

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR – ANNABA



جامعة بادجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'Ingéniorat  
Département : Électrotechnique

## MEMOIRE DE LICENCE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Électrotechnique

Thème :

### Etude et simulation d'un système photovoltaïque

Présenté par :

ALLAGUI SALIM

LABIOD SALAH EDDINE

Dirigé par :

Mr.Adjabi Mohamed

**Jury de soutenance:**

- TOURAB Wafa	Présidente	MCB	Université d'Annaba
- Mr.Adjabi Mohamed	Rapporteur	Pr	Université d'Annaba

Promotion : juin 2021

# *Remerciements*

*Nous tenons d'abord à remercier fortement  
notre DIEU puissant qui nous a donné le  
courage et la force pour mener à bout ce  
modeste travail.*

*Je remercie du fond du coeur mon encadreur monsieur le Professeur  
Adjabi Mohamed  
pour son assistance, son encouragement et surtout sa patience durant la  
réalisation de ce travail ; ainsi qu'à Madame TOURAB  
qui ont accepté de le juger.*

*Nous remercions également tous Les enseignants et les responsables*

*De département D'électrotechnique ,  
Par la même occasion, nous remercions  
vivement tous les étudiants, les amis sans  
exception, et tous ceux qui nous ont aidées de  
prés ou de loin à réaliser ce travail.*

***Promotion 2021***

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

- Mon père et ma mère que dieu ait pitié d'eux .
- Ma chère femme, que dieu la protège pour moi .
- Mes enfants ( oussama , nazim , iyed ) que dieu protège
- Mes frère et sœurs
- Chef de Sureté Urbaine chebaita mokhtar Commissaire principale bouras farouk
- Mes collègue : guerdoud med – kachar nour el houda – sigman rahma – z.aziza
- Mon amis : T.Foued – Farhi seif eddine

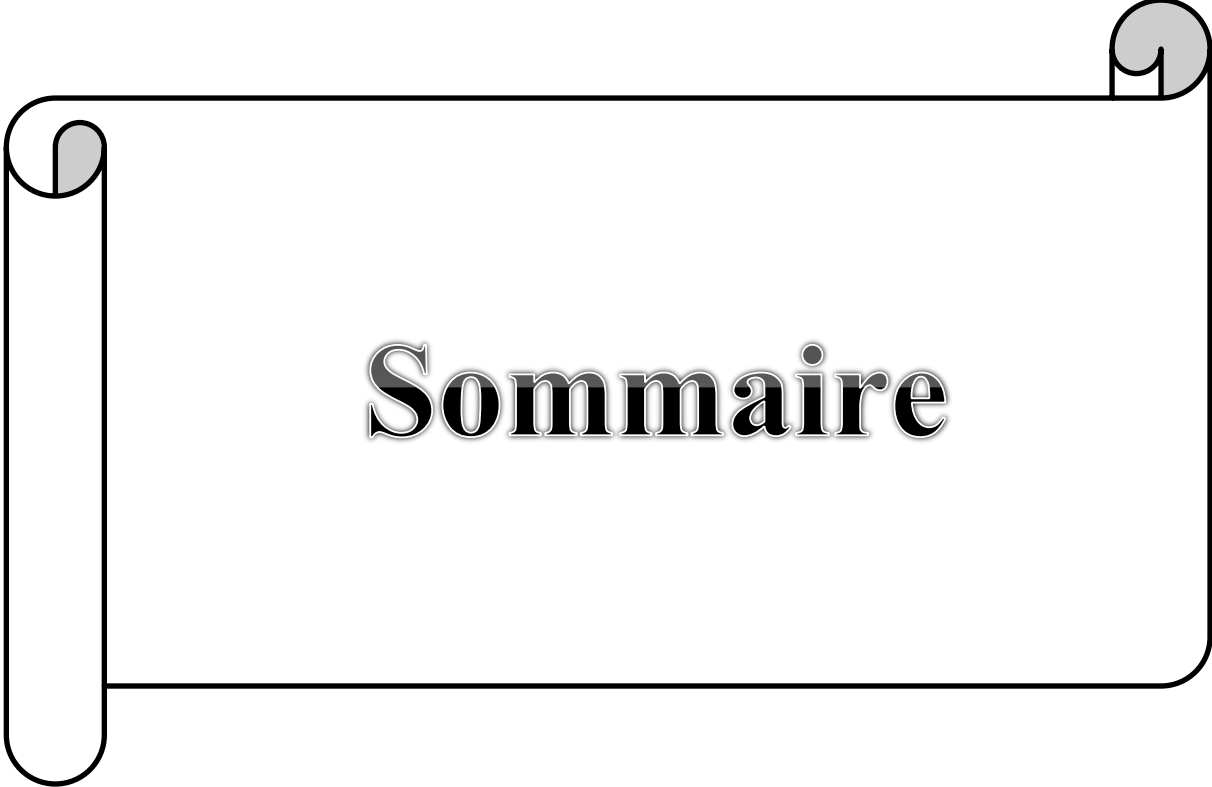
ALLAGUI SALIM

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

- Les parents
- Mes frères et sœurs

LABIOD SALAH EDDINE



# Sommaire

# Sommaire

---

Introduction général.....	1
---------------------------	---

## Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïque

I.1. Introduction.....	2
I.2. Généralités sur les systèmes solaires.....	2
I.2.1. Spectre solaire.....	2
I.2.2. Rayonnement solaire.....	3
I.2.3. L'énergie solaire.....	4
I.3. Cellule photovoltaïque.....	5
I.3.1. Définition de la cellule photovoltaïque.....	5
I.3.2. Historique.....	5
I.3.3. Structure physique.....	5
I.3.4. Rendement.....	6
I.3.5. Principe de fonctionnement.....	7
I.4. Caractéristiques et modélisation de la cellule photovoltaïque.....	8
I.4.1. Modèle électriques d'une cellule photovoltaïque.....	8
I.4.2. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.....	9
I.4.2.1. Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ).....	9
I.4.2.2. Tension de circuit-ouvert ( $V_{co}$ ).....	10
I.4.2.3. Puissance de la cellule PV.....	10
I.4.2.4. Puissance maximale d'une cellule PV.....	10
I.4.2.5. Rendement énergétique.....	11
I.4.2.6. Facteur de forme.....	11
I.5 Générateur photovoltaïque.....	12
I.5.1. caractéristique d'un module photovoltaïque.....	12
I.5.2. Protection des modules photovoltaïques.....	13
I.6 Différents types de systèmes photovoltaïques.....	14
I.6.1. Les systèmes autonomes.....	14
I.6.2. Les systèmes connectés au réseau.....	15
I.6.3. Les systèmes hybrides.....	15
I.7 Convertisseurs d'énergie.....	16
I.8 Avantages et inconvénients d'une installation PV.....	17
I.9 Conclusion.....	18

# Sommaire

---

## Chapitre II : Modelisation et simulation d'un système photovoltaïque

II.1 Introduction .....	19
II.2 Modélisation du générateur photovoltaïque .....	19
II.2.1. Modèle de la cellule solaire .....	19
II.2.2. Les modèles mathématiques .....	21
II.3 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) .....	24
II.3.1. Hacheur dévolteur .....	24
II.3.2. Hacheur survolteur (boost) .....	25
II.5 Conclusion .....	26

## Chapitre III : Simulation et interprétation des résultats

III.1 Introduction .....	27
III.2 Principe de la recherche du point de puissance maximal .....	27
III.3 Optimisation par la méthode de perturbation et observation (P&O) .....	28
III.4 Simulation .....	30
III.4.1 Sans commande MPPT .....	30
III.4.1.1 Influence de l'Irradiation .....	31
III.4.1.2 Influence de la température .....	32
III.4.2 Avec commande MPPT .....	34
III.4.2.1 Influence d'irradiation .....	34
III.4.2.2 Influence du changement d'éclairement à l'entrée a la sortie d'un Boost du panneau PV muni de la commande MPPT .....	35
III.5. Conclusion .....	36
<b>Conclusion général .....</b>	<b>37</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>38</b>

*Liste des figures et  
tableaux*



## *Liste des figures*

- Figure I.1 : Analyse spectrale du rayonnement solaire .
- Figure I.2 : Rayonnement solaire globale sur un collecteur photovoltaïque.
- Figure 1.3 : Représentation schématique d'une pile solaire à jonction PN standard.
- Figure 1.4 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV.
- Figure I.5 : Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une diode.
- Figure I.6 : Puissance maximale idéale et pratique .
- Figure I.7 : Cellule, module et panneau PV.
- Figure I.8 : Un module photovoltaïque.
- Figure I.9 : Protection des modules photovoltaïques.
- Figure I.10 : Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes.
- Figure I.11 : Systèmes photovoltaïques connectés au réseau.
- Figure I.12 : Configuration du système hybride à bus continu.
- Figure II-1 : schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.
- Figure II-2 : schéma électrique équivalent du modèle à une diode.
- Figure II-3 : schéma électrique équivalent du modèle deux diodes.
- Figure II-4: Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur.
- Figure II-5 : Circuit électrique du convertisseur DC-DC (boost).
- Figure III-1 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque .
- Figure III-2 : Caractéristique ( $P_{pv}, V_{pv}$ ) d'un panneau photovoltaïque.
- Figure III-3 : Organigramme de la méthode perturbation et observation.
- Figure III-4 : Schéma de bloc d'un générateur PV .
- Figure III-5 : Caractéristiques  $I = f(V)$  d'un panneau solaire pour différents éclairements à température constante égale à 25°C.
- Figure III-6 : Caractéristiques  $P = f(V)$  d'un panneau solaire pour différentes irradiances solaires à température constante égale à 25°C .
- Figure III-7 :Caractéristiques  $I = f(V)$  d'un panneau solaire pour différentes températures à éclairements constante égale 1000w/m<sup>2</sup>.
- Figure III-8 :Caractéristiques  $P = f(V)$  d'un panneau solaire pour différentes températures à éclairements constante égale 1000w/m<sup>2</sup>.
- Figure III-9 :Schéma de bloc d'un générateur PV mini d'une commande MPPT.
- Figure III-10 :Variation de la puissance incidente de l'éclairement en fonction du temps.
- Figure III-11 :Simulation de l'influence du changement d'éclairement sur les grandeurs électriques à l'entrée et la sortie d'un Boost du panneau PV muni de la commande MPPT.

## *Liste des tableaux*

- Tableau III-1 : Les modes de perturbation de la méthode P&O.
- Tableau III.2: Caractéristiques électriques du module.

## Introduction général

Depuis les crises successives du pétrole des dernières décennies et face aux prévisions d'épuisement inéluctable des ressources mondiales en énergie fossile (Pétrole, gaz, charbon...) d'un côté, et face aux débats sur l'énergie nucléaire et le réchauffement climatique d'un autre côté ; la nécessité de la diversification énergétique, de la sécurisation des approvisionnements et de la protection de l'environnement est devenue une urgence mondiale. Cette situation a conduit à la recherche d'autres ressources d'énergies de remplacement.

Les énergies renouvelables et notamment l'énergie solaire photovoltaïque représente une solution de remplacement par excellence et elle est de plus en plus utilisée dans nos jours. Pour cela Le rôle de ce système est de la production d'électricité sans interruption dans les régions isolées n'est pas seulement d'apporter « une puissance énergétique », mais un outil de développement social et économique des zones rurales. Le nombre de kilowattheures produit peut paraître insignifiant devant la capacité de production énergétique du pays, mais ces quelques dizaines ou centaines de kilowattheures peuvent ranimer tout l'espoir d'un village ou d'une communauté.

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Elle peut même se transformer en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. Le rendement des systèmes photovoltaïques peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT «Maximum Power Point Tracking»).

Le but de ce travail est l'étude d'un système photovoltaïque.

Notre mémoire est structurée en trois chapitres en plus de l'introduction générale, la conclusion générale et perspective.

Dans le premier chapitre, nous présenterons généralités sur les systèmes photovoltaïque . Ainsi que les différentes technologies des cellules solaires, leur principe de fonctionnement. A la fin de ce chapitre, on mettra en valeur les avantages et les inconvénients de ce système.

Le second chapitre sera consacré à la modélisation et la simulation du système photovoltaïque, qui a pour but d'étudier théoriquement le comportement de certains paramètres.

La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet sera élaborée à partir de modèles de la littérature (champ PV, convertisseurs) ; cette modélisation est une étape essentielle permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi les paramètres constitutifs.

Le dernier chapitre est consacré à la simulation et l'optimisation de système photovoltaïque.

Nous terminerons ce modeste travail par une conclusion générale qui résume notre étude.



# **CHAITRE I :**

## **GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES**

## I.1. Introduction

La consommation mondiale en matière d'énergie est assurée essentiellement par les énergies non renouvelables. Du fait que celles-ci sont épuisables, des stratégies énergétiques sont mises en oeuvre, visant à augmenter l'efficacité des systèmes électriques, à éviter le gaspillage mais également à se tourner vers les énergies renouvelables (hydraulique, vent, solaire, houle, biomasse, géothermie, marée).

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergies dont le renouvellement est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle de temps humaine. Les systèmes photovoltaïques permettent d'exploiter l'énergie du soleil à diverses fins, ils sont très fiables et constituent une source non polluante d'électricité qui peut convenir à toute une gamme d'applications.

