière pour le chauffage.

#### Les Avantages de l'énergie solaire

- Une bonne source d'énergies renouvelables
- Une énergie non-polluante
- La lumière ne coute rien
- Peut de soutenir et durent longtemps

#### Les Inconvénients de L'énergie solaire

- Il n'y a pas de lumière la nuit
- A besoin de beaucoup d'espace
- Le placement peut modifier l'énergie pris dans les panneaux
- Panneau fragile

### 1.3 L'énergie solaire dans le monde

L'énergie solaire est l'énergie du Soleil par son rayonnement diffuse à travers L'atmosphère. Dans l'espace, l'énergie des photons peut être utilisée, par Exemple pour propulser une voile solaire. Sur Terre, l'énergie solaire est à L'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse créée par le règne Végétal, dont dépend le règne animal via les chaines alimentaires. L'énergie Solaire est donc à l'origine de toutes les énergies sur Terre à l'exception de L'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice. L'Homme utilise l'énergie solaire pour la transformer en d'autres formes D'énergie : énergie alimentaire, énergie cinétique, énergie thermique, électricité Ou biomasse. Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent Employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir de Cette dernière.

#### 1.3.1 La nature de l'énergie solaire

L'énergie solaire provient de la fusion nucléaire d'atomes (ou plutôt de Noyaux d'atomes) d'hydrogène qui se produit au coeur du Soleil. Elle se propage Dans le système solaire et dans l'Univers sous la forme d'un rayonnement Électromagnétique, de photons, selon la théorie corpusculaire.

La terre est illuminée par le Soleil en permanence. L'une des deux faces du Globe terrestre se trouve privé d'énergie solaire, pendant la nuit, en raison de la Rotation de la Terre. La puissance solaire reçue en un point du globe varie en Fonction de l'heure de la journée, de la saison et de la latitude du lieu Considéré.



### 1.3.2 Le gisement solaire en Algérie

Pour saisir la portée des énergies renouvelables en Algérie et les enjeux considérables et Inépuisables existant de ces énergies non encore exploitées à savoir le gisement solaire exceptionnel qui couvre une superficie de 2381745 Km<sup>2</sup> [Arr, 07], [Hat, 08].

L'Algérie est l'un des pays qui ont une diversité de sites du à son grand secteur, où le Rayonnement de la région près de la mer est influencé par les saisons. Les zones du nord de L'Algérie son à ciel - couvert plus que ceux du sud. Les régions Sahariens reçoivent une quantité Plus grande d'énergie mais sont caractérisées par une température de l'air plus élevée. En Raison de cette diversité dans le climat, l'ensoleillement moyen global au plan horizontal reçu Varie entre 4,5 et 7.5 kWh/m<sup>2</sup>. En tenant compte de cette diversité, l'Algérie peut être divisée en 8 zones climatiques qui ont approximativement un ensoleillement homogène comme indiqué sur la figure si dessus

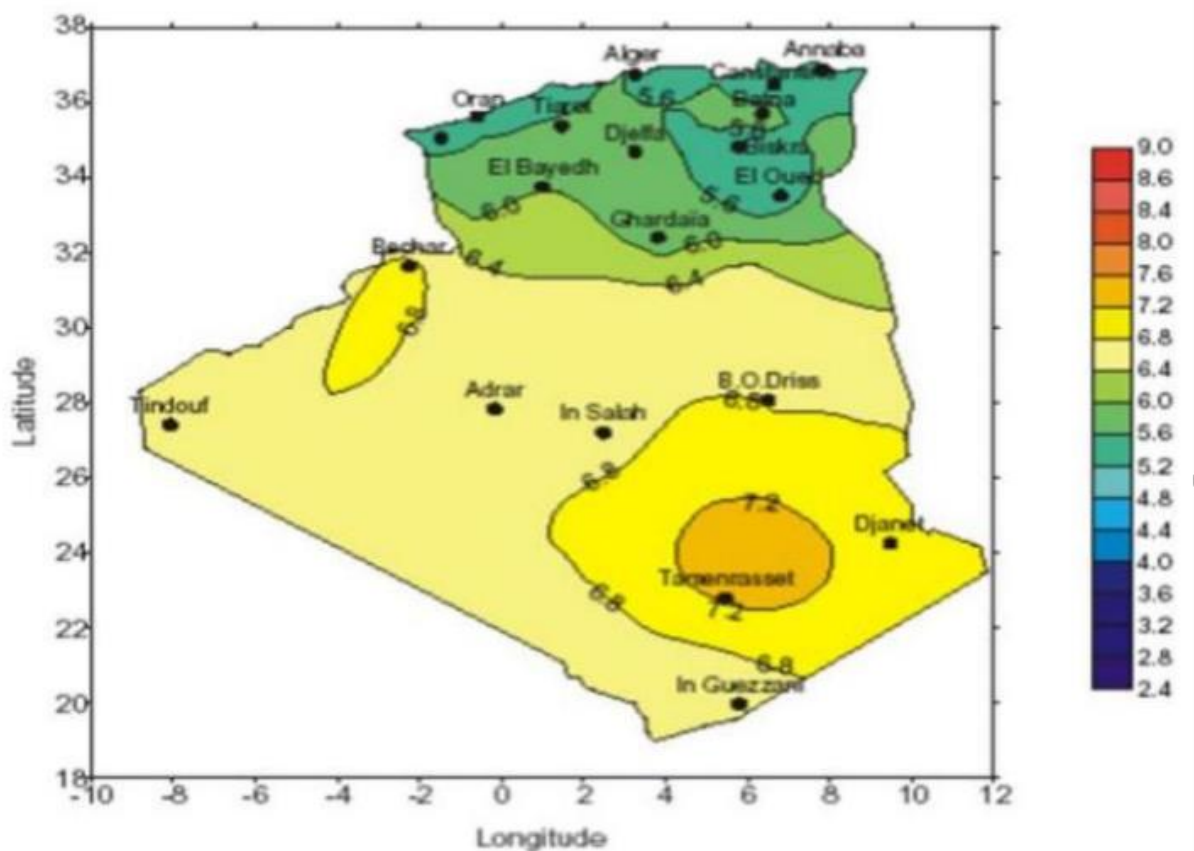


Figure 1.1 la carte d'éclairement solaire de l'Algérie

## Chapitre 1 Généralité sur le system photovoltaïque

Donc, Part sa situation privilégiée, l'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du bassin Méditerranéen. La durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2000 heures annuelles, peut atteindre près de 3500 heures d'ensoleillement dans le désert du Sahara. Le total d'énergie reçu est estimé à 169 400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays.

## 1.4 Semi-conducteur

La filière la plus avancée sur le plan technologique et industrielle est la réalisation de cellules À base de silicium. Ce dernier est l'élément semi-conducteur le plus utilisé car il est peu coûteux et il se trouve en très grande quantité sur terre : il constitue 28% de l'écorce terrestre, sous forme de silice, parfaitement stable et non toxique

### 1.4.1 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

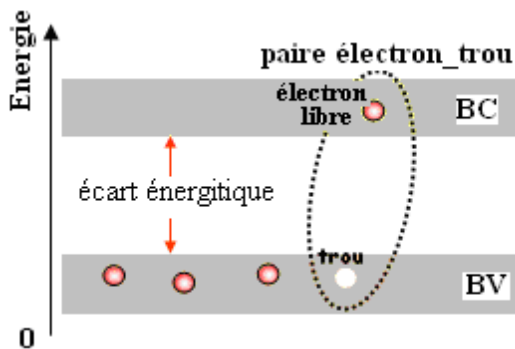


Figure 1.2 Génération de la paire électron-trou.

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 de la photo génératrice 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. Le composant ainsi créé est appelé diode.

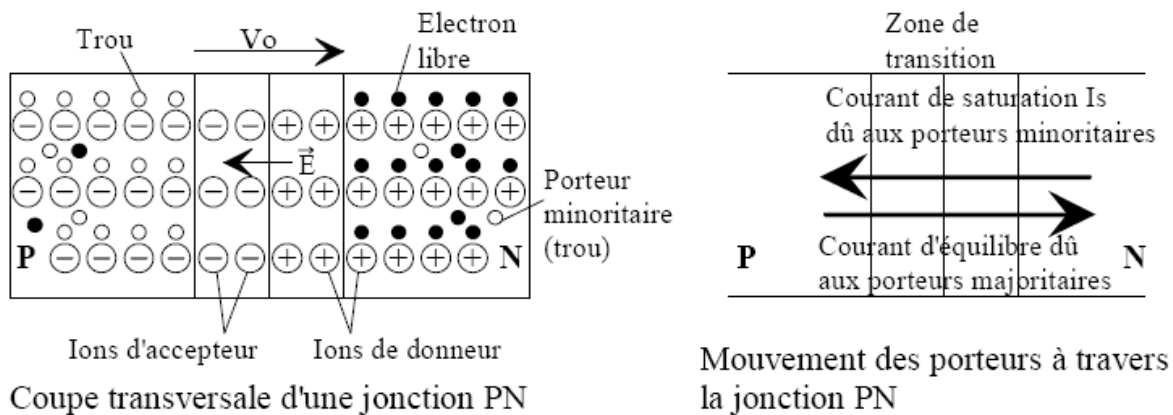


Figure 1.3 La jonction PN

### 1.4.2 Description du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux Atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des Électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes Positives et négatives de la cellule.

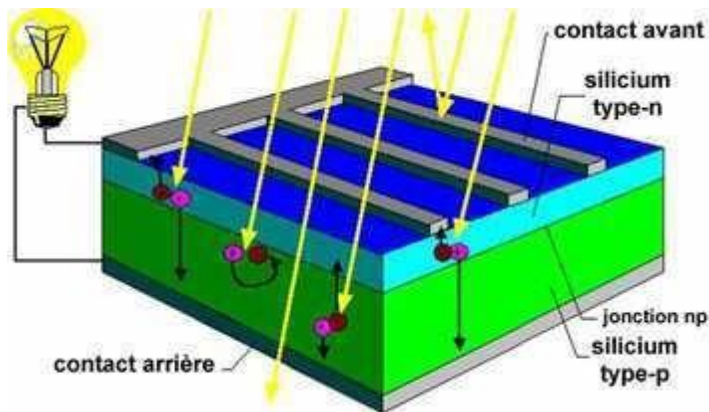


Figure 1.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

### 1.4.3 La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible, elle est basée sur le Phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force Électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposé à la lumière. La tension générée Peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que la Température et du vieillissement de la cellule. Composé de matériaux semi-conducteurs les cellules photovoltaïques sont constitués de :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, Qui joue le rôle de 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.

### **1.4.4 Différentes technologies de cellules solaires**

Une grande variété de cellules photovoltaïques existe et peut être partagée en trois grandes Familles selon les technologies utilisées. La première génération existe depuis plusieurs Dizaines d'années, elle offre de loin le meilleur rendement pour un rapport qualité/ prix assez Satisfaisant. La deuxième génération, récemment apparue regroupe les technologies dites « Couches minces », leurs rendement est encore inférieur à celui des cellules cristallines mais Tend à s'améliorer pour un coût inférieur. La dernière et troisième génération, celle des Cellules organiques est en cours de développement et vise de hauts rendements avec des coûts De productions de plus en plus basses.

### **1.4.5 Technologies de la première génération à base de silicium cristallin**

Considérée comme la technologie photovoltaïque la plus efficace et la plus dominante la Première génération comprend le monocristallin et le poly cristallin. Le silicium Monocristallin reste encore plus cher que le silicium poly cristallin mais permet d'obtenir un Rendement plus élevé, avec près de 19.8% contre 24.7% de rendement en laboratoire.

#### **➤ Cellule monocristalline**

La cellule monocristalline est celle qui s'approche le plus du modèle théorique. Lors du Refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande Dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules.

Cependant pour arriver à ce résultat la fabrication est complexe et coûteuse en énergie, les Rendements de conversion obtenue varient entre 14 et 16%.

