

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'enseignement Supérieur**  
**et de la Recherche scientifique**



**Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued**  
**Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Mémoire de Fin d'Étude**  
**En vue de l'obtention du diplôme de**

**MASTER ACADEMIQUE**

**Domaine : Sciences et Technologie**  
**Filière: Génie Électrique**  
**Spécialité: Réseaux Électriques**

## **Thème**

**Modélisation et Simulation d'un**  
**Systeme Photovoltaïque**

Réalisé par:  
Touil Nacer Eddine  
Ghenbazi Slimane

Encadré par:  
Lammouchi zakaria

**Soutenu en Septembre 2015**

## Remerciements

*Nous rendons nos profondes gratitude à dieu qui nous a aidé à réaliser ce modeste travail.*

*Nous exprimons nos profondes gratitude à nos parents pour leurs encouragements, leurs soutiens et pour les sacrifices qu'ils ont enduré.*

*Nous remercions nos encadreurs **\*lammouchi zakaria\*** pour le effort qu'ils ont déployés, pour nous aider, conseiller, encourager et corriger.*

*Nous remercions aussi tout le corps enseignant et administratif qui ont contribué à notre formation universitaire.*

# *Dédicace*

*Nous consacrons CE MODESTE TRAVAIL A :*  
*Nos chers parents*  
*Nos sœurs et nos frères*  
*Toute nos familles*  
*Tous nos amis*  
*Tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin pour*  
*être un jour licencié d'électrotechnique*

## **Résumé**

L'objectif de ce mémoire est d'assurer l'injection l'énergie électrique produite par un centrale PV au réseau de distribution. La configuration de ce système comporte un générateur photovoltaïque, connecté à un hacheur dévolteur, un onduleur de tension multi veaux et un filtre et la charge.

Pour un fonctionnement optimale du système, on doit assurer un fonctionnement à puissance maximale du générateur photovoltaïque quel que soit les conditions climatiques.

L'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge a été effectuée moyennant le Convertisseur DC/DC. Et l'injection d'énergie vers le réseau est assuré vie un onduleur multi niveaux de type NPC à commande MLI triangulé- sinusoïdale multiple.

**Mots clés :** sources photovoltaïque, qualité d'énergie,



# ***SOMMAIRE***

# Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

Introduction Générale..... 01

## chapitre I:Etude d'un système photovoltaïque

I.1. Introduction..... 03

I.2. Les ressources des énergies renouvelables..... 04

I. 2.1. Définition d'énergie renouvelable..... 04

I.3. L'énergie solaire..... 04

I.3.1. Rayonnement solaire..... 05

I.3.2. Spectre du rayonnement..... 06

I.3.3. Durée d'insolation..... 07

I.4. Description des éléments d'un système photovoltaïque..... 08

I.4.1. Cellule photovoltaïque..... 08

I.4.1.1. Historique..... 08

I.4.1.2. Constitution de la cellule photovoltaïque..... 08

I.4.2. L'effet photovoltaïque..... 09

I.4.2.1. Définition..... 09

I.5. Le module photovoltaïque..... 10

I.5.1. Caractéristiques d'un module..... 12

I.6. Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque..... 12

I.6.1. Cas d'une cellule idéale..... 12

I.6.2. Cas d'une cellule réelle..... 13

I.6.3. Influence de l'éclairement..... 16

I.6.4. Influence de la température..... 18

I.7. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV).....	20
I.7.1. Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle.....	20
I.7.2. Association des Cellules Photovoltaïques en Série.....	21
I.8. Avantages et inconvénients de l'énergie PV.....	25
I.8.1. inconvénients.....	25
I.8.2. Avantages.....	25
I.9. Conclusion.....	26

## Chapitre II : Convertisseurs de puissance avec le système PV

II.1. Introduction.....	27
II.2. Principe de fonctionnement de MPPT.....	27
II.3. Classification de l'algorithme de suiveur la puissance max.....	30
II.3.1. Les méthodes indirectes.....	30
II.3.1.1. La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur.....	30
II.3.1.2. La méthode de court-circuit.....	30
II.3.2. Les méthodes directes.....	31
II.3.2.1. La méthode Perturbe & Observe (P&O).....	31
II.3.2.2. La méthode incrémentation de la conductance.....	33
II.4. Structures des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau.....	34
II.4.1 .Structure avec hacheur et onduleur.....	34
II.4.2. Structures des systèmes à connexion directe au réseau.....	35
II.4.2.1. Installation mono-onduleur (onduleur central).....	36
II.4.2.2 Installation avec un onduleur pour chaque string (onduleur string).....	36
II.4.2.3. Installation multi-onduleurs (Onduleur modulaire).....	37
II.5. Caractéristiques propres d'un onduleur pour les systèmes photovoltaïques.....	37
II.6. Les inconvénients des onduleurs à deux niveaux.....	38
II.7. Convertisseur multi niveaux.....	38
II.8 .Principe de fonctionnement de l'onduleur NPC.....	39
II.9. Conclusion.....	40

## Chapitre III Système photovoltaïque

III.1. Introduction.....	41
III.2. Structure de connexion avec un Onduleur triphasé unique.....	41
III.3. Adaptation de l'énergie produite par le photovoltaïque avec le réseau.....	42
III.3.1. Modélisation de l'Onduleur triphasé à deux niveau.....	42
III.3.2. Modélisation de l'Onduleur triphasé à trois niveau.....	46
III.3.3. Principe de la Commande Prédictive .....	49
III.3.4 .Principaux de cette stratégie pour contrôler l'onduleur à deux niveaux.....	50
III.3.5. Principe de sélection du vecteur de commande optimal.....	51
III.3.6. Algorithme de la commande prédictive .....	51
III.4. Résultat de simulation.....	53
III.5. Conclusion.....	57
Conclusion générale.....	58
Annexe	
Bibliographique	



# *Liste des Figures*

# Liste des figures

## Chapitre I : Etude d'un système photovoltaïque

<b>Figure I.1 :</b> Composante du rayonnement global sur un plan	<b>06</b>
<b>Figure I.2 :</b> spectre solaire hors atmosphère	<b>07</b>
<b>Figure I.3 :</b> Schéma d'une cellule élémentaire	<b>09</b>
<b>Figure I.4 :</b> Spectre du rayonnement solaire	<b>10</b>
<b>Figure I.5:</b> Module photovoltaïque	<b>10</b>
<b>Figure I.6:</b> Boite de jonction	<b>11</b>
<b>Figure I.7:</b> Schéma équivalent d'une cellule idéale	<b>12</b>
<b>Figure I.8:</b> Schéma d'une cellule photovoltaïque réelle	<b>13</b>
<b>Figure I.9:</b> Schéma de simulation d'une cellule photovoltaïque	<b>15</b>
<b>Figure I.10:</b> Caractéristique I-V d'une cellule PV	<b>16</b>
<b>Figure I.11:</b> Caractéristique P-V d'une cellule PV	<b>16</b>
<b>Figure I.12:</b> Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.	<b>16</b>
<b>Figure I.13:</b> Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.	<b>17</b>
<b>Figure I.14:</b> Caractéristique puissance- courant d'une cellule en fonction de l'éclairement	<b>18</b>
<b>Figure I.15:</b> Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température.	<b>19</b>
<b>Figure I.16 :</b> Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de la température.	<b>19</b>
<b>Figure I.17 :</b> Caractéristique puissance-courant d'une cellule en fonction de la température.	<b>20</b>
<b>Figure I.18 :</b> Schéma de simulation de la 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle	<b>21</b>
<b>Figure I.19:</b> Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en parallèle	<b>21</b>
<b>Figure I.20:</b> Caractéristique I-V des cellules PV raccordées en parallèle	<b>21</b>
<b>Figure I.21:</b> Schéma de simulation de la 3 cellules photovoltaïques associées en série	<b>22</b>
<b>Figure I.22:</b> Caractéristique P-V des cellules PV accorder en séries	<b>22</b>
<b>Figure I.23:</b> Caractéristique P-V des cellules PV accorder en séries	<b>22</b>
<b>Figure I.24:</b> Block du module dans SIMULINK	<b>23</b>

<b>Figure I.25:</b> Caractéristique I-V du module PV selon l'éclairement	24
<b>Figure I.26:</b> Caractéristique P-V du module PV selon l'éclairement	24
<b>Figure I.27:</b> Caractéristique P-I du module PV selon l'éclairement	25

## Chapitre II : Convertisseurs de puissance avec le système PV

<b>Figure II.1 :</b> La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM	28
<b>Figure II.2 :</b> Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque	28
<b>Figure II.3:</b> Recherche et recouvrement du Point Puissance Maximale (a) suite à une variation (b) suite à une variation de charge,( c) suite à une variation d'éclairement de température	29
<b>Figure II.4:</b> Schéma de converge vers le PPM par P&O	31
<b>Figure II.5 :</b> Algorithme de MPPT a de base la méthode P&O nouvelle la Puissance : $P_{pvn}$	31
<b>Figure II.6:</b> Trajectoire par Incrémentation de Conductance	33
<b>Figure II.7 :</b> Algorithme d'incrémentation de la conductance	34
<b>Figure II.8 :</b> Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé	35
<b>Figure II.9 :</b> Différentes topologies des installations PV connectés réseaux aux électriques	36
<b>Figure II.10:</b> Onduleur triphasé à trois niveaux	39

## Chapitre III Système photovoltaïque

<b>Figure III.1 :</b> Mise en série de Plusieurs modules PV a un seul onduleur	42
<b>Figure III.2 :</b> Structure de l'onduleur de tension triphasé raccordé au réseau	43
<b>Figure III.3:</b> configuration de l'onduleur à deux niveaux pour l'état des interrupteurs (0, 0, 0) (vecteur de tension $V_0$ )	44
<b>Figure III.4 :</b> diagramme vectoriel de l'onduleur	46
<b>Figure III.5:</b> Un bras de l'onduleur à trois niveaux de type NPC	46
<b>Figure III.6:</b> Vecteurs tension que peut fournir l'onduleur à 3-niveaux de tension	48
<b>Figure III.7:</b> Evolution temporelle de la prédiction	49

---

<b>Figure III.8:</b> Algorithme de la commande prédictive	<b>52</b>
<b>Figure III.9:</b> schéma de contrôle de la commande prédictive	<b>53</b>
<b>Figure III .10 :</b> L'éclairement de rayonnements solaires	<b>54</b>
<b>Figure III.11 :</b> La tension de générateur photovoltaïque	<b>54</b>
<b>Figure III.12 :</b> Tension composée à la sortie de l'onduleur à deux niveau	<b>54</b>
<b>Figure III.13 :</b> Le courant et la tension de réseaux pour un onduleur à deux niveau	<b>55</b>
<b>Figure III.14:</b> Les puissances active et réactive délivrée par générateur PV	<b>55</b>
<b>Figure III .15 :</b> Tension composée à la sortie de l'onduleur à trois niveau	<b>56</b>
<b>Figure III.16:</b> Le courant et la tension de réseaux	<b>56</b>
<b>Figure III.17 :</b> Les puissances active et réactive délivrée par générateur PV	<b>56</b>



# *Liste des tableaux*

# List des tableaux

## Chapitre: Etude d'un système photovoltaïque

**Tableau I.1:** Valeurs des paramètres de simulation 16

**Tableau I.2:** Valeurs des paramètres de simulation 22

## Chapitre III : Système photovoltaïque

**Tableau III.1 :** État des interrupteurs et les vecteurs de tension Les autres des deux vecteurs de tension ( $V_0$ ,  $V_7$ ) sont représentées comme des vecteurs qui ont un amplitude nu 45

**Tableau III .2:** Grandeur connue pour chacune des configurations d'un bras de l'onduleur NPC à trois niveaux 47

**Tableau III.3 :** Etats possibles de l'onduleur NPC à trois niveaux et leur tension de mode commun 48



***Liste des symboles***

# Liste des symboles

**PV** : Photovoltaïque.

**GPV** : Générateur photovoltaïque.

**MPPT**: Maximum Power Point Tracking.

**P&O**: Méthode de Perturbation et observation .

**DC= CC** : Courant Continu.

**AC=CA** : Courant alternatif.

**TUC**: Température d'utilisation de la cellule (c).

**Pm** : Puissance maximale (W).

**Im** : Courant de point de Puissance maximale (A).

**IpI** : Courant délivré par une cellule photovoltaïque (A).

**Iph** : Le photo-courant (A).

**Ip** : Courant de résistance parallèle (A).

**Ich** : Courant de charge (A).

**h**: Constant de Planck ( $6,62 \cdot 10^{-34}$  j.s ) .

**I0** : Le courant de saturation inverse de la diode.

**Icc** : Courant de court-circuit d'une cellule ou d'un module solaire (A).

**Vco** : La tension du circuit ouvert (V) .

$\lambda$  : La longueur d'onde (m) .

**T** : Température de la jonction des cellules PV (°K).

**Rp**: Résistances parallèle shunt. ( $\Omega$ )

**RS** : Résistance série ( $\Omega$ ) de la cellule.

**Np** : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

**Rsh**: Résistance parallèle de la cellule



***Introduction  
Générale***

# **Introduction générale**

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

L'exploitation directe de l'énergie solaire au moyen des capteurs relève de deux technologies bien distinctes : l'une produit des calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre produit de l'électricité, et c'est cette dernière énergie solaire photovoltaïque qui fait l'objet de ce mémoire.

A travers l'effet photovoltaïque, l'énergie fournie est très variable et est toujours en courant continu: il faut souvent la stocker et parfois la transformer. L'association des centrales PV connectées au réseau électrique se fait à l'aide d'un convertisseur. Dans le cadre de notre travail, nous traitons l'une des structures les plus recommandées dite « onduleur de tension » qui sera utilisé pour injecter l'énergie électrique issue d'une source PV vers le réseau de distribution. Cette mémoire comporte trois chapitres :

Dans le premier chapitre, les différents systèmes photovoltaïques sont exposés. De plus, une description générale sur les éléments d'un système de captage photovoltaïque et la modélisation du module et générateur photovoltaïque est présentée.

Dans le deuxième chapitre, on va étudier les différents techniques de suivi le point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque avec les différents types des convertisseurs statiques qu'on peut utiliser dans le système photovoltaïque .

Dans le troisième chapitre on a présenté une étude théorique sur les onduleurs connectés au réseau et leur stratégie de commande prédictive. Les résultats de simulation sont présentés pour la commande utilisée.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et de simulation.

# **Chapitre I**

## ***Etude d'un système photovoltaïque***

## I.1.Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie [1]. c'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

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 19<sup>ème</sup> 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. [2]

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 [3]:

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

## I.2..Les ressources des énergies renouvelables

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. ces énergies satisfont quant à elles 13 % de la demande, dont 10 % pour hydraulique. Comparé aux énergies classiques (fossiles et nucléaires), les énergies renouvelables présentent le double avantage de ne pas être source d'émissions de gaz à effet de serre lors de leur utilisation et de présenter des gisements renouvelables donc inépuisables. ce sont des énergies de flux, par opposition aux énergies dites de stock (gaz, fioul, charbon, uranium, ...) [4]. La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement [5][6].

### I. 2.1.Définition d'énergie renouvelable

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) c'est-à-dire, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation [5], [7].

Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...), à l'échelle de la durée de vie de humanité .Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires [5], [8], [4].

### I.3.L'énergie solaire

La distance de la terre au soleil est environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h [9], les rayons du soleil mettent donc environ 8minutesà nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément priseéga le à 1360W/m2. Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduit à 1000 W/ m2 à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein à 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:

$$E = \frac{h.c}{\lambda}$$

I.1

$h$  : la constante de Planck

$C$  : la vitesse de la lumière.

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

$$E = \frac{1.26}{\lambda}$$

I.2

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns ( $\mu\text{m}$ ). L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

-9% dans la bande des ultraviolets ( $<0,4\mu\text{m}$ ).

-47% dans la bande visible ( $0,4$  à  $0,8\mu\text{m}$ ).

-44% dans la bande des infrarouges ( $>0,8\mu\text{m}$ ).

### I.3.1. Rayonnement solaire:

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. c'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0,2 et  $4.10^{-6}\text{m}$ . sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent

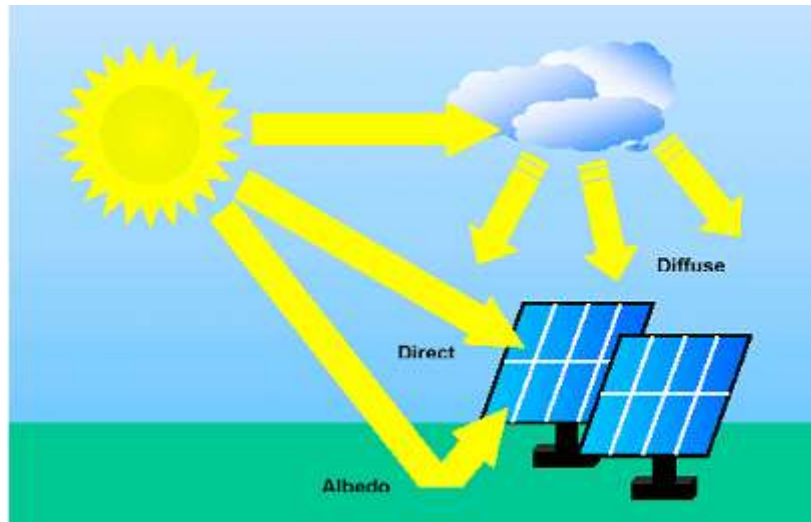
♦ **Le rayonnement direct** est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un pyréliomètre.

♦ **Le rayonnement diffus** est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). la diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet'éclatement) des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.

♦ **Le rayonnement solaire réfléchi** ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

♦ **Le rayonnement global** :est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran.

Les stations météorologiques généralement mesurer le rayonnement global horizontal par un Pyranomètre placé horizontalement à l'endroit requis. [1] .



**Fig (I.1) :** Composante du rayonnement global sur un plan horizontal

### I.3.2.Spectre du rayonnement:

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde  $\lambda$  :

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en [10]:

Ultraviolet $U_V$	$0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$	6.4%	Visible	$0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$	48.0%
Infrarouge $I_R$	$0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$	45.6%			

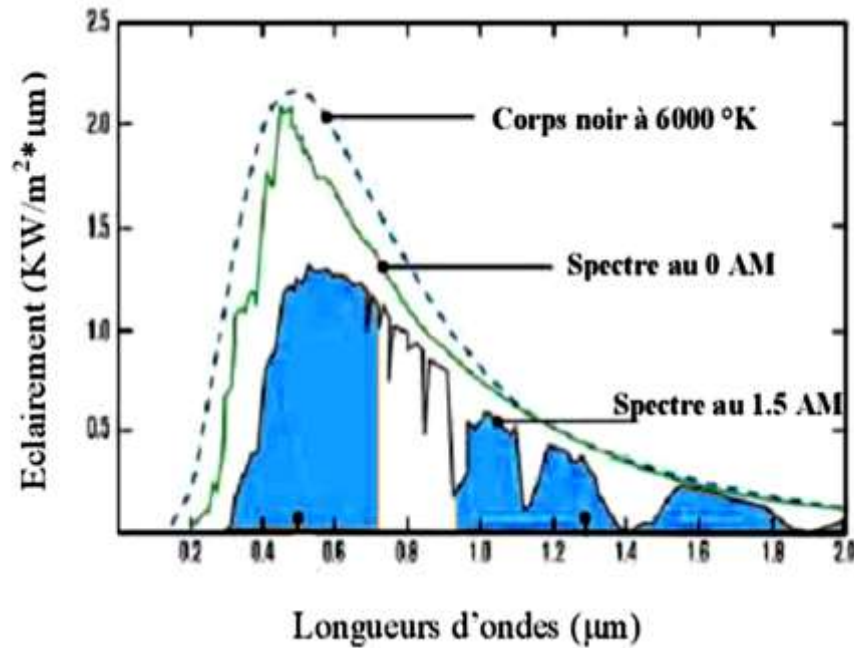


Fig (I.2) : spectre solaire hors atmosphère

### I.3.3. Durée d'insolation

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell– Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés ; on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages.

Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil.

## **I.4.Description des éléments d'un système photovoltaïque**

### **I.4.1.Cellule photovoltaïque**

#### **I.4.1.1.Historique**

IL est important de citer les dates les plus importantes dans l'histoire du photovoltaïque qui noté:

1839:Le physicien français [edmond becquerel] découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. c'est l'effet photovoltaïque.

1875:Werner von siemens expose devant l'académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1954:Trois chercheurs américains, chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958: Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973:La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de delaware.

1983:La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000km en Australie.

#### **I.4.1.2. Constitution de la cellule photovoltaïque**

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible. Son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs.

Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur qui sont dopées différemment, Figure (I.3). Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons, les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques

(couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu.

Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches du semi-conducteur. l'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche anti reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée. [11],[12]

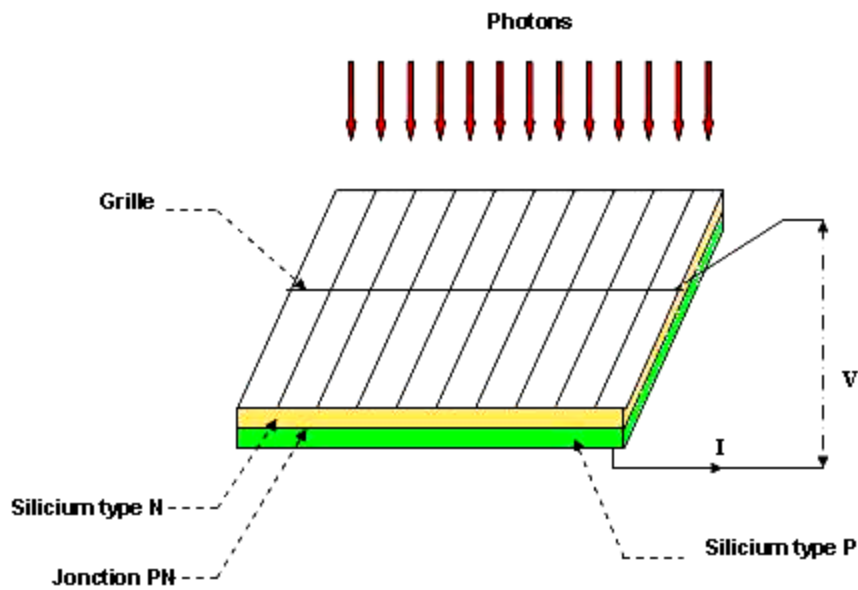


Fig (I.3) : Schéma d'une cellule élémentaire

## 1.4.2.L'effet photovoltaïque

### 1.4.2.1.Définition

Il a été démontré que le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie  $E_{ph}$  qui répond, elle-même, à la relation suivante [13]:

$$E_{ph}=h*(c/\lambda) \tag{I.3}$$

D'après la relation (I.3), on voit que cette énergie est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. Le flux d'énergie solaire est alors transmis sous forme de rayonnements électromagnétiques dont les longueurs d'onde sont assez différentes du corps noir dans l'espace, mais encore plus sur la terre ainsi que le montre la figure (I.4), [14]. Il est à remarquer que le spectre de l'énergie solaire en atmosphère terrestre est décalé vers le rouge et l'infrarouge par rapport au spectre hors atmosphère.

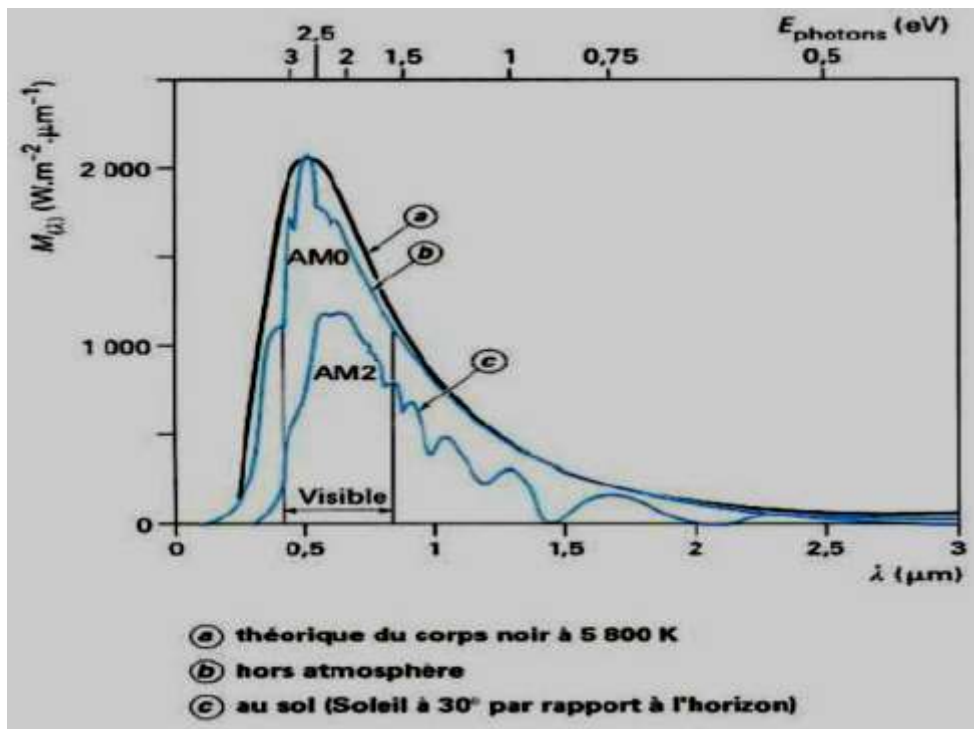


Fig (I.4) : Spectre du rayonnement solaire

### I.5. Le module photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module Figure (I.5-a). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène -vynil-acétate) Figure (I.5-b) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène [15].

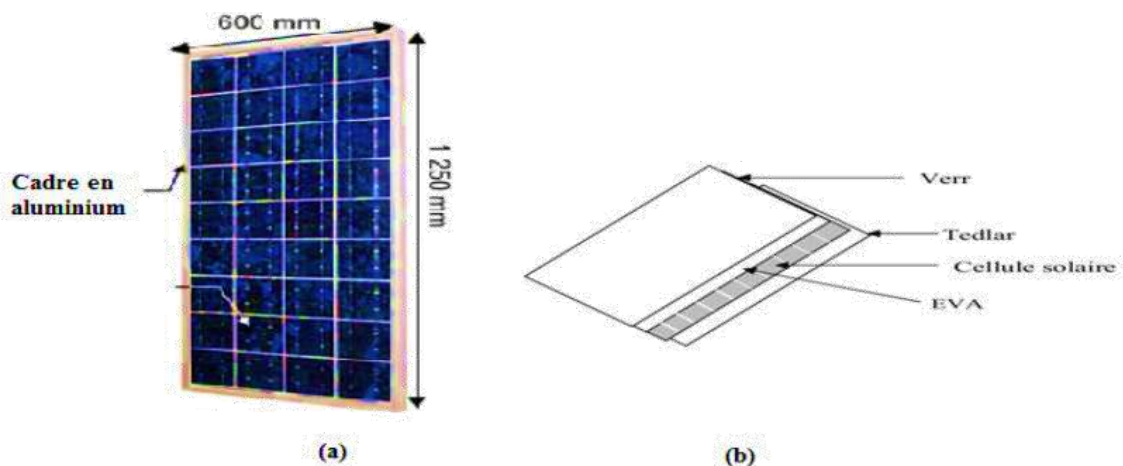


Fig (I.5): Module photovoltaïque

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

A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant 2 diodes antiparallèles Figure (I.6). Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre [16].



**Fig (I.6):** Boîte de jonction.

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

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

Les modules en silicium monocristallin (c-si, 64% de marché), poly cristallin ou multi cristallin (xc-Si, 28% du marché) ou silicium amorphe (a-si, 13% du marché), délivrent des tensions normalisées (12, 24, 48) et des puissances entre 10 et 100  $W_c$  (watt-crête : puissance obtenue pour l'ensoleillement maximal) [15].

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, le courant de sortie, et la puissance seront proportionnels à la surface du module. Ils ont une efficacité de conversion (énergie électrique produite/énergie solaire incidente) de l'ordre de 10 à 20% [17].

### I.5.1. Caractéristiques d'un module [18]

Les modules sont généralement des parallélépipèdes rectangles rigides minces (quelques centimètres d'épaisseur), dont les caractéristiques suivantes :

- ♦ **La puissance de crête,  $P_c$**  : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards ( $25^\circ\text{C}$  et un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$ ).
- ♦ **La caractéristique  $I=f(V)$**  : 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 un éclairement " plein soleil ".
- ♦ **Point de fonctionnement optimum,  $P_m (V_m, I_m)$**  : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $P_m = V_m \cdot I_m$
- ♦ **Rendement** : 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 :  $V_{co} \cdot I_{cc}$ .

### I.6. Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque

#### I.6.1. Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connectée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant  $I_{ph}$  en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (I.7), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire e idéale [19].

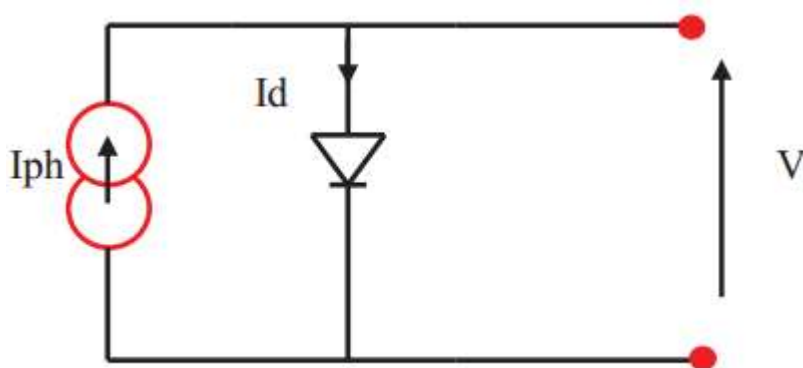


Fig (I.7): Schéma équivalent d'une cellule idéale.

- ◆ Les équations retenues de ce modèle sont:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad \text{I.4}$$

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

$$I_{ph} = I_{sc} = \frac{E}{E_{ref}} \quad \text{I.5}$$

**E:** L'éclairement absorbé par la cellule

**$E_{ref}$**  : L'éclairement de référence (1000 w/m<sup>2</sup>)

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad \text{I.6}$$

**$I_0$ :** Courant de saturation inverse de la diode

$$I_t = \frac{NKT}{q} \quad \text{I.7}$$

**$V_t$**  : Tension thermique

**N** : Facteur d'idéalité de la photopile

**K** : Constant de Boltzmann (1,38.10<sup>-23</sup>J/K)

**q** : Charge de l'électron (1,6.10<sup>-19</sup>C)

### I.6.2. 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 (I.8). Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant ( $I_{ph}$ ) caractérisant le photo-courant, une résistance série ( $R_s$ ) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte ( $R_{sh}$ ) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à ( $R_s$ ) [20]

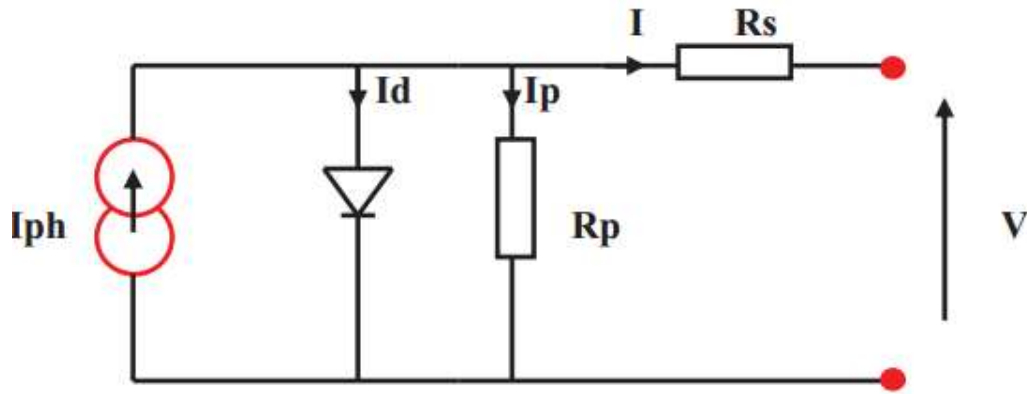


Fig (I.8): Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

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:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p \quad \text{I.8}$$

$I_{pv}$ : Courant générer par la cellule photovoltaïque

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

$I_d$ : Le courant circulant dans la diode.

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad \text{I.9}$$

$$I_0 = I_{0r} \left( \frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\left[ \frac{E_g}{BK} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] - 1} \quad \text{I.10}$$

$I_{0r}$ : 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 [°K]

$T_n$  : Température de référence des cellules PV [°K]

$B$  : 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

$V_{pv}$ : 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 aux impuretés et sur les coins de cellule.

Les résistances  $R_s$  et  $R_p$

sont calculées par une boucle de programmation voir l'annexe (A.1)

En substituant les équations (I.9 ; I.10) dans l'équation (I.8) le courant  $I_{PV}$  devient Donc :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ e \left( \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_p} \quad \text{I.11}$$

♦ Pour résoudre cette équation on utilise le block 'Algébriques Contraint' qui est intégré dans la bibliothèque 'Simulink/Math Opération'.

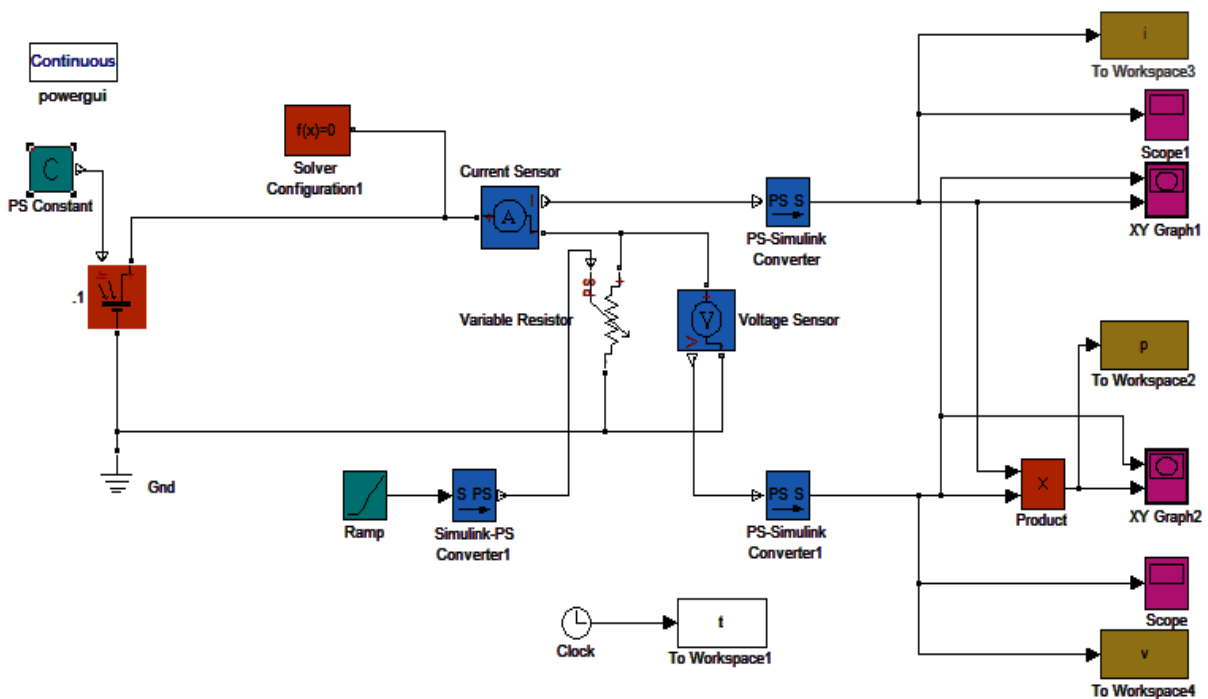
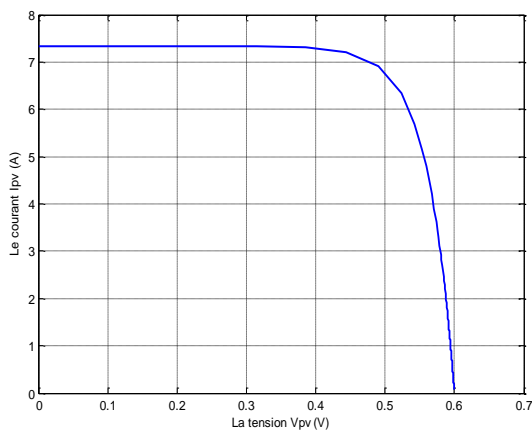


Fig (I.9): Schéma de simulation d'une cellule photovoltaïque

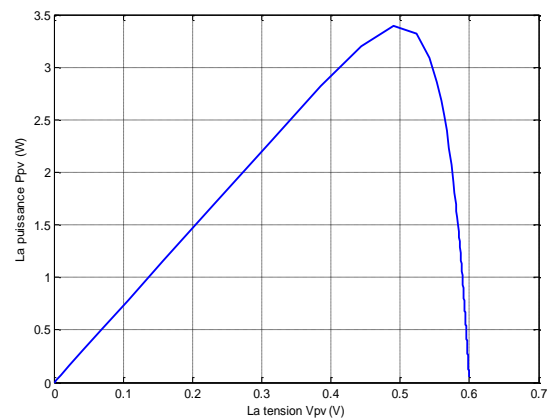
Les paramètres de simulation sont donnés dans le tableau (I-1) et les autres paramètres sont reportés en détails:

Les paramètres de module	La valeur de chaque paramètre
Le nombre des cellules en série $N_s$	1
La tension maximale $V_r$ à PPM (V)	0.4822
La tension en circuit ouvert $V_{oc}$ (V)	0.598
Le courant maximal $I_r$ à PPM (A)	6.98
Le courant de court-circuit $I_r$ (A)	7.2

**Tableau ( I.1):** Valeurs des paramètres de simulation.



**Fig (I.10):** Caractéristique I-V d'une cellule PV.

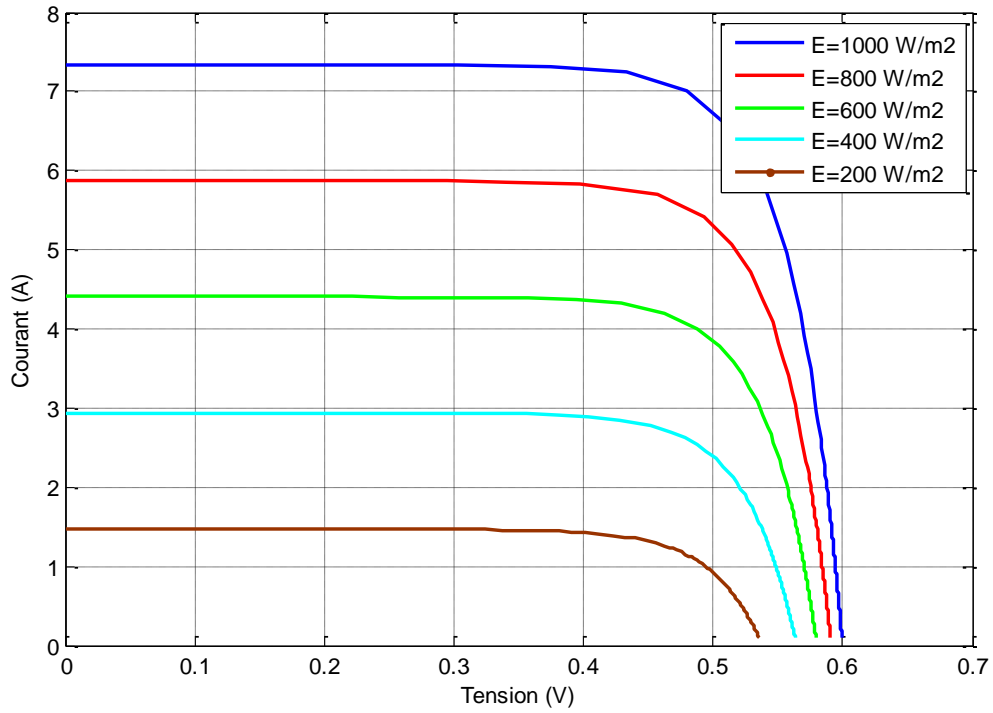


**Fig (I.11):** Caractéristique P-V d'une cellule PV.

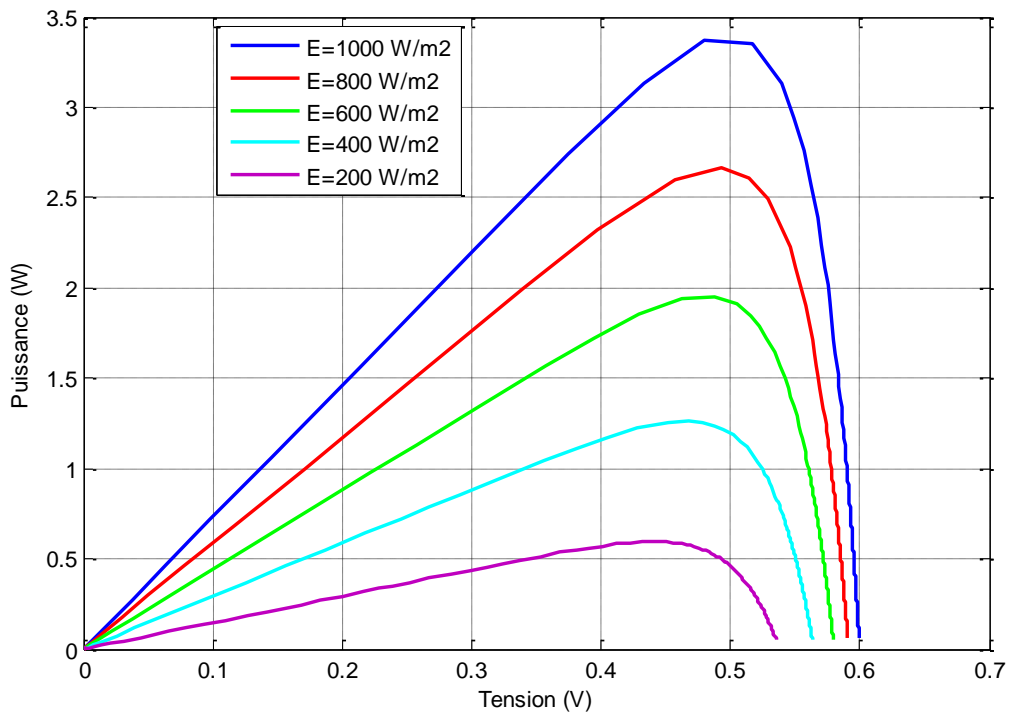
### I.6.3. Influence de l'éclairement

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure (I.7) représente la caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes:

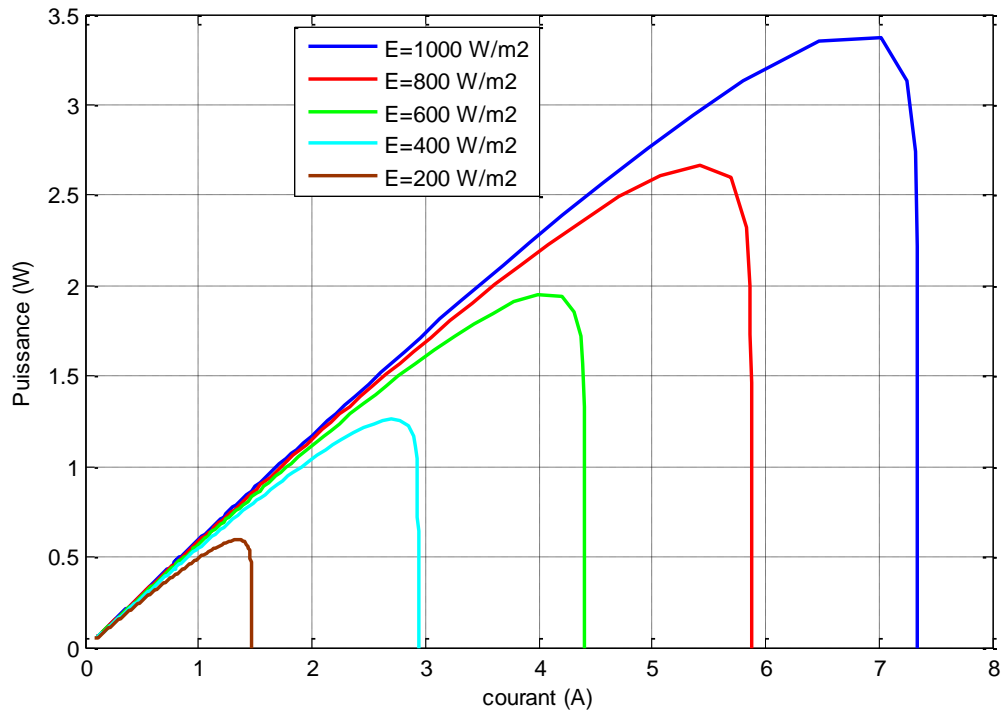
Le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement figure (I.12).