## I.2. Généralités sur les systèmes solaires

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables, mais elle est très atténuée.

Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteur photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique [1].

L'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie, elle représente un potentiel considérable. En effet, la terre reçoit plus de 3000 h de lumière solaire par année avec un haut niveau d'éclairement. Avec une optimisation des angles de réception, la moyenne annuelle journalière est de 5 à 7 kWh /m<sup>2</sup>/jour [2].

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

### I.2.1. Spectre solaire

Le spectre solaire et la distribution spectrale en fonction de la longueur d'onde ( $\lambda$ ) ou de la fréquence ( $n$ ).

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde qui varie entre de 0,22 à 10  $\mu\text{m}$ .

La (figure I.1) représente la variation de la répartition spectrale énergétique. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 6,4% dans la bande des ultraviolets ( $0,20 < \mu < 0,38 \mu\text{m}$ ).
- 48% dans la bande visible ( $0,38 < \mu < 0,78 \mu\text{m}$ ).
- 45,6% dans la bande des infrarouges ( $0,78 < \mu < 10 \mu\text{m}$ ).

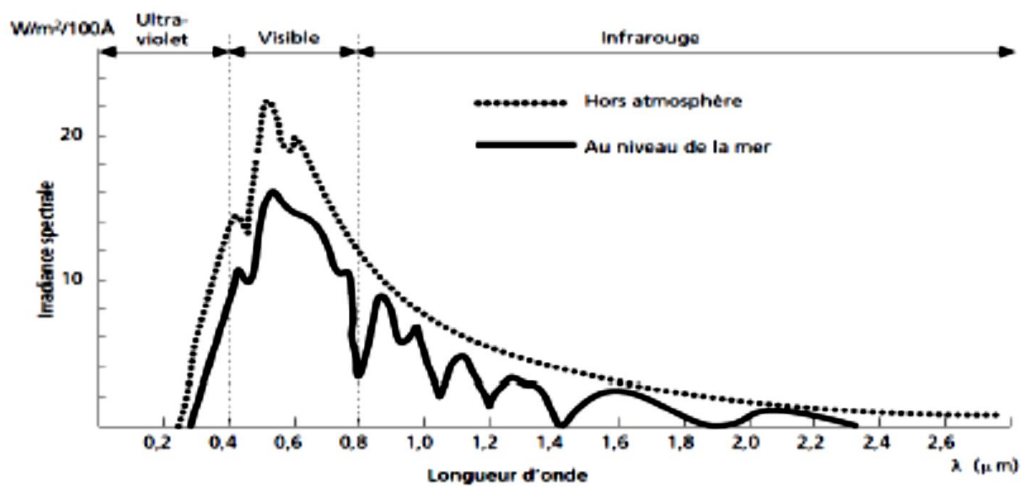


Figure I.1 : Analyse spectrale du rayonnement solaire .

### I.2.2. Rayonnement solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Lavoisier et Laplace, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance. Il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène-hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius.

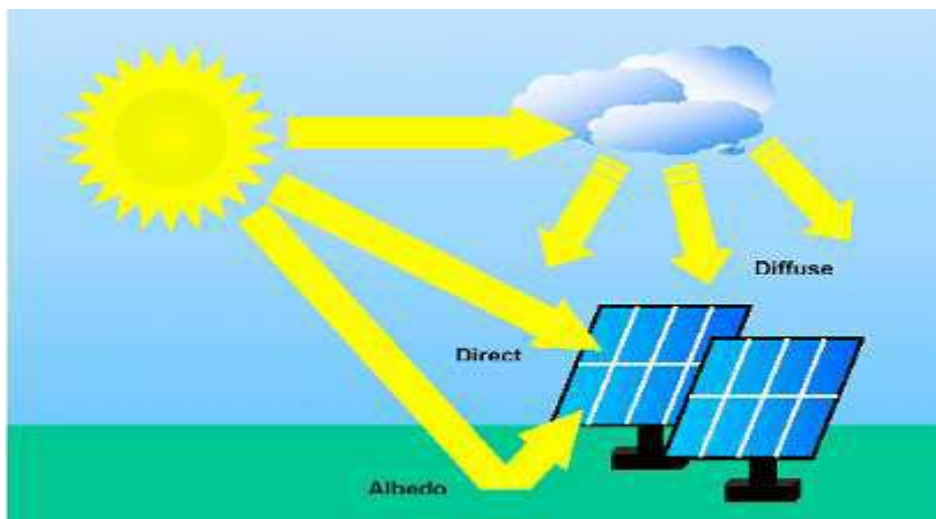
Ainsi, à chaque seconde le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement [3].

- Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s.
- Met environ 8 minutes pour parvenir à la terre.
- Distance moyenne soleil-terre est de 150 million kilomètres.
- Sa distribution spectrale de l'atmosphère présente un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0,5 μm.
- La température de corps noirs à la surface du soleil est d'environ 5780° K [4].
- Diamètre de soleil  $D=1,39 \cdot 10^9$  m.

Au sol, le rayonnement a au moins deux composantes : une composante directe et une composante diffuse (rayonnement incident diffusé ou réfléchi par un obstacle : nuage, sol) Sa valeur dépend de la pression, l'altitude et de l'angle d'incidence des rayons lumineux. L'intégration de l'irradiante sur la totalité du spectre permet d'obtenir la puissance  $P(W \cdot m^2)$  fournie par le rayonnement. Pour simplifier on utilise les notions suivantes.

- AM0 : Hors atmosphère (application spatial).  $P = 1.36 \text{ KW} \cdot m^{-2}$ .
- AM1 : le soleil est au zénith du lieu d'observation (à l'équateur).
- AM2 : spectre standard, le soleil est à  $45^\circ$ .  $P = 1.36 \text{ KW} \cdot m^{-2}$ .

Les conditions standard de caractérisation sont définis par la norme **IEC-609004** de **International Electrotechnical commission (IEC)** selon une distribution spectrale **AM2** globale (la somme des rayonnements directs et diffus), d'intensité  $100 \text{ mW/cm}^2$  et pour une température de cellule de  $25^\circ\text{C}$  [5].



**Figure I.2 :** Rayonnement solaire globale sur un collecteur photovoltaïque.

### I.2.3: L'énergie solaire

La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. La valeur de l'éclairement est communément prise égale à  $1360 \text{ W/m}^2$ . Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à  $1000 \text{ W/m}^2$  à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet Photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation :

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.1)$$

$h$  : la constante de Planck [j. s<sup>-1</sup>].

$C$  : la vitesse de la lumière [m. s<sup>-1</sup>].

$\lambda$  : la longueur d'onde [m].

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande [5]. Une façon commode d'exprimer cette énergie est :

$$E = \frac{1.26}{\lambda} \quad (1.2)$$

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns ( $\mu\text{m}$ ) [6].

### **I.3. Cellule photovoltaïque**

#### **I.3.1. Définition de la cellule photovoltaïque**

Une cellule photovoltaïque, ou cellule solaire, est un composant électronique qui, exposé à la lumière, produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. La puissance obtenue est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente et dépend du rendement de la cellule. Celle-ci délivre une tension continue et un courant la traverse dès qu'elle est connectée à une charge électrique (en général un onduleur, parfois une simple batterie électrique).

#### **I.3.2. Historique**

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

L'effet fut étudié dans les solides tels que le sélénium par Heinrich Hertz dès les années 1870. Avec des rendements de l'ordre de 1%, le sélénium fut rapidement adopté par les photographes comme luxmètre [7].

De rapides progrès furent obtenus dès les années 1950 par les équipes de *Bell Laboratoires* qui fabriquèrent la première cellule au silicium cristallin de rendement 4% à partir du procédé de tirage Czochralski. L'industrie des semi-conducteurs contribua largement au développement des cellules solaires.

La taille des cellules PV accompagna la progression de la dimension des wafers de l'industrie des circuits intégrés, de 5,08 cm dans le début des années 70, à 7,62 cm à la fin des années 70, et à 10,16 cm au début des années 80, avant de s'émanciper par la découverte de la croissance de lingots multi cristallins parallélépipédiques qui donnèrent des plaquettes carrées de 10 cm de côté et qui atteignent aujourd'hui couramment 12.5 à 15 cm de côté [7].

#### **I.3.3. Structure physique**

La cellule est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction).

La cellule la plus commune d'aujourd'hui est une cellule simple au silicium de jonction PN avec un rendement qui arrive jusqu'à environ 17% [8]. Ce matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p (Figure I.3). Les contacts de la face éclairée de la cellule ont la structure d'une grille afin de n'occulter qu'une faible partie de la surface (5 à 10%). La face arrière peut être entièrement métallisée.

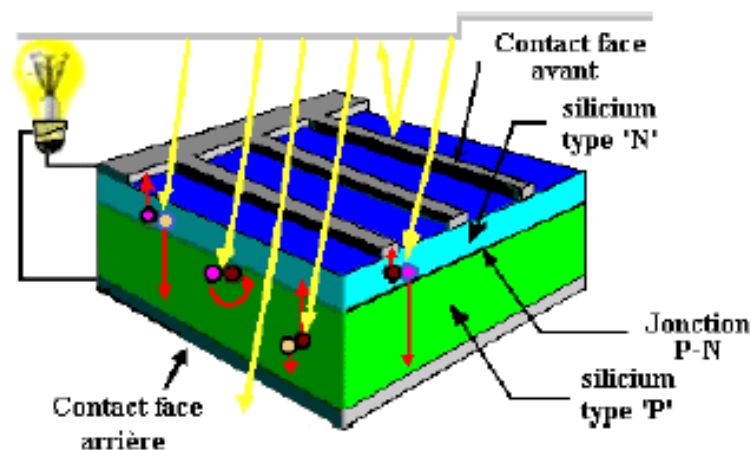


Figure 1.3 : Représentation schématique d'une pile solaire à jonction PN standard.

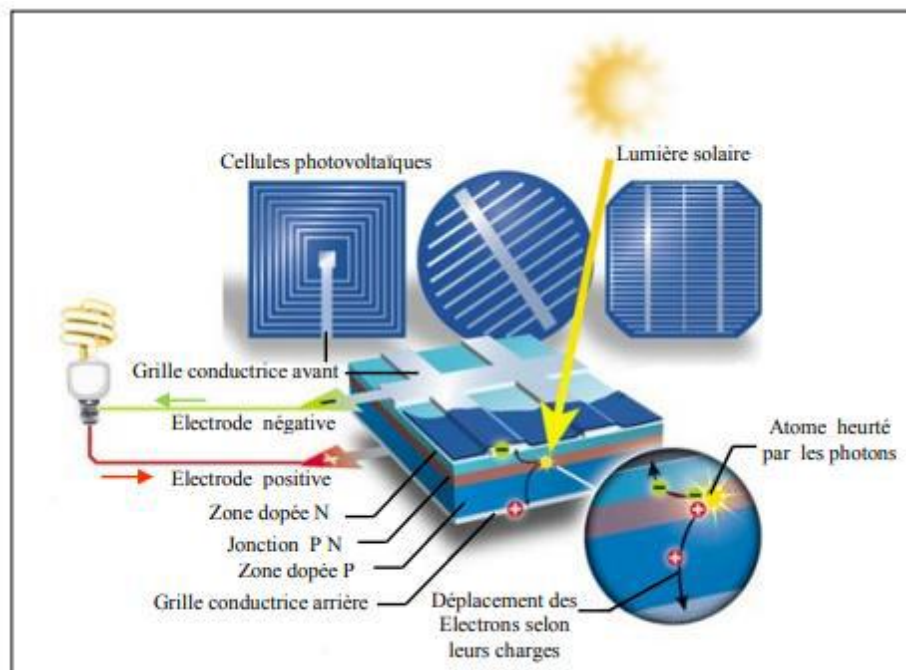
### I.3.4. Rendement

Le rendement de la cellule PV est un des critères de qualité de ce type de capteur. Ainsi, cette mesure est effectuée selon des normes précises en fixant un type de spectre lumineux, une pression et une température de fonctionnement. Nous parlons ici uniquement du rendement global de conversion d'énergie des photons en électrons traduit par la puissance électrique délivrée par les cellules PV, par rapport à un éclairage de  $1000 \text{ W/m}^2$  de type AM1.5 pour pouvoir ainsi effectuer des comparaisons objectives des diverses performances de cellules.

Le rendement dépend du matériau utilisé et des pertes liées à la technologie mise en oeuvre pour réaliser une cellule. Parmi les matériaux les plus utilisés et en raison de son faible coût, on trouve le silicium (Si) sous ses différentes formes cristallines (monocristallin, polycristallin ou bien amorphe). Les panneaux PV avec des cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, Ils sont composés de cristaux de silicium de grande pureté.



### I.3.5. Principe de fonctionnement



**Figure 1.4** : Principe de fonctionnement d'une cellule PV.

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type **N** et dopée de type **P**. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau **N** diffusent dans le matériau **P**. La zone initialement dopée **N** devient chargée positivement, et la zone initialement dopée **P** chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone **N** et les trous vers la zone **P**. Une jonction **PN** a été formée.