#### **➤ Cellule polycristalline**

Contrairement à la cellule monocristalline, la cellule poly cristalline n'a pas besoin d'un Silicium aussi pur et ordonné. Pour fabriquer ce matériau, on refond tous les déchets Provenant du tirage des monocristaux, on obtient des lingots qu'il faut ensuite scier en Plaquettes. Les rendements de conversion industrielle qui étaient de l'ordre de 8 à 10% avant 1980 sont actuellement de 16 à 17%. Il s'agit de la technologie la plus représentée sur le marché du

photovoltaïque car elle allie à la fois des rendements de conversion élevés avec un coût de production faible par rapport à la filière silicium monocristallin.

### **1.4.6 Technologie de la deuxième génération à base de couche-mince**

Les premiers essais de couches minces remontent au milieu du XXème siècle avec de fins Dépôts sur cristaux massifs puis finalement des structures complètement a base de couches minces. Ces technologies reposent sur des matériaux possédant un fort coefficient D'absorption du spectre solaire, et promettent un avenir prometteur vu leurs croissance Importante ces dernières années.

#### **➤ Les cellules amorphes**

Les cellules amorphes sont à base d'un matériau composé de silicium hydrogéné (état non Cristallin) déposé sur un substrat de verre, elles se caractérisent par un fort coefficient D'absorption, et sont souvent utilisées dans de petits produits de consommation tel que des Calculatrices solaires ou encore des montres. L'avantage de ces derniers est le fonctionnement Avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment). Leurs Rendement est assez faible de 5% à 8% voir jusqu'à 13% en laboratoire, mais ne nécessite que De très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevés.




Type de cellule	Rendement	Avantage	Inconvénient	Image
<b>Silicium monocristalline</b>	13-17%	Bon rendement pour une cellule	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication	
<b>Silicium poly-cristallin</b>	11-15%	Bon rendement pour un module	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication	
<b>Silicium amorphe</b>	5-9%	Facile à fabriquer	Mauvais rendement	

Tableau 1 .1 Performance des différentes technologies des cellules photovoltaïques

## 1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a vue les différentes notions de base qui constitue l'énergie photovoltaïque, le chapitre décrit brièvement les cellules solaires les plus couramment utilisées, Leurs rendements ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Le principe de fonctionnement, les différentes caractéristiques ainsi que les différentes Dégradations ont été détaillées.

## **Chapitre 2 :**

# **Modélisation d'un panneau solaire**



## Chapitre 2 :

### Modélisation d'un panneau solaire

#### 2.1 Introduction

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui transforme l'énergie lumineuse en courant électrique. La première photopile a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs de laboratoire 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 quelques années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quittés 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. Actuellement, l'objectif essentiel est devenu la production de l'électricité, sans pollution, pour l'alimentation des réseaux de distribution.

#### 2.2 Circuit équivalent d'une cellule solaire

##### 2.2.1 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  $I_{pv}$  en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (2.1), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale.

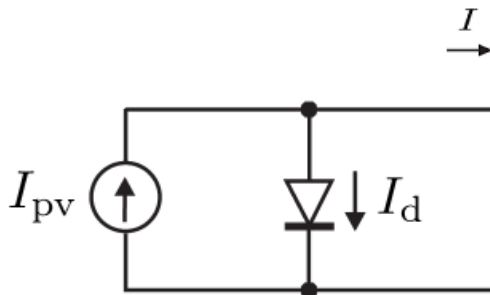


Figure 2.1. Schéma équivalent d'une cellule idéale

Les équations retenues de ce modèle sont :

$$I = I_{pv} - I_d$$

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

### 2.2.2 Cas d'une cellule réelle

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs Parasites dues à la fabrication et représenté sur la figure (2.2).

Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant  $I_{pv}$  caractérisant le photo-courant, une résistance série ( $R_s$ ), et une résistance parallèle

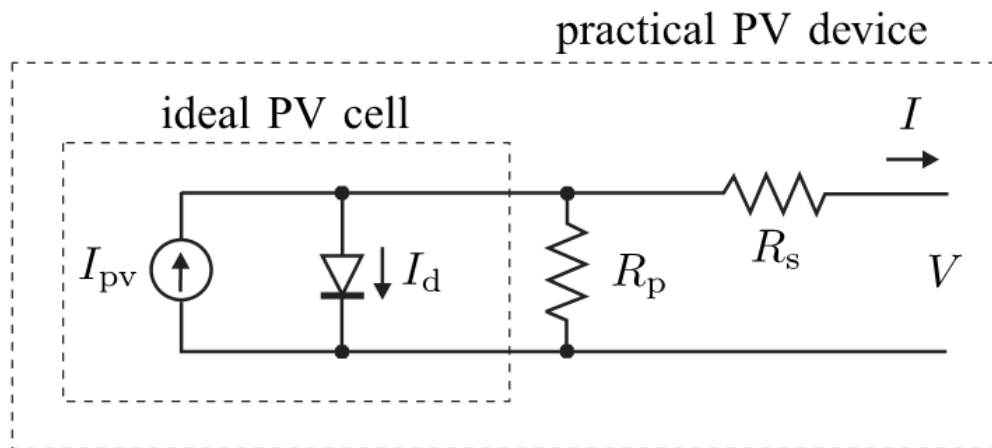


Figure 2.2 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle

Dans notre travail, nous avons utilisé le modèle mathématique du module solaire à Exponentiel simple.

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante :

$$I = I_{pv} - I_d - I_p$$

$I$ : Courant générer par la cellule photovoltaïque

$I_{pv}$  : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + K_1 \Delta T) \frac{G}{G_n}$$

$I_d$  : Le courant circulant dans la diode.

$$I_d = I_{pv} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_s}$$

$$I_0 = I_{0,n} \left(\frac{T_n}{T}\right)^3 \exp\left[\frac{qE_g}{aK} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)\right]$$

$$I_{0,n} = \frac{I_{sc,n}}{\exp\left(\frac{V_{0c,n}}{aV_{t,n}}\right) - 1}$$

$$R_p = \frac{V_{mp} (V_{mp} + I_{mp} R_s)}{\left\{ V_{mp} I_{pv} - V_{mp} I_0 \exp\left[\frac{(V_{mp} + I_{mp} R_s) q}{N_s a K T}\right] + V_{mp} I_0 - P_{max,e} \right\}}$$

$$I_{pv,n} = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{sc,n}$$

$$R_{p,min} = \frac{V_{mp}}{I_{sc,n} - I_{mp}} - \frac{V_{0c,n} - V_{mp}}{I_{mp}}$$

$I_{or}$  : est le courant de court-circuit de la cellule à la température de référence  $T_n$  et l'éclairement de référence ;

$T$  : Température de la jonction des cellules PV [ $^{\circ}$ K] ;

$T_n$  : Température de référence des cellules PV [ $^{\circ}$ K] ;

$a$  : facteur d'idéalité de la jonction ;

$E_g$  : Énergie de gap [ev] ;

$R_s$  : résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules ;

$V$  : La tension de sortie ;

$I_p$  : Le courant circulant dans la résistance  $R_p$  ;

$R_p$  : Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues impuretés

Les résistances  $R_s$  et  $R_p$  sont calculées par une boucle de programmation suivent :

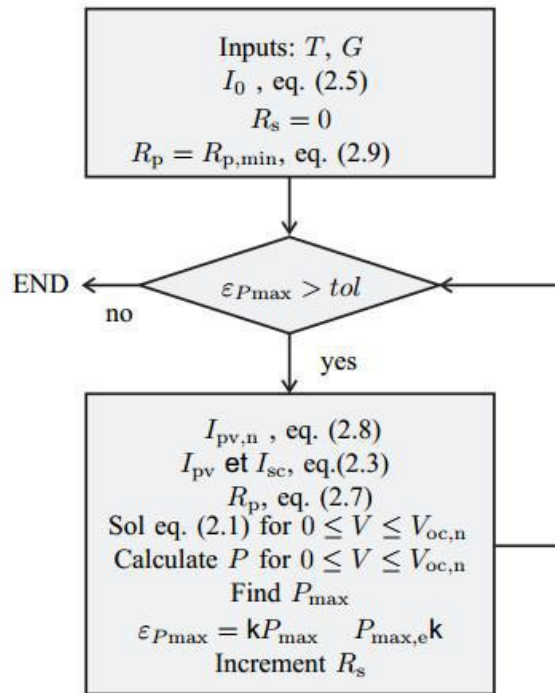


Figure 2.3 Algorithm of the method used to adjust the I–V model

On a choisi un modèle simple ne nécessitant que les paramètres donnés par le fabricant, les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont données dans le tableau suivant :

### 2.2.3 Caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau Sanyo

<b>Type de module</b>	HIP-225HDE1
Puissance crête mesuré ( $W_C$ )	225
Tension optimale mesuré ( $V_{MPP}$ )	33.9
Courant optimale mesuré ( $I_{MPP}$ )	6.64
Tension a circuit ouvert ( $V_{C0}$ )	41.8
Courant de court-circuit ( $I_{CC}$ )	7.14
Fusible série max	15

Tab 2.1

## 2.3 Les paramètres qui influent sur la caractéristique $I=f(V)$

### 2.3.1 Influence de l'éclairement

La puissance délivrée par un générateur PV dépend de l'irradiation qu'il reçoit. Les Figures (2.4), (2.5), représentent la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'un module (PV) solaire en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes. On remarque que la tension  $V_{max}$  correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant  $I_{max}$  qui augmente fortement avec l'éclairement.