**Fig (I.12):** Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.



**Fig (I.13):** Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.



**Fig (I.14):** Caractéristique puissance- courant d’une cellule en fonction de l’éclairement

### I.6.4 Influence de la température

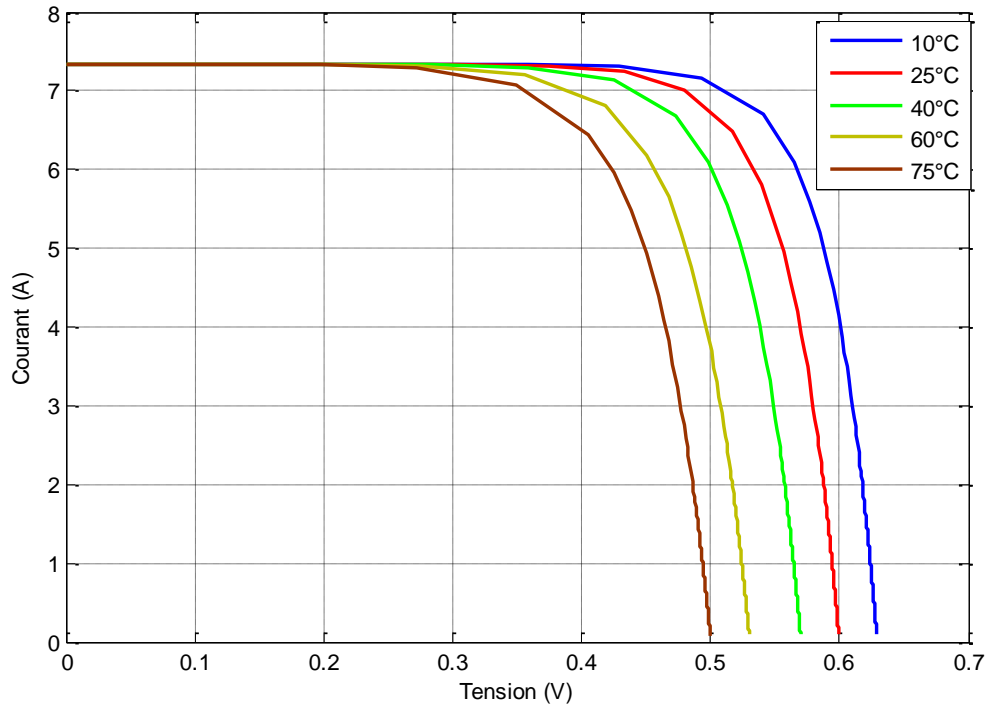
L’influence de la température est importante et a des conséquences pour la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques

La température est un paramètre essentiel puisque les cellules sont exposées aux rayonnements solaires, susceptibles de les échauffer. De plus, une partie du rayonnement absorbé n’est pas convertie en énergie électrique il se dissipe sous forme de chaleur ; c’est pourquoi la température de la cellule ( $T_c$ ) est toujours plus élevée que la température ambiante ( $T_a$ ).

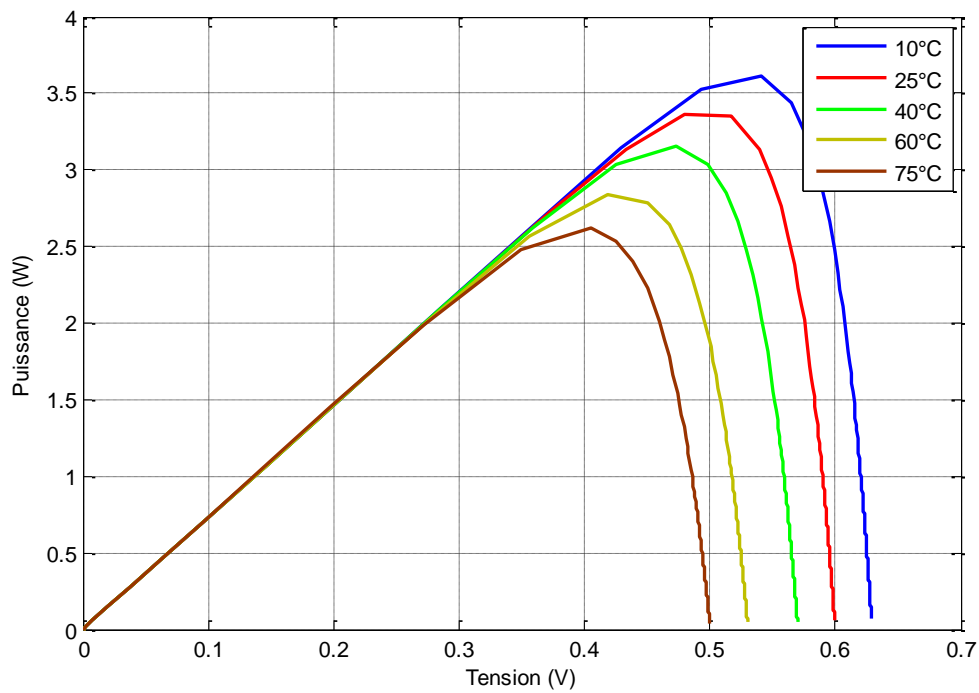
$$T_c = T_a + E_m / 800 (T_{UC} - 20)$$

**I.12**

La figure (I.15), montre que la tension d’une cellule baisse fortement avec la température. Plus la température augmente et moins la cellule est performante. En revanche, le courant augmente légèrement en intensité : cette augmentation reste néanmoins négligeable au point de puissance maximale [21]



**Fig (I.15):** Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température.



**Fig ( I.16 ) :** Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de la température.

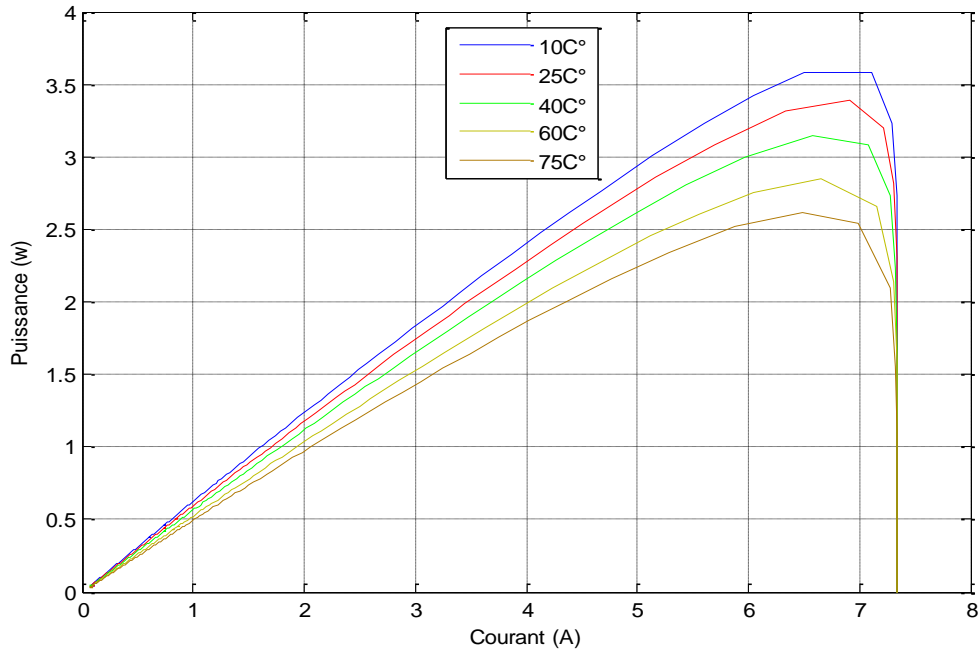


Fig ( I.17) : Caractéristique puissance-courant d’une cellule en fonction de la température.

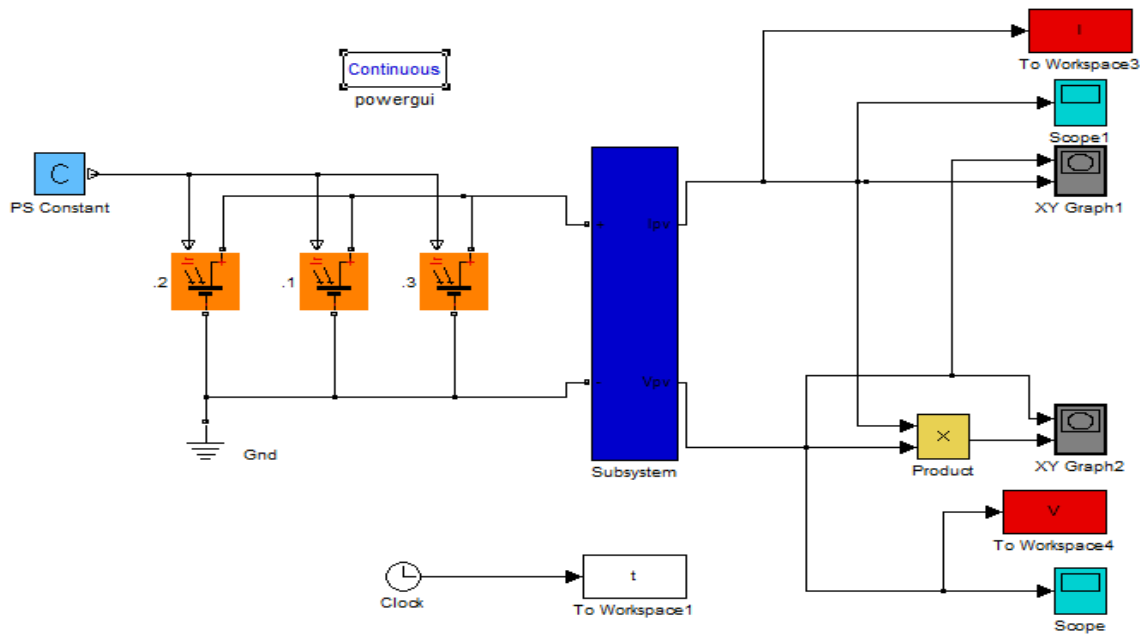
### I.7. Constitution d’un générateur photovoltaïque (GPV)

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.

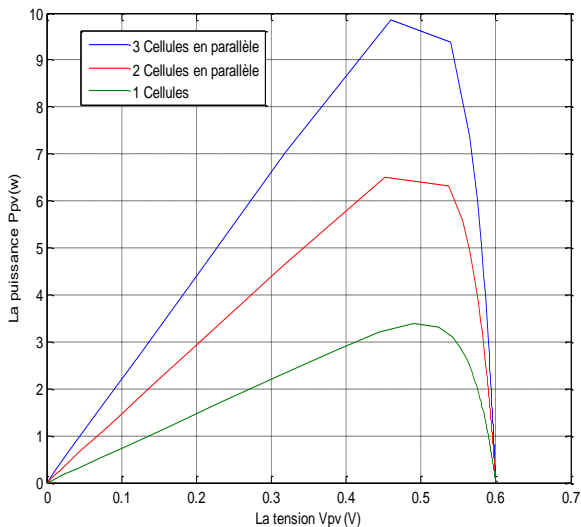
#### I.7.1. Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement des cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. les figures. (I.19)- (I.20)) montrent les caractéristiques résultantes ( $I_{PCC}, V_{PCO}$ ) obtenues en parallèle (indice p)  $N_p$  cellules identiques:

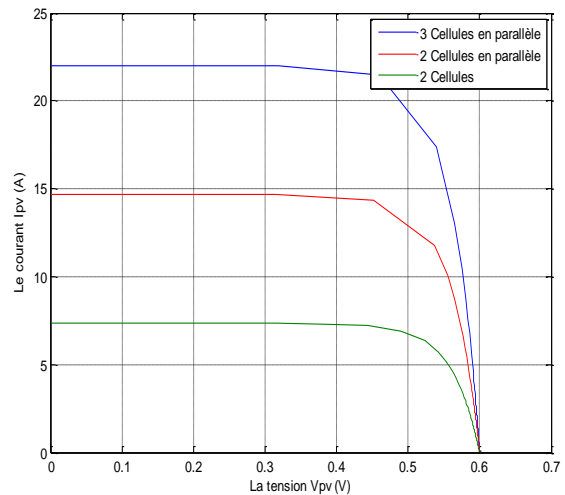
$$I_{PCC} = N_p * I_{CC} \quad \text{et} \quad V_{PCO} = V_{CO} \quad \text{I.13}$$



**Fig (I.18) :** Schéma de simulation de la 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle



**Fig (I.19):** Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en parallèle.



**Fig (I.20):** Caractéristique I-V des cellules PV raccordées en parallèle.

### I.7.2. Association des Cellules Photovoltaïques en Série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. Les figures (I. (22 ; 23)) montrent la caractéristique résultante ( $I_{SCC}, V_{SCO}$ ) obtenue en associant en série (indice s)  $N_s$  cellules identiques ( $I_{CC}, V_{CO}$ ) :

$$I_{PCC} = I_{PCO} \quad \text{et} \quad V_{SCO} = N_s * V_{CO} \quad \text{I.14}$$

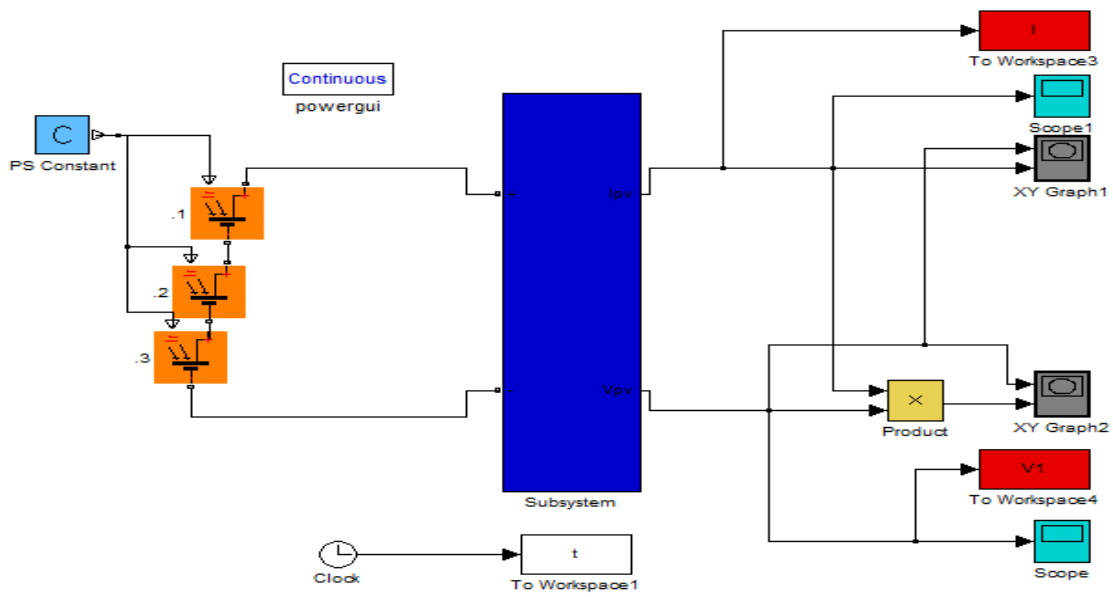


Fig ( I.21): Schéma de simulation de la 3 cellules photovoltaïques associées en série

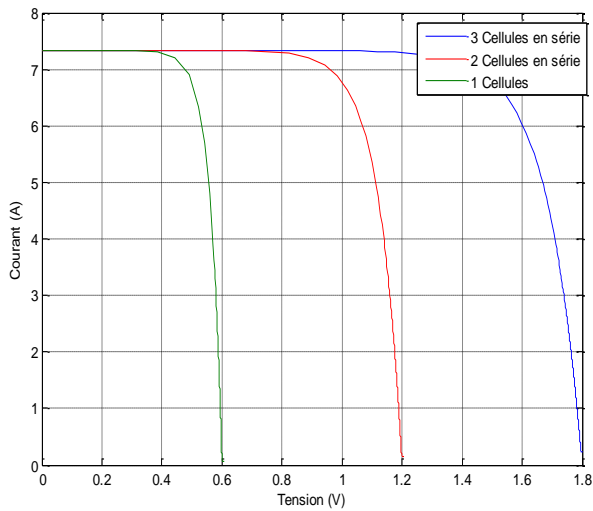


Fig (I.22) Caractéristique P-V des cellules PV accorders en series

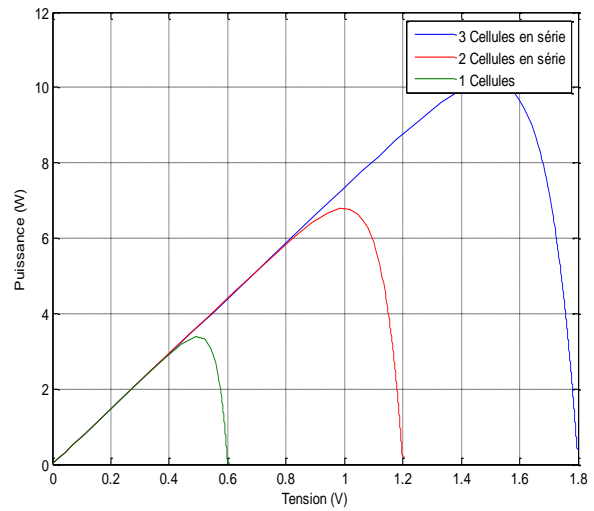


Fig ( I.23) Caractéristique P-V des cellules PV accorders en series

Chaque module est caractérisé par des paramètres illustrés dans le tableau (I.2)

Les parameters de module	La valeur de chaque paramètre
Le nombre des cellules en série $N_s$	36
La tension maximale $V_r$ à PPM (V)	17.58
La tension en circuit ouvert $V_{oc}$ (V)	21.5
Le courant maximal $I_r$ à PPM (A)	6.98
Le courant de court-circuit $I_r$ (A)	7.2