## I.4.Caractéristiques et modélisation de la cellule photovoltaïque

### I.4.1 Modèle électriques d'une cellule photovoltaïque

La (figure I.5) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Il correspond à un générateur de courant monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma. ph I

Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique  $I = f(V)$  de la cellule [10] :

- La résistance montée en série ( ) représente la résistance de contacte et de connexion s R
- La résistance shunt ( ) montée en parallèle représente le courant de fuite. sh R
- Une diode en parallèle qui modélise la jonction PN

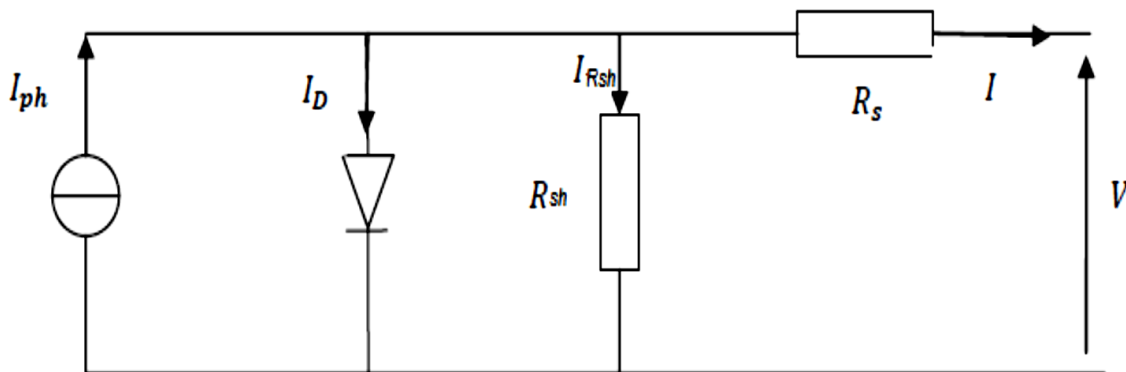


Figure I.5 : Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une diode.

La loi de Kirchoff nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I_{ph} = I_D + I_{Rsh} + I \quad \text{Donc} \quad I = I_{ph} - I_D - I_{Rsh} \quad (\text{I.3})$$

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[ \exp \left( \frac{V + (I \cdot R_s)}{n V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + (I \cdot R_s)}{R_{sh}} \quad (\text{I.4})$$

Les expressions de ( $I_{ph}$ ) et de ( $I_{sat}$ ) le courant de saturation de la diode sont donnés par :

$$I_{ph} = [I_{sc} + (K_i * (T - 298))] * \frac{G}{1000} \quad (\text{I.5})$$

$$I_{sat} = (I_{sc} * \exp \left[ \left( \frac{V_{co}}{n \cdot V_t} \right) - 1 \right] * \left( \frac{T}{298} \right)^3 * \exp \left[ \frac{q \cdot E_g + \left( \frac{1}{298} - \frac{1}{T} \right)}{n \cdot K} \right] \quad (\text{I.6})$$

Dou :

$I_{ph}$  : Photo courant produit.

$I_{sat}$  : Courant de saturation de la diode

$R_s, R_{sh}$ : La résistance série et la résistance parallèle, respectivement.

$V_T = \frac{KT}{q}$  Tension thermique à la température T.

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

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

$K_i$ : Constante ( $1.2 A / cm^2 K^3$ )

$n$  : Facteur de non idéalité de la jonction

$T$  : Température effective de la cellule en degré Kelvin

$E_g$ : énergie de gap (pour le silicium cristallin est égale à 1.12 eV)

$G$  : l'ensoleillement en  $W / m^2$

## I.4.2. Caractéristiques électriques 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 :

### I.4.2.1. Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal ( $R_s$  nulle et  $R_{sh}$  infinie), ce courant se confond avec le photo-courant  $I_{ph}$  dans le cas contraire, en annulant la tension  $V$  dans l'équation (I.4), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[ \exp \left( \frac{q(I_{cc} + R_s)}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{(I_{cc} + R_s)}{R_{sh}} \quad (I.7)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$I_{sat} \left[ \exp \left( \frac{q(I + R_s)}{nKT} \right) - 1 \right]$  devant  $I_{ph}$ . L'expression approchée du courant de court-circuit et alors :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left( 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (I.8)$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule pratiquement

(  $I_{cc} = I_{ph}$  ).

### I.4.2.2. 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).

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \left[ \exp \left( \frac{q \cdot V}{n k T} \right) - 1 \right] - \frac{V}{R_{sh}} \quad (I.9)$$

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

$$V_{co} = V_t \ln \left[ \frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (I.10)$$

### I.4.2.3. Puissance de la cellule PV

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc...), la puissance électrique P(W) disponible aux bornes d'une cellule PV est :

$$P = VI \quad (I.11)$$

P(w) : Puissance fournie par la cellule PV.

V(V) : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.

I(A) : Intensité débitée par la cellule PV.

### I.4.2.4. Puissance maximale d'une cellule PV

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale  $P_{max}$  correspondrait donc à la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  multipliée par le courant de court-circuit  $I_{cc}$  :

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

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

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

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

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie" (figure I.6), et la tension au point de puissance maximale  $V_{Pmax}$  est inférieure à la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , de même que le courant fourni  $I_{Pmax}$  est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit. L'expression de la puissance en ce point est donnée par :

$$P_{max} = V_{Pmax} I_{Pmax} \quad (I.13)$$

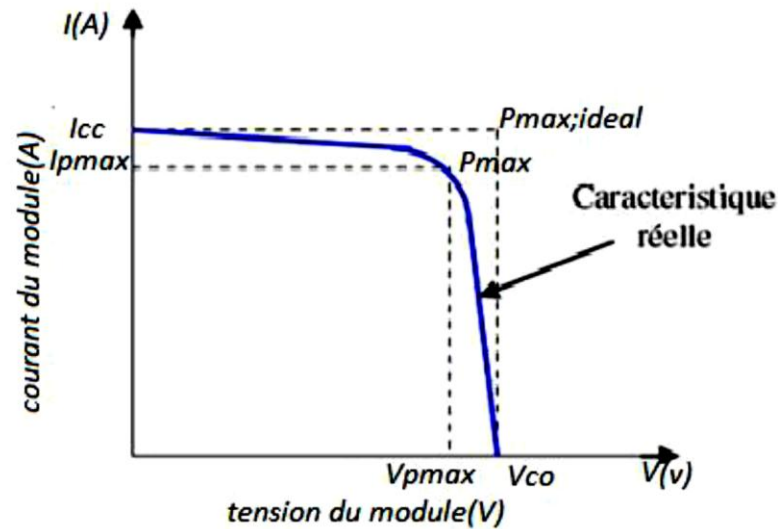


Figure I.6 : Puissance maximale idéale et pratique .

#### I.4.2.5. Rendement énergétique

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

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{max}V_{max}}{P_{inc}} \quad (I.14)$$

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.

#### I.4.2.6. Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule ( $I_{max}, V_{max}$ ) 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). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites  $R_s$  et  $R_{sh}$ . Il est défini par :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc}V_{co}} = \frac{I_{max}V_{max}}{I_{cc}V_{co}} \quad (I.15)$$

## I.5. Générateur photovoltaïque

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et en parallèle [11], elles produisent de l'électricité du moment où elles sont exposées au rayonnement solaire, elles ne polluent pas, n'ont aucune pièce mobile, ne nécessitent pratiquement aucun entretien et ne produisent aucun bruit [12]. Si une cellule (sous éclairage) n'est pas connectée à un circuit extérieur elle présente une tension nommée tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) fortement dépendante de la température. D'autre part, le courant maximal PV est atteint lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. On parle alors de courant de court-circuit noté ICC dépendant fortement du niveau d'éclairement noté E.

Pour produire davantage de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module photovoltaïque complet (générateur d'énergie). Ainsi, la connexion en série de cellules identiques permet d'augmenter la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Le câblage série/parallèle est possible et souvent utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées afin d'adapter théoriquement la production d'énergie photovoltaïque à la demande [11].

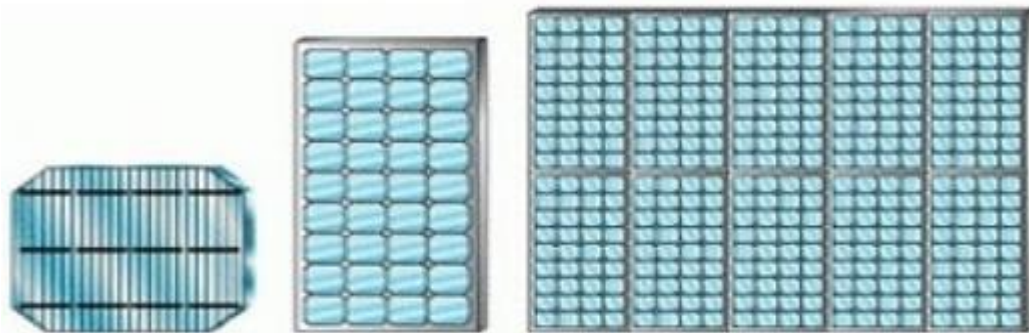


Figure I.7 : Cellule, module et panneau PV. [13]

### I.5.1. caractéristique d'un module photovoltaïque

Voici la description des paramètres d'un module:

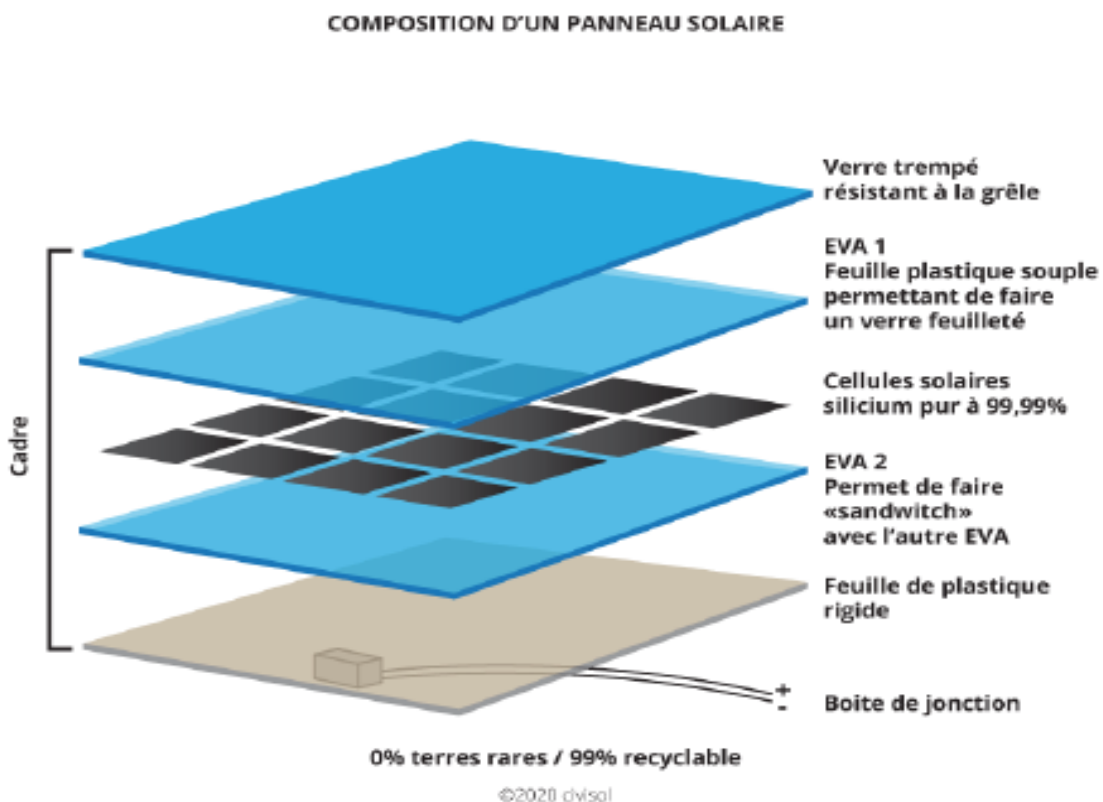
- **La puissance crête  $P_c$**  : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans la condition standard ( $25^\circ\text{C}$  et un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$ ).

La caractéristique I (V): Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

- **Tension à vide  $V_{co}$**  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- **Courant de court-circuit  $I_{cc}$**  : Courant débité par un module en court-circuit pour éclairement " plein soleil ".



- **Point de fonctionnement optimum ( $U_m$ ,  $I_m$ )** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $P_m = U_m \cdot I_m$
- **Rendement maximal** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule :  $V_{co} \cdot I_{cc}$  [14].



**Figure I.8** : Un module photovoltaïque.

### I.5.2. Protection des modules photovoltaïques

Il faut faire attention à ce que toutes les photopiles soient éclairées de la même façon. En effet, une photopile ombragée (même partiellement) voit sa tension et surtout son intensité baisser considérablement. Une perte de puissance risque de provoquer une polarisation inverse avec dissipation d'énergie dans la diode défaillante [15]. Pour limiter la perte de puissance, on utilise une diode by-pass qui se place en dérivation d'un groupe de cellule pour ne pas limiter le courant en situation de déséquilibre. De même, si tout le module est à l'ombre, une batterie bien chargée pourrait débiter dans celui-ci, ce qui serait dangereux pour la structure des photodiodes quasiment incapables de dissiper de l'énergie. On introduit une diode anti-retour sur la borne + du module pour être à l'abri d'un tel ennui. Les diodes anti-retour et by-pass provoquent une chute de potentiel de 0,6V environ qu'il faut prendre en compte dans le rendement des modules.