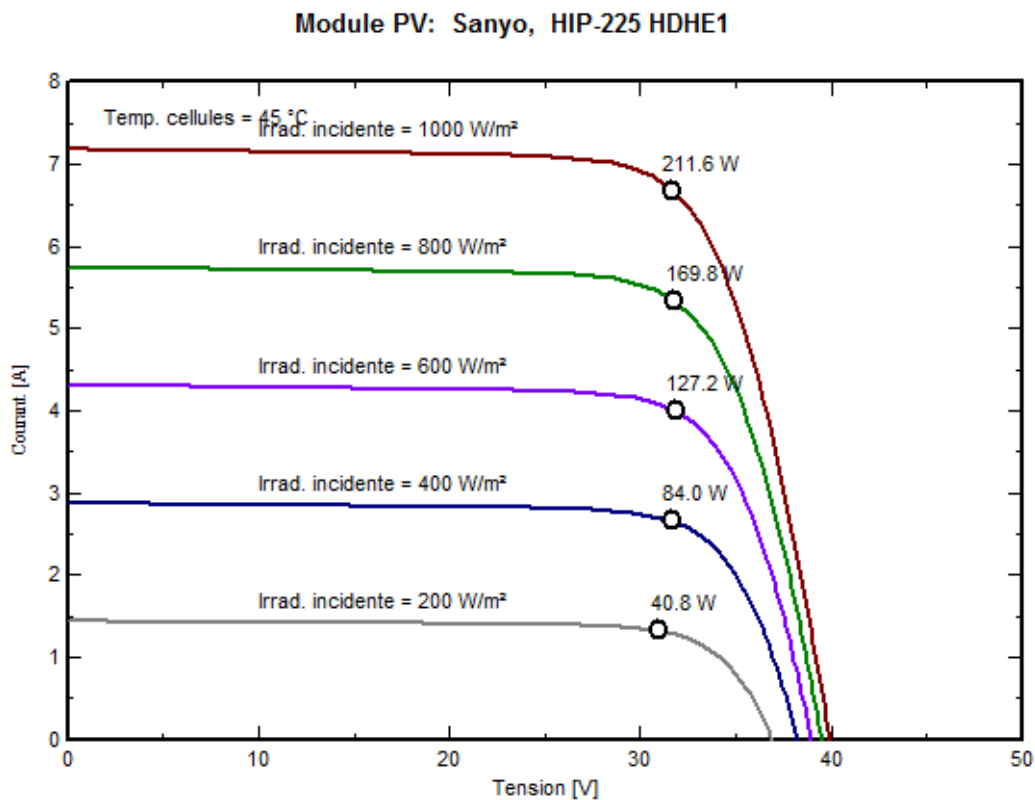


Figure 2.4. Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$

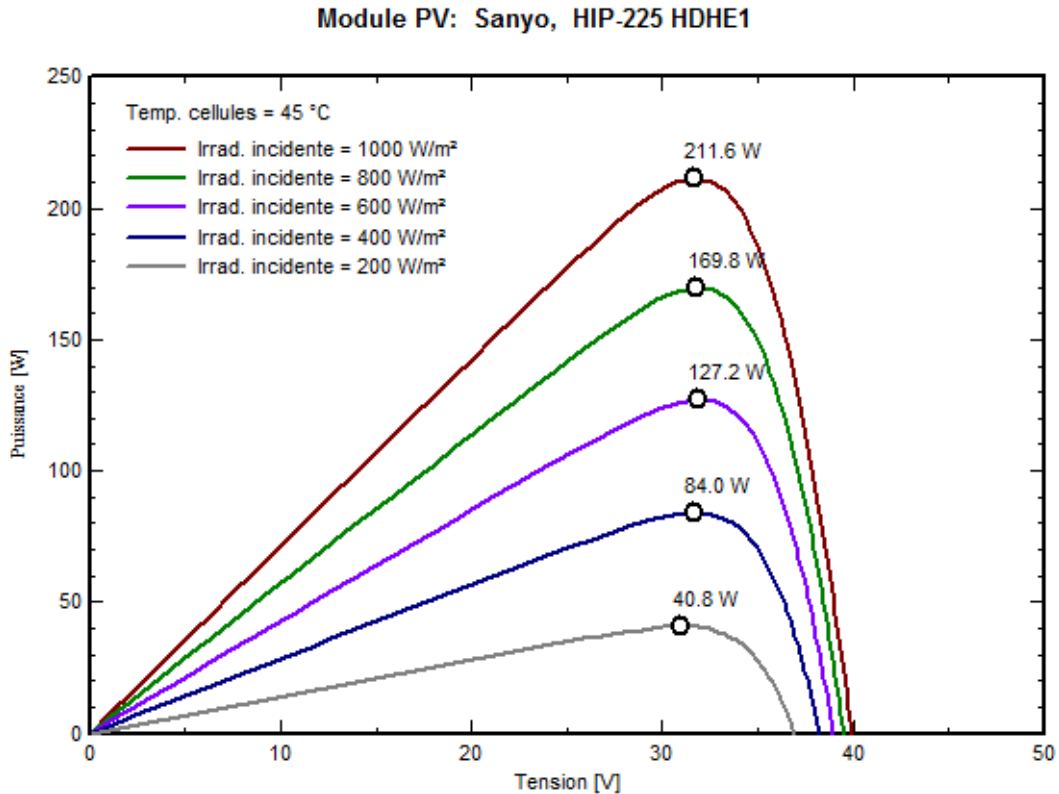


Figure 2.5. Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P=f(V)$ .

### 2.3.2 Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules Photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température. Les figures (2.6), (2.7) représentent la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'un module (PV) solaire en fonction de la température, à un éclairement constant.

On remarque que L'augmentation de la température entraîne une diminution de la Tension de circuit ouvert, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale.

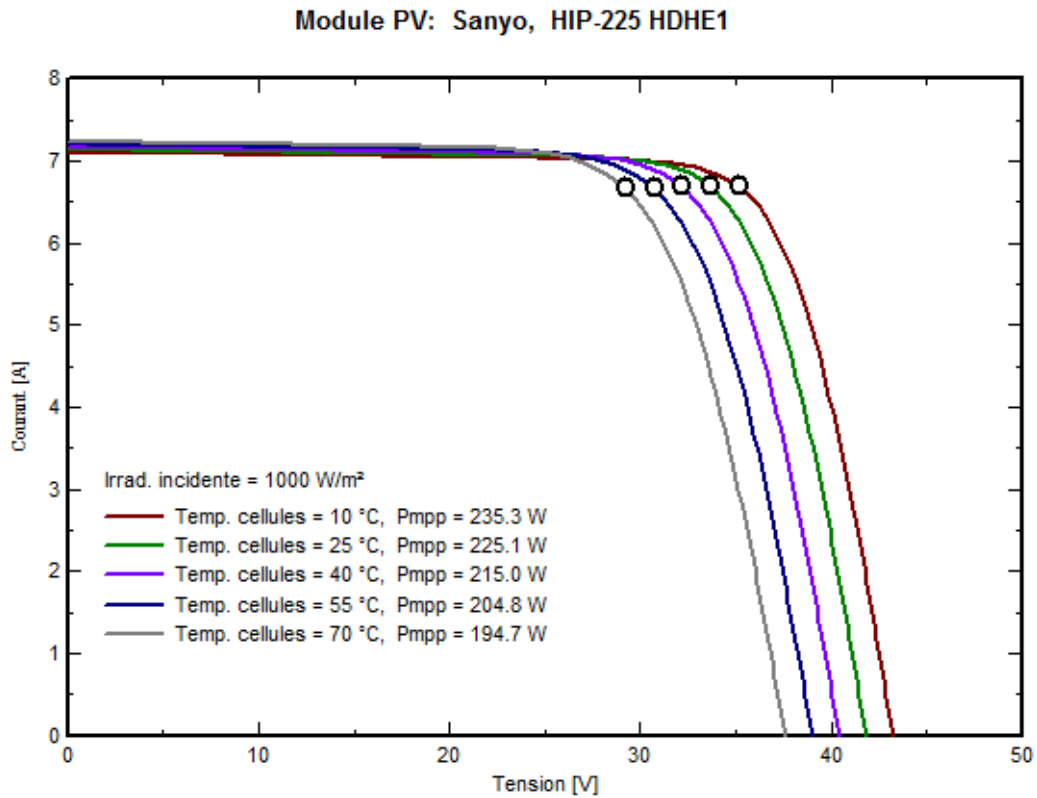


Figure 2.6. Influence de la température sur la caractéristique I (V).

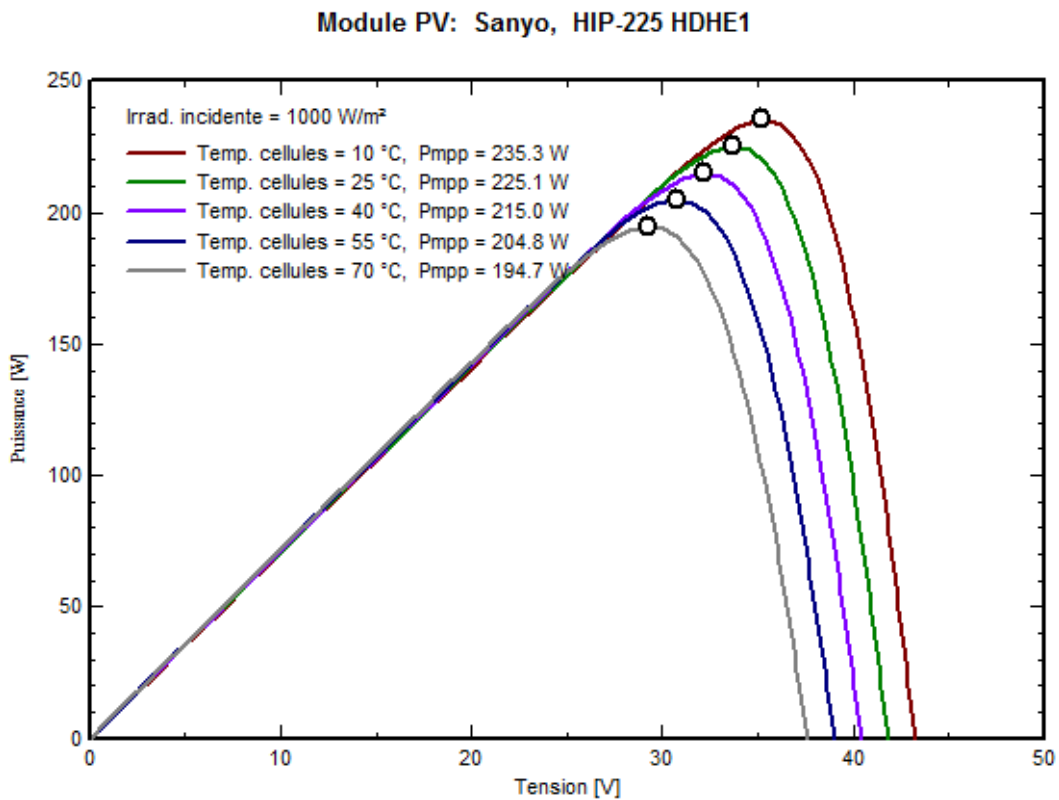


Figure 2.7. Influence de la température sur la caractéristique P (V).

### 2.3.3 Influence de la résistance série

La résistance série 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 série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone de la photodiode se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court-circuit.

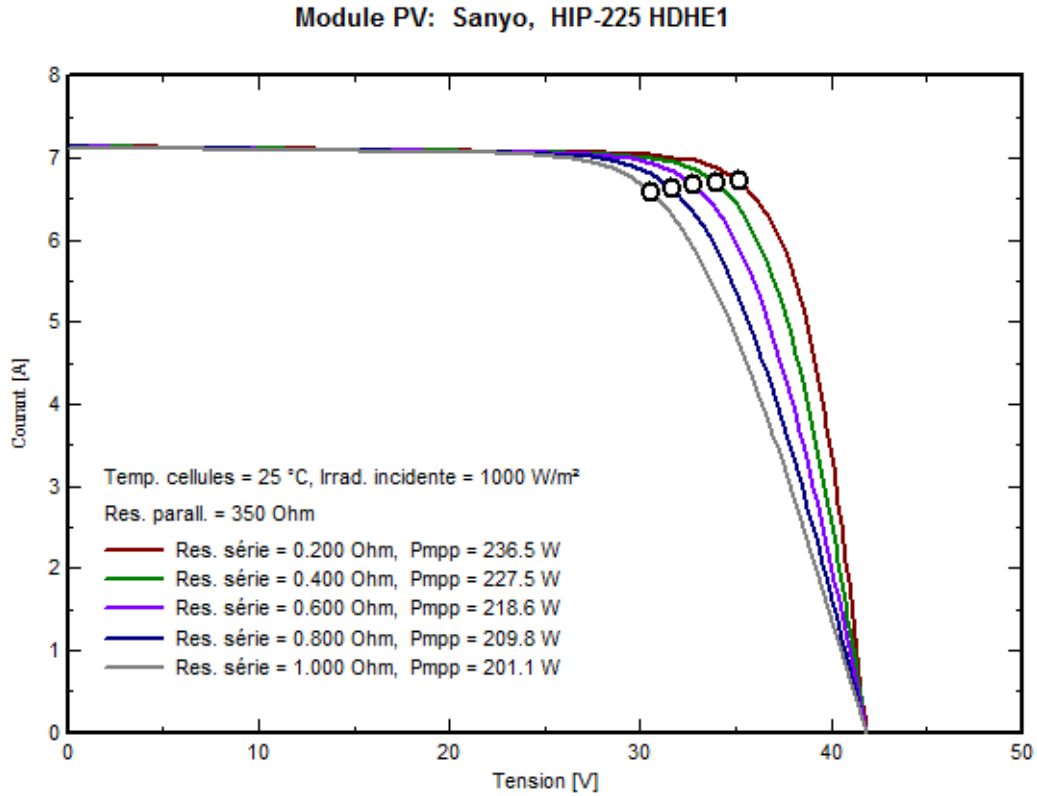


Figure 2.8. L'influence de la résistance série  $R_s$  sur la caractéristique  $I(V)$ .