Tableau ( I.2): Valeurs des paramètres de simulation

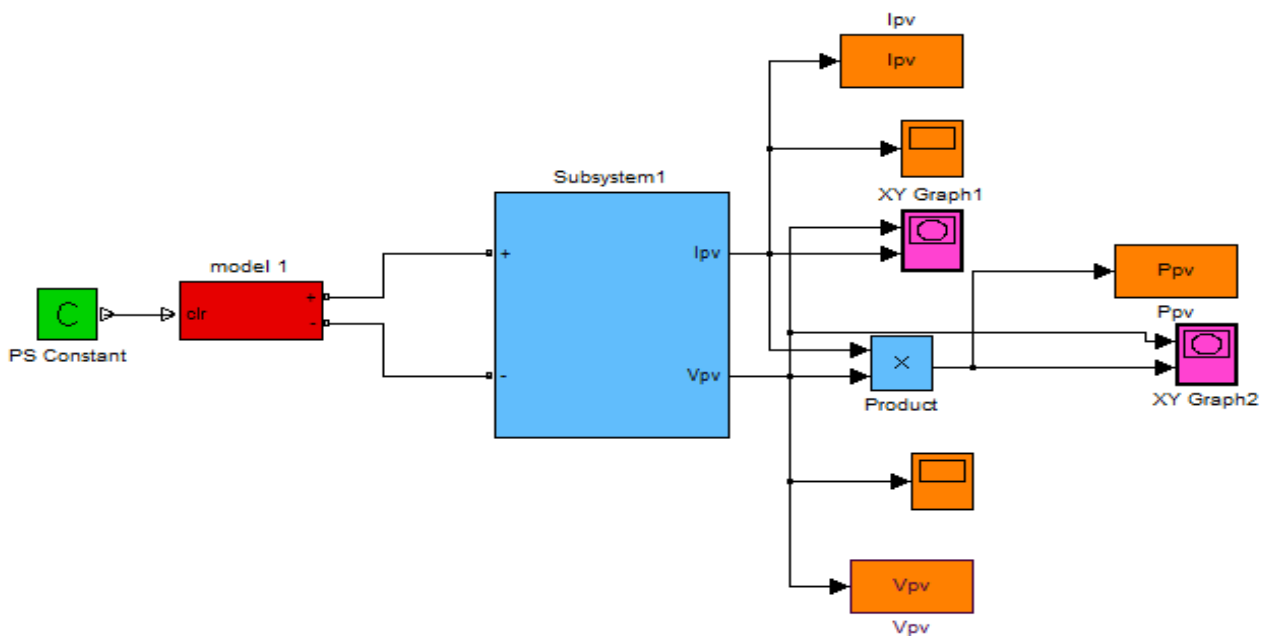


Fig (I.24): Block du module dans SIMULINK

◆ Influence de l'Éclairement

En faisant varier l'éclairement entre 200 w/m<sup>2</sup> et 1000 w/m<sup>2</sup> avec un pas de 200, la caractéristique ( $I_{pv}=f(V_{pv})$ ) est donnée par les figures (I. (25,26 et 27)). On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement

L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m<sup>2</sup> et une température de 25 °C

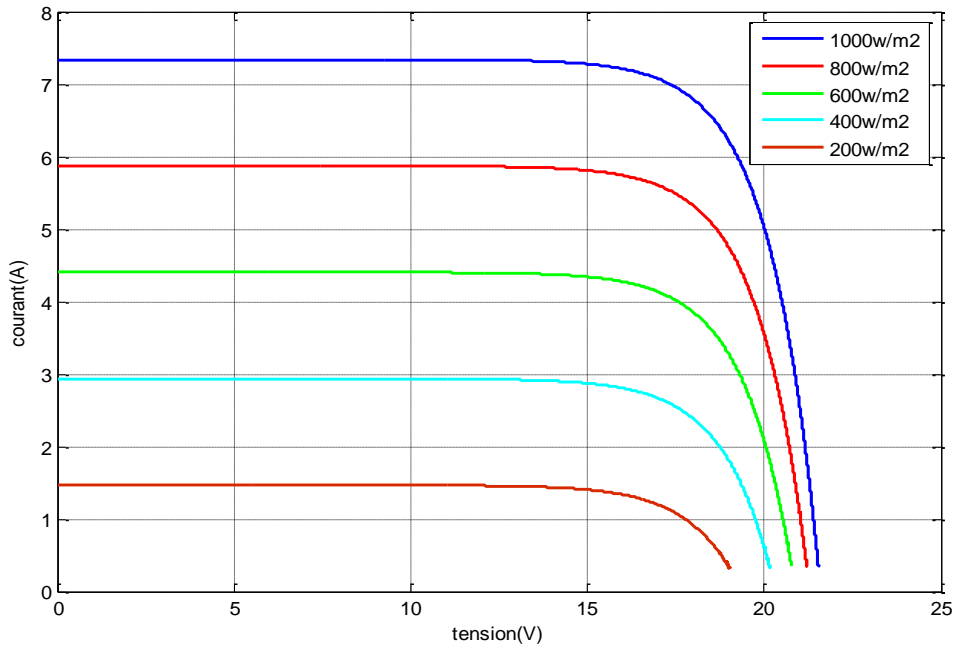


Fig (I.25): Caractéristique I-V du module PV selon l'éclairement

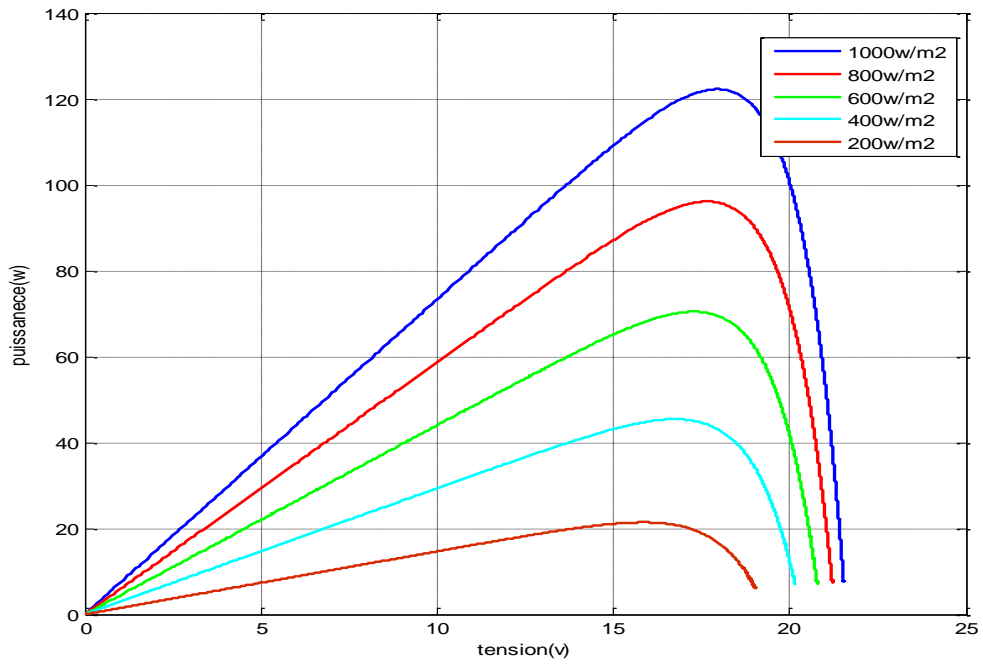


Fig (I.26): Caractéristique P-V du module PV selon l'éclairement

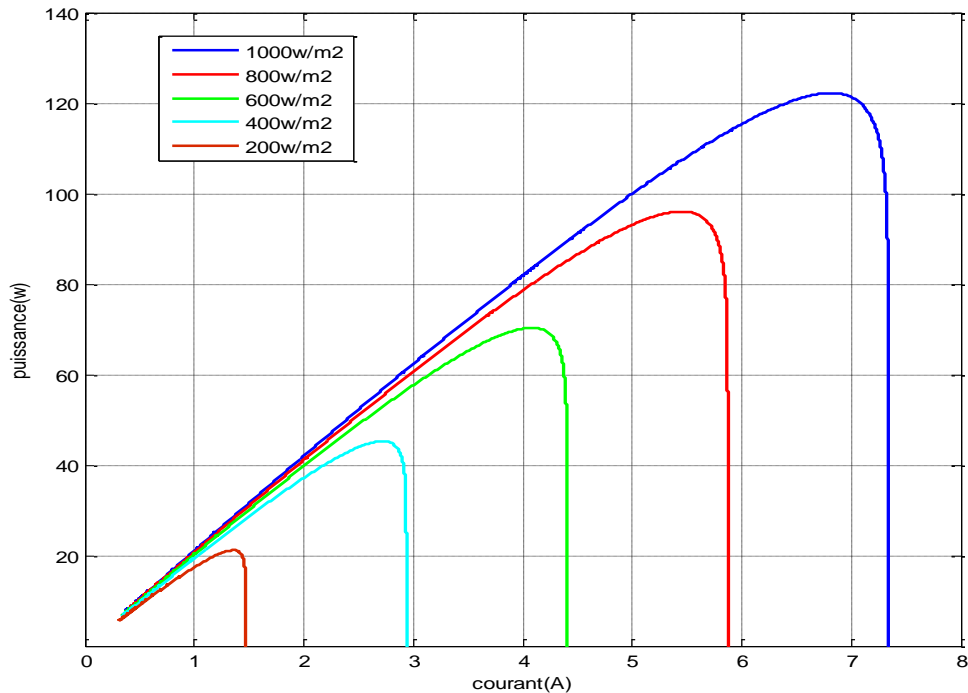


Fig ( I.27): Caractéristique P-I du module PV selon l'éclairement

## I.8. Avantages et inconvénients de l'énergie PV

### I.8.1. inconvénients

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

Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

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

### I.8.2. 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 puissance allant du milliwatt au Mégawatt.

Le coût de fonctionnement est très faible vu les entre tiens réduits et il ne nécessite 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, ce n'est pas l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

### **I.9.Conclusion**

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

Dans le chapitre prochain, on présentera une étude sur les convertisseurs DC-DC (hacheurs) et leur commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.

# **Chapitre II**

## ***Convertisseurs de puissance avec le système PV***

## II.1 Introduction

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

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

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

## II.2 Principe de fonctionnement de MPPT

Un MPPT, de l'anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant. La figure (II.1) représente la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur.

La Figure (II.1) présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie servant de stocker l'énergie pour une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension.

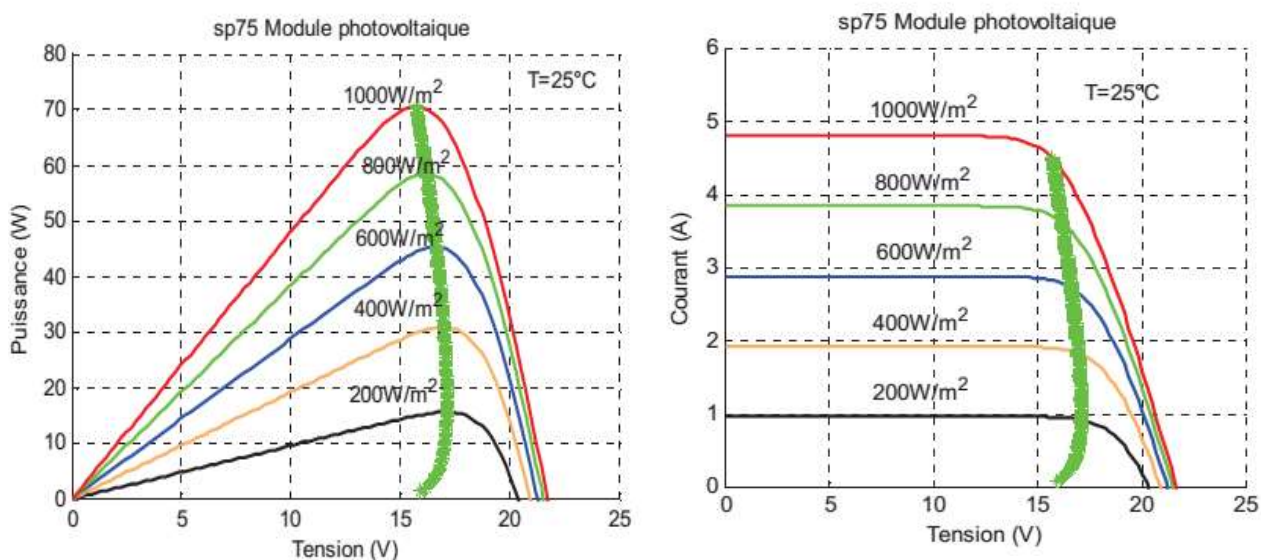


Fig (II.1) : La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM

Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé [22]

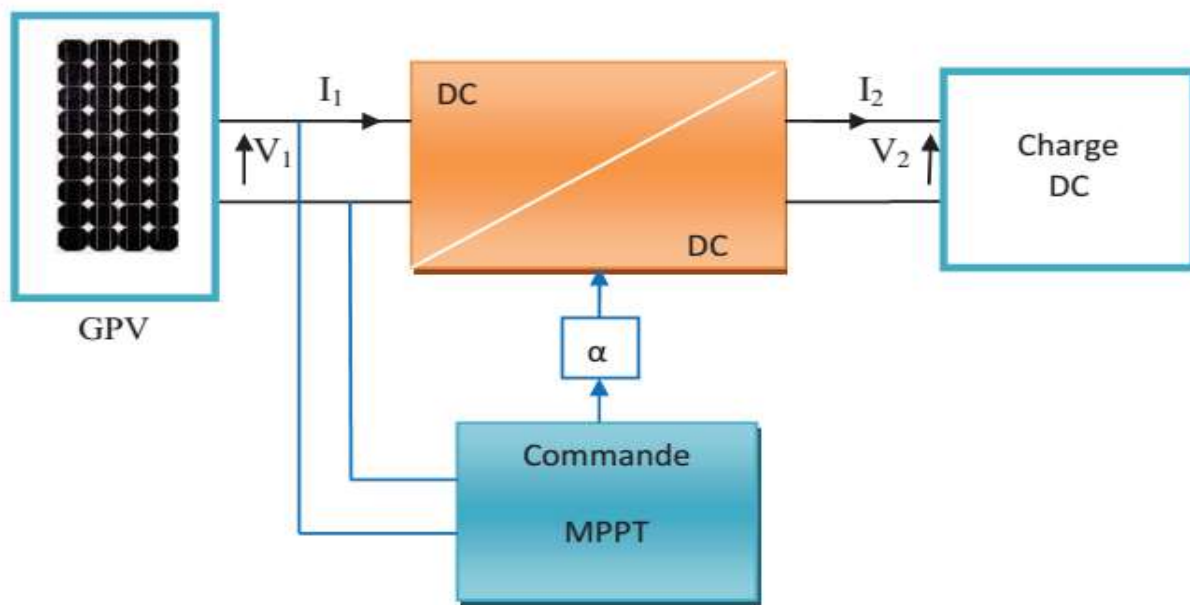
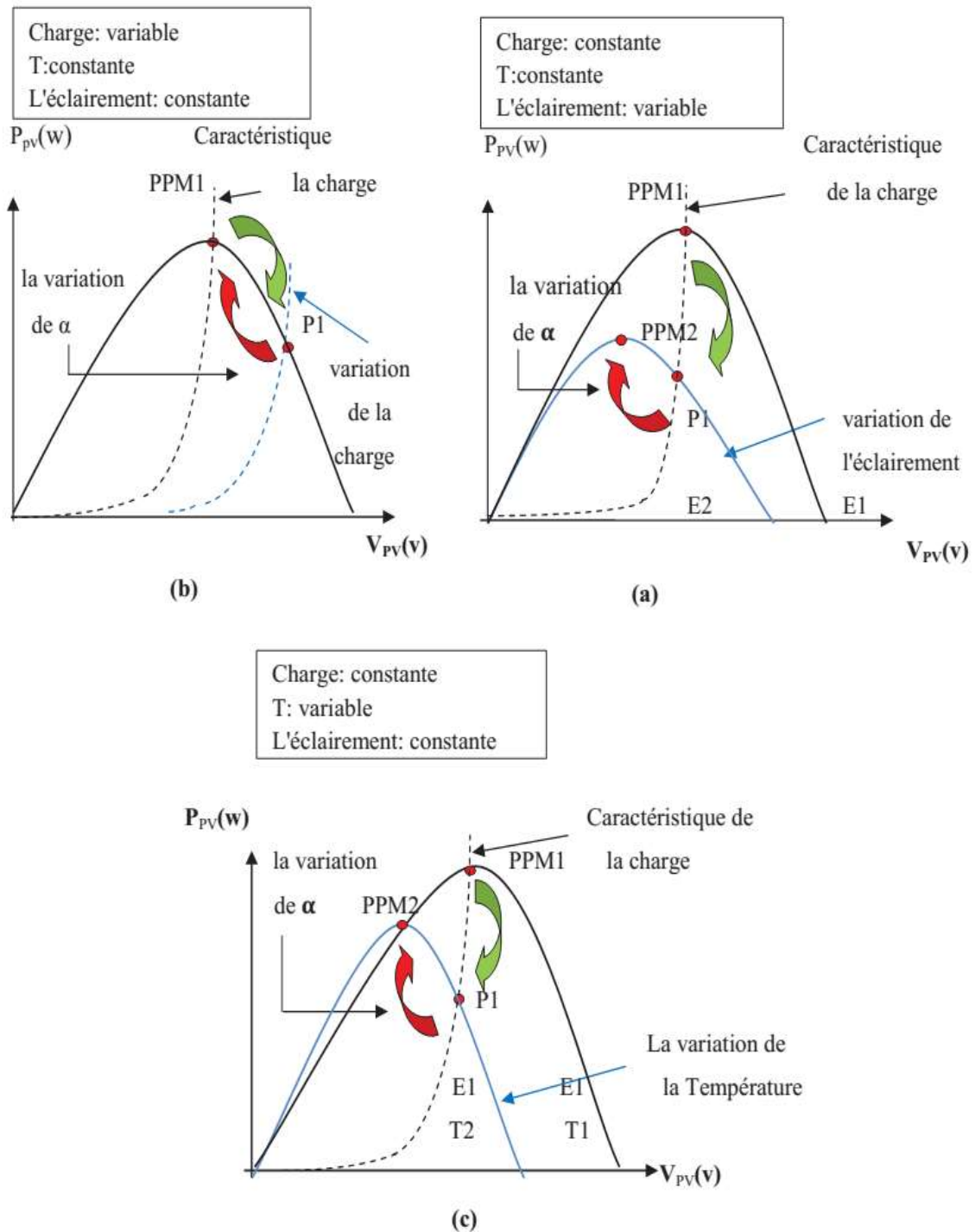


Fig ( II.2) : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

La figure (II.3) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.



Fig( II.3): Recherche et recouvrement du Point Puissance Maximale (a) suite à une variation d'éclairement, ( b) suite à une variation de charge, ( c) suite à une variation de température

Dans ce cas est pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Dans le cas b pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de

fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Enfin dans le dernier cas c de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV .Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande [23].

### II.3 Classification de l'algorithme de suiveur la puissance max

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

#### II.3.1 Les méthodes indirectes

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

##### II.3.1.1 La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur

Cette méthode, est basée sur la tension du générateur PV au point de puissance maximale qui est approximativement proportionnelle à sa tension à circuit ouvert  $V_{oc}$ . La constante proportionnelle  $k_1$ , dépend de la technologie de cellules photovoltaïques, du facteur de forme et des conditions météorologiques.

$$K_1 = \frac{V_{MPP}}{V_{OC}} \text{ Cte} < \quad \text{II. 1}$$

La tension de circuit ouvert du générateur PV est mesurée et stockée en arrêtant le système cette opération s'effectuant à une certaine fréquence. Le MPP est calculé suivant l'équation II .1 . et la tension de fonctionnement est ajustée sur le point de puissance maximale. Bien que cette méthode soit apparemment simple, il est difficile de choisir une valeur optimale de  $k_1$  .

Cette méthode souffre donc d'inexactitude mais présente l'avantage d'être simple et à bas prix. Aussi, l'interruption de service à la limite des systèmes avec stockage où la déconnexion des panneaux est « transparente » pour l'utilisateur.

##### II.3.1.2 La méthode de court-circuit

Cette méthode est similaire à la précédente et est basée sur la proportionnalité existant entre le courant de court-circuit et le courant au point de puissance maximale :

$$K_2 = \frac{I_{MPP}}{I_{OC}} \cong \text{Cte} < 1 \quad \text{II. 2}$$

Cette méthode présente les mêmes avantages et inconvénients que ceux de la méthode de la tension de circuit ouvert.

### II.3.2 Les méthodes directes

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

L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance...