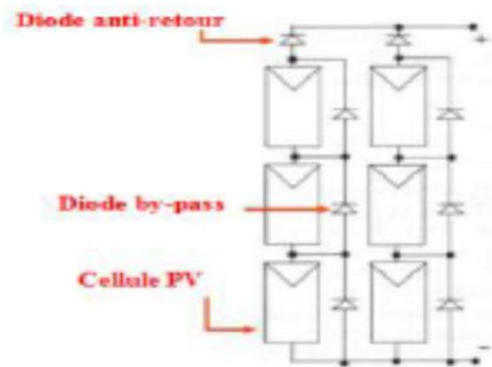


Figure I.9 : Protection des modules photovoltaïques.

### I.6. 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 [16]. Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées.

#### I.6.1. Les systèmes autonomes

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes sont décrits sur la figure (I-9) qui traduit les différentes possibilités offertes : couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking), fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique.

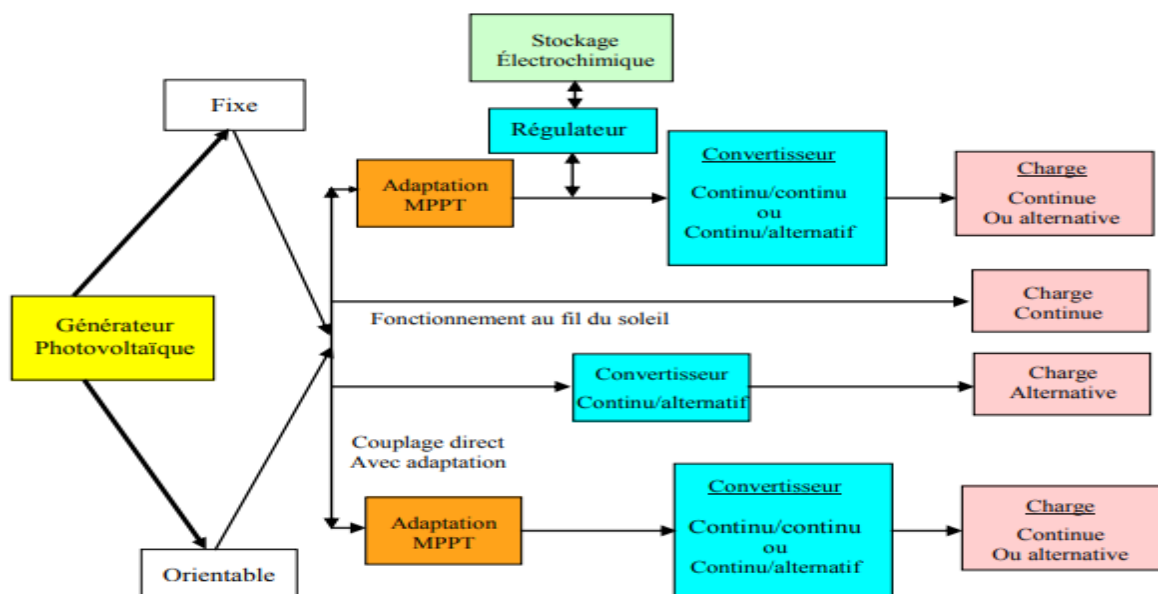


Figure I.10 : Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes.



Le couplage direct implique un fonctionnement au fil du soleil, donc à puissance essentiellement variable au cours de la journée. Les charges typiques à courant continu qui peuvent satisfaire le critère (tension constante à puissance variable) sont les accumulateurs électrochimiques. Les charges alternatives sont les pompes à eau, c'est le pompage au fil du soleil, le stockage est néanmoins présent sous la forme d'eau emmagasinée (dans un réservoir) Dans la plus part des cas une adaptation d'impédance doit être réalisée en insérant entre le générateur et sa charge électrique un dispositif électronique qui permet de forcer le système à fonctionner à sa puissance maximale.

### I.6.2. Les systèmes connectés au réseau

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau (figure I-10) sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Il produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès du quel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ceux systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau.

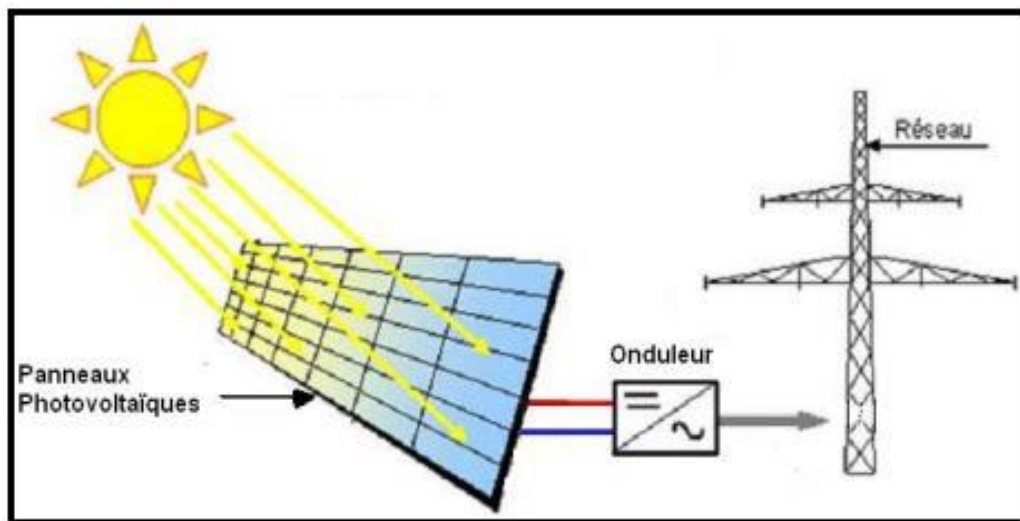
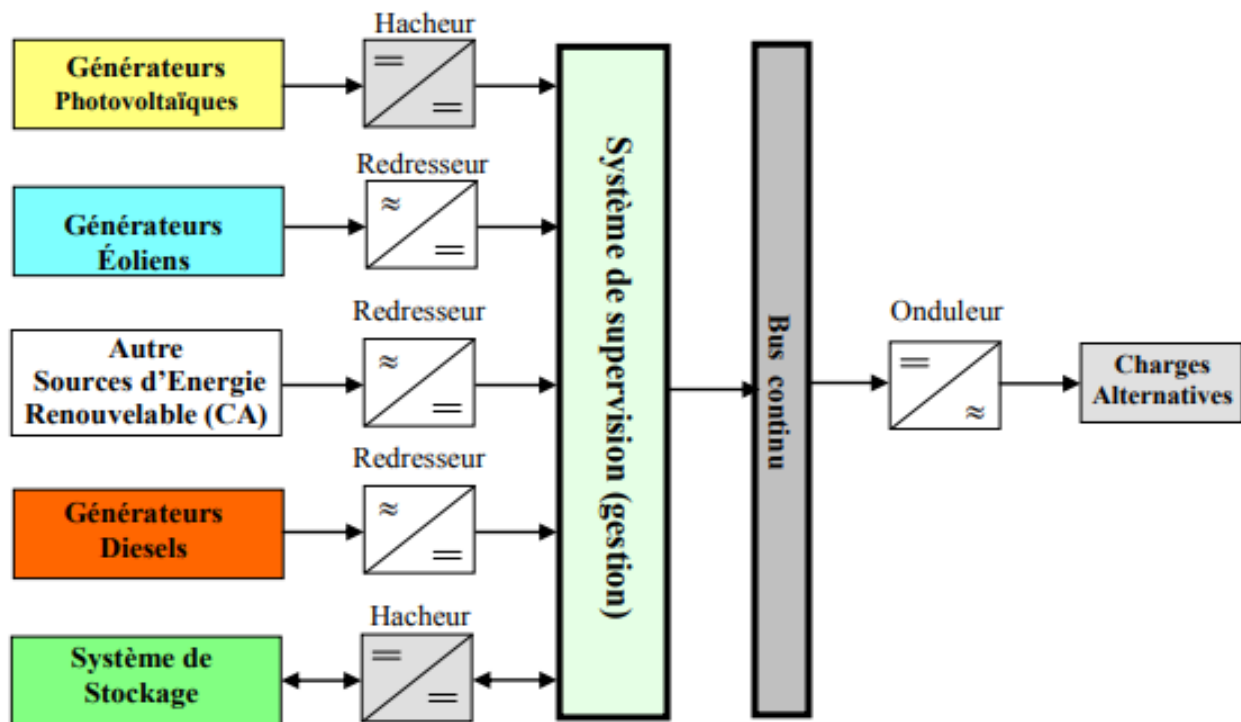


Figure I.11 : Systèmes photovoltaïque connectés au réseau.

### I.6.3. Les systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue.

Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. Les différentes sources dans un système hybride peuvent être connectées en deux configurations, architecture à bus continu et architecture à bus alternatif [17], [18].



**Figure I.12 :** Configuration du système hybride à bus continu.

Dans la première configuration, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu (voir figure I-11). Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence. La fonction spécifique du système de supervision est la commande de mise en marche et arrêt des générateurs et du système de stockage. L'avantage de cette topologie est la simplicité de commande. Dans la seconde configuration tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative.

## I.7. Convertisseurs d'énergie

Les convertisseurs sont les appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative.

- a. Convertisseurs DC/DC (hacheurs) :** Le convertisseur DC-DC est un régulateur de conversion de puissance inséré entre le générateur solaire et l'induit du moteur. Le rapport cyclique  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) donne le ratio de la tension du générateur à la tension aux bornes de la charge. En intercalant entre le générateur et la charge, Un convertisseur DC-DC qui consiste en un traqueur de puissance maximale qui va pister le point de fonctionnement maximal du générateur photovoltaïque, Il permet aussi le contrôle de la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. On distingue trois types de convertisseurs: boost,buck et buck–boost, [19]. Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit dévolteur (BUCK). Dans le cas contraire, il est dit survolteur (BOOST).
- b. Convertisseurs DC/AC (onduleur) :** Les fonctions de l'onduleur sont de convertir l'électricité produite avec un maximum d'efficacité et en toute sécurité en convertissant le courant continu de l'énergie photovoltaïque issue d'un panneau solaire en courant alternatif.

### I.8. Avantages et inconvénients d'une installation PV [20]

#### a. Avantages

D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliWatt au MégaWatt.

Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

**b. Inconvénients**

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km<sup>2</sup> par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%.

· Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

Tributaire des conditions météorologiques.

Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.

Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux - problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

**I.9. Conclusion**

Le contenu de ce chapitre a été consacré aux notions de base du développement de l'énergie solaire. On a mis en évidence le principe de fonctionnement de cette technologie, présenter ces composants et nous avons aussi cité les avantages et inconvénients de ce système.

Nous nous sommes intéressé et détaillé le système de conversion photovoltaïque autonome car cette méthode permet d'exploiter l'énergie du soleil à divers fins, nous avons aussi essayé de détailler et d'identifier les majors parties constituantes ce type d'installation tout en expliquant vaguement son processus de production.

Nous allons à présent entamer dans le chapitre suivant, la modélisation des éléments principaux figurants dans une installation photovoltaïque.



**CHAITRE II :**  
**Modélisation d'un système  
photovoltaïque**

## II.1 Introduction

Les générateurs photovoltaïques sont reconnus par leur fonctionnement en large gamme de tension et courant de sortie, mais ils ne peuvent délivrer une puissance maximale. En effet, les variations climatiques qui influent sur la caractéristique  $I(V)$  entraînent la fluctuation de la puissance maximale. Pour cela il existe plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le MPP.

Dans ce chapitre nous présentons les principales caractéristique de générateur photovoltaïque et leur différents modelés électriques, en suite nous étudierons l'influence des conditions météorologiques (températures et l'ensoleillement) sur le comportement du générateur PV, ainsi nous procédons à la modalisation du convertisseur DC/DC de type boost.

## II.2. Modélisation du générateur photovoltaïque

Dans le cadre de l'optimisation du générateur photovoltaïque et pour mieux utiliser l'énergie soutirée, on doit adapter la caractéristique non linéaire (courant-tension) du générateur photovoltaïque au point de fonctionnement de la charge utilisée. Pour avoir le point optimal qui correspond au point de la puissance maximale, il est évident de modéliser le générateur photovoltaïque.

### II.2.1. Modèle de la cellule solaire [A1]

La cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. La modélisation du comportement électrique du module photovoltaïque peut être étendue au générateur photovoltaïque selon sa configuration, nombre de modules en série et en parallèle.

#### ❖ Le courant de court-circuit $I_{cc}$

Il définit la quantité des paires électron-trou créé et qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion des électrons et trous ( $L_n$  et  $L_p$ ) respectivement

$$I_{cc} = qG(L_n + L_p) \quad (II.1)$$

$I_{cc}$  : Courant de court circuit de la cellule.

#### ❖ La tension en circuit ouvert $V_{oc}$

C'est la tension pour la quelle la diode à l'obscurité, fournit un courant nul. Elle est obtenue à partir de l'équation :

$$V_{oc} = V_{th} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (II.2)$$

$$V_m = \frac{AKT_c}{q} \quad (\text{II.3})$$

$I_s$  : Courant de saturation de la diode

$V_{th}$  : Tension thermique.