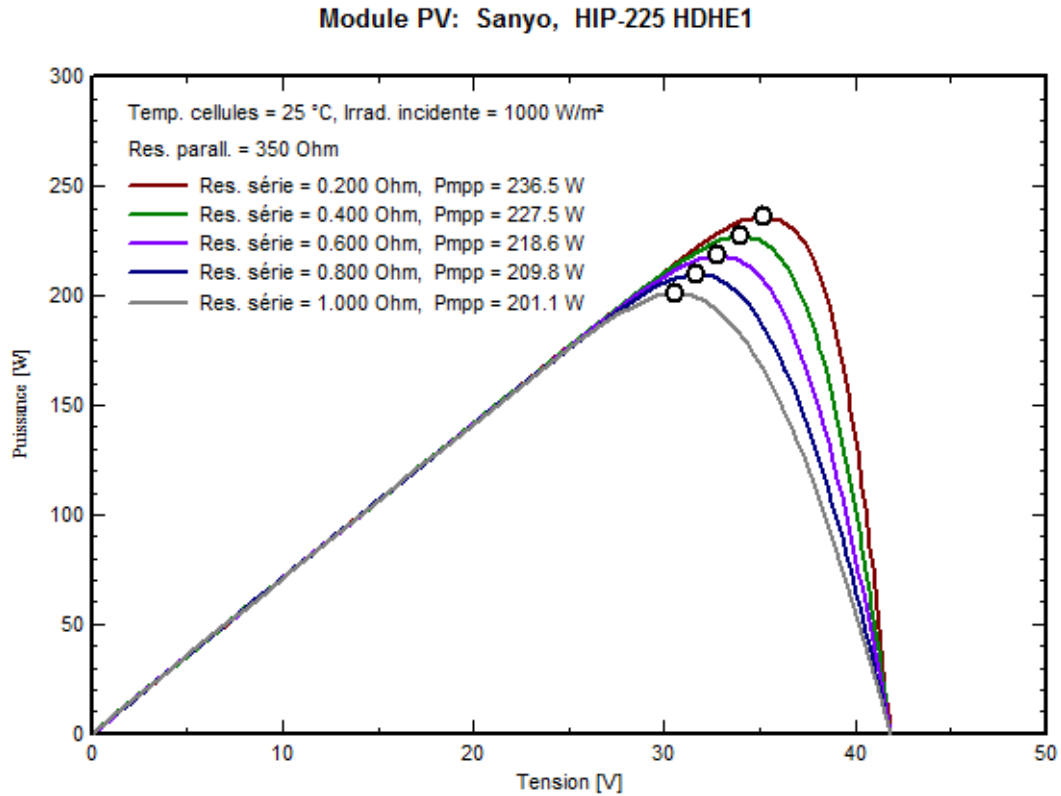


Figure 2.9. L'influence de la résistance série  $R_s$  sur la caractéristique  $p(V)$ .

### 2.3.4 Influence de la résistance shunt

La résistance shunt est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du Courant qui intervient entre les bornes opposées positives d'une photopile.

En générale, la résistance shunt est très élevée, son effet se fait sentir surtout dans la partie génération du courant.

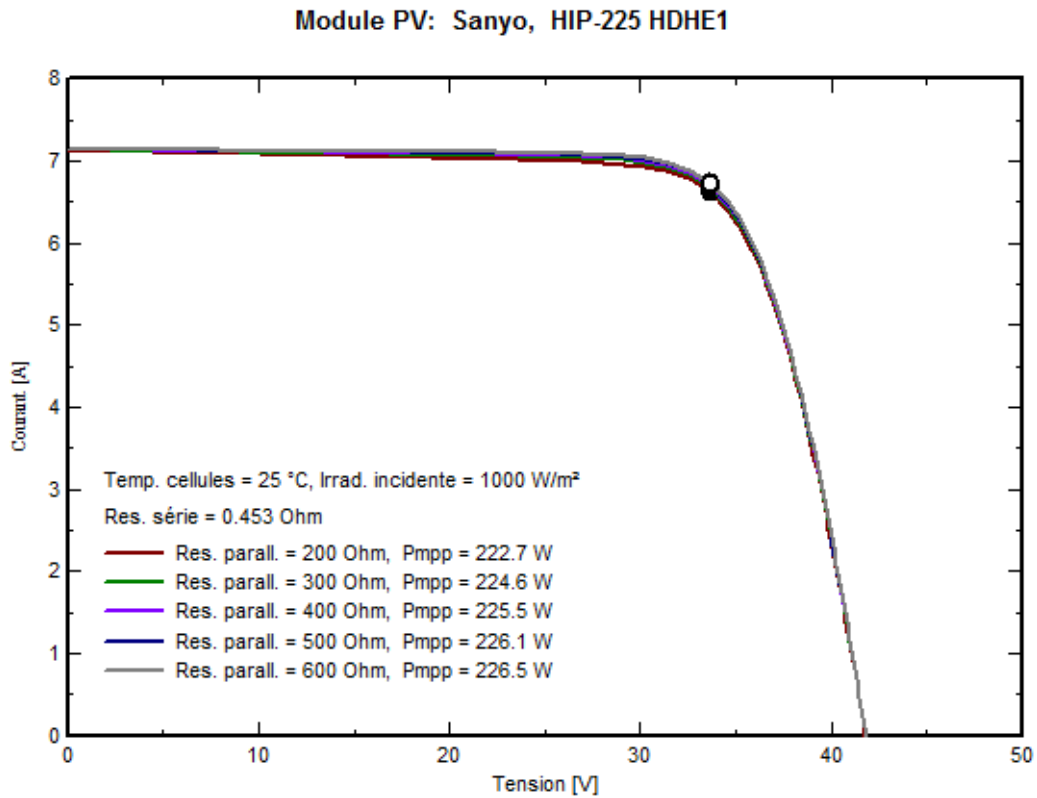


Figure 2.10. L'influence de la résistance shunt  $R_{sh}$  sur la caractéristique  $I(V)$

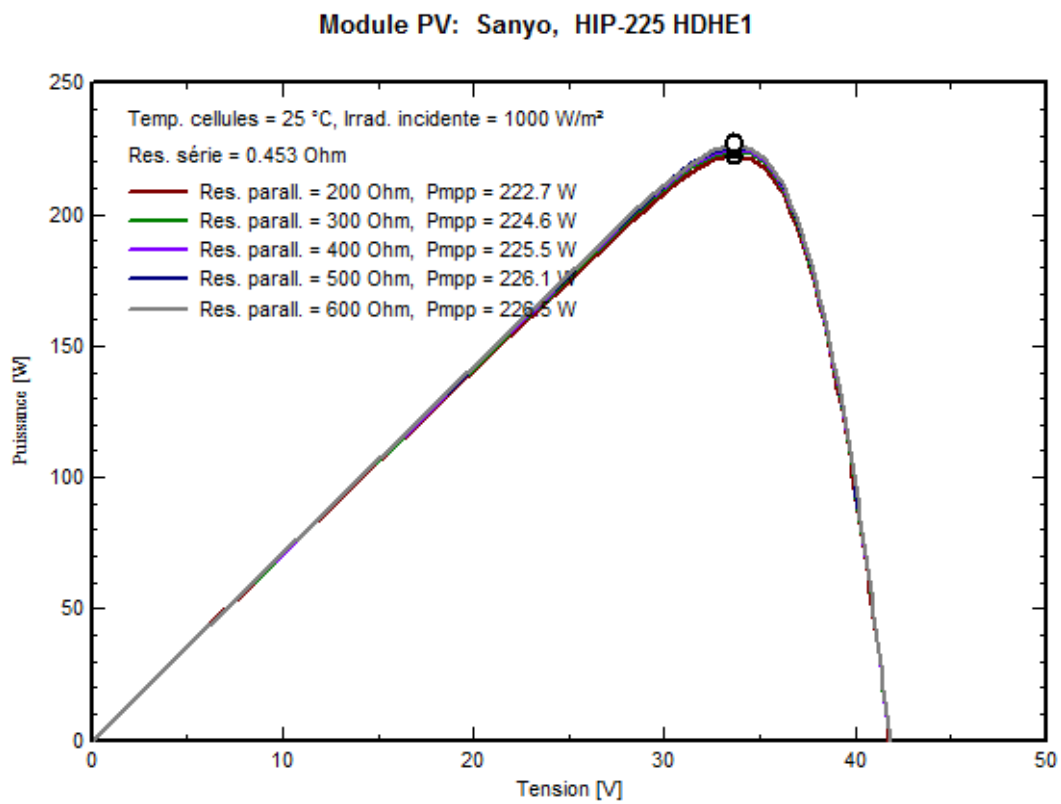


Figure 2.11. L'influence de la résistance shunt  $R_{sh}$  sur la caractéristique  $P(V)$ .

## 2.4 Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)

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.

### 2.4.1 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 suivant montrent les caractéristiques résultantes ( $I_{pcc}$ ,  $V_{pco}$ ) obtenues en associant en parallèle (indice  $p$ )  $N_p$

cellules identiques :

$$I_{pcc} = N_p * I_{cc} \quad \text{et} \quad V_{pco} = V_{co}$$

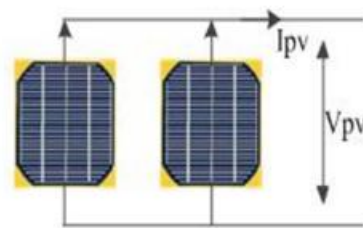
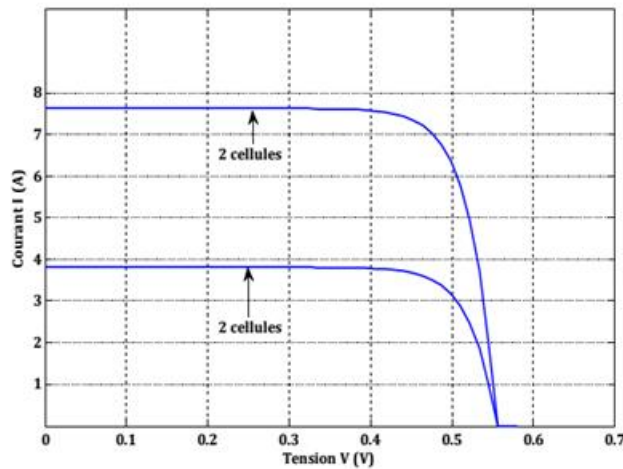


Schéma de deux (2) cellules photovoltaïques associées en parallèle.



Caractéristique I-V de deux (2) cellules PV raccordées en parallèle.

Figure 2.12 et figure 2.13

### 2.4.2 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 suivant montrent les caractéristiques résultantes ( $I_{SCC}, V_{SCO}$ ) obtenues en associant en série (indice s)  $N_s$  cellules identiques ( $I_{CC}, V_{CO}$ )

$$I_{SCC} = I_{CC} \quad \text{et} \quad V_{CO} = N_s * V_{CO}$$

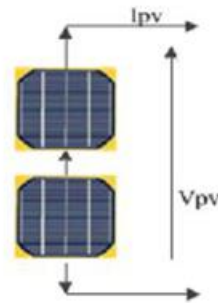


Figure 2.14 : Schéma de 2 cellules photovoltaïques associées en série.

Figure 2.14

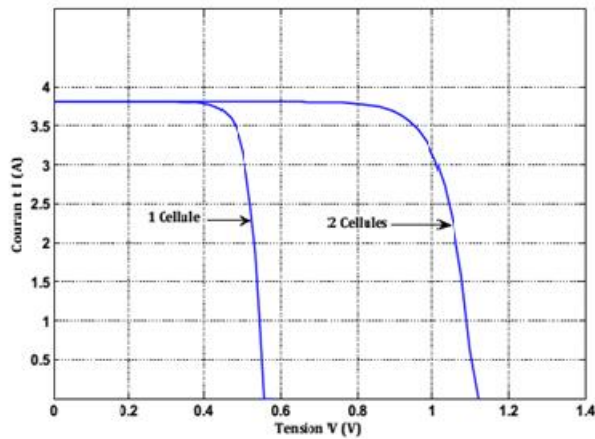


Figure 2.15 : Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en série.