#### II.3.2.1 La méthode Perturbe & Observe (P&O)

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension VPV d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance PPV qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure (II.4), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension VPV engendre un accroissement de la puissance PPV, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

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

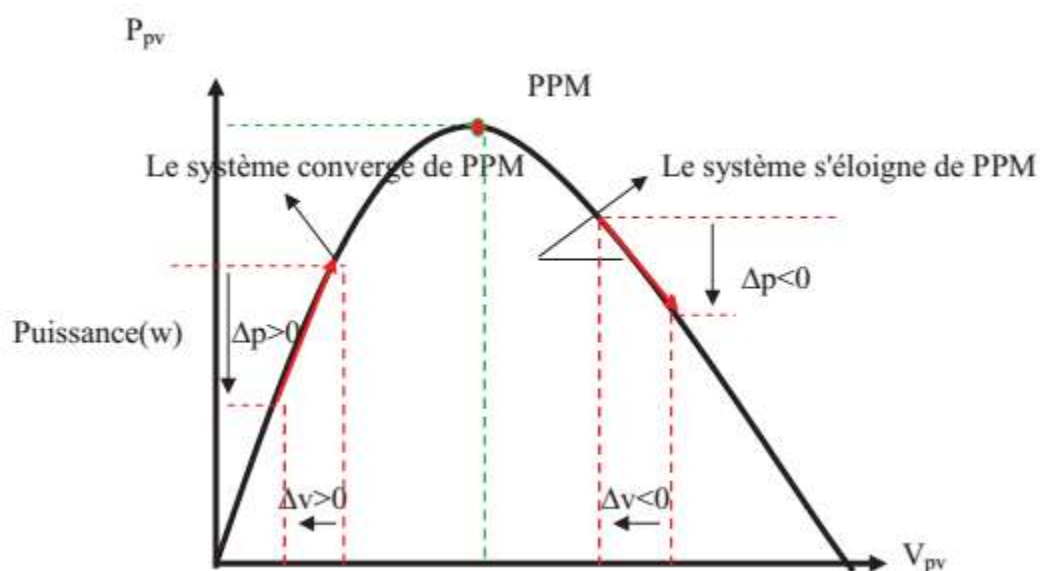


Fig (II.4): Schéma de convergence vers le PPM par P&O

La figure (II.5) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

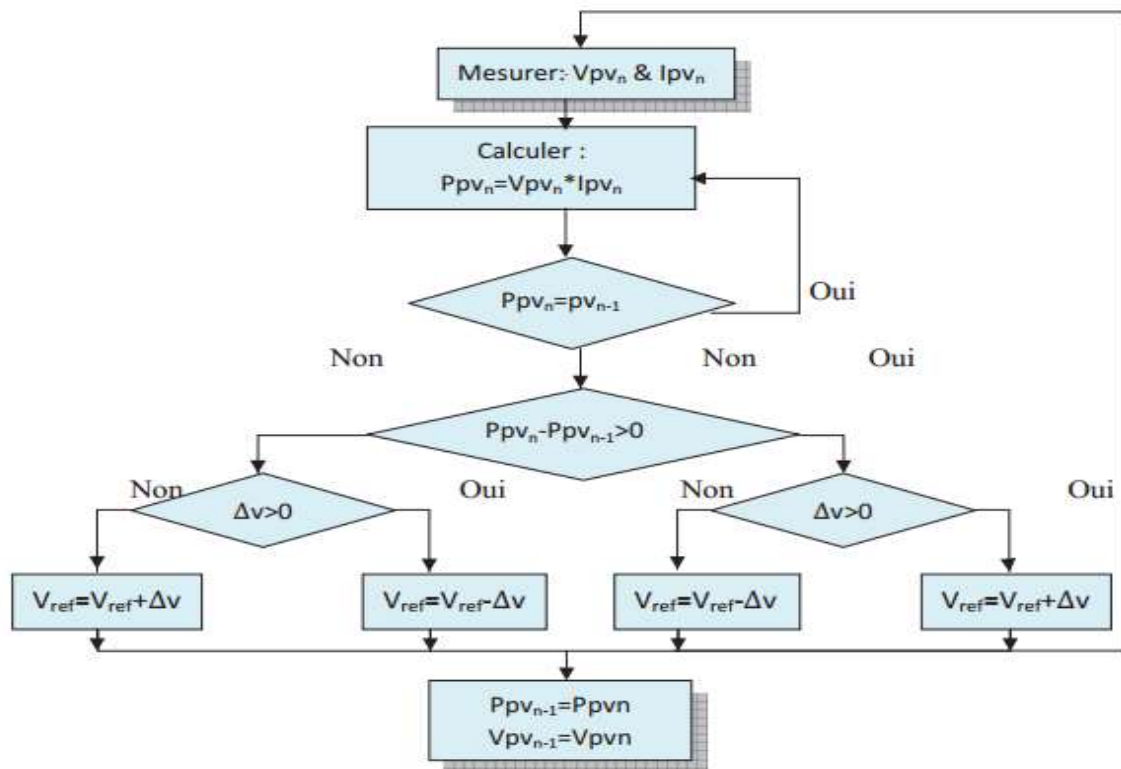


Fig (II.5) : Algorithme de MPPT a base de la méthode P&O la nouvelle puissance :  $P_{pv_n}$

Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant [24].

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

$$\Delta V = V_{PV_n} - V_{PV_{n-1}} \tag{II.3}$$

$$\Delta P = PV_{PV_n} - P_{PV_{n-1}} \tag{II.4}$$

La méthode P&O est aujourd’hui largement utilisée de part sa facilité d’implémentation cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu’elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d’incrément ralenti la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser [24].

### II.3.2.2 La méthode incrémentation de la conductance

L'avantage de cet algorithme est la vitesse de recherche du point de puissance maximale quand les conditions atmosphériques changent rapidement ; la description de l'algorithme sera présentée par la suite [25].

La puissance produite par le générateur PV peut être exprimé par:

$$P_{PV_n} = I_{PV} \cdot V_{PV} \tag{II.5}$$

La conductance et l'incrément de la conductance peuvent être identifiées en dérivant l'équation par rapport à la tension Ppv:

$$\frac{1}{V} \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} + \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \tag{II.6}$$

Ainsi on a noté avec G la conductance et avec G l'incrément de la conductance:

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \tag{II.7}$$

$$\Delta G = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \tag{II.8}$$

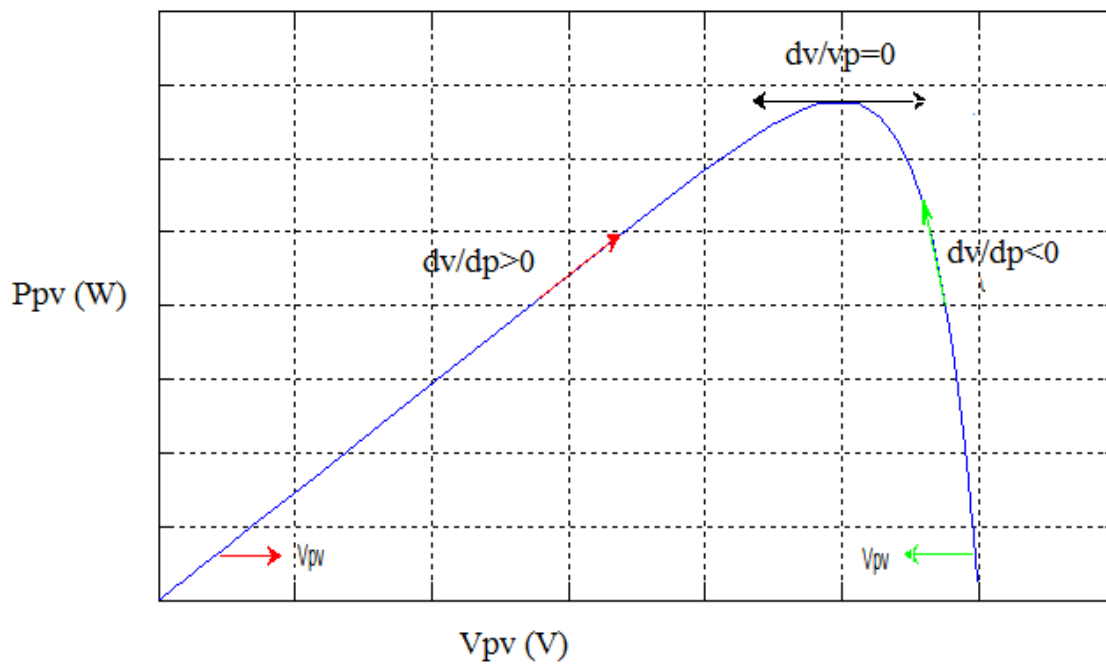
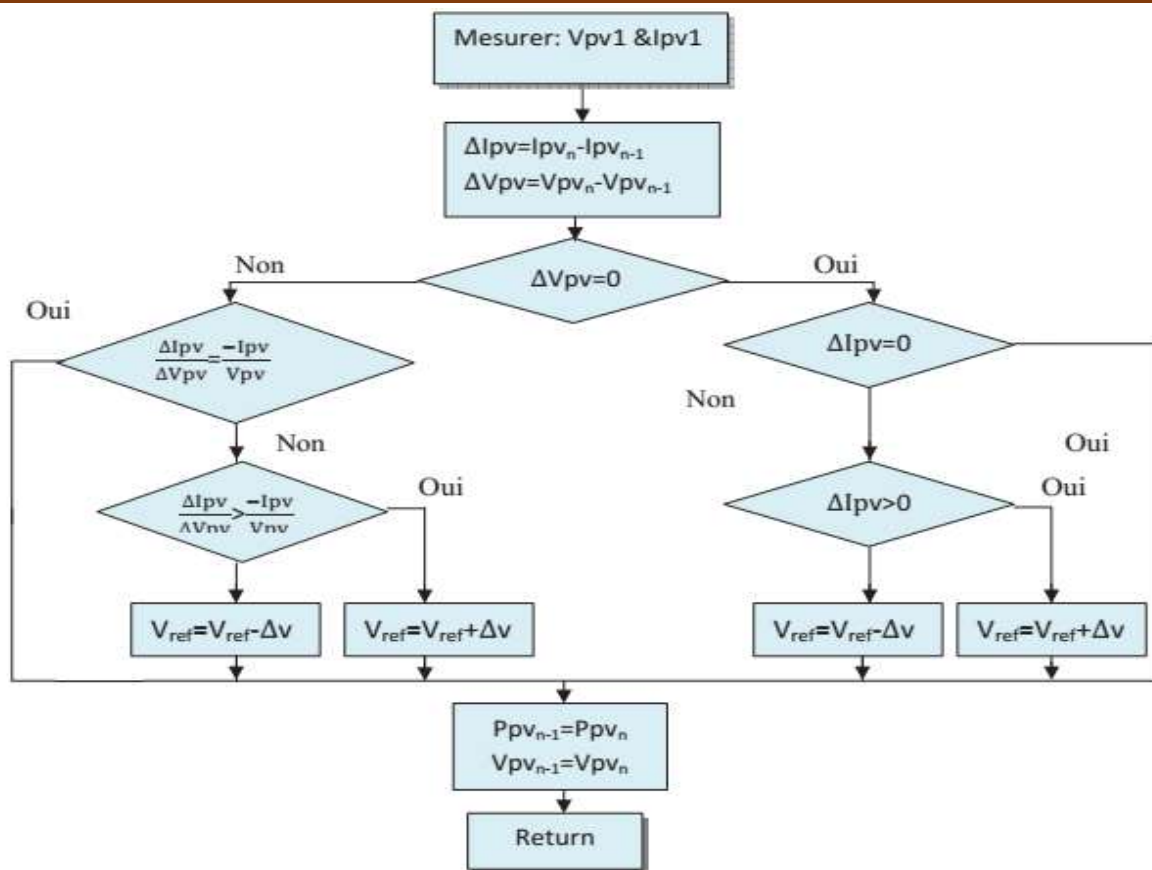


Fig (II.6): Trajectoire par Incrémentation de Conductance



Fig( II.7) : Algorithme d'incrément de la conductance

$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > 0$ : Le point de fonctionnement est à gauche du PPM.

$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0$ : Le point de fonctionnement sur le PPM .

$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < 0$ : Le point de fonctionnement est droit de PPM

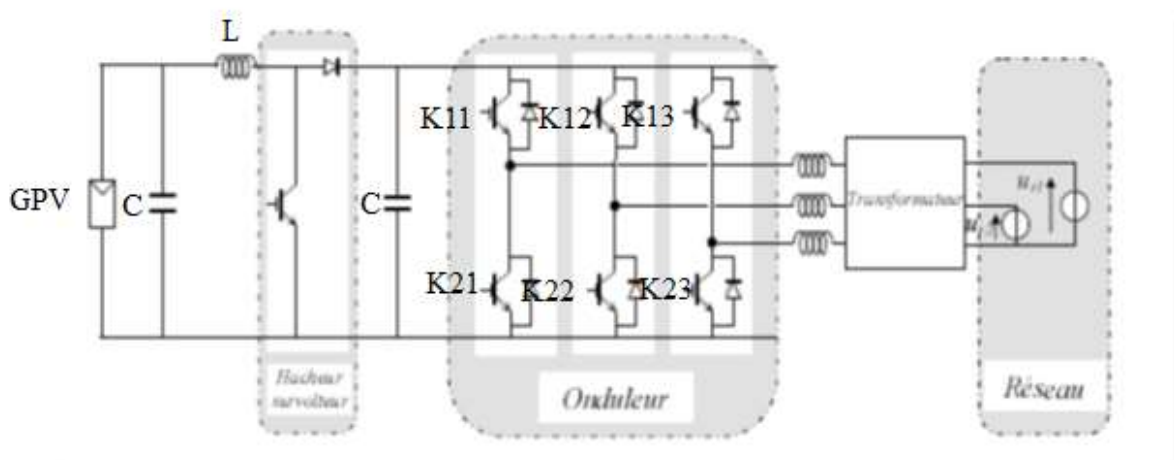
## II.4 Structures des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau

Deux types de structures de système photovoltaïque existent : un système à connexion directe au réseau à l'aide d'un onduleur et un système avec un bus continu par l'intermédiaire d'un convertisseur continu – continu (un onduleur délivre une tension modulée) [26].

### II.4-1 Structure avec hacheur et onduleur

Le générateur photovoltaïque est connecté à un bus continu par l'intermédiaire d'un convertisseur continu - continu. Un onduleur délivre une tension modulée. Celle-ci est filtrée pour réduire le taux d'harmonique (THD) On obtient alors en sortie de ce dispositif une tension utilisable pouvant être injectée dans le réseau [27]. Il existe plusieurs architectures pour les

dispositifs permettant de convertir la tension continue issue du générateur photovoltaïque en une tension sinusoïdale utilisable [28] [29].



Fig( II.8) : Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé

La figure (II.8) représente un hacheur qui élève la tension en sortie du module photovoltaïque. Avec le hacheur, il est difficile d'élever la tension de sortie des modules plus de 4 à 5 fois pour obtenir une tension continue suffisamment grande, en raison de la résistance de l'inductance. On adjoint un onduleur pour avoir une sortie sinusoïdale, puis un transformateur pour élever cette tension au niveau désiré (selon le réseau) et pour assurer l'isolation entre la partie " production " et la partie " utilisation ". L'avantage de ce système c'est que les batteries peuvent être facilement connectées au bus continu pour obtenir un système autonome.

#### II.4-2 Structures des systèmes à connexion directe au réseau

Les onduleurs ne se limitent plus seulement à transformer la puissance continue générée par les panneaux solaires en puissance alternative sous forme d'une tension (DC) de fréquence souhaitée (par ex. 230V/400V - 50Hz) mais ils exploitent également la puissance sinusoïdale délivrée par le GPV en le forçant à fonctionner à son point de puissance maximum. De plus, ils assurent une surveillance fiable du réseau pour protéger ce dernier contre les pannes et interrompre l'alimentation en cas de problème survenant soit du réseau soit de l'installation. Actuellement, il existe trois architectures d'onduleurs donnant de bonnes solutions techniques principalement trois architectures d'onduleurs donnant de bonnes [30]

- Un seul onduleur pour toutes les installations (onduleur simple ou central, figure II.9a)
- Un onduleur string ( pour chaque string, figure II.9b)

- Installations multi-onduleurs (installations multi-onduleurs, figure II.9c)

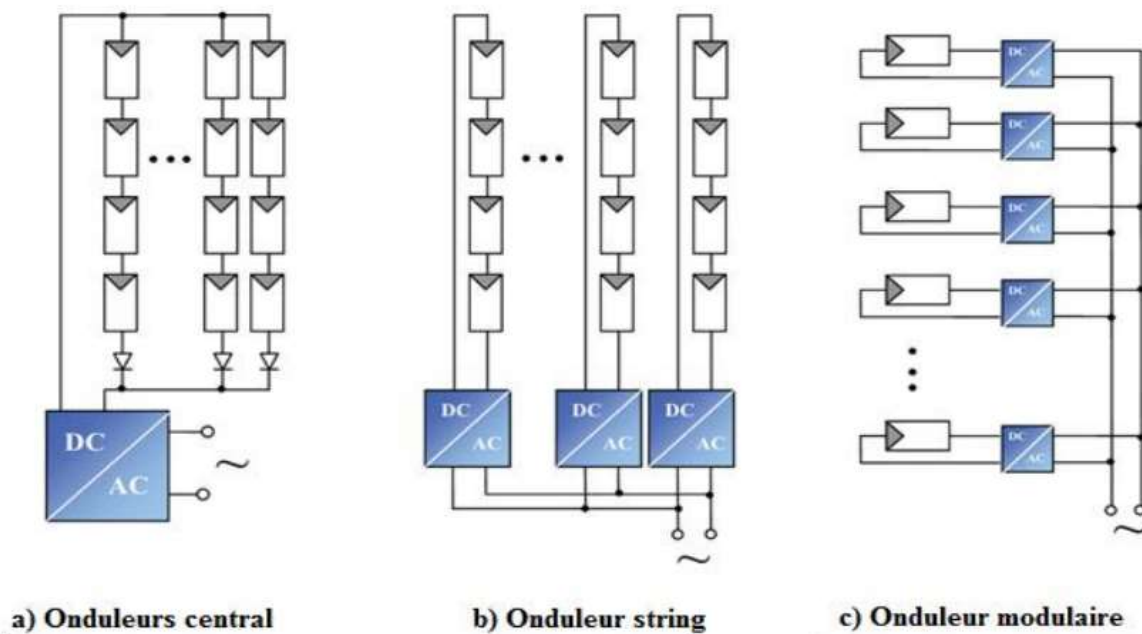


Fig (II.9) : Différentes topologies des installations PV connectés aux réseaux électriques.

#### II.4-2.1 Installation mono-onduleur (onduleur central)

Cette configuration est utilisée dans les petites installations avec des modules du même type ayant la même exposition. La présence d'un onduleur unique présente des avantages économiques, en réduisant l'investissement initial et les coûts d'entretien. Cependant, la défaillance de l'onduleur peut entraîner l'arrêt de la production de l'ensemble de l'installation. De plus, cette solution n'est pas très adaptée à l'agrandissement de l'installation PV, car elle augmente les problèmes de protection contre les surintensités et ceux liés à un ombrage différent (autrement dit lorsque l'exposition des panneaux n'est pas la même dans l'ensemble de l'installation).

Le fonctionnement de l'onduleur est régulé par le MPPT en tenant compte des paramètres moyens des strings raccordés à l'onduleur ; par conséquent, si tous les strings sont raccordés à un onduleur unique, l'ombrage ou la défaillance de tout ou partie des strings entraîne une réduction accrue des performances électriques de l'installation par rapport à d'autres configurations.

#### II.4-2.2 Installation avec un onduleur pour chaque string (onduleur string)

Dans une installation de taille moyenne, chaque string peut être directement raccordé à propre onduleur et donc fonctionner selon son propre Maximum Power Poin. Dans cette

configuration, la diode, qui empêche la source de circuler dans le sens inverse, est généralement incluse dans l'onduleur. Ce dernier réalise un diagnostic de la production et assure également la protection contre les surintensités et les surtensions d'origine atmosphérique du côté DC.

De plus, la présence d'un onduleur sur chaque string limite les problèmes de couplage entre les modules et les onduleurs de même que la réduction des performances causée par l'ombrage ou une exposition différente. Par ailleurs, avec plusieurs strings, des modules présentant différentes caractéristiques peuvent être utilisés, augmentant par conséquent l'efficacité et la fiabilité de l'ensemble de l'installation.

#### **II.4-2.3 Installation multi-onduleurs (Onduleur modulaire)**

Suivant ce concept, chaque module solaire dispose d'un onduleur individuel. Pour les installations plus importantes, tous les onduleurs sont connectés en parallèle côté courant alternatif. Les onduleurs modulaires sont montés à proximité immédiate du module. Dans les installations de grande taille, le champ PV est généralement divisé en un plus grand nombre de parties (sous-champs), chacune étant alimentée par un onduleur auquel différents strings sont raccordés en parallèle. Par rapport à la configuration précédente, le nombre d'onduleurs est dans ce cas inférieur, entraînant une réduction conséquente de l'investissement et des coûts d'entretien. Cette configuration présente également l'avantage de réduire les problèmes liés à l'ombrage et à la différence d'exposition des strings mais également ceux liés à l'utilisation de modules différents, à condition que les strings du sous-champ ayant des modules et une exposition identiques soient raccordés au même onduleur.

De plus, la défaillance d'un onduleur n'implique pas la perte de production de l'ensemble de l'installation (comme dans le cas de l'onduleur unique) mais du sous-champ correspondant uniquement. Il est recommandé de pouvoir déconnecter chaque string séparément, de manière à ce que les vérifications de fonctionnement et d'entretien requises puissent être réalisées sans mettre hors service l'ensemble du générateur PV. Dans cette configuration, le diagnostic de l'installation est réalisé par un système de supervision qui vérifie la production des différents strings.

#### **II.5 Caractéristiques propres d'un onduleur pour les systèmes photovoltaïques**

L'onduleur couplé au réseau est utilisé pour les installations photovoltaïques. Il permet de transformer le courant continu, produit par les modules solaires, en un courant ondulé conforme à celui du réseau. Il adapte également le courant produit à la fréquence et à la tension du réseau. Donc la principale caractéristique de l'onduleur PV est la recherche du

meilleur point de fonctionnement du système. En effet, le générateur PV a une courbe caractéristique I V non linéaire.