A : Coefficient d'idéalité de la diode.

q : Charge d'un électron  $1.6.10^{-19}$ .

$T_c$  : Température de la jonction.

k : Constante de Boltzmann  $1.38.10^{-23} (J / K)$ .

#### ❖ Le facteur de forme FF

Il définit l'efficacité de la cellule solaire, il est obtenu comme suit :

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (\text{II.4})$$

$V_m$  : Tension de point de puissance maximale (V).

$I_m$  : Courant de point de puissance maximale (A).

#### ❖ Point de puissance maximale

Est le point ( $V_m, I_m$ ) ou la puissance dissipée dans la charge est maximale.

$$P_m = V_m I_m$$

(II.5)

#### • La puissance du flux lumineux incident

$$P_m = SE \quad (\text{II.6})$$

E : L'ensoleillement qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface (W/m<sup>2</sup>).

S : La surface effective des cellules.

#### ❖ Température de jonction [A2]

La température de la jonction  $T_c$  de la cellule est donnée par la relation suivante :

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} E \quad (\text{II.7})$$

Avec :

**NOCT** : La température nominale de fonctionnement de la cellule solaire .

**T<sub>a</sub>** : La température ambiante.

### ❖ Le rendement de conversion d'énergie $\eta$

C'est le rapport de la puissance maximale générée et de la puissance du rayonnement solaire Incident

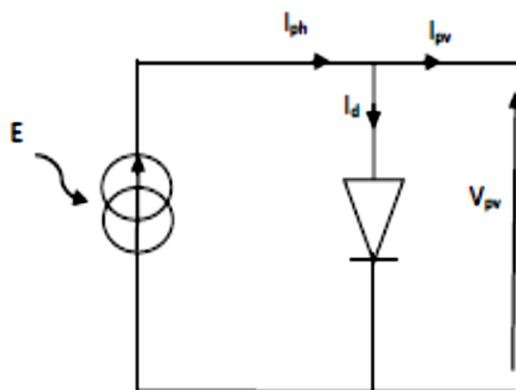
$$\eta = FF \frac{I_m V_m}{P_{in}} \quad (\text{II.8})$$

$$\text{Où } \eta = \frac{I_m V_m}{S.E}$$

## II.2.2. Les modèles mathématiques

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles du générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant finals du générateur photovoltaïque.

### a. Cellule idéale [A3]



**Figure II-1** : schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.



$$I = I_{ph} + I_d \tag{II.9}$$

$$I_d = I_s e^{\left(\frac{V_{pv}}{AKTc} - 1\right)} \tag{II.10}$$

$I$  : Courant disponible

$I_{ph}$  : Courant produit par la photopile

$V$ : Tension aux bornes de la cellule

$\frac{KT}{q} = 26\text{mV}$  à  $T_c=300$  °K pour le silicium poly-cristallin

$I_s$  : Courant de polarisation de la diode ou courant de saturation

**b. Modèle à une diode [A4]**

Le modèle à une diode est le plus utilisé et il donne de très bonnes précisions. La conversion de l'énergie de la lumière en énergie électrique est modélisée par un générateur de courant

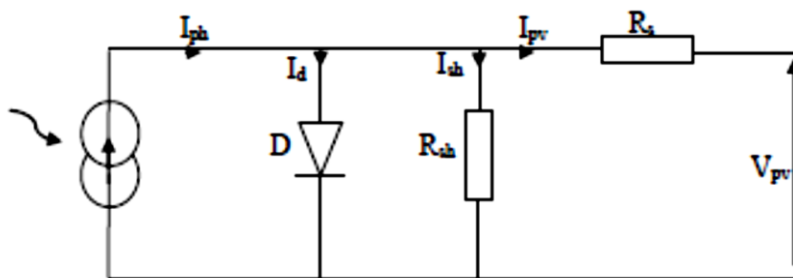


Figure II-2 : schéma électrique équivalent du modèle à une diode.

➤ Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{II.11}$$

Tel que :

$I_{pv}$  : Le courant délivré par le module.

$I_{ph}$  : Photo courant.

$I_d$ : Courant de diode.

$I_{sh}$ : Le courant shunt.

➤ Le courant produit par la photopile est donné par :

$$I_{ph} = P_1 E \left[ 1 + P_2 (E - E_{ref}) + P_3 (T_c - T_{cref}) \right] \tag{II.12}$$

Tel que :

$E_{ref}$  : Ensoleillement de référence

$T_c$  : Température absolue de la cellule

$T_{cref}$  : Température de référence

➤ Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_s e^{\frac{q(V+R_s I_{pv})}{A n_s K T_c} - 1} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

$$I_s = P_4 T_c^3 e^{\left(-\frac{E_g}{K T_c}\right)} \quad (\text{II.14})$$

Avec :  $E_g = 1.1 \text{ eV}$

**Eg** : L'énergie de gap (paramètre caractéristique du matériau, pour le Silicium).

**Is** : Courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité.

➤ Le courant de la résistance shunt est donné par :

$$I_{sh} = \frac{(v + R_s I_{pv})}{R_{sh}} \quad (\text{II.15})$$

Tel que :

**Rs** : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contacte).

**Rsh** : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

D'où l'expression de la caractéristique courant-tension (I-V) qui est donnée par l'équation suivante :

$$I_{pv} = P_1 E \left[ 1 + P_2 (E - E_{ref}) + P_3 (T_c - T_{cref}) \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} - P_4 T_c^3 e^{\left(-\frac{E_g}{K T_c}\right)} e^{\left(\frac{q(V+R_s I)}{A n_s K T_c} - 1\right)} \quad (\text{II.16})$$

### c. Modèle à deux diodes [A5]

Ce modèle est représenté par son schéma électrique équivalent qui se compose d'une source de courant modélisent le flux lumineux, les pertes sont modélisé par deux résistances, une résistance shunt **Rsh** , une résistance série **Rs** et deux diodes pour la polarisation de la cellule et le phénomène de la recombinaison des porteurs minoritaires.

L'avantage de ce modèle c'est qu'il établi en appliquant seulement des données standard.

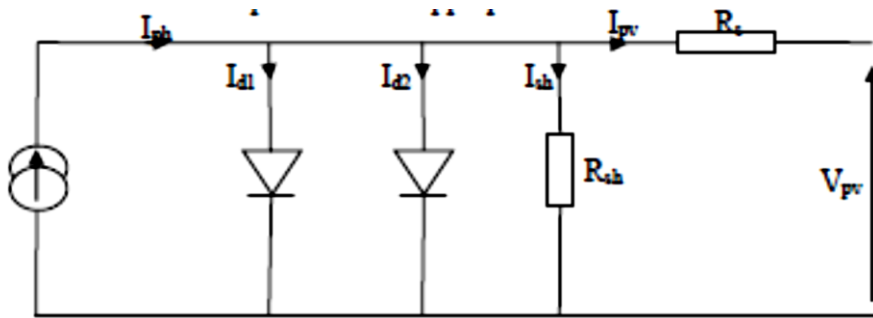


Figure II-3 : schéma électrique équivalent du modèle deux diodes.

Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = P_1 E \left[ 1 + P_2 (E - E_{ref}) + P_3 (T_c - T_{ref}) \right] - P_4 T_c^3 e^{\left( \frac{E_g}{kT_c} \right)} e^{\left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A n_s k T_c} \right)} - P_5 T_c^3 e^{\left( \frac{E_g}{2kT_c} \right)} e^{\left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{2 A n_s k T_c} \right)} - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (II.17)$$

### II.3. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

#### II.3.1. Hacheur dévolteur

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur Buck ou hacheur série. La figure (II.4) présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur [A6].

Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion  $M = V_0 / V_i$  change avec le rapport cyclique du commutateur.

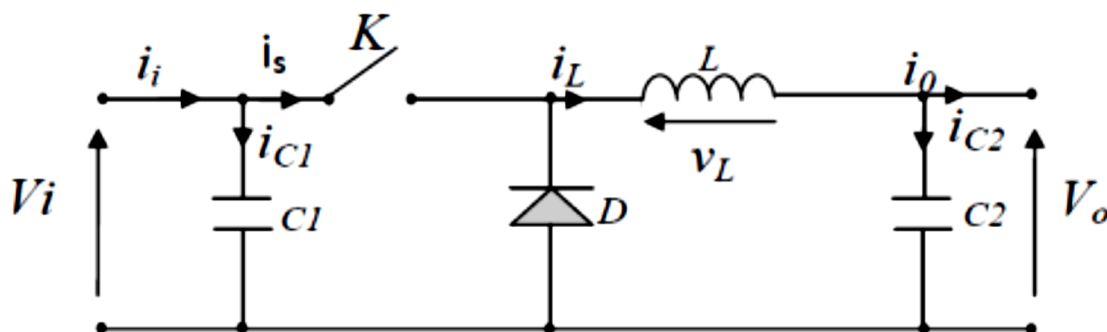
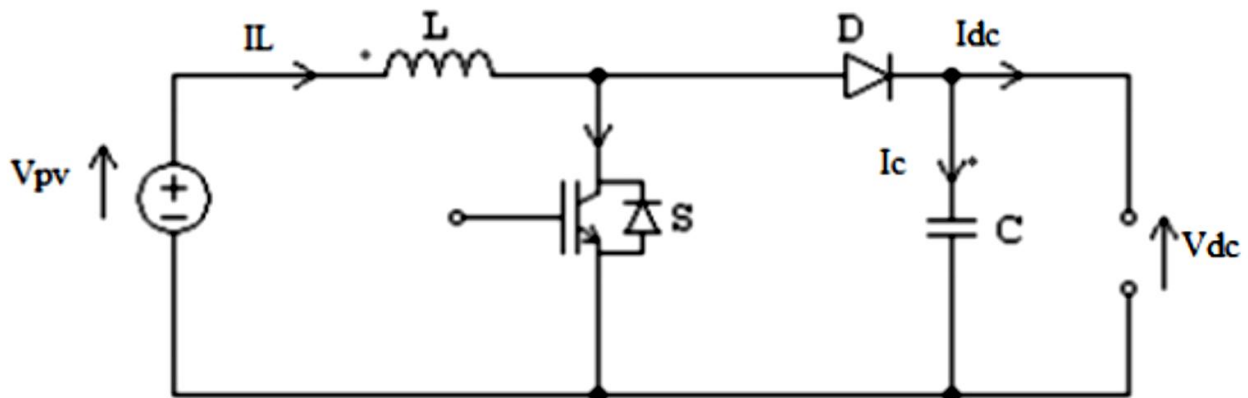


Figure II-4: Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur.

### II.3.2. Hacheur survolteur (boost)

Les convertisseurs statiques DC/DC, appelés aussi hacheurs, sont souvent utilisés dans les systèmes photovoltaïques comme interface d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et sa charge. Ils permettent de commander le flux d'énergie générée par les GPV et d'assurer la poursuite du point de puissance maximale en suivant des stratégies de contrôle spécifiques. Le convertisseur boost est un élévateur de tension, la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée [A7]. La figure (II-5) représente la structure d'un hacheur de type Boost utilisé pour adapter un système photovoltaïque.



**Figure II-5 :** Circuit électrique du convertisseur DC-DC (boost).

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage  $T$ , comporte deux étapes. Lors de la première, on rend l'interrupteur passant ( $T_r$  est passant) et la diode polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de  $0$  à  $\alpha.T$  ( $\alpha$  rapport cyclique, et compris entre  $0$  et  $1$ ). la tension aux bornes de l'inductance vaut  $V_L = V_{pv}$ , le courant traversant l'inductance augmente linéairement.

Lors de la seconde, on bloque l'interrupteur. La diode devient passante. Cette phase dure de  $\alpha.T$  à  $T$ .

La tension aux bornes de l'inductance vaut  $V_L = V_{pv} - V_{dc}$ , dans cette phase le condensateur  $C_s$  se charge en même temps par le courant stocké dans l'inductance et par le générateur [A8].

Les équations électriques du hacheur boost sont :

$$V_{pv} = L \frac{di_L}{dt} + (1 - \alpha)V_{dc} \quad (\text{II.18})$$

$$(1 - \alpha)I_L = C_s \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (\text{II.19})$$

En valeurs moyennes, la tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique moyen. Son expression est donnée par l'équation (II.20).

$$V_{dc} = \frac{1}{(1-\alpha)} V_{pv} \quad (\text{II.20})$$

Et le courant par la relation :

$$I_{dc} = (1 - \alpha)I_1 \quad (\text{II.21})$$

La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique.

#### II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes constitutions d'un système photovoltaïque ainsi que la modalisation du générateur PV

De plus, nous avons présenté le comportement de notre système et ses performance sous l'influence de différents conditions atmosphérique à savoir l'influence du de l'ensoleillement et la température.

Par ailleurs, en a fait une modalisation du convertisseur DC/DC de types survolteur, et cela pour pouvoir établir la condition de fonctionnement adéquat nécessaire à son couplage avec le générateur photovoltaïque.

Le chapitre suivant est consacré à l'optimisation et la simulation numérique de la chaîne de production d'énergie photovoltaïque.



**CHAITRE III :**

**Simulation et interprétation  
des résultats**

### III.1.Introduction

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  du générateur PV dépendent de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la variation du point de puissance maximale.

A cause de cette variation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le point de puissance maximale.