Figure 2.15

### 2.4.3 Association des Cellules Photovoltaïques mixte

La plupart des panneaux photovoltaïques commerciaux sont constitués par des sous réseaux de cellules connectées en série. Chacun de ces sous-réseaux est lui-même constitué d'un groupe de cellules photovoltaïque connectés en série. Le nombre de cellules par sous-réseaux est le fruit d'un compromis économique entre protection et pertes d'une partie importante du générateur photovoltaïque en cas de défaut partiel.

$$I = I_{pv}N_p - I_0N_p \left[ \exp \left[ \frac{V+R_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right)I}{V_taN_s} \right] - 1 \right] - \frac{V+R_s\left(\frac{N_s}{N_p}\right)I}{R_p\left(\frac{N_s}{N_p}\right)I}$$

Les paramètres de GPV	La valeur de chaque paramètre
Le nombre de modules en série N <sub>s</sub>	15
Le nombre de modules en parallèle N <sub>p</sub>	2
La tension maximale Vr à PPM (V)	26.3*15=394.5
La tension en circuit ouvert Voc (V)	32.9*15=445
Le courant maximal Ir à PPM (A)	7.61*2=15.22
Le courant de court-circuit Icc (A)	8.21*2=16.42

Tab 2.2 . Valeurs des paramètres de simulation

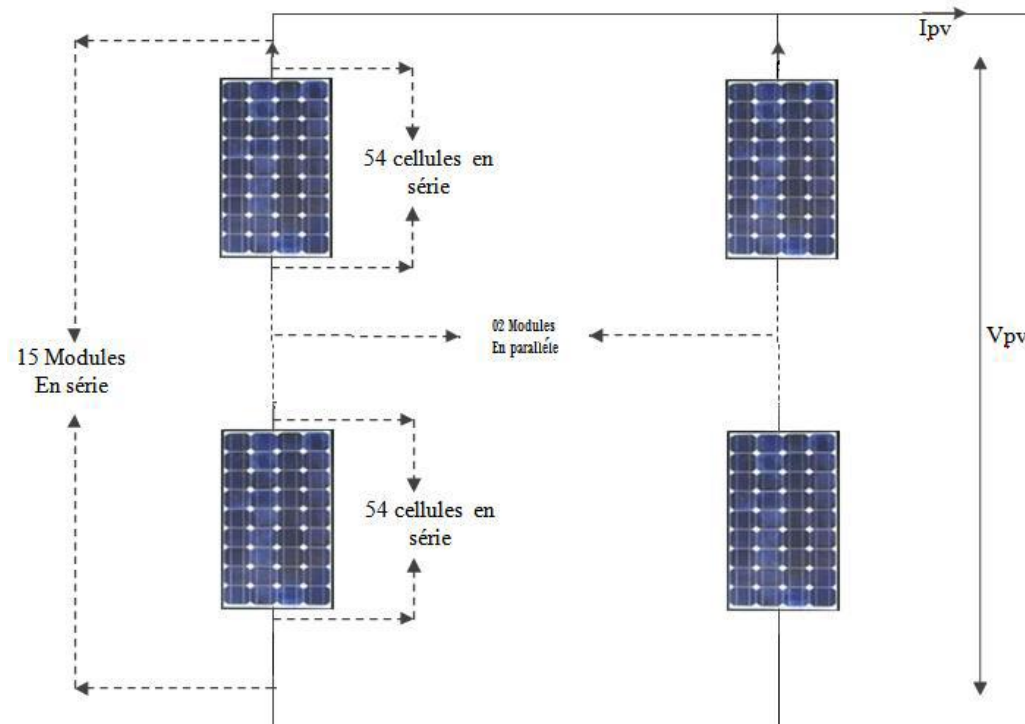


Figure 2.16 schéma mixte des cellules photovoltaïque

## 2.5 Paramètres caractéristiques d'une cellule

### photovoltaïque

Les paramètres des cellules photovoltaïques ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF,  $\eta$ ) extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

#### 2.5.1 Courant de court-circuit $I_{cc}$

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule ( $V=0$ ). Ce courant croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule, il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température. On peut écrire :  $I_{cc}(V=0) = I_{ph}$

#### 2.5.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$

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

$$V_{co} = \ln \frac{nkt}{q}$$

$n$  : Facteur d'idéalité de la diode.

$K$  : constante de Boltzmann ( $1,381.10^{-23}$  Joule/Kelvin).

$T$  : Température de la jonction p-n des cellules.

$q$  : Charge d'électron ( $1,602.10^{-19}$  C).

$E$  : Eclairement reçu.

$E_0$  : Eclairement de référence.

Il peut aussi être calculé par :

$$V_{oc} = \frac{nkt}{q} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1\right)$$

$I_{cc}$  : Courant continu de la cellule.

$I_s$  : Courant de saturation de la diode.

### 2.5.3 Le facteur de forme FF

On appelle facteur de forme FF le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule  $P_{max}$ , et le produit du courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) par la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) (C'est à dire la puissance maximale d'une cellule idéale) :

$$FF = \frac{P_{max}}{(V_{co} I_{cc})}$$

$$FF = \frac{V_m I_m}{(V_{co} I_{cc})}$$

FF : Facteur

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'une cellule photovoltaïque et d'une centrale photovoltaïque, les caractéristiques du module et générateur PV avec ses performances. Ainsi, L'influence de quelques paramètres sur ses caractéristiques. Pour le fonctionnement optimal d'un système photovoltaïque.

## **Chapitre 3 :**

# **Convertisseurs et techniques d'optimisation**



### 3.1 Introduction

Le convertisseur est un appareil servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnent soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative.

Donc à partir de cette définition on englobe deux types différents d'appareils électroniques placés entre générateur photovoltaïque et charges.

Convertisseur continu-continu qui fait office d'interface entre générateur et charge pour transférer de l'un à l'autre le maximum de puissance.

Les convertisseurs continus –alternatifs qui transforment l'énergie de type continu fournie par le panneau ou le stockage en énergie de type alternatif.

On va s'intéresser dans notre travail aux convertisseurs continu- continu.

### 3.2 Convertisseur continu- continu (DC-DC) :

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continus-continus permettant de générer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe. Permettant de contrôler la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. D'un point de vue circuit, le hacheur apparaît comme un quadripôle figure (3.1), jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues.

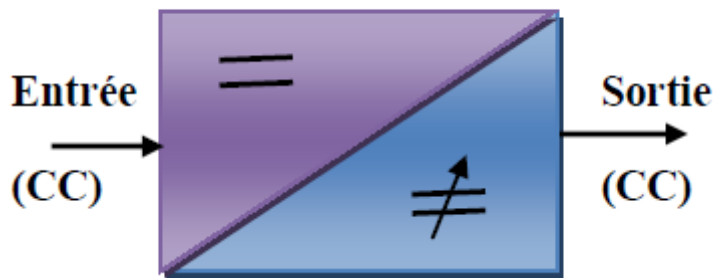


Figure 3.1 Convertisseur DC-DC

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Tous ces dispositifs dans le cas idéal ne consomment pas de puissance, c'est la raison pour laquelle les hacheurs ont de bons rendements.

Le commutateur est un dispositif semi-conducteur en mode (bloqué -saturé), habituellement un transistor MOSFET ou IGBT. Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro d'où sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l'état Saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance Perdue sera très petite. Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante ( $f_s$ ) avec un temps de fermeture égale à  $(\alpha.T_s)$  et un temps d'ouverture égale à  $(1-\alpha)$ :

**Ou :**

$T_s$  : est la période de commutation qui est égale à  $\frac{1}{f_s}$

$\alpha$  : Le rapport cyclique du commutateur

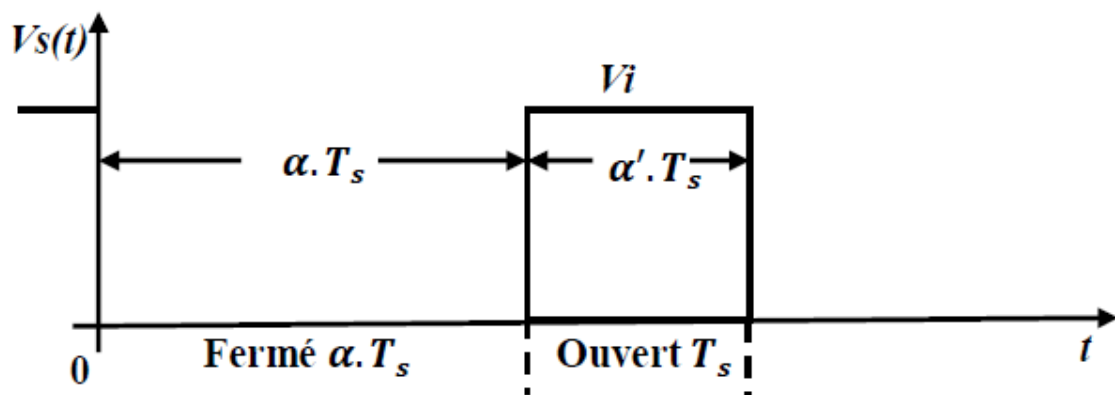


Figure 3.2 Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur

Les hacheurs peuvent être subdivisés en deux catégories :

- Hacheur non réversible (hacheur série, hacheur parallèle et hacheur série Parallèle).

- Hacheur réversible (hacheur a 2 quadrants, hacheur en pont réversible en Courant et en tension).

Dans ce chapitre, on présentera les différents types de convertisseur statique continu continu Non réversible.

### 3.2.1 Hacheur série ou Buck (dévolteur) :

La responsabilité (ou convertisseur abaisseur), illustré dans la figure.3.3, Contient un condensateur et une inductance avec le rôle de stockage d'énergie, Et de deux commutateurs complémentaires : quand il Ya un contact fermé, L'autre est ouvert et vice-versa

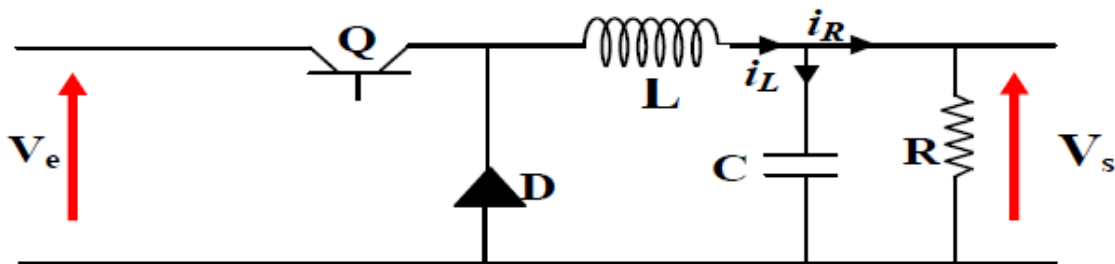


Figure 3.3 Convertisseur Buck

Les interrupteurs sont alternativement ouverts et fermé avec un taux de Fréquence de découpage PWM.

La sortie qui en résulte est une tension régulée de grandeur plus faible que

La tension d'entrée. L'fonctionnement du convertisseur sera analysé la fonction

Des Etats commutateurs.