Dans les installations d'habitation, le courant solaire produit est d'abord utilisé par l'habitation elle-même, si le courant produit pour l'habitation est excédentaire, l'excédent est injecté dans le réseau [31].

Donc, un système de régulation soit obligatoire pour maintenir la tension et la fréquence aux valeurs nominales de réseau, quelle que soit la tension d'entrée et aussi un filtrage en sortie de l'onduleur, qui tend à lisser la forme de la tension donc à réduire le taux d'harmonique [32].

Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques diffèrent quelque peu des onduleurs classiques en électrotechnique, mais l'objectif de conversion DC/AC est le même. La principale caractéristique de l'onduleur PV réside dans la recherche du point de fonctionnement maximal où MPPT en anglais «Maximum Power Point Tracking» car le générateur PV a une caractéristique courant/tension non-linéaire [33].

## **II.6 Les inconvénients des onduleurs à deux niveaux**

Les onduleurs les plus connus jusqu'ici sont les onduleurs à deux niveaux. Ils sont largement utilisés, mais les appareils existants ont l'inconvénient majeur de présenter des pertes à vide ou à faible charge, très élevées, leur rendement n'est donc acceptable qu'à pleine charge [34].

Ces onduleurs à deux niveaux sont limités en tension (1.4 kV) et en puissance (1 MVA). Pour monter en puissance et en tension, on associe généralement plusieurs onduleurs en séries ou en parallèles, d'où une complication dans la commande et une augmentation du coût du système. Pour remédier à ces inconvénients, la solution naturelle consiste à réaliser une mise en série des éléments conducteurs de manière à réduire la tension à commuter en des valeurs plus petites et directement commutables par les semi-conducteurs actuels. Les onduleurs multi-niveaux permettent d'augmenter la tension.

## **II.7. Convertisseur multi niveaux**

Durant ces dernières années, on vit la naissance de nouveaux convertisseurs de puissance multi niveaux qui sont utilisés dans le domaine des entraînements de grande puissance trouvent une intégration rapide dans le domaine PV. Parmi les convertisseurs multi-niveaux, on peut citer les onduleurs multi niveaux.

Pour la génération de trois niveaux de tension, la topologie NPC présente plusieurs avantages par rapport à la topologie d'onduleur à deux niveaux. [35,36]

- les composants de puissance à semi-conducteur bloquent une tension inverse égale seulement à la moitié de la tension de la source continue.
- cette topologie peut être généralisée et les principes employés dans la topologie d'onduleur à trois niveaux peuvent être étendus pour l'utilisation dans des topologies avec n'importe quel nombre de niveaux.
- Toutes les phases partagent le même bus continu.
- La forme d'onde de trois niveaux résulte dans une meilleure qualité spectrale.

### II.8 Principe de fonctionnement de l'onduleur NPC

L'onduleur NPC à trois niveaux est représenté sur la figure (II.10). Le bus continu d'entrée composée de deux capacités en série ( $C1$  et  $C2$ ), formant un point milieu notée ( $O$ ) qui permet à l'onduleur d'accéder à un niveau de tension supplémentaire par rapport à l'onduleur classique à deux niveaux. La tension totale du bus continu vaut  $E$  ; dans les conditions normales de fonctionnement, celle-ci est uniformément répartie sur les deux capacités qui possèdent alors une tension  $E/2$  à leurs bornes : c'est l'hypothèse que l'on retiendra par la suite. Chacun des trois bras ( $A$ ,  $B$  et  $C$ ) de l'onduleur est composé de quatre interrupteurs commandés ( $K_{A1}$ ,  $K_{A2}$ ,  $K_{A3}$  et  $K_{A4}$  pour le bras  $A$ ) et deux diodes de clamp ( $Dcl_{A1}$  et  $Dcl_{A2}$ ) connectées au point milieu du bus continu. Les interrupteurs commandés sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant : il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle.

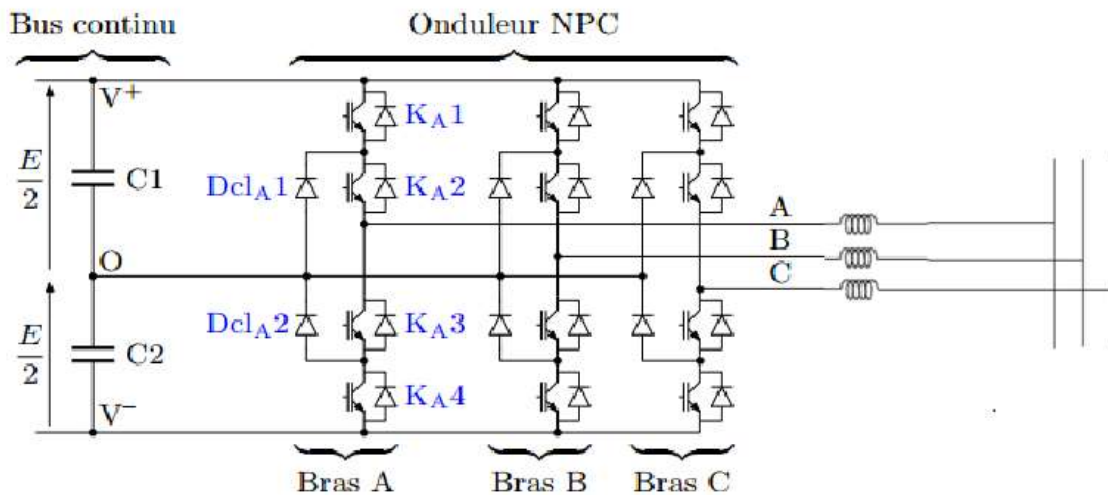


Fig (II.10): Onduleur triphasé à trois niveaux

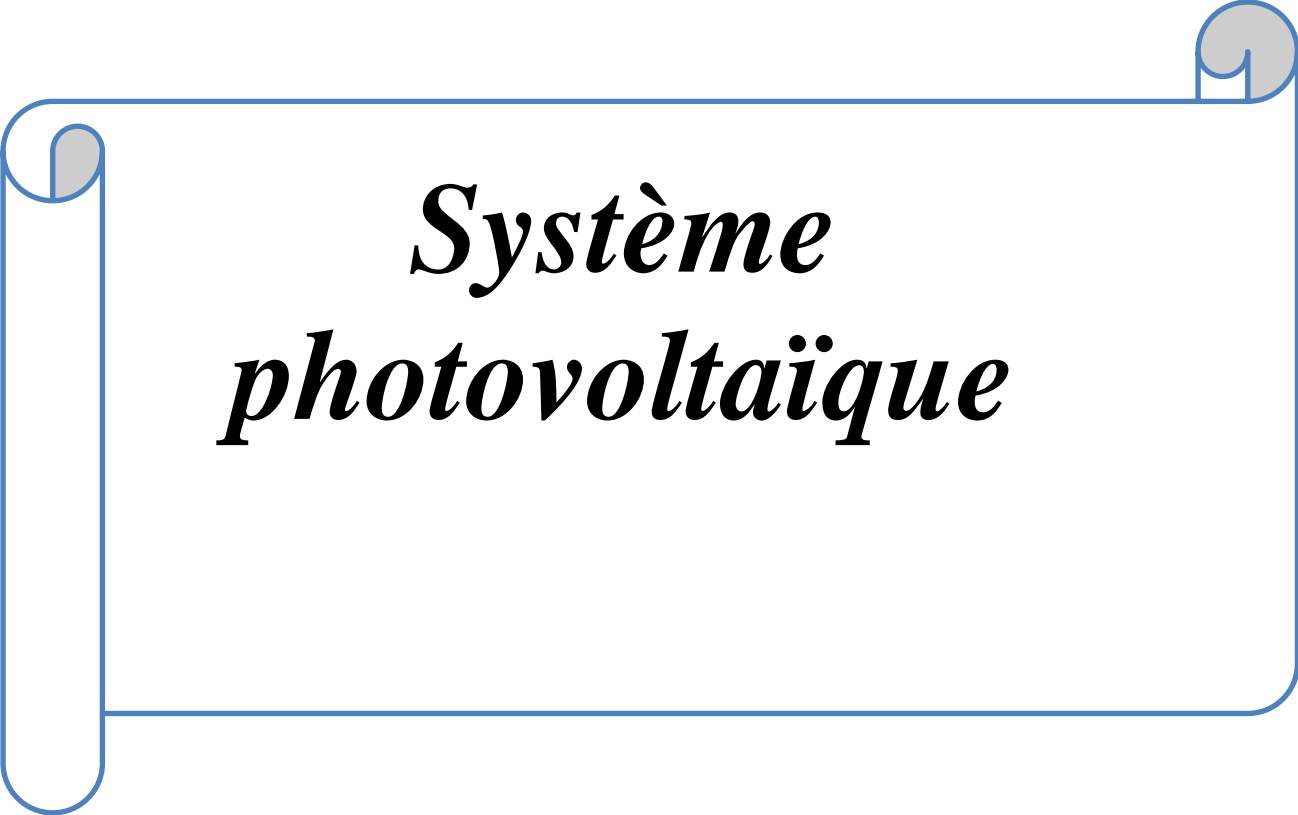
En fonction de la configuration des interrupteurs commandés, chaque tension simple ( $V_{AO}$ ,  $V_{BO}$ ,  $V_{CO}$ ) entre une phase (A, B ou C) et le point milieu (O) du bus continu peut prendre les valeurs  $\frac{E}{2}$ , 0 ou  $-\frac{E}{2}$ . Ainsi pour le bras A, les configurations utiles sont les suivantes :

- ❖  **$K_{A1}$  et  $K_{A2}$  commandés** : la phase A se retrouve au potentiel de  $V^+$  et la tension  $V_{AO}$  vaut  $\frac{E}{2}$ .  
 Si  $i_A > 0$ , le courant circule par les transistors de  $K_{A1}$  et  $K_{A2}$ ;  
 Si  $i_A < 0$ , le courant passe dans les diodes antiparallèles de  $K_{A1}$  et  $K_{A2}$ .
- ❖  **$K_{A2}$  et  $K_{A3}$  commandés** : A se retrouve au potentiel du point O et la tension  $V_{AO}$  est nulle.  
 Si  $i_A > 0$ , le courant circule par la diode  $D_{Cl_{A1}}$  et le transistor de  $K_{A2}$ ;  
 Si  $i_A < 0$ , le courant passe dans le transistor de  $K_{A1}$  et la diode  $D_{Cl_{A3}}$ .
- ❖  **$K_{A3}$  et  $K_{A4}$  commandés** : A se retrouve au potentiel de  $V^-$  et la tension  $V_{AO}$  vaut  $-\frac{E}{2}$ .

## II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types des convertisseurs entre les générateurs PV et les charges. On a exposé les différents convertisseurs à savoir DC/DC et DC/AC. Pour les seconds convertisseurs, on a donné les différentes topologies des onduleurs utilisés dans les systèmes PV pour leur raccordement aux réseaux électriques, ce qui permet la simulation du système (générateur photovoltaïque, onduleur) qu'on va présenter dans le chapitre suivant.

# **Chapitre III**



## ***Système photovoltaïque***

### III.1 Introduction

Au niveau mondial, le marché des systèmes photovoltaïques connaît, depuis maintenant plus de 10 ans, un taux de croissance très élevé, de l'ordre de 30 à 40% par an. Cette croissance exceptionnelle, due principalement aux systèmes photovoltaïques raccordés au réseau de distribution d'électricité, se traduit bien évidemment par des innovations technologiques et une baisse de coûts des modules photovoltaïques mais aussi à des efforts importants de recherche et développement dans le domaine de l'électronique de puissance. En effet, les performances techniques et la fiabilité des onduleurs utilisés pour le raccordement des modules photovoltaïques au réseau de distribution d'électricité, sont des paramètres qui peuvent très fortement faire varier la production d'énergie électrique annuelle et donc la rentabilité financière d'un système. L'objectif dans ce chapitre est de mieux faire connaître ces appareils d'électronique de puissance en présentant leur principe de fonctionnement, leur commande prédictive ainsi que le filtrage des harmoniques. Le deuxième, c'est un modèle global ou comportemental, dans ce cas on a utilisé le logiciel MATLAB pour la modélisation des différents composants d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau électrique (à savoir le modèle du générateur photovoltaïque PV), à partir du système des équations simulées sur l'environnement MATLAB, on peut déduire les points de puissances maximales. La réponse d'un tel système dépend dans une grande mesure du lieu géographique, où l'installation sera réalisée et des facteurs aléatoires, tels que des conditions atmosphériques variables (éclairage solaire incident, température), donnera directement l'énergie électrique produite par la centrale photovoltaïque connectée au réseau électrique.

Dans ce chapitre, et afin de montrer le fonctionnement d'une source PV associée à un réseau électrique via un onduleur triphasé deux et trois niveaux, le dimensionnement des différents composants du système va être présenté et la simulation des différents étages sera réalisée. Le but de la modélisation et la simulation des composants de la centrale grâce au logiciel MATLAB est d'aider à comprendre les critères de conception et de dimensionnement des systèmes PV connectés au réseau. Ces critères permettent de déduire l'énergie électrique injectée au réseau.

### III.2 Structure de connexion avec un Onduleur triphasé unique

Le dispositif présenté dans la figure (III.1) est le plus simple, car il comporte le moins de composants possibles. L'association de plusieurs modules photovoltaïques en série à pour but

l'obtention d'une tension continue suffisamment grande. Cette solution est une alternative à un hacheur élévateur de tension.

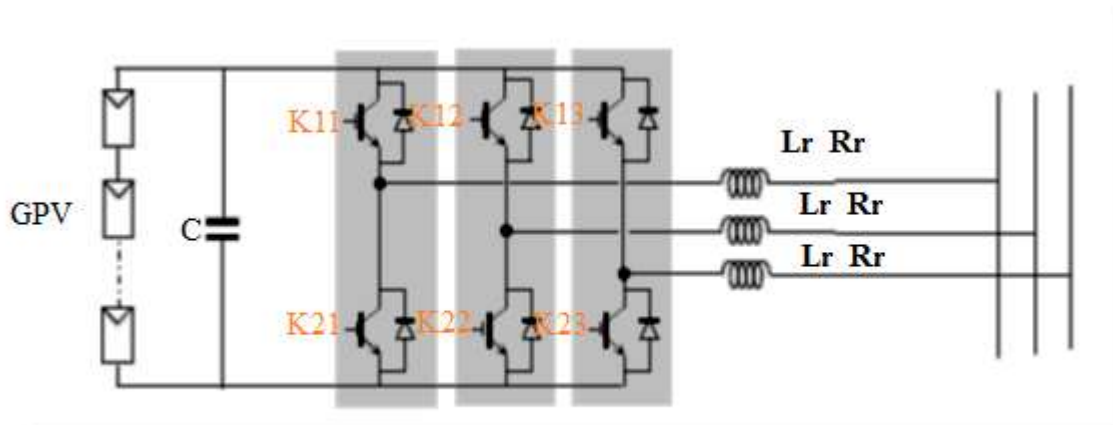


Fig (III.1) : Mise en série de Plusieurs modules PV a un seul onduleur

La tension continue obtenue alimente directement un onduleur central, qui fournit la tension sinusoïdale désirée. On pourra aussi insérer un transformateur pour isoler le système photovoltaïque du réseau.

### III.3 Adaptation de l'énergie produite par le photovoltaïque avec le réseau

Dans une installation raccordée au réseau, l'appareil de conditionnement de la puissance est un onduleur qui représente l'élément clé le plus délicat de l'installation. Situé à l'interface entre le champ PV et le réseau, il doit être adapté aux impératifs techniques et doit assurer la sécurité de deux sous-systèmes électriques très différents. A présent notre travail se fixera sur la modélisation, ainsi la commande de ce convertisseur. Notons que la simulation s'effectuera sous MATLAB/SIMULINK

#### III.3.1 Modélisation de l'Onduleur triphasé à deux niveau

La plupart des onduleurs sont des structures en pont constituées le plus souvent d'interrupteurs électroniques comme des IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Le choix de ce type de composant relève, d'une part de sa particularité à pouvoir commuter de très grandes valeurs de courant et tension à des fréquences de découpage de plusieurs dizaines de kHz et d'autre part, parce qu'il permet la suppression de tous les circuits d'aide à la commutation des montages à thyristors [32]

L'onduleur de tension triphasé est composé de trois cellules de commutations **C1**, **C2** et **C3**, le total donne six interrupteurs. Chaque cellule comporte deux interrupteurs **K11** et **K21** pour la

cellule C1, K12 et K22 pour la cellule C2, K13 et K23 pour la cellule C3. Le schéma de l'onduleur de tension triphasé raccordé au réseau électrique est le suivant [37]:

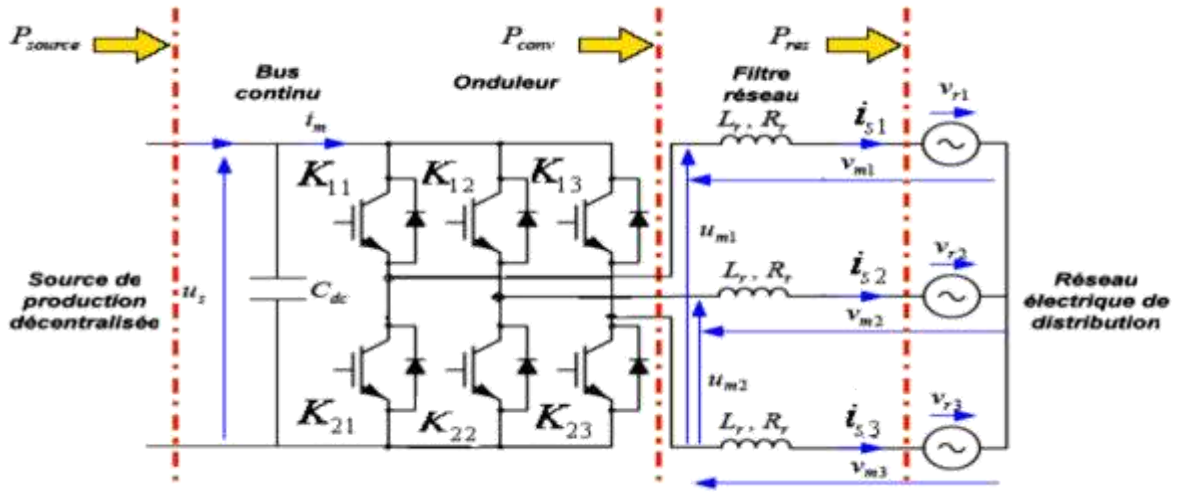


Fig (III.2) : Structure de l'onduleur de tension triphasé raccordé au réseau

L'onduleur est modélisé en associant à chaque bras une fonction logique. L'état des interrupteurs peut être défini par trois grandeurs booléennes de commande  $S_i$  avec  $i \in \{a, b, c\}$

- Si le transistor supérieur est en conduction, les variables  $S_i = 1$
- Si le transistor inférieur est en conduction, les variables  $S_i = 0$
- Vecteurs de tension d'un onduleur à deux niveaux dans l'espace d'état

Le vecteur de tension  $V$  est directement calculé à partir des états des 6 interrupteurs de puissance de l'onduleur et de la tension continue  $V_{dc}$ .

La transformation des vecteurs dans l'espace d'état sont données par :

$$\bar{x} = \frac{2}{3} \left( x_1 + x_2 e^{j\frac{2\pi}{3}} + x_3 e^{-j\frac{2\pi}{3}} \right) = \frac{2}{3} (x_1 + ax_2 + a^2x_3) \quad \text{III.1}$$

Avec :  $x_1, x_2, x_3$  sont des variables qui représentent des tensions dans ce cas.

$$a = e^{(j2\pi/3)} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Alors les vecteurs de tension dans l'espace d'états sont :

$$V = \frac{2}{3} (V_{aN} + aV_{bN} + a^2V_{cN}) \quad \text{III.2}$$

Où  $(V_{aN}, V_{bN}, V_{cN})$  les voltages des phases neutre (N) sont définis par :

$$V_{aN} = S_a V_{ds} \quad \text{III.3}$$

$$V_{bN} = S_b V_{ds} \tag{III.4}$$

$$V_{cN} = S_c V_{ds} \tag{III.5}$$

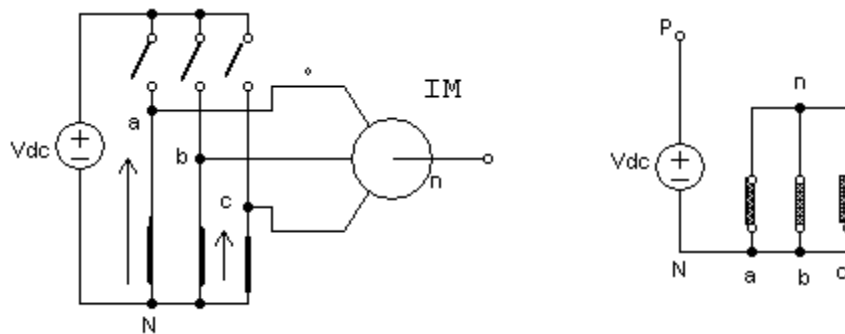
L'état de commutation du convertisseur peut être exprimé en forme vectorielle par :

$$S = \frac{2}{3} (S_a + aS_b + a^2 S_c) \tag{III.6}$$

De cette façon, état des interrupteur  $(S_a, S_b, S_c) = (0, 0, 0)$  produit le vecteur de tension  $V_0$  défini comme suit :

$$V_0 = \frac{2}{3} (0 + a \times 0 + a^2 \times 0) = 0 \tag{III.7}$$

Cette configuration est représentée par la figure (III-3) :



Fig( III .3): configuration de l'onduleur à deux niveaux pour l'état des interrupteurs (0, 0, 0) (vecteur de tension  $V_0$ )

✓ État (1, 0, 0) produit le vecteur de tension  $V_1$ , qu'il dé fini comme suit :

$$V_1 = \frac{2}{3} (1 \times V_{ds} + a \times 0 + a^2 \times 0) = \frac{2}{3} V_{ds} \tag{III.8}$$

Il existe huit combinaisons possibles pour les bras . Six sur ces huit topologies produisent la tension et sont connues en tant que les états différents de zéro de commutation et deux topologies restantes produisent la tension nulle et sont connues en tant que les états zéro de commutation. Considèrent que toutes les combinaisons possibles avec les vecteurs de tension sont obtenus, sont données dans le tableau (III.1)

Les six vecteurs de tension différents de zéro ( $V_1$ - $V_6$ ) peuvent être montrés pour prendre les positions montrées dans la figure (III.4).