Ces commandes sont, connus sous le nom MPPT; ces techniques sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïques en poursuivant en permanence le point de puissance maximale. En effet, plusieurs méthodes ont été élaborées et utilisées.

### III.2. Principe de la recherche du point de puissance maximal

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, un suiveur du point de puissance maximum (MPPT : Maximum Power Point Tracking) est utilisé. La technique de suivi du point à puissance maximal a été développé depuis 1968, cette commande est essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque.

La Figure III.1 représente la chaîne de conversion PV avec le contrôleur MPPT. La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique, à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir.

L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du hacheur en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier ( $I_{pv}$  et  $V_{pv}$  et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP.

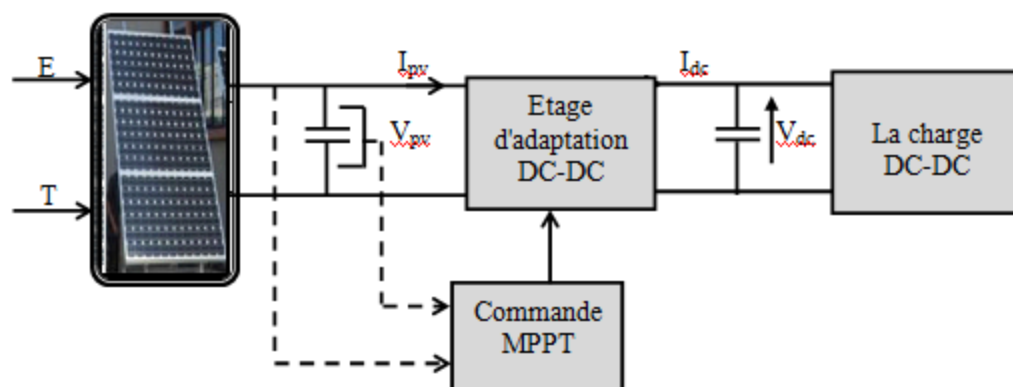
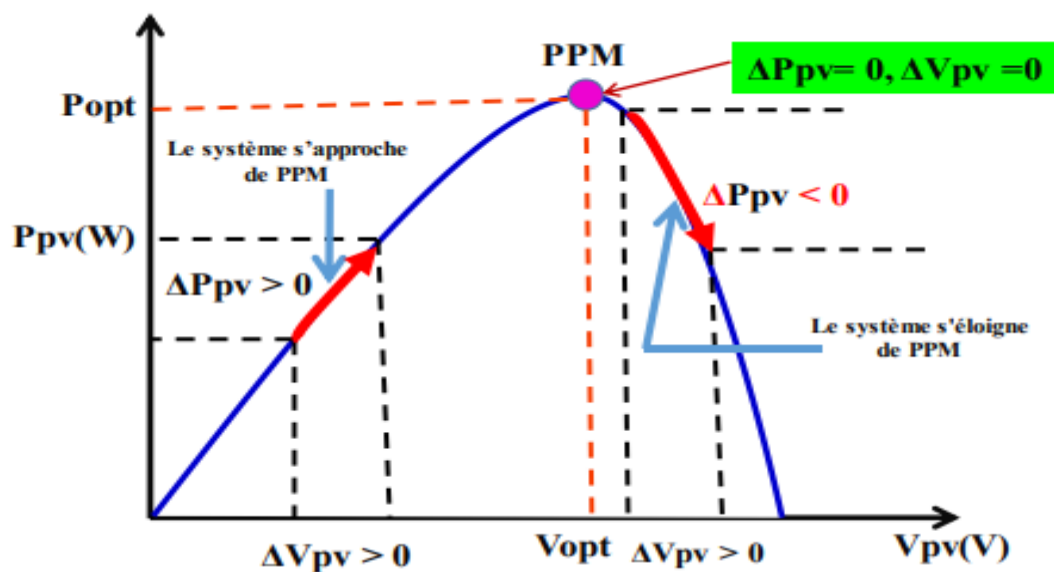


Figure III-1 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque .

**III.3. Optimisation par la méthode de perturbation et observation (P&O)**

C'est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité. Une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires. La tension aux bornes des panneaux est volontairement perturbée (augmentée ou diminuée) avec une constante (C) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation. Précisément, si la puissance aux bornes des panneaux est augmentée à cause de la perturbation, la perturbation suivante est faite dans la même direction. Réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé. En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.



**Figure III-2 :** Caractéristique (Ppv, Vpv) d'un panneau photovoltaïque.

Le Tableau III.1 résume le principe de fonctionnement de la méthode perturbation et observation.

Perturbation	Changement de la puissance	Perturbation Suivante
Positive	Positive	Positive
Positive	Négative	Négative
Négative	Positive	Négative
Négative	Négative	Positive

**Tableau III-1 :** Les modes de perturbation de la méthode P&O.



Un organigramme de fonctionnement de cette méthode est montré dans la figure suivante :

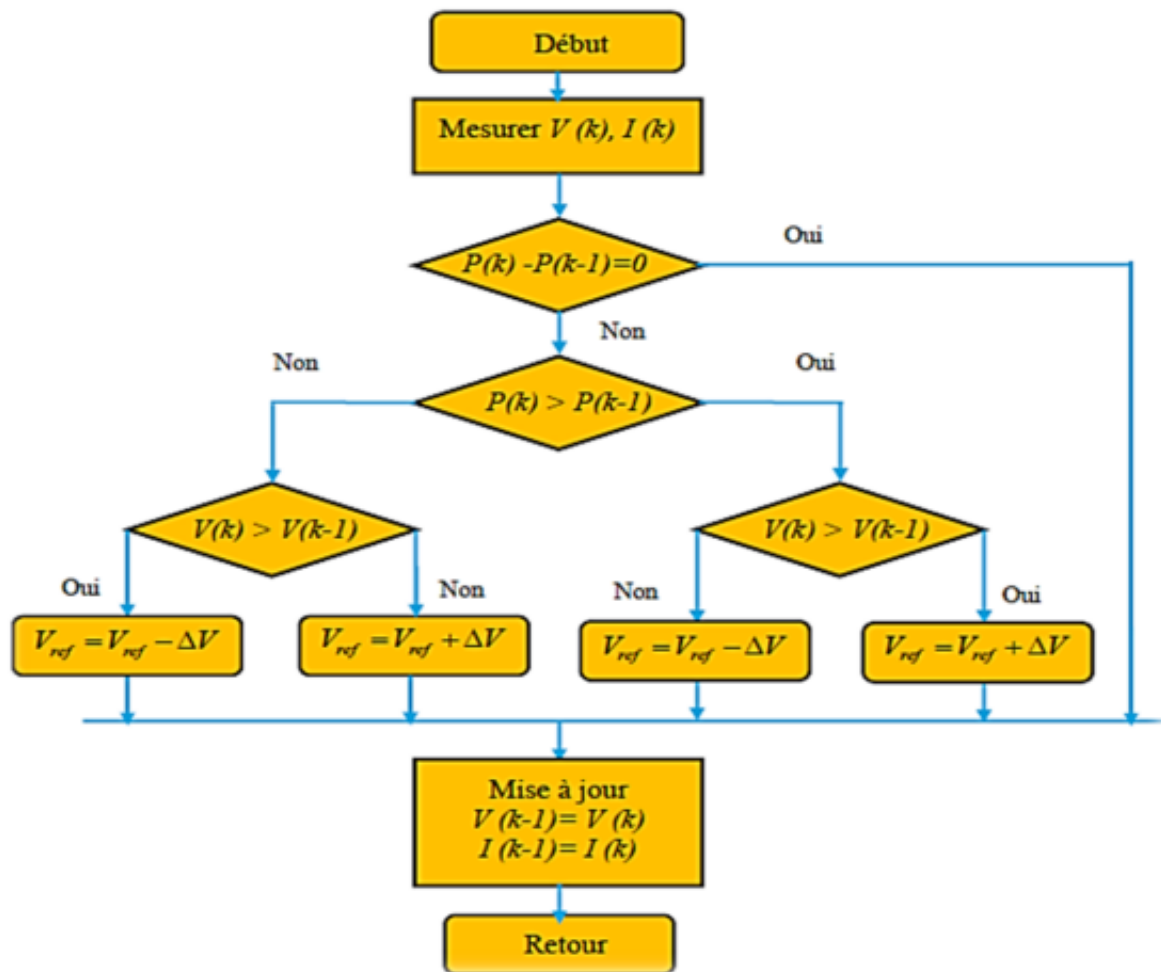


Figure III-3 : Organigramme de la méthode perturbation et observation.

### III.4 Simulation :

#### III.4.1 Sans commande MPPT :

La stratégie de modéliser un module PV n'est aucun différent de modéliser une cellule PV. Les paramètres sont les mêmes, mais seulement la tension qui va changer (la tension du circuit ouvert) est différente et doit être par le nombre de cellules.

A l'aide du logiciel **MATLAB** on simule un panneau photovoltaïque des différents effets sur la caractéristique  $I = f(V)$  et  $P = f(V)$  telle que, l'influence d'irradiation, température. Pour effectuer nos simulations on a utilisé le panneau ASE-300-DG-FT(315) dont les caractéristiques sont regroupées dans le Tableau (III.1).

Les paramètres	Symbole	Unité
Tension de circuit ouvert	$V_{co}$	64.50V
Courant de court-circuit	ICC	6.70A
Tension de puissance maximale	$V_{mp}$	51.70V
Courant de puissance maximale	$I_{mp}$	6.10A
Puissance maximale	$P_{max}$	315.4W
Nombre de cellule en série	$N_s$	10 8
Nombre de cellule en parallèle	$N_p$	2
Coefficient de température courant	$K_i$	6.7 mA/°C
Coefficient de température tension	$K_v$	-223 mV/°C
Coefficient de température	$N_T$	0.10 %/°C
Facteur d'idéalité	A	1. 35

Tableau III.2: Caractéristiques électriques du module.