**La première période ( $0 < t \leq dT$ ) :** Le transistor est à l'état **ON** et la diode **OF**.

Durant cette période, correspondant au cycle de PWM conduite  
Signal, le schéma équivalent du circuit est présenté ci-dessous

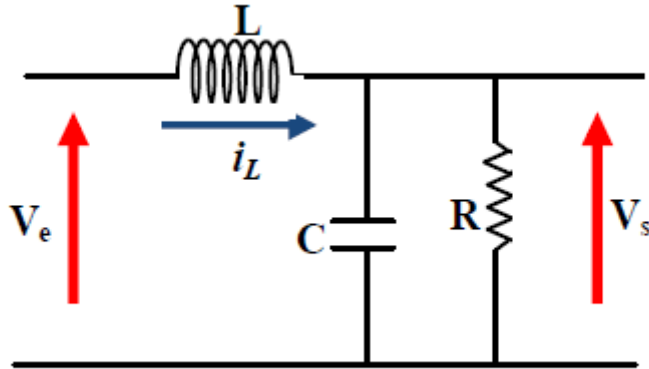


Figure 3.4 Schéma de convertisseur Buck état

L'équation (1) d'état résultante écrit comme suit :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_e - V_c) \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C} \left( i_L - \frac{V_c}{R} \right) \end{cases} \quad 0 < t < dT, Q: ON$$

**La deuxième période ( $dT \leq t < T$ ):** le transistor OFF et la diode ON

Dans le moment où le commutateur à transistor à l'état OFF, la tension aux Bornes de l'inducteur sera changer la polarité et la diode s'allume à l'état. Le Schéma équivalent de convertisseur cours de cette période est indiquée dans la

Figure ci-dessous :

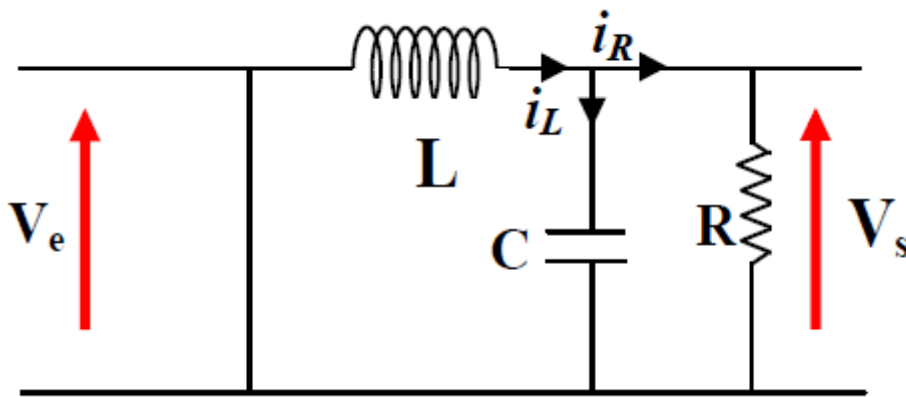


Figure 3.5 Schéma de convertisseur Buck état OFF

Pour cette période de fonctionnement, la tension de sortie  $V_C$  et le courant dans l'inducteur  $i_L$  satisfont les équations(2) suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_c) \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C} \left( i_L - \frac{V_c}{R} \right) \end{cases} \quad 0 < t < dT, Q: OFF$$

À partir de l'équation (1) et (2) on obtient le modèle moyenne de Convertisseur à la condition continue CCM comme suit :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (-V_c + uV_e) \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C} \left( i_L - \frac{V_c}{R} \right) \end{cases}$$

### 3.2.2. Convertisseur Boost (survolteur)

Convertisseur Boost présenté dans la (Figure 3.6), comporte un Condensateur et une bobine d'inductance avec le rôle de stockage d'énergie, et Deux commutateurs complémentaires. En le cas du convertisseur élévateur de

Tension, la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée.

Les interrupteurs sont ouverts et fermés alternativement avec un taux De fréquence de commutation PWM. Tant que le transistor est ON, la diode est Éteinte, en train de s'inverser biaisée .La tension d'entrée, appliqué directement À l'inductance L. Lorsque le transistor est éteint, la charge est alimentée à la Fois par la source d'entrée et le filtre LC. La sortie qui en résulte est un marché Réglementé tension de grandeur supérieure à la tension d'entrée. Le Fonctionnement du convertisseur sera analysé selon l'état des Interrupteurs

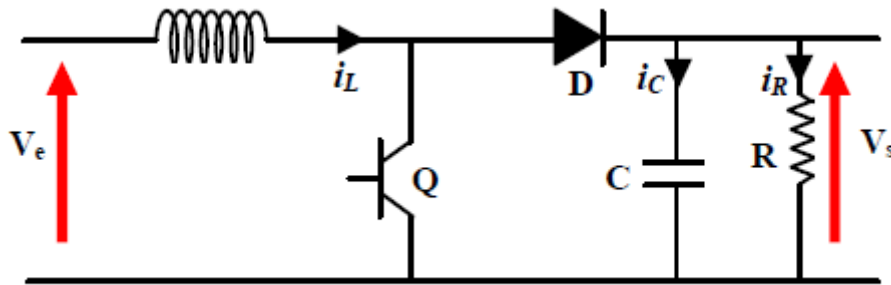


Figure 3.6 Convertisseur Boost

**La première période ( $0 \leq t \leq dT$ ) :** Le transistor est à l'état ON et la diode OFF.

Durant cette période, correspondant au cycle devoir de PWM signal de Conduite, le schéma équivalent du circuit est présenté ci-dessous. En cette Période L'inductance stocker l'énergie.

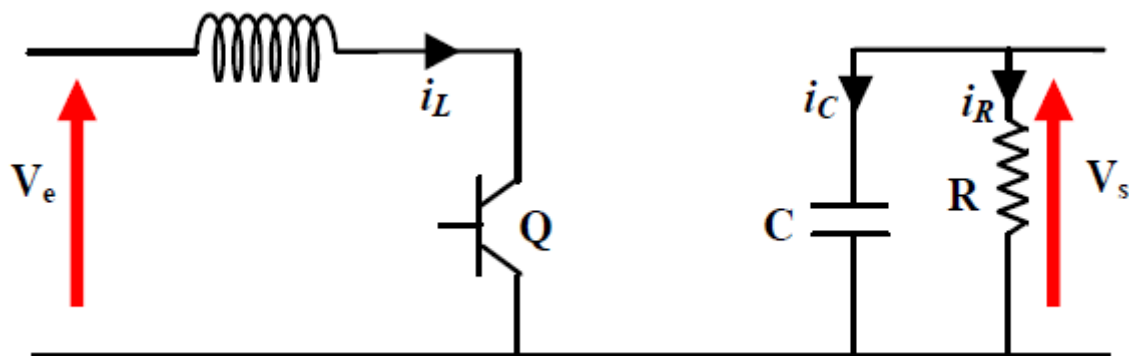


Figure 3.7 Schéma de convertisseur Boost état ON

Pour cette période d'exploitation, le VC tension de sortie et le courant dans L'inducteur  $i_L$  satisfait les équations (3) suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_e) \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C} \left( \frac{V_c}{R} \right) \end{cases} \quad 0 < t < dT, Q: ON$$

**La deuxième période ( $dT \leq t \leq T$ ) :** le transistor OFF et la diode ON Dans le moment où le commutateur à transistor à l'état OFF, la tension aux Bornes de l'inductance va changer la polarité et diode passera à l'état. Le Schéma équivalent du convertisseur au cours de cette période est indiqué dans La figure ci-dessous :

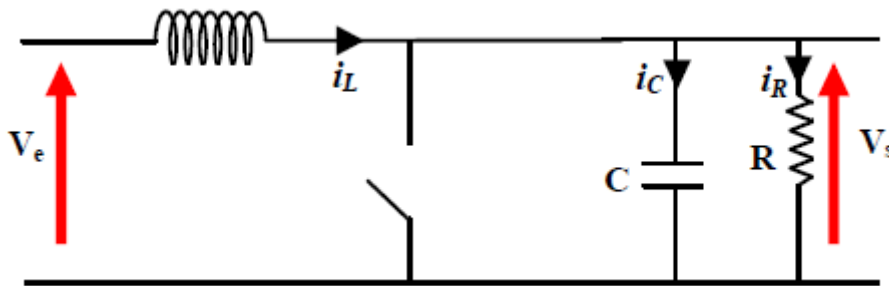


Figure 3.8 Schéma de convertisseur Boost état OFF

Pour cette période d'exploitation, le VC tension de sortie et le courant dans L'inducteur  $i_L$  satisfont les équations (4) suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_e - V_c) \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C} \left( i_L - \frac{V_c}{R} \right) \end{cases} \quad 0 < t < dT, Q: OFF$$

À partir de l'équation (3) et (4) on obtient le modèle moyenne de convertisseur à la condition continue CCM comme suit :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} V_e - (1 - u) \frac{1}{L} V_c \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C} \left( (1 - u) i_L - \frac{V_c}{R} \right) \end{cases}$$

### 3.3 Les convertisseurs DC-AC (Onduleurs)

L'onduleur est un convertisseur continu/ alternatif, il permet d'obtenir une tension alternative (éventuellement réglable en fréquence et en amplitude) à partir d'une source de tension continue. Son symbole est illustré dans la **Figure (3.9)**.

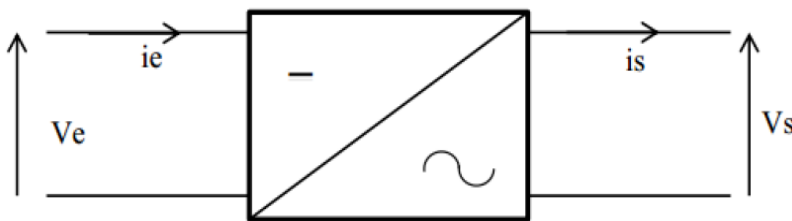


Figure 3.9 Symbole de convertisseur Continu - Alternative (DC – AC) Les onduleurs

Sont basés sur une structure en pont en H, constituée le plus souvent d'interrupteurs électroniques tels que les IGBT, transistors de puissance ou thyristors. Par un jeu de commutations commandées de manière appropriée (généralement une modulation de largeur d'impulsion), on module la source afin d'obtenir un signal alternatif de fréquence désirée

#### 3.3.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue comme le montre la **Figure (3.10)**, on peut dire qu'il existe deux moyens pour réaliser cette conversion.

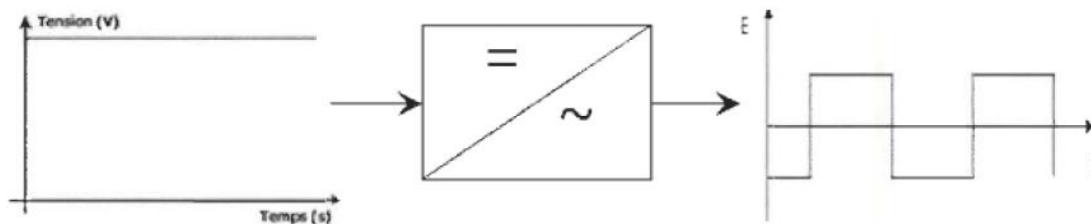


Figure 3.10 Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)



L'utilisation directe d'une paire d'interrupteurs de base qui consiste à régler la fréquence et la durée des interconnexions de la source avec la sortie. il est donc plutôt temporel et débouche sur les techniques de modulation de largeur d'impulsion Contrôler l'amplitude soit de façon continue en créant une source réglable (ce qui suppose l' existence d'un autre étage de conversion), soit de façon discrète en disposant d'un nombre suffisant de sources .