V	Sa	Sb	Sc	V(abc)n			Voltage vector V
				Van	Vbn	Vcn	
V0	0	0	0	0	0	0	0
V1	1	0	0	Vdc	0	0	$\frac{2}{3}Vdc$
V2	1	1	0	Vdc	Vdc	0	$\left(\frac{1}{3} + j\frac{\sqrt{2}}{3}\right)Vdc$
V3	0	1	0	0	Vdc	0	$\left(-\frac{1}{3} + j\frac{\sqrt{2}}{3}\right)Vdc$
V4	0	1	1	0	Vdc	Vdc	$-\frac{2}{3}Vdc$
V5	0	0	1	0	0	Vdc	$-\left(\frac{1}{3} + j\frac{\sqrt{2}}{3}\right)Vdc$
V6	1	0	1	Vdc	0	Vdc	$-\left(-\frac{1}{3} + j\frac{\sqrt{2}}{3}\right)Vdc$
V7	1	1	1	Vdc	Vdc	Vdc	0

**Tableau (III.1) :** État des interrupteurs et les vecteurs de tension

Les autres des deux vecteurs de tension ( $V_0$ ,  $V_7$ ) sont représentées comme des vecteurs qui ont un amplitude nul.

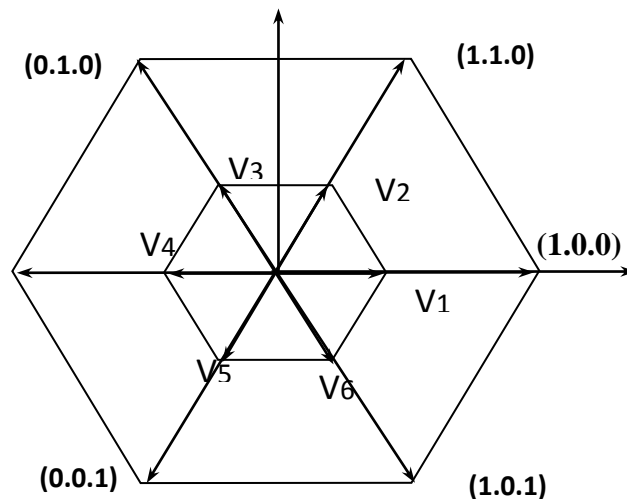


Fig (III .4) : diagramme vectoriel de l'onduleur

**III.3-2 Modélisation de l'Onduleur triphasé à trois niveau:**

L'onduleur triphasé à trois niveaux utilisé est constitué de trois bras et de deux sources de tension continue. Chaque bras comporte quatre interrupteurs en série et deux diodes médianes. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et une diode montée en tête bêche, [31]

La figure (III.5) fournit une représentation schématique d'un bras de cet onduleur :

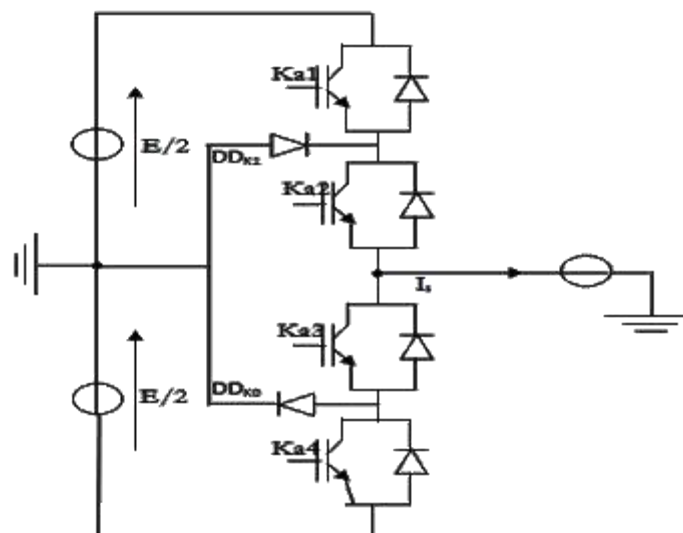


Fig (III.5): Un bras de l'onduleur à trois niveaux de type NPC

Il faut déterminer les valeurs que peut prendre la tension simple  $V_{ao}$  entre la borne (a) de la charge et le point neutre 0. Cette tension est entièrement définie par l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs  $K_{a1}$ ,  $K_{a2}$ ,  $K_{a3}$  et  $K_{a4}$  du bras.

L'onduleur à trois niveaux étant symétrique, l'étude peut se limiter au fonctionnement d'un bras, (où on distingue trois configurations possibles).

On donne ci-dessous le tableau récapitulatif tableau (III.1) représente la tension de sortie  $V_{ao}$  d'un onduleur NPC à trois niveaux en fonction de l'état des interrupteurs, la tension au des interrupteurs de puissance n'excède jamais la moitié du bus d'entrée, [11]. borne

A la différence de l'onduleur à deux niveaux, chaque demi-bras de l'onduleur à trois niveaux utilisée non pas un interrupteur bidirectionnel mais deux, ce qui permet d'effectuer une commande décalée, [17].

Etat des interrupteurs				Tension de sortie
Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	
1	1	0	0	$E/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

**Tableau ( III .2):** Grandeur connue pour chacune des configurations d'un bras de l'onduleur NPC à trois niveaux

Par la suite, on symbolisera ces différents états par la notation 1, 0 ou -1 correspondant respectivement aux niveaux de tension  $E/2$ , 0 et  $-E/2$ .

Ainsi, les transitions de ce bras entre l'état 1 et l'état 0 s'effectuent par commutation entre les interrupteurs Ka1 et Ka3, avec Ka2 toujours fermé et Ka4 toujours ouvert. De la même manière, les transitions entre l'état 0 et l'état -1 s'effectuent par commutation entre les interrupteurs Ka2 et Ka4, avec Ka1 ouvert et Ka3 fermé. Chacun des trois bras de l'onduleur pouvant prendre indépendamment les trois états 1, 0 ou -1, l'ensemble des possibilités pour l'onduleur complet s'élève à  $3^3$ , soit 27 états. Ceux-ci sont répertoriés dans le tableau (III.1).

L'ensemble des vecteurs tensions délivrées par un onduleur à trois niveaux ainsi que les séquences de niveaux de phase correspondantes sont représentés dans la figure (III.6).

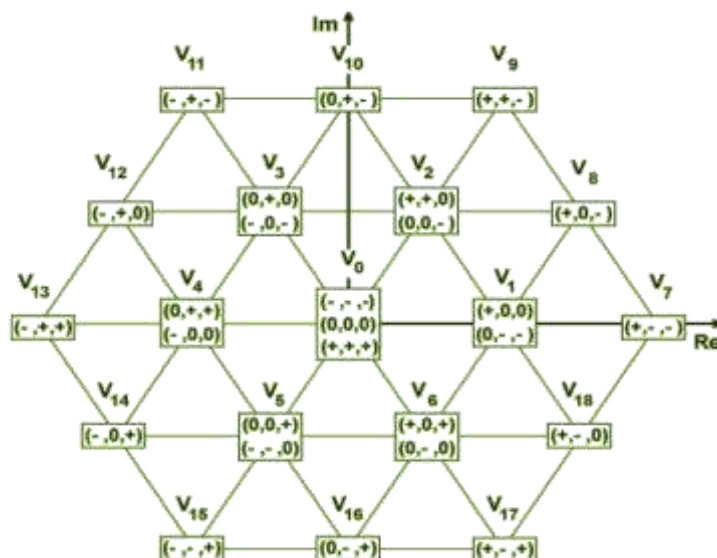


Fig III.6: Vecteurs tension que peut fournir l'onduleur à 3-niveaux de tension

E tats des bras			Tension $v_{cm}$
Bras <i>a</i>	Bras <i>b</i>	Bras <i>c</i>	
1	1	1	$E/2$
1	1	0	$E/3$
1	1	-1	$E/6$
1	0	1	$E/3$
1	0	0	$E/6$
1	0	-1	0
1	-1	1	$E/6$
1	1-	0	0
1	-1	-1	$-E/6$

E tats des bras			Tension $v_{cm}$
Bras <i>a</i>	Bras <i>b</i>	Bras <i>c</i>	
0	1	1	$E/3$
0	1	0	$E/6$
0	1	-1	0
0	0	1	$E/6$
0	0	0	0
0	0	-1	$-E/6$
0	-1	1	0
0	1-	0	$-E/6$
0	-1	-1	$-E/3$

E tats des bras			Tension $v_{cm}$
Bras <i>a</i>	Bras <i>b</i>	Bras <i>c</i>	
-1	1	1	$E/6$
-1	1	0	0
-1	1	-1	$-E/6$
-1	0	1	0
-1	0	0	$-E/6$
-1	0	-1	$E/3$
-1	-1	1	$-E/6$
-1	1-	0	$-E/3$
-1	-1	-1	$-E/2$

Tableau (III .3) : Etats possibles de l'onduleur NPC à trois niveaux et leur tension de mode commun

### III.3.3. Principe de la Commande Prédictive

La commande prédictive, appelée aussi compensation ou correction anticipatrice, est une technique de commande avancée. Le principe de cette commande est d'utiliser un modèle dynamique du processus commandé à l'intérieur du contrôleur en temps réel afin d'anticiper le futur comportement du procédé.

Les processus industriels, pour une grande partie d'entre eux, doivent également suivre certaines consignes. Les actions "naturelles" naissant de la volonté de prédiction peuvent être aussi transposées dans cadre de la commande de processus. En effet, les actions déterminées par avance pour un système dynamique peuvent être réparties en deux points:

- L'action liée à la poursuite de trajectoire au cours du temps.
- L'action liée à la stabilisation autour des trajectoires, c'est -à-dire, le rejet de perturbations.

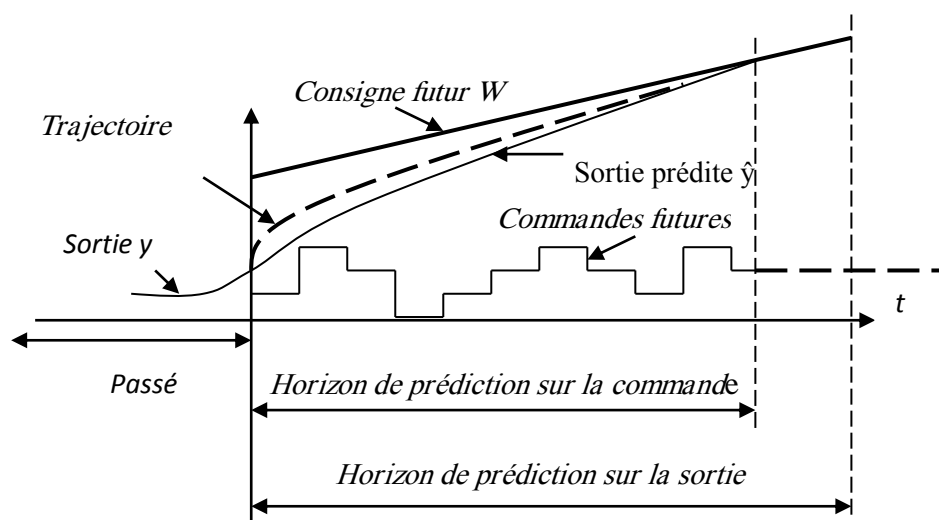


Fig (III .7): Evolution temporelle de la prédiction

Les avantages cités précédemment confèrent à la commande prédictive une grande aptitude pour être appliquée aux convertisseurs statiques de l'électronique de puissance. Pour ces convertisseurs de puissance, il est aisé d'introduire ce genre de commande étant donné le nombre fini de combinaisons topologiques possibles. Ainsi, nous pouvons chercher à déterminer quelle est la meilleure configuration à imposer au sens d'un critère prédéfini.

### III.3.4 Principaux de cette stratégie pour contrôler l'onduleur à deux niveaux

L'idée principale est de minimiser une fonction coût, cette fonction est basée sur la somme quadratique des écarts de puissance active et réactive et leurs valeurs prédites. Les futures valeurs des puissances sont calculées en utilisant un modèle temporel discret. Les puissances active et réactive sont directement contrôlées en sélectionnant l'état de commutation optimal dans le but d'obtenir une meilleure convergence des puissances active et réactive vers leurs références respectives.

Le réseau est modélisé par une FEM triphasée sinusoïdale en série avec une inductance " $l$ " et une résistance " $r$ " qui représentent l'impédance totale de la ligne [38].

On suppose le réseau équilibré, avec les mêmes impédances dans les trois phases, les tensions de ligne sont exprimées comme suit :

$$V_{[3]} = R_g I_{g[3]} + L_g \frac{dI_{g[3]}}{dt} + V_{g[3]} \quad \text{III.9}$$

Avec l'approximation du dérivé du courant de réseaux  $\frac{dI_g}{dt}$  dans (9) pendant un temps  $T$  est :

$$\frac{dI_g}{dt} = \frac{I_g(k+1) - I_g(k)}{T} \quad \text{III.10}$$

Alors les courants de réseaux en futur sont obtenus sous forme discret :

$$I_g(k+1) = \frac{I}{R_g T + L_g} (L_g I_g(k) + TV(k+1) - TV_g(k+1)) \quad \text{III.11}$$

Les courants de réseaux  $I_g(k)$  sont mesurés et employés pour prédire  $I_g(k+1)$ . Alors une transformation de coordonnées ( $\alpha - \beta$ ) est employée pour découpler les deux composants par :

$$I_g(k+1) = I_{g\alpha}(k+1) + jI_{g\beta}(k+1)$$

La commande est basée sur le modèle prédictif des puissances active et réactive. Ce dernier est obtenu à partir du modèle de l'onduleur dans le repère stationnaire  $\alpha - \beta$ . Les valeurs prédictives des puissances pour un vecteur de commutation donné  $v_{ci}$  où ( $i = 0, 1, \dots, 7$ ) du diagramme vectoriel de l'onduleur, sont données par :

$$\begin{aligned}
 P_g(k+1) &= V_{g\alpha}(k+1)I_{g\alpha}(k+1) + V_{g\beta}(k+1)I_{g\beta}(k+1) \\
 Q_g(k+1) &= V_{g\beta}(k+1)I_{g\alpha}(k+1) - V_{g\alpha}(k+1)I_{g\beta}(k+1)
 \end{aligned}
 \tag{III.12}$$

### III.3.5 Principe de sélection du vecteur de commande optimal

La commande prédictive est basée sur l'application d'un seul vecteur de commande durant une période d'échantillonnage, avec le vecteur de commande appliqué cette fois-ci est optimal [36].

Dans le cas idéal, la convergence des puissances commandées active et réactive leurs consignes est atteinte si la condition ci-dessous est vérifiée :

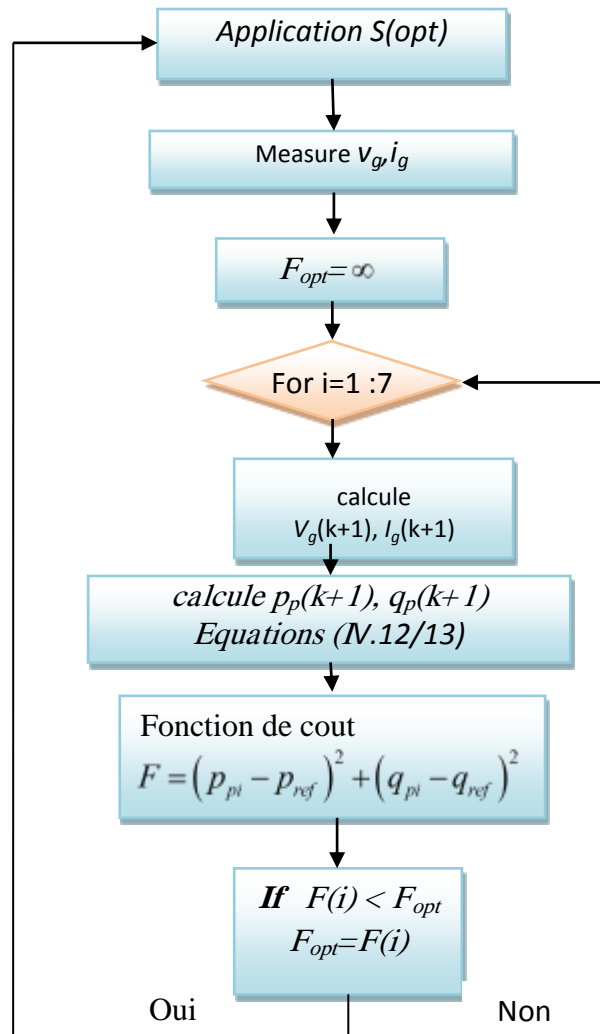
$$\begin{aligned}
 e_p &= p_{pi} - p_{ref} \\
 e_q &= q_{pi} - q_{ref}
 \end{aligned}
 \tag{III.13}$$

Cette fonction sera calculée pour chaque vecteur de commutation, et le vecteur qui minimise cette fonction sera alors choisi:

$$F = (p_{pi} - p_{ref})^2 + (q_{pi} - q_{ref})^2
 \tag{III.14}$$

### III.3.6 Algorithme de la commande prédictive

La commande prédictive dans ce cas basée sur les données des composantes mesurés des vecteurs de tension  $v_{sabc}(k)$ , les courants mesuré  $i_{sabc}(k)$ , avec les références la puissance actives  $p^*(k)$ , la puissance réactive  $q^*(k)$  et la tension continu  $V_{dc}(k)$  aussi, en utilisant les deux équations (III.13) et (III.14), pour prédit  $p_p(k+1)$  et  $q_p(k+1)$  pour ce vecteur de tension  $v_{ci}(k)$  où  $v_c = [v_1, \dots, v_7]$ , le principe est illustrée sur la figure (III.8).



Fig( III .8): Algorithme de la commande prédictive

Les valeurs prédit de la puissance active et réactive sont employées pour évaluer une fonction de coût  $F$  qui réduit au minimum l'erreur entre les valeurs prédites et leurs références, l'état de commutation (correspond à un vecteur optimal de tension à partir le huit états) qui produit la valeur minimum de cette fonction de coût est choisie à appliquer durent le temps suivant.

La référence de la puissance active  $P_g^*$  peut être exprimé [39] :

$$P_g^* \approx P_{pv} - P_{dc}^* - P_J$$

$$P_J = 3R_g I_g \bar{I}_g$$

III.15

avec  $P_{pv}$  La puissance produite par le générateur PV ,  $P_{dc}^*$  la puissance du bus continu, avec la tension continue on utiliser le correcteur PI pour produit la puissance active de référence  $P_{dc}$ .