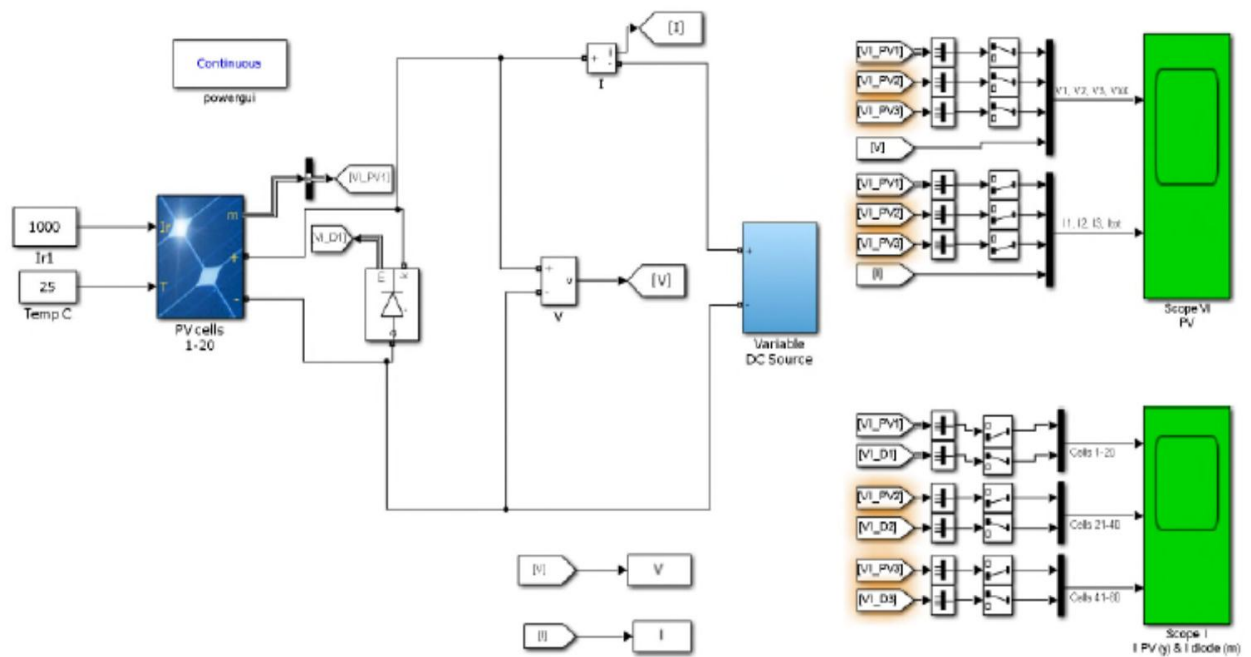


Figure III-4 : Schéma de bloc d'un générateur PV

### III.4.1.1 Influence de l'Irradiation :

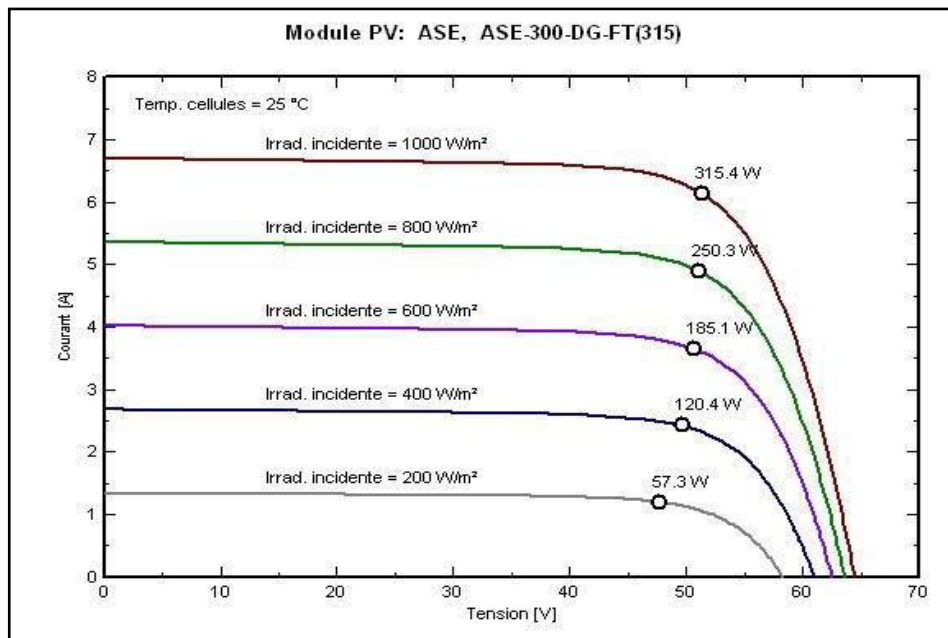
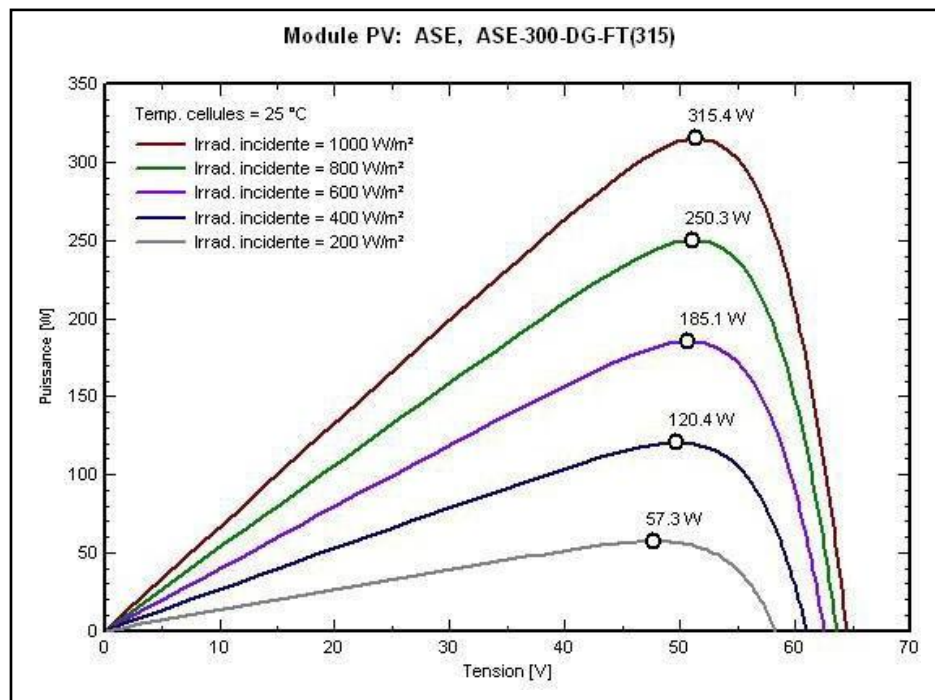


Figure III-5 : Caractéristiques  $I = f(V)$  d'un panneau solaire pour différents éclairagements à température constante égale à 25°C.

Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on fixe la température ambiante ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ) et on fait varier l'éclairement dans une gamme suffisante.

D'après la figure (III.5), on remarque une forte diminution du courant de court-circuit par rapport à l'éclairement ( $E$ ) et une faible diminution de la tension du circuit ouvert. C'est qui prouve que le courant de court-circuit de la cellule dépend au éclairement, par contre la tension de circuit ouvert subit une légère augmentation quand l'éclairement varie de  $200 \text{ W/m}^2$  à  $1000 \text{ W/m}^2$ .



**Figure III-6 :** Caractéristiques  $P=f(V)$  d'un panneau solaire pour différentes irradiances solaires à température constante égale à  $25^{\circ}\text{C}$

On remarque aussi sur la figure (III.6) que, l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension du circuit ouvert du GPV.

#### III.4.1.2 Influence de la température :

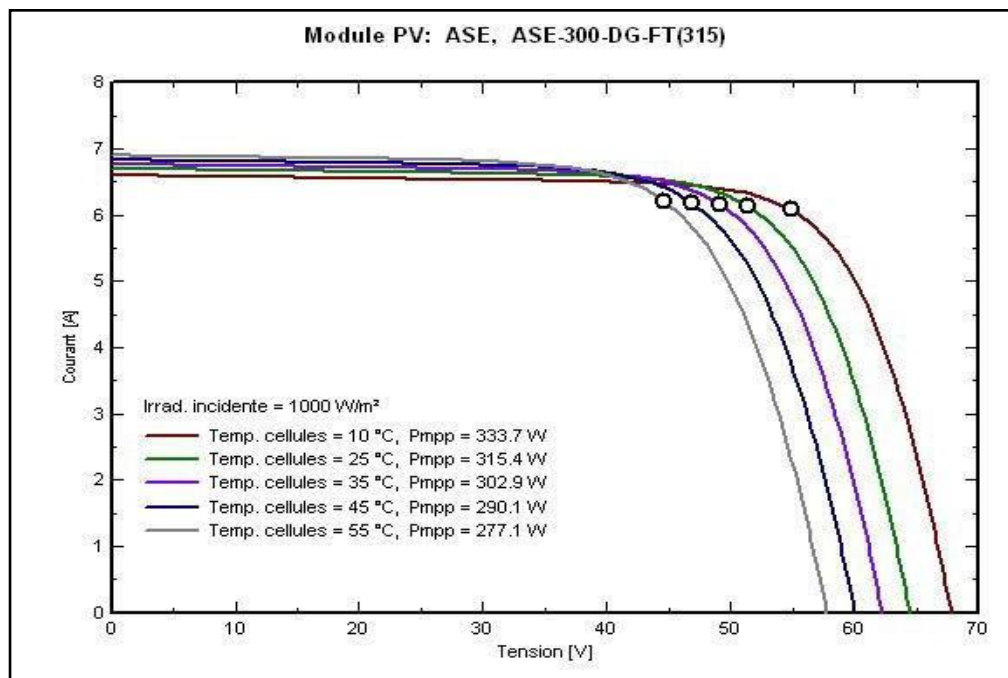


Figure III-7 :Caractéristiques  $I = f(V)$  d'un panneau solaire pour différentes températures à éclairements constante égale 1000w/m<sup>2</sup>.

On constate d'après la figure (III.7) que l'effet de l'augmentation de la température fait diminuer la tension du circuit ouvert du GPV, contrairement au courant de court-circuit qui reste constant.

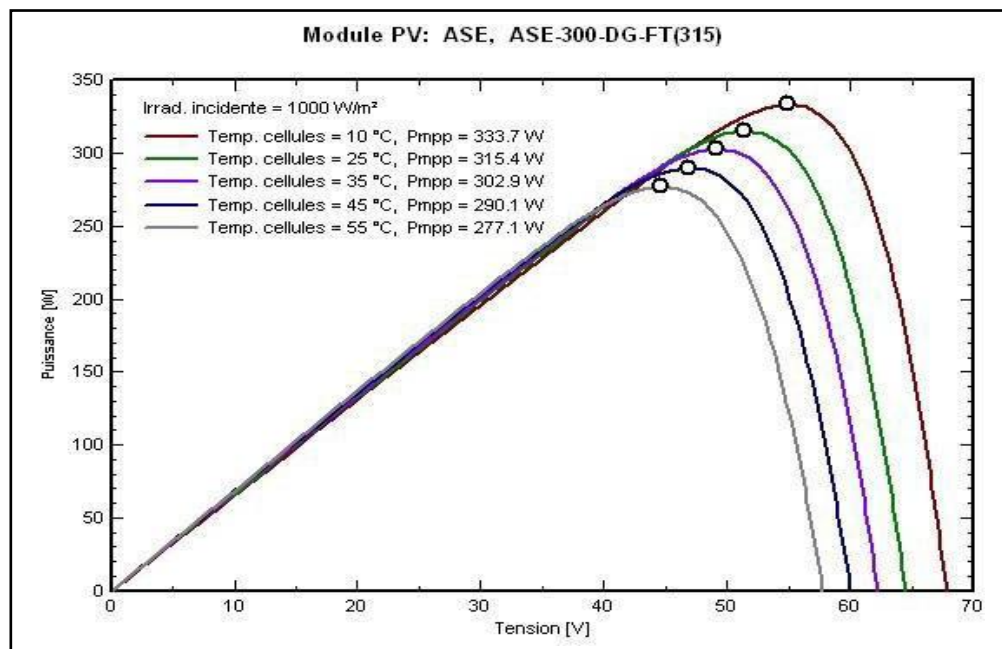


Figure III-8 :Caractéristiques  $P = f(V)$  d'un panneau solaire pour différentes températures à éclairements constante égale 1000w/m<sup>2</sup>.

D'après la figure (III.12) l'effet de l'augmentation de la température sur la caractéristique  $P_{pv} = f(V_{pv})$  fait diminuer la puissance et la tension du circuit ouvert du GPV.

La modèle choisi a donné des résultats concordant avec ceux obtenus la littérature et reflète bien le comportement physique d'une cellule (PV) vis-à-vis des variations de la température et de l'éclairement, ce qui valide le modèle utilisé.

### III.4.2 Avec commande MPPT :

Le schéma du système de régulation est donné par figure III.15.

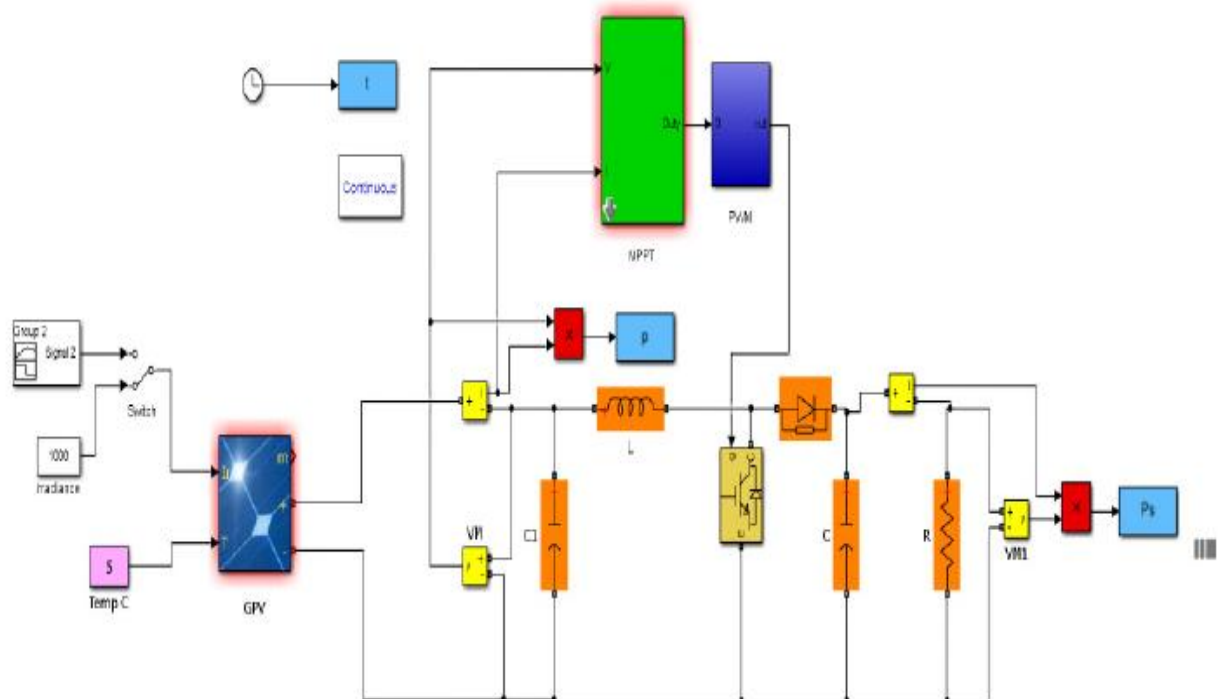


Figure III-9 :Schéma de bloc d'un générateur PV mini d'une commande MPPT.

#### III.4.2.1 Influence d'irradiation :

Lorsque l'irradiation change, on a simulé les grandeurs électriques du système PV pour  $W=1000w/m^2$ ,  $W= 600w/m^2$ ,  $W = 300w/m^2$ , comme le montre dans la figure III.10.