Quand S1 - S2 sont fermés (On) et S3–S4 sont ouverts (Off) pour  $0 < t < T/2$  on obtient une alternance positif  $U(t) = VDC$  comme la montre la Figure 3.11 ci-dessous

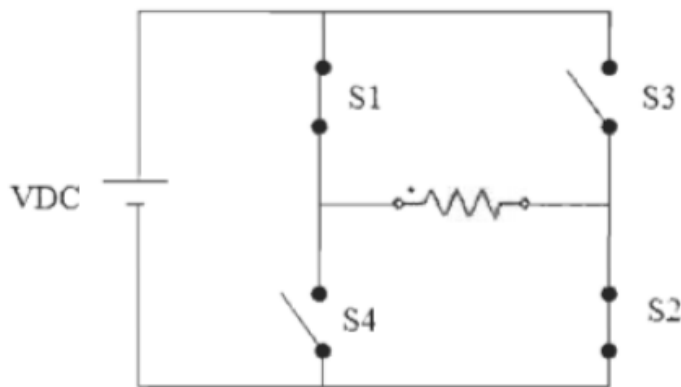


Figure 3.11 Fonctionnement de l'onduleur dans le 1er demi-cycle

Quand S1 - S2 sont ouvert (Off) et S3–S4 sont fermés (On) pour  $T/2 < t < T$  on obtient une alternance négative  $U(t) = -VDC$  comme la montre la Figure 3.12

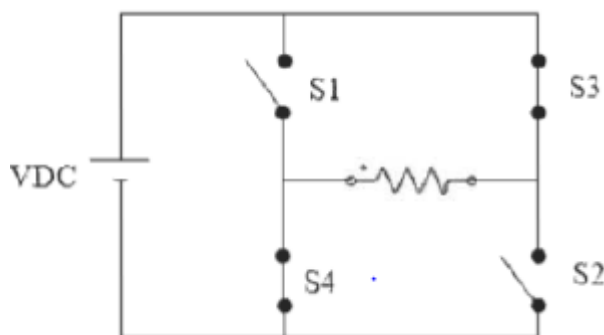


Figure 3.12 Fonctionnement de l'onduleur dans le 2éme demis cycle

Le signal résultant sur la période complète est présenté sur la Figure 3.13

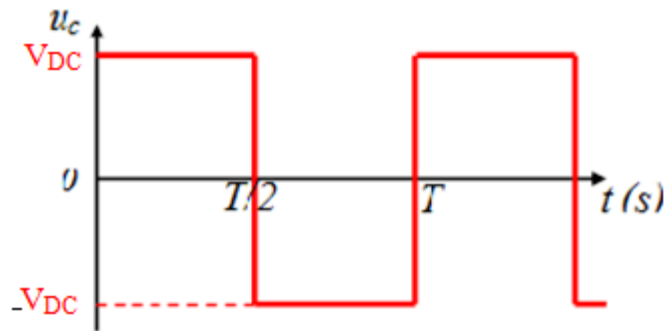


Figure 3.13 Signal complet de l'onduleur

### 3.3.2 Onduleur autonome

Un onduleur autonome délivre une tension avec une fréquence soit fixe, soit ajustable Par l'utilisateur. Il n'a pas toujours besoin de réseau électrique pour fonctionner ; par Exemple un convertisseur de voyage que l'on branche sur la prise allume-cigare d'une Voiture utilise le 12 V continu du véhicule pour générer du 120 ou 230 V, alternatif en 50 ou 60 Hz.

Les onduleurs sont notamment employés pour la réception de la TV en mode nomade (Récepteur satellite dans un camping-car par exemple) dépourvu d'entrée alimentation Électrique basse tension ( $\sim 12$  V).

### 3.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents types des convertisseurs ( DC-DC ) (DC-AC) spécialement le hacheur Boost utilisé dans notre application, ainsi les différentes techniques d'optimisation.

**Chapitre 4 :**

**Commande MPPT maximam  
Power Point Tracking**

### **4.1 Introduction**

La stratégie de gestion de l'énergie photovoltaïque y compris le système de conversion d'énergie est un élément très important dans l'amélioration de l'efficacité. Une des stratégies de conversion d'énergie en cours de développement est la méthode pour trouver la puissance maximale du module PV qu'on appelle méthode de suivi du point de puissance maximale (MPPT). La méthode MPPT trouve automatiquement la tension maximale ou le courant maximal du module PV au cours de lesquelles il fonctionnera pour atteindre le maximum de puissance sous certaine température et irradiation. Pour obtenir de bonnes performances, de nombreuses méthodes sont proposées pour être mises en oeuvre dans le système de PV. Sur la base de l'algorithme de commande, ces méthodes de MPPT proposées peuvent être classées en méthodes classiques et intelligents

### **4.2. Commande MPPT**

#### **4.2.1 Principe de la recherche du point de puissance maximal :**

La chaîne de puissance d'un GPV où une charge DC est alimentée par un générateur à Travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT peut être représentée comme Indiquée sur la figure 4.1. La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du CS de telle Sorte que la puissance fournie par le GPV soit la puissance maximale disponible à ses bornes. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le PPM, mais en général il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS jusqu'à se placer sur le PPM en fonction des évolutions des paramètres d'entrée du CS (IPV et VPV). ). Dans la section suivante, nous présentons un bilan sur les différents types d'algorithmes MPPT présents dans la littérature.

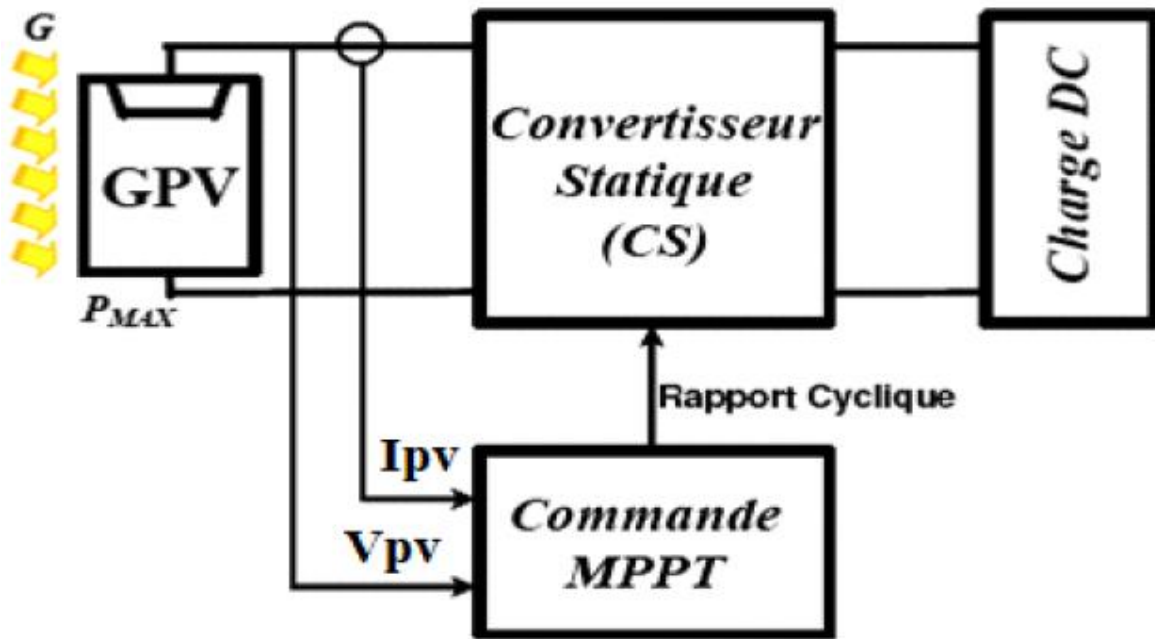


Figure 4.1 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec CS contrôlé par une Commande MPPT sur charge DC

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du CS de telle sorte que la puissance fournie par le GPV soit maximale à ses bornes. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS jusqu'à se placer sur le PPM en fonction des évolutions des paramètres d'entrée du CS ( $I_{PV}$  et  $V_{PV}$ ) (voir Fig. 4.2). Dans le chapitre suivant, nous présentons un bilan des différents types d'algorithmes MPPT présents dans la littérature.

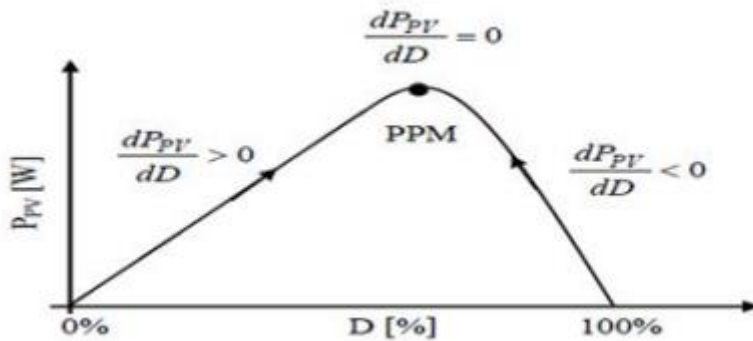


Figure 4.2 Relation entre le rapport cyclique d'un CS et la puissance du GPV.

### 4.3 différent commande MPPT

#### 4.3.1 Commande perturbation et observation (P and O simple) :

C'est l'algorithme de poursuite du PPM le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est Basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de  $V_{ref}$  où en agissant Directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie de panneau. La figure 4.3 donne l'organigramme de cet algorithme.

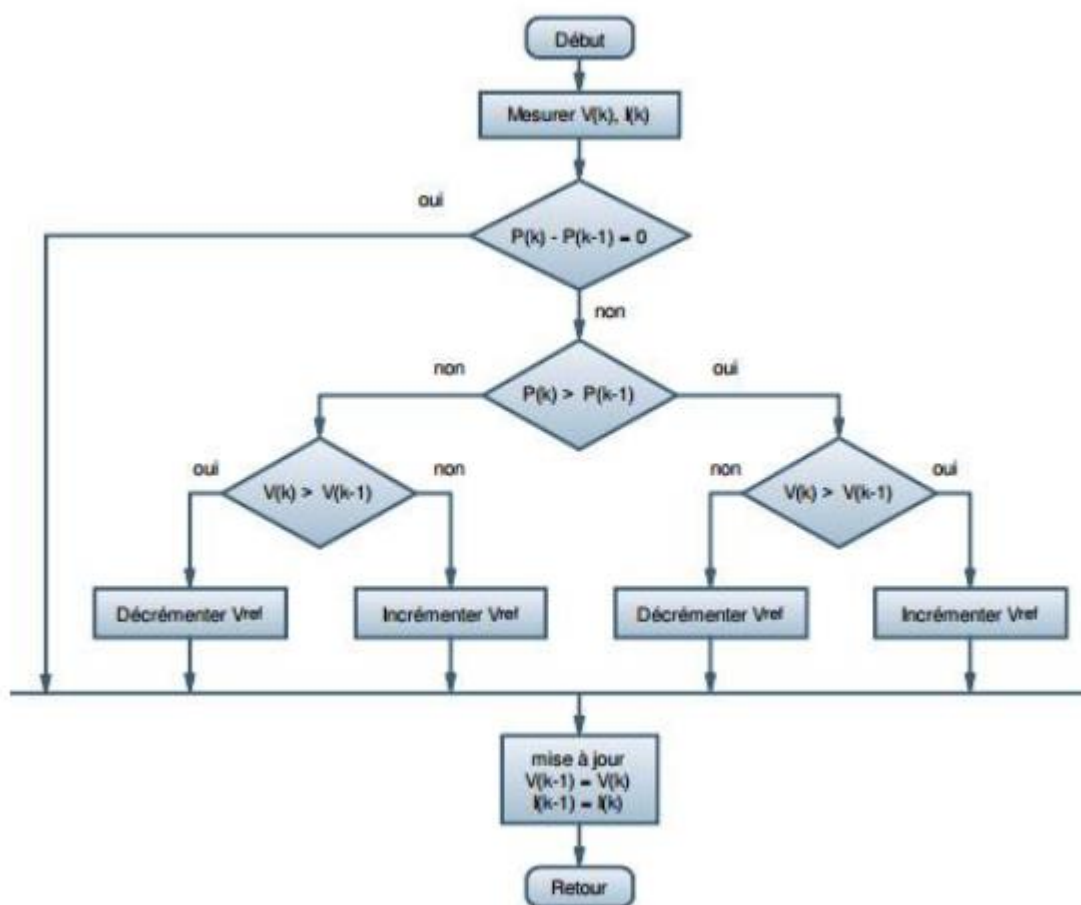


Figure 4.3 Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation

Un inconvénient de la méthode de P&O est décrit par Hussein et ali, Si une augmentation Brutale de l'ensoleillement est produite on aura une augmentation de la puissance du panneau, L'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de Perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui l'éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continu jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement où il revient au vrai point de puissance maximale. Ceci cause

un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance

#### 4.3.2 commande par incrémentation de conductance :

L'algorithme par incrémentation de conductance se résulte en dérivant la puissance du Panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro .Ceci Peut-être décrit par les équations suivantes :

$$\frac{dp_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(V_{pv} \cdot I_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (4.2)$$

Le  $\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$  terme représente l'opposé de la conductibilité instantanée du panneau photovoltaïque.

Et  $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}$  représente le terme d'incrément de conductance.

Par conséquent, pour le point de puissance maximum (PPM), ces deux termes peuvent être Égaux mais de signes opposés. Si le point de fonctionnement ne coïncide pas avec le point (PPM), l'inégalité de l'équation (4.1) indique la position de la tension de fonctionnement si elle est plus grande ou inférieure à la tension du point de puissance maximum (PPM).