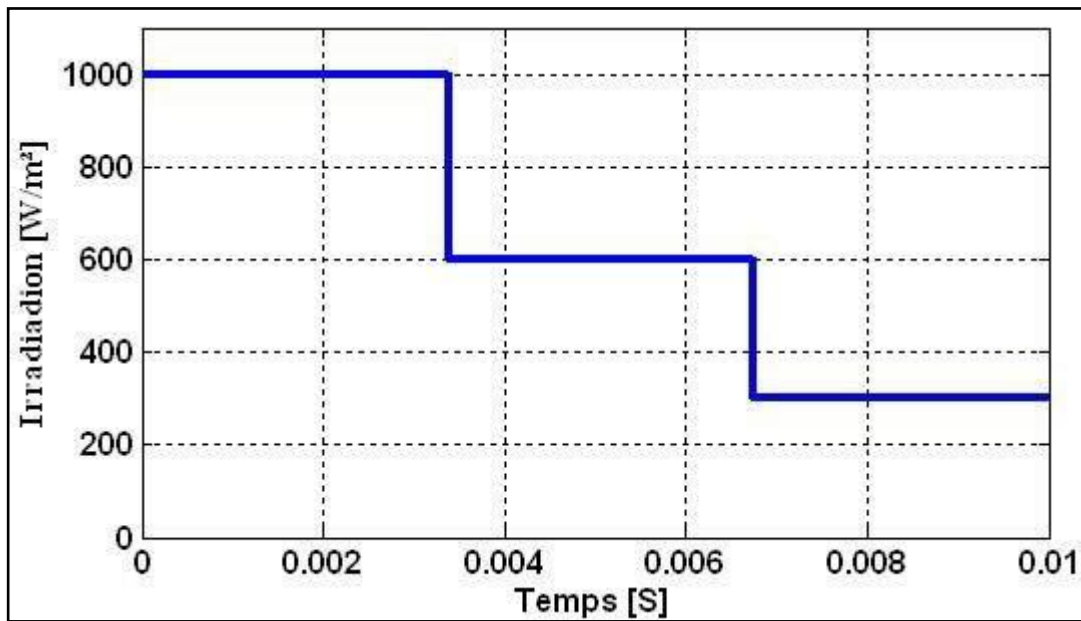
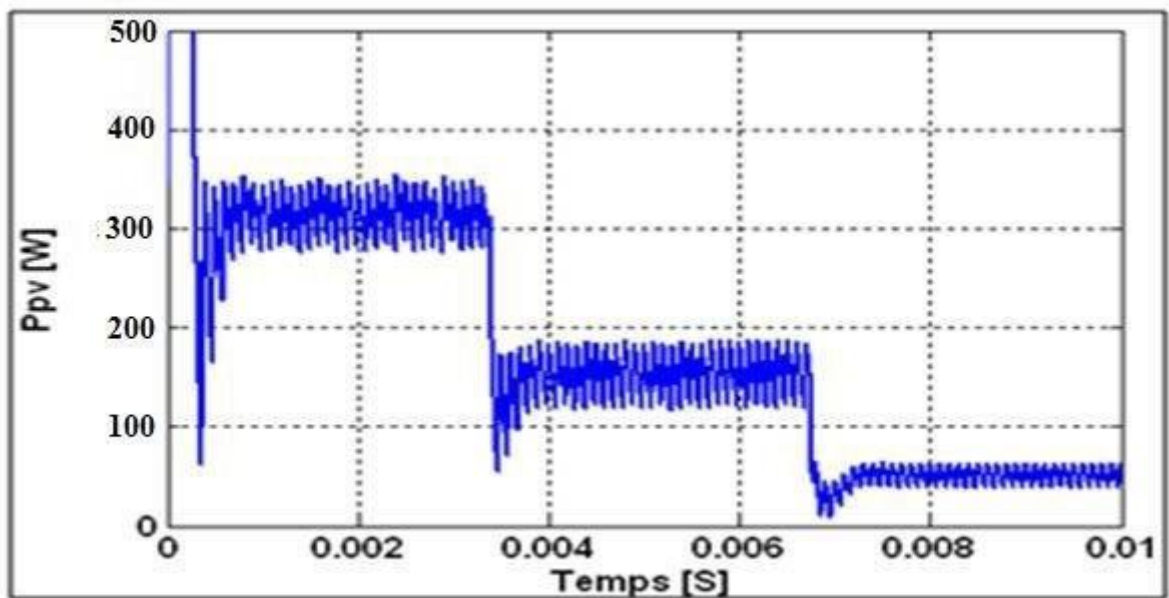


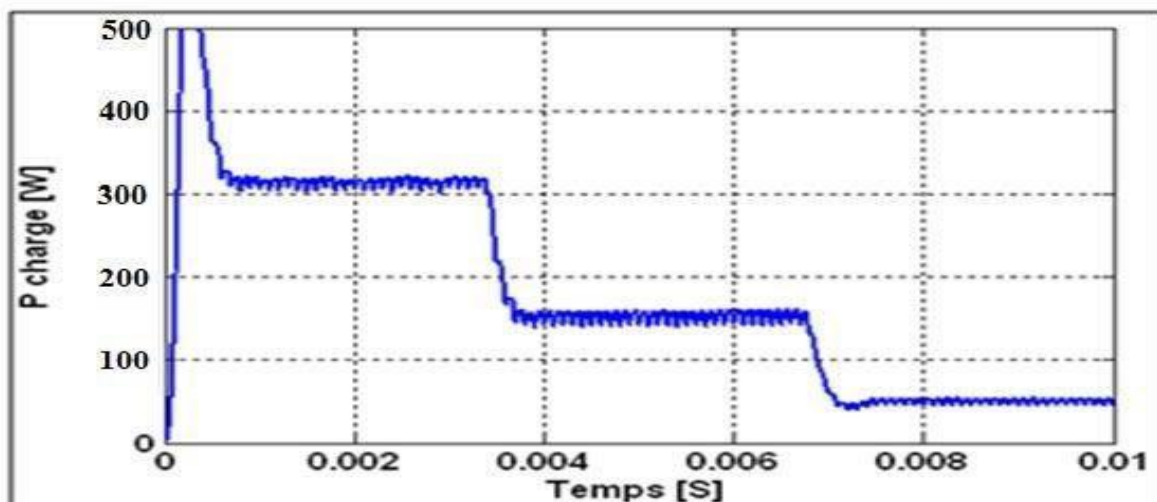
Figure III-10 :Variation de la puissance incidente de l'éclairage en fonction du temps.

**III.4.2.2 Influence du changement d'éclairage à l'entrée a la sortie d'un Boost du panneau PV muni de la commande MPPT :**



a) puissance à la sortie du panneau





b) puissance de la charge

**Figure III-11 :** Simulation de l'influence du changement d'éclairement sur les grandeurs électriques à l'entrée et la sortie d'un Boost du panneau PV muni de la commande MPPT.

### **III.5.Conclusion :**

Les résultats de simulation montrent que les performances d'un panneau PV sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'éclairement solaire et la température.

Quand l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant croît, ce qui permet au module de produire une puissance électrique plus importante et que la caractéristique  $P = f(V)$  comporte un point de puissance maximal (PPM).

L'évolution de la caractéristique  $I = f(V)$  en fonction de la température montre que le courant augmente lorsque la température s'élève.

Et que les performances d'un panneau PV sont d'autant plus dégradées que  $R_s$  est grande, Cette influence se traduit par une diminution du point de puissance maximum.

Pour remédier à ce problème on a muni notre système d'une commande MPP notons que cette commande est valable pour n'importe quel type de convertisseur DC-DC et Surtout pour tout générateur dont les caractéristiques sont aléatoires tel que le photovoltaïque et l'éolien.

Les résultats de simulation montrent que la commande MPPT assure la poursuite du point de puissance maximale lors de la variation des conditions météorologiques (l'éclairement, température) et de la charge.





# **Conclusion général**

### Conclusion général

Aujourd'hui, la demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles diminuent à cause du développement démographique et du développement de l'industrie. Pour résoudre ce problème, les chercheurs se sont intéressés à l'exploitation des énergies renouvelables. Parmi celles-ci, on trouve l'énergie solaire qui se trouve dans la plupart des régions du monde, dont le renouvellement naturel est assez rapide et inépuisables à l'échelle du temps humain.

Dans ce travail nous avons fait l'étude de la modélisation d'une chaîne photovoltaïque qui se compose d'un générateur photovoltaïque, un étage d'adaptation convertisseur DC /DC, 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 et CI).

Dans ce cadre nous avons présenté les systèmes d'énergie renouvelable en portant un intérêt particulier aux systèmes photovoltaïques et nous avons présenté d'une façon générale le principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique qui est réalisée à travers de matériaux semi-conducteurs, puis nous avons présenté la cellule solaire et ses différentes technologies.

Après avoir fait la modélisation d'un générateur PV, nous avons vu le comportement du système photovoltaïque (caractéristique puissance-tension et caractéristique courant-tension) par rapport aux variations climatiques. Les résultats de la simulation ont montré que la caractéristique du panneau photovoltaïque est directement liée essentiellement à ses conditions climatiques (l'éclairement et la température).

Pour que le système photovoltaïque fonctionne à sa puissance maximale, il doit comporter un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge associé à une commande MPPT. Pour se faire, nous avons utilisé des algorithmes MPPT qui sont l'algorithme « perturbation et observation » (P&O), Après avoir modélisé et simuler cette technique, nous avons donné les résultats de simulation.

## Bibliographie

---

[1] : Fellah Boumediene, «Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah» Thèse de Magister, Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, Décembre 2012.

[2] : Abdelmalek Bouden, «Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque». Mémoire de magistère, Université de Constantine, Algérie 2008.

[3] : K .Kassmi, M .Hamdaoui et F .Olivié, «Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique» Université Mohamed Premier, Faculté des Sciences, Département de physique, LEPAS, Oujda, Maroc. Revue des énergies renouvelables, 451-462, 2007.

[4] : N. Chandrasekaran ,K .Thyagarajah,« Modeling and matlab simulation of pumping system using motor powered by solar system» European Journal of Scientific Research,6-13,2011.

[5] : S .ABADA, « Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic» Mémoire maitre es Sciances, Université laval, Quebec Canada 2011.

[6] : J .Royer, T. Djiako, E. Schiler et B. Sadasy, «Le pompage photovoltaïque» université d'ottawa ,1998.

[7] : M.Orgeret, «Les piles solaires, le composent et ces applications» Préface de F.Allest.

[8] : H.J. Möller. Semiconductors for Solar Cells. Artech House, Inc, Norwood, MA, 1993.

[9] Le photovoltaïque Module 3 – Fonctionnement et Technologies Novembre 2010 page 3,4,5,6/10.

[10] : 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.

[11] J. F.Reynaud, « Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, 2011.

[12] S.Bensmail, «Contribution à La Modélisation Et à l'Optimisation Des Systèmes Photovoltaïques», Mémoire de Magister de l'Université de Béjaia, Algérie, 2012.

[13] S. Ould-Amrouche, « Contribution à l'Etude du Conditionnement de Puissance dans les Systèmes Photovoltaïques », Thèse de Doctorat en Electrotechnique de l'université de Bejaia, Algérie, 2012.

[14] F. Benyarou « Conception assistée par ordinateur des systèmes photovoltaïques modélisation, dimensionnement et simulation », Thèse de Doctorat d'état. Université de Tlemcen Juillet 2004.

## Bibliographie

---

[15] [www.peracod.sn/IMG/pdf/Le\\_manuel-technicien-photovoltaique.pdf](http://www.peracod.sn/IMG/pdf/Le_manuel-technicien-photovoltaique.pdf)

[16] A. Labouret, M. Viloz, « Energie solaire photovoltaïque », Le manuel du professionnel, Edition DUNOD, Paris - France, Août 2003.

[17]: Abou El-Maaty Metwally Metwally Aly Abd El-Aal. Modelling and simulation of a photovoltaic fuel cell hybrid system, Thèse de doctorat de l'Université de Kassel, Germany, 2005.

[18]: I. Vechiu, Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome, Thèse de doctorat de l'université du Havre, 2005.

[19] N. Aouchiche , M.S. Aït Cheikh et A. Malek « Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation », Division Energie Solaire Photovoltaïque Centre de Développement des Energies Renouvelables, Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 N°3 (2013) 485 – 498

[20] D.Turcotte, M.Ross and F.Sheriff. « Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools » PV Horizon, Canada, 2001. ARTICLE PDF.

[A1] N.Koide, A Islam, Y.Chiba, L. Han , « Improvement of efficiency of dye-sensitized solar cells based on analysis of equivalent circuit », Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, Vol. 182, Issue 3, 10, pp. 296-30, September 2006.

[A2] I. Vechiu, « Modelisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Ph.D. thesis, Université du Havre, 2005.

[A3] J. Royer, T.Djiako , E.Schiller, B. Sada, S.Sous , « Le pompage photovoltaïque : manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens », la direction de Eric Schiller , Publ. En collab, avec : IEPF, Université d'Ottawa, EIER, CREPA. ISBN 2-89481-006-7, 1998.

[A4] W. R.Anis, H. Metwally « Dynamic Performance of a Directly Coupled PV Pumping System », Solar Energy, Vol.53, N°4, pp369-377, 1994.

[A5] D. Rekioua, O.Amrani « Etude et identification des différents modèles électriques photovoltaïques », Conférence sur les énergies renouvelables, Université de Bejaia, Algérie, 2007.

[A6] : Rene le Doeuff et Mohammed El-Hadi Zaim, « machines électriques tournantes » Lavoisier, paris, 2009.

[A7] N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie Buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.

[A8] R.Saisset, « Contribution à l'étude systématique de dispositifs énergétique à composants électrochimique. Formalise bond graph applique aux piles à combustible, accumulateurs lithium-ion », Thèse de Doctorat , Institut Nationale politechnique de toulouse, France, 2004.