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}, \left( \frac{dP}{dV} = 0 \right) \quad (4.3)$$

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}, \left( \frac{dP}{dV} > 0 \right) \quad (4.4)$$



$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}, \left(\frac{dP}{dV} < 0\right) \quad (4.5)$$

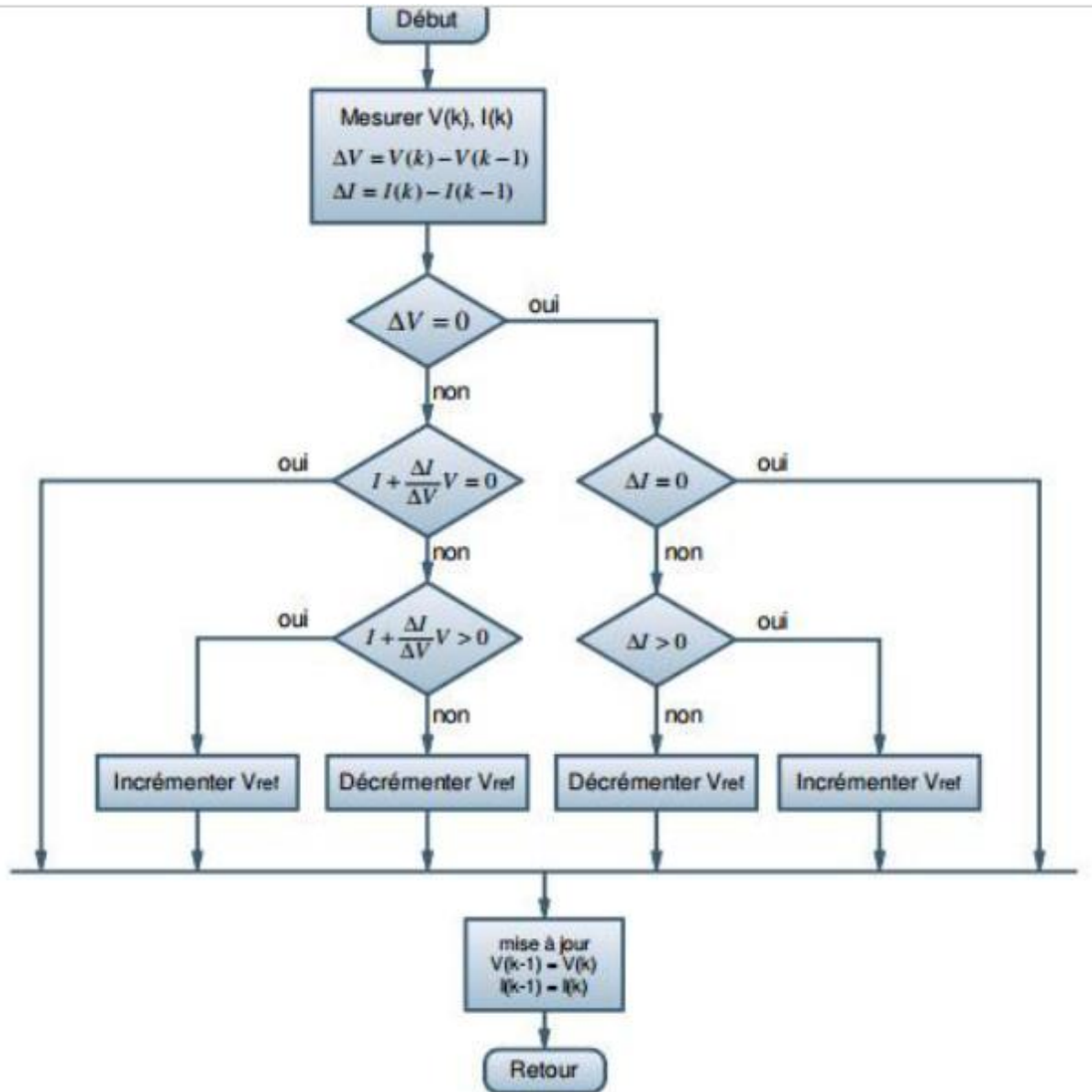


Figure 4.4. Organigramme de l’algorithme incrémentation de conductance.

### 4.3.3 Commande en circuit ouvert

Dans ce cas on se base sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par la Comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d’erreur qui fait varier le rapport cyclique de la PWM de commande afin d’annuler cette erreur.

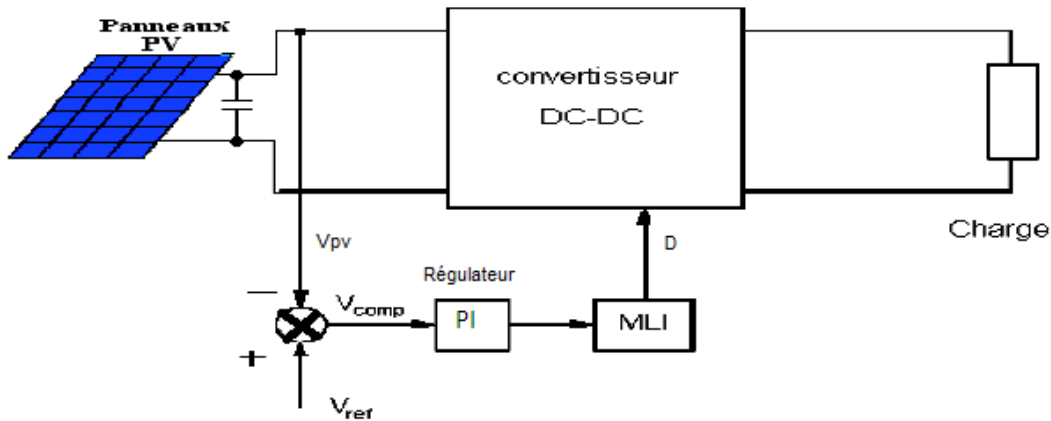


Figure 4.5 Méthode avec Contre-réaction de tension.

On a trois types de cette méthode selon la nature de la tension de référence :

- Méthode à tension de référence fixe
- Méthode à tension de référence en fonction de  $V_{OC}$
- Tension de référence externe (Cellule pilote)

#### 4.3.4 Commande en court-circuit

Le courant de court-circuit du panneau solaire permet de savoir la valeur du courant Optimal dans lequel doit fonctionner le panneau. Le courant optimal est proportionnel au courant de Court-circuit, cette proportionnalité est presque constante en fonction des conditions d'ensoleillement et de température. La fonction  $I_{mp}=f(I_{sc})$  est pratiquement Linéaire et elle est de forme  $I_{mp}=k*I_{sc}$ .

#### 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié la commande MPPT pour rechercher le point où La puissance du générateur photovoltaïque est maximale, sous différentes conditions de Fonctionnement. On a étudié quelques méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrémentement de l'inductance, méthode de perturbation et observation et logique floue.

### Conclusion Générale

Dans ce travail nous avons fait l'étude de la modélisation d'une chaîne photovoltaïque qui se compose d'un générateur photovoltaïque (avec une seule diode), un étage d'adaptation (convertisseur DC /DC Boost), une charge DC (résistance) et un étage de commande pour piloter le convertisseur (une première fois la commande MPPT classique en l'occurrence P&O, IncCond).

Dans ce cadre nous avons présenté les systèmes d'énergie renouvelable en portant un intérêt particulier au système photovoltaïque qui est constitué essentiellement par un panneau photovoltaïque (PV) et un convertisseur DC-DC Boost. Le modèle électrique à une seule diode du PV décrit par le modèle mathématique. Pour le convertisseur Boost qui est dont le modèle Simulink. Différentes simulations, sous l'environnement Matlab/simulink, sont réalisées pour mettre en évidence l'influence des variations des conditions climatiques (éclairage et température) sur le MPP où la puissance du système est maximale.

La commande MPPT soit classique (P&O, IncCond) ou Floue permet la meilleure connexion entre le panneau photovoltaïque (PV) et la charge et elle force le de faire fonctionner toujours au point de puissance maximale.

Par ce travail, nous souhaitons d'avoir apporté une contribution à l'étude des caractéristiques photovoltaïques de la cellule solaire, l'étude des systèmes photovoltaïques autonomes et les commandes MPPT classiques. Comme perspective de ce travail, il serait intéressant de procéder à l'implémentation matérielle des techniques MPPT simulées, sur des systèmes à base de microcontrôleur ou DSP, afin de valider les résultats de simulation et confirmer les performances obtenues.

- [1] M. S., Bouakez, « Etude comparative de trois techniques de commande MPPT pour un système photovoltaïque », Mémoire Master, Univ Annaba, 2016.
- [2]. A.Mohammed Ahmed, “Study of interconnecting issues of photovoltaic/wind hybrid system with electric utility using artificial intelligence”, Electrical engineering dept., faculty of engineering, El-Minia University 2006.
- [3]. B.Bendib, “Techniques conventionnelles et avancées de MPPT pour des applications photovoltaïques : étude comparative”, mémoire de Magister, département d’Electronique .Université Ferhat Abbas-Sétif 2007.
- [4]. N.Saadaoui, “Modélisation et extraction automatique des paramètres d’un générateur photovoltaïque”, mémoire de Magister, département d’Electrotechnique, Université Ferhat Abbas-Sétif 2010.
- [5]. U.Kassel, “Photovoltaic system technology”, Germany, 2003, [www.uni-kassel.de/re](http://www.uni-kassel.de/re).
- [6]. S.Zeng, “Study on improving output current waveform of photovoltaic grid - connected system”, IEEE, pp. 1-5, 2006.
- [7]. M.Z, F.Z.Zerhouni, "Optimisation d’un système à énergie verte avec validation pratique," Revue des energies renouvelables, vol. 11 , no. N°1, p. 41–49,
- [8] : Yann RIFFONNEAU, « Gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque avec stockage connecte au réseau », Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier. 2009.
- [9] : Wikipédia est une mine d’informations sur les énergies renouvelables en général, et sur chaque type et technologie en particulier. Idéal pour commencer : [http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_renouvelable](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_renouvelable).
- [10] : Le site « Learn Energy » du projet éducatif de la Commission européenne (ManagEnergy) propose des liens vers des informations et des ressources sur l’énergie renouvelables : <http://learn-energy.net/education/> (site en anglais).
- [11] A. Labouret, M. Viloz : « Energie solaire photovoltaïque ». Edition le Moniteur, Dunod, 2éme Edition, 2005.
- [12] Fritts. On a new form of selenium photocell. *American Journal of Science*, 97, 1883.
- [13] G, Gomard. Cristaux photoniques pour le contrôle de l’absorption dans les cellules Solaires photovoltaïques silicium ultramine. Thèse de Doctorat. Université de Lyon 2012.

- [14] M, Urien. Cellules photovoltaïques organiques à base copolymères à blocs de type rigide-flexible Thèse de Doctorat. Université de Bordeaux 1.2008
- [15] M.A. Green, K. Emery, D.L. King, S. Igari and W. Warta, Progress in Photovoltaics, 13, 1 (2005) 49.
- [16] P. Destruel, I. Seguy, *Techniques de l'Ingénieur* 2004, RE25.
- [17] : MEZIANI Zahra « modélisation du module photovoltaïque » mémoire de magister, université de Batna année universitaire 2012.
- [18] : A. Lyes, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque » Université MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU Mémoire de Magister, 2011.
- [19]: Said Bentouba, Aek. Slimani, Med seghir Boucherit, Messaoud Hamouda « L'énergie renouvelable en Algérie et l'impact sur l'environnement ». Journal of scientific research N°0. 2010.
- [20] : Le ministère de l'énergie et des mines, conception et réalisation SATINFO ; Société du Groupe Sonelgaz « Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique ». Mars 2011.
- [21] : Site web : [www.cder.dz](http://www.cder.dz) « Bulletin des énergies renouvelables » 2012.
- [22] : « Les Energies Renouvelables en Algérie ». Université Kasdi Merbah-Ouargla. Faculté des hydrocarbures, des énergies renouvelable et des Sciences de la terre et l'univers. département renouvelable des énergies.