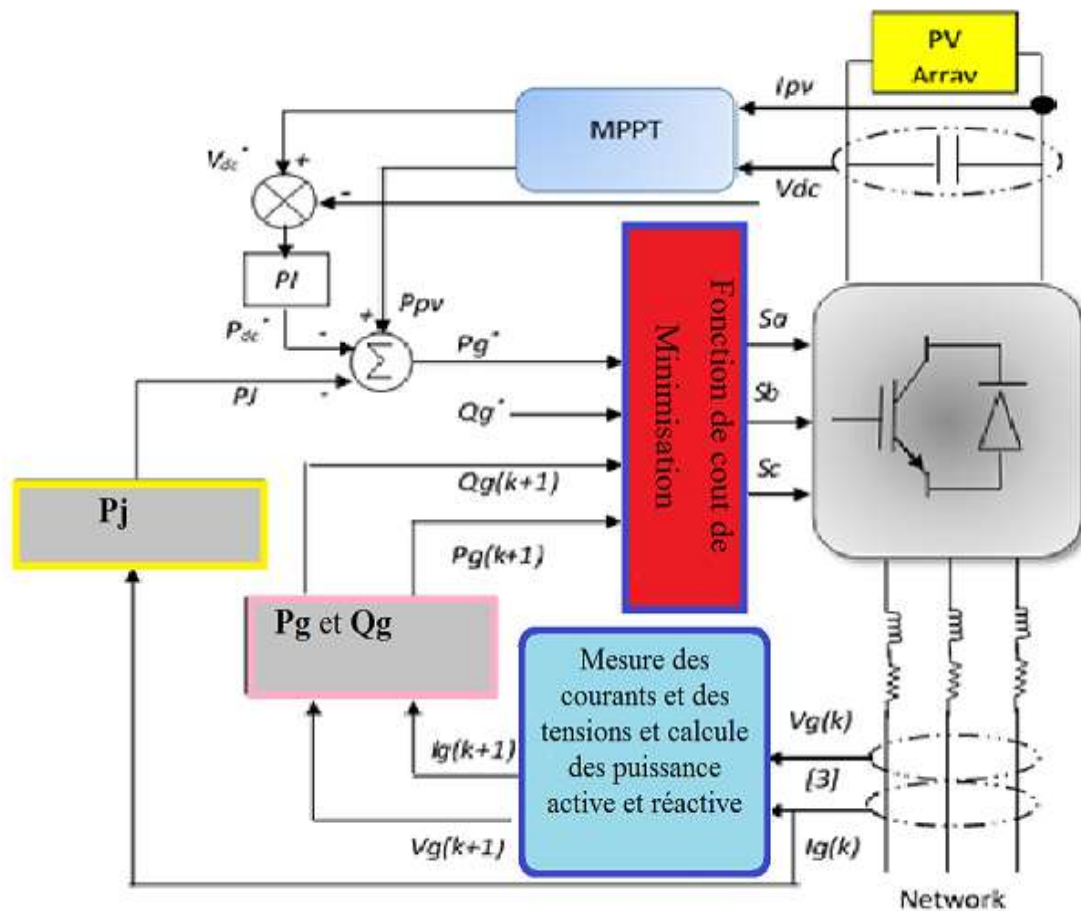
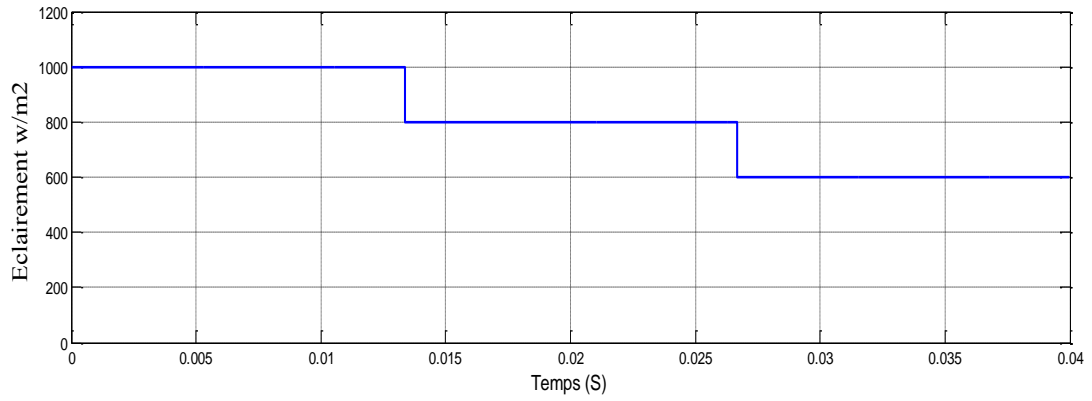


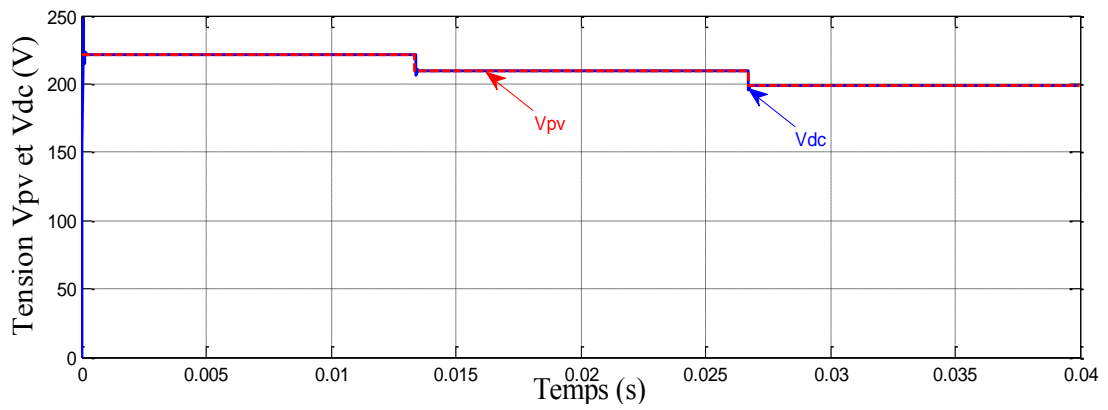
Fig (III .9): schéma de contrôle de la commande prédictive

### III.4 Résultat de simulation

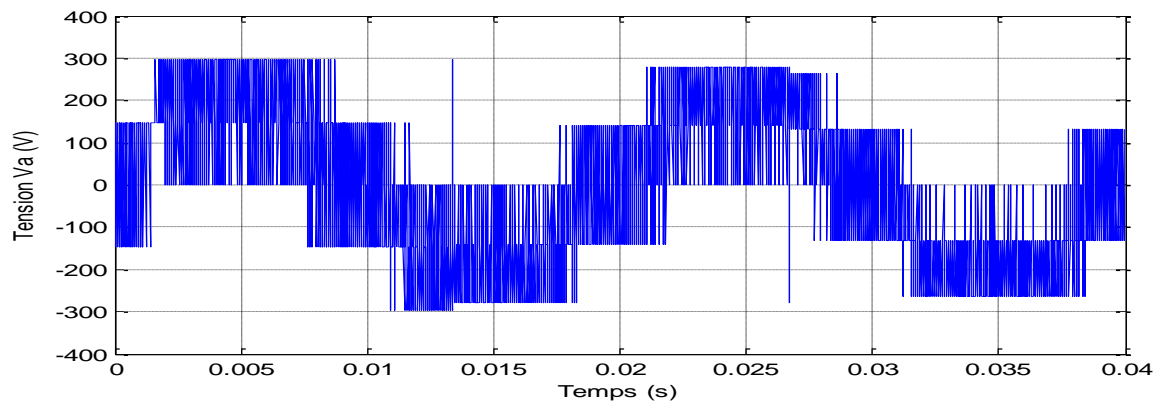
Pour la simulation de système PV connecté au réseau et vérifié le bon fonctionnement de notre MPPT et la commande prédictive, on a utilisé le système à commande prédictive avec une perturbation sur l'éclairement de  $E=1000\text{w/m}^2$  à  $600\text{w/m}^2$  et une température fixe  $T=25^\circ\text{C}$ , Ainsi la puissance active de ce générateur diminue à l'instant  $0.013\text{s}$  et  $0.027\text{s}$  par la diminution de l'éclairement. Les résultats obtenus avec un onduleur à deux niveau est la suivante :



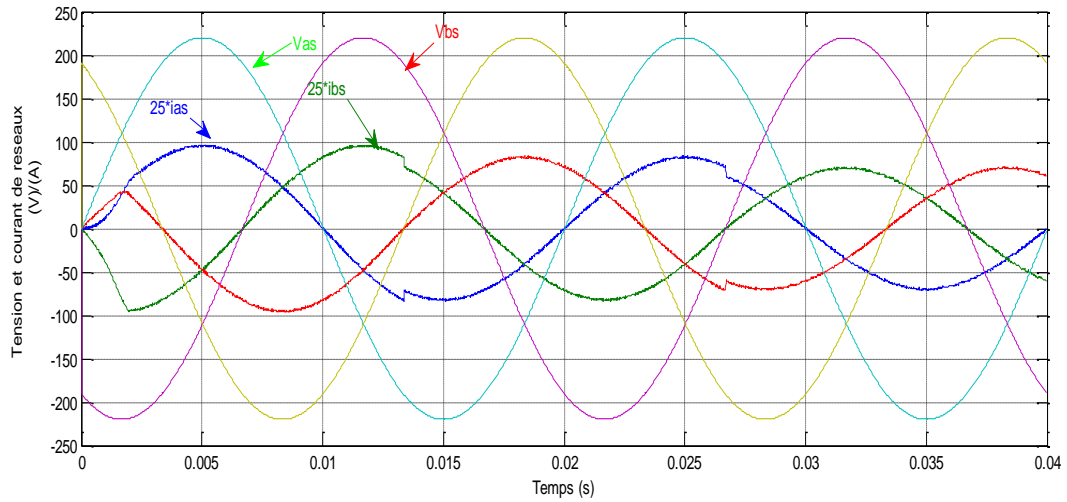
Fig( III .10) :L'éclairement de rayonnements solaires



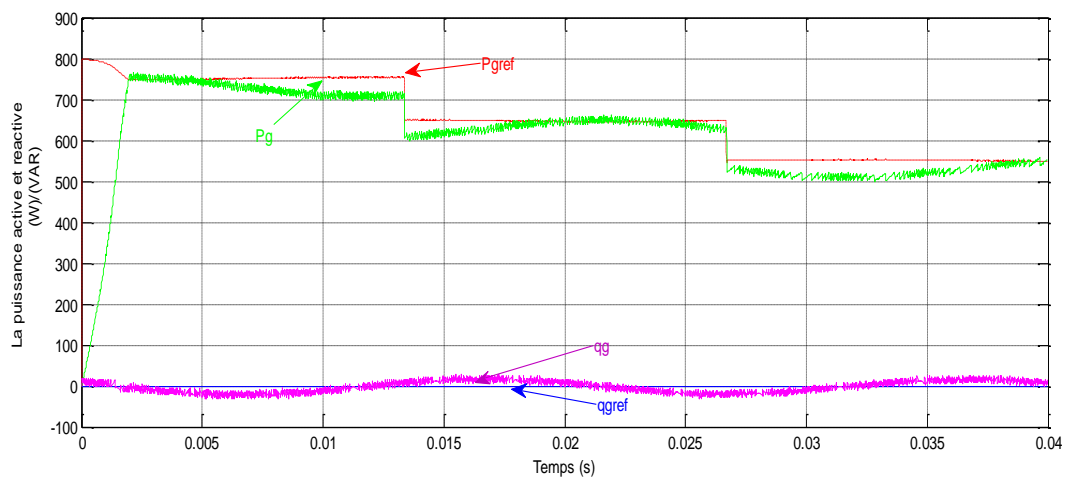
Fig( III.11) : La tension de générateur photovoltaïque



Fig( III .12) : Tension composée à la sortie de l'onduleur à deux niveau

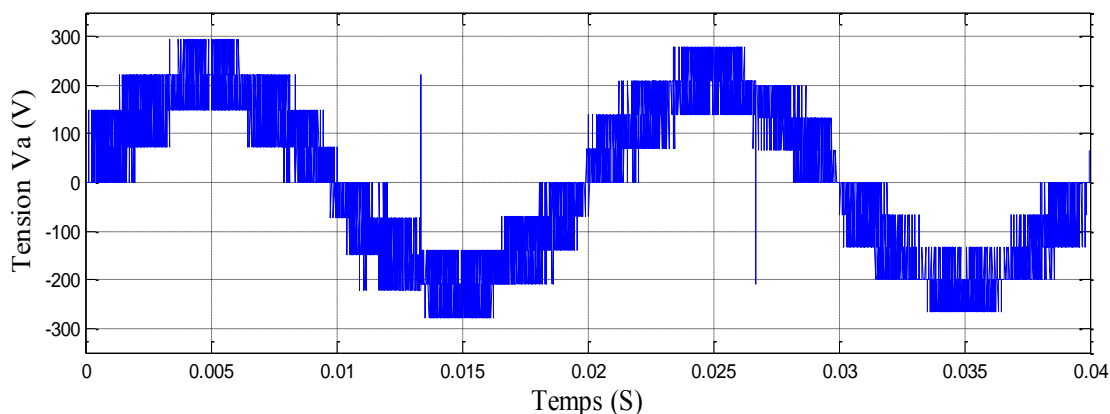


Fig( III .13) : Le courant et la tension de réseaux pour un onduleur à deux niveau

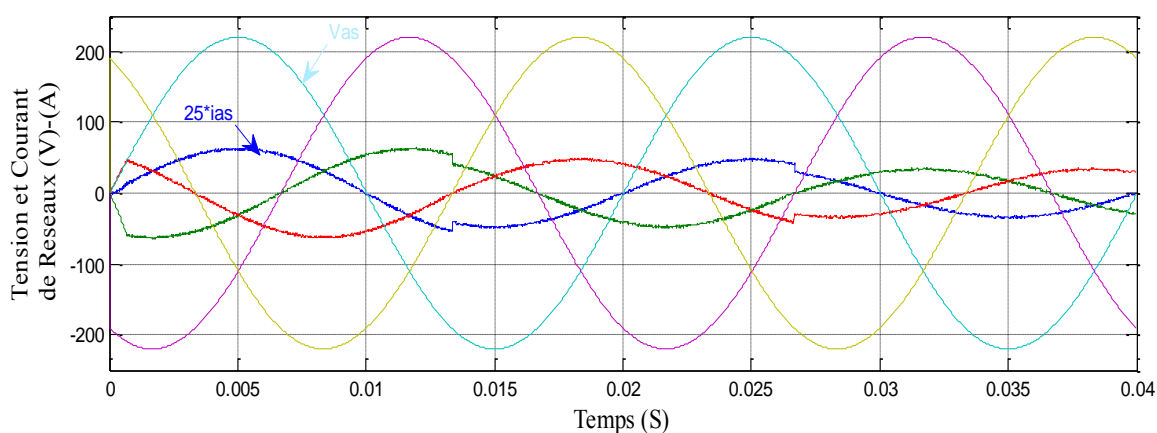


Fig( III .14): Les puissances active et réactive délivrée par générateur PV

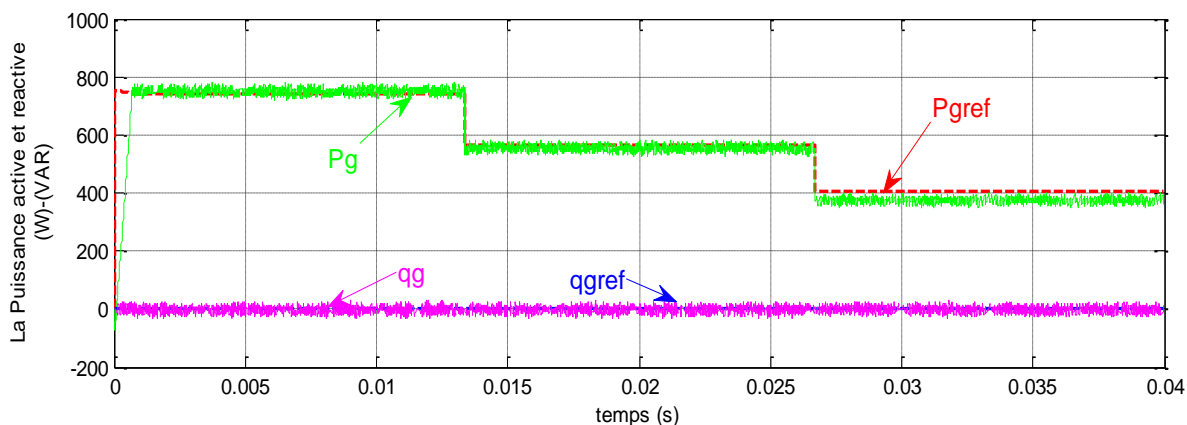
On passe maintenant à la simulation de l'onduleur NPC à trois niveaux qui relie le GPV à le réseau électrique. Les résultats montrent aussi que l'utilisation d'un onduleur à trois niveaux avec la stratégie de la commande prédictive :



Fig( III .15) : Tension composée à la sortie de l'onduleur à trois niveau



Fig( III .16): Le courant et la tension de réseaux



Fig(III .17) : Les puissances active et réactive délivrée par générateur PV

- ✓ Pour l'éclairement  $E = 1000 \text{ W/m}^2$ , la valeur de la puissance du GPV est 785 W proche de sa puissance maximale, (Figure III.17), pour une diminution d'éclairement, il y a une diminution de puissance électrique maximale.

- ✓ Les résultats montrent la poursuite du point de fonctionnement optimale lors de la perturbation. La tension de réseau et le courant de l'onduleur sont présentés sur la même figure (III.17), la forme d'onde du courant injecté est clairement sinusoïdale et en phase avec la tension du réseau.
- ✓ Les résultats montrent que l'utilisation d'une configuration convenable d'onduleur NPC qui sera connecté au réseau toute en assurant un fonctionnement optimal de la source PV (les puissances instantanées active et réactive).

### **III-5.Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons développé les stratégies de commande prédictive de l'onduleur de tension à deux et trois niveaux pour le système photovoltaïque connecté au réseau. L'étude des caractéristiques de la tension de sortie de l'onduleur pour la stratégie définie dans ce chapitre. On présente le principe de fonctionnement d'un onduleur, en précisant les niveaux de tension de mode commun générés par cette structure. On développe également l'approche vectorielle permettant de prendre en compte simultanément l'état des trois bras, représentation qui sera amplement utilisée par la suite. Les résultats de simulation obtenus aussi bien en régime permanent que en transitoire sont présentés dans ce chapitre. Ils montrent la faisabilité de cette approche développée et valident ainsi les algorithmes de commande élaborés.

La commande prédictive avec l'adaptateur MPPT permet d'optimiser la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque en fonction de l'ensoleillement. Ce qui a permis de faire fonctionner la station au point de fonctionnement optimal de la source PV.



***Conclusion  
Générale***

## **Conclusion générale**

Le travail présenté dans ce mémoire concerne une application des plus actuelles des énergies renouvelables, celle de l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque. Une meilleure rentabilité de ce système à énergies renouvelables implique forcément un meilleur conditionnement, donc adaptation.

Avant d'aborder la problématique de conversion, nous avons tout d'abord étudié le contexte et la problématique de l'énergie solaire photovoltaïque. Ceci s'avère nécessaire pour acquérir une connaissance approfondie du comportement d'un générateur photovoltaïque. Nous avons établi des programmes de calculs sous l'environnement Matlab permettant de tracer la caractéristique I-V pour différents éclairagements et températures solaires et de calculer la puissance maximale délivrée par la cellule photovoltaïque correspondante.

De ce qui précède, on peut conclure que l'énergie produite par le photovoltaïque est difficile à exploiter, cela est dû à la non linéarité de la caractéristique statique, de plus cette caractéristique change, si la température ou l'éclairagement varie. Ce dernier changement entraîne une variation du point de fonctionnement, d'où la nécessité de concevoir des régulateurs pour le suivi du point de puissance maximale, quelque soit la valeur de l'éclairagement ou de la température.

Ce mémoire est consacré à l'élaboration d'un système photovoltaïque connecté au réseau. Il consiste à choisir une configuration convenable d'onduleur qui sera connecté au réseau tout en assurant un fonctionnement optimal de la source PV.

En première partie, nous avons étudié le principe du système photovoltaïque où on a présenté le modèle des différents éléments constitutif (module, générateur, ....) ainsi que les différents types de central solaire.

En deuxième partie, nous avons brièvement présenté les différentes configurations de convertisseurs de puissance ainsi que les techniques d'optimisation de puissance des générateurs PV.

Dans la troisième partie, nous avons représenté le principe de fonctionnement des onduleurs associé à la commande prédictive, on a présenté la simulation sous Matlab/Simulink de l'ensemble « générateur PV, convertisseurs, MPPT »

Nous avons proposé aussi une stratégie de commande prédictive. A cet effet, l'approche est basée sur la sélection du vecteur de commande optimal qui doit être appliqué durant chaque période d'échantillonnage, afin d'optimiser une fonction de coût qui est basée sur la somme quadrature des écarts entre les puissances active et réactive et leurs valeurs de références. Les

résultats de simulation obtenus aussi bien, de bonnes performances sont obtenues en régimes permanent et transitoire.

Pour poursuivre ce modeste travail nous proposons les perspectives suivantes :

- ✓ Développer l'étude pour les systèmes photovoltaïques raccordés aux réseaux de distribution électrique ou comportant un onduleur.
- ✓ L'étude et l'application d'autres convertisseurs de niveaux supérieurs tels que cinq niveaux.
- ✓ Investiguer au niveau de l'implantation des lois de commande envisagées, par l'utilisation de la carte DSP.

primaire (ensoleillement), ensuite nous avons intéressé aux modes d'intégration d'un système photovoltaïque au réseau électrique.

La modélisation du système PV consiste à la mise en équations des différentes parties les constituant : la source primaire (température et ensoleillement), les convertisseurs statiques : le hacheur survolteur (Boost) et dévolteur (Buck), permettant la commande en tension du panneau photovoltaïque. Il s'agit donc d'optimiser le traitement global de l'énergie électrique au sein du système et en particulier au niveau du générateur, en plaçant celui-ci à chaque instant à son point optimal de fonctionnement grâce à un système de poursuite de type MPPT.

De plus, en raison de leur fonctionnement en commutation, ces convertisseurs statiques sont des générateurs de perturbations susceptibles de nuire au bon fonctionnement du générateur tant sur le plan électrique qu'énergétique. Sur le plan énergétique, les ondulations de la tension ou du courant à l'entrée de certains convertisseurs se traduisent par une oscillation du point de fonctionnement sur la caractéristique autour du point de puissance optimale, qui implique une dégradation de la conversion photovoltaïque.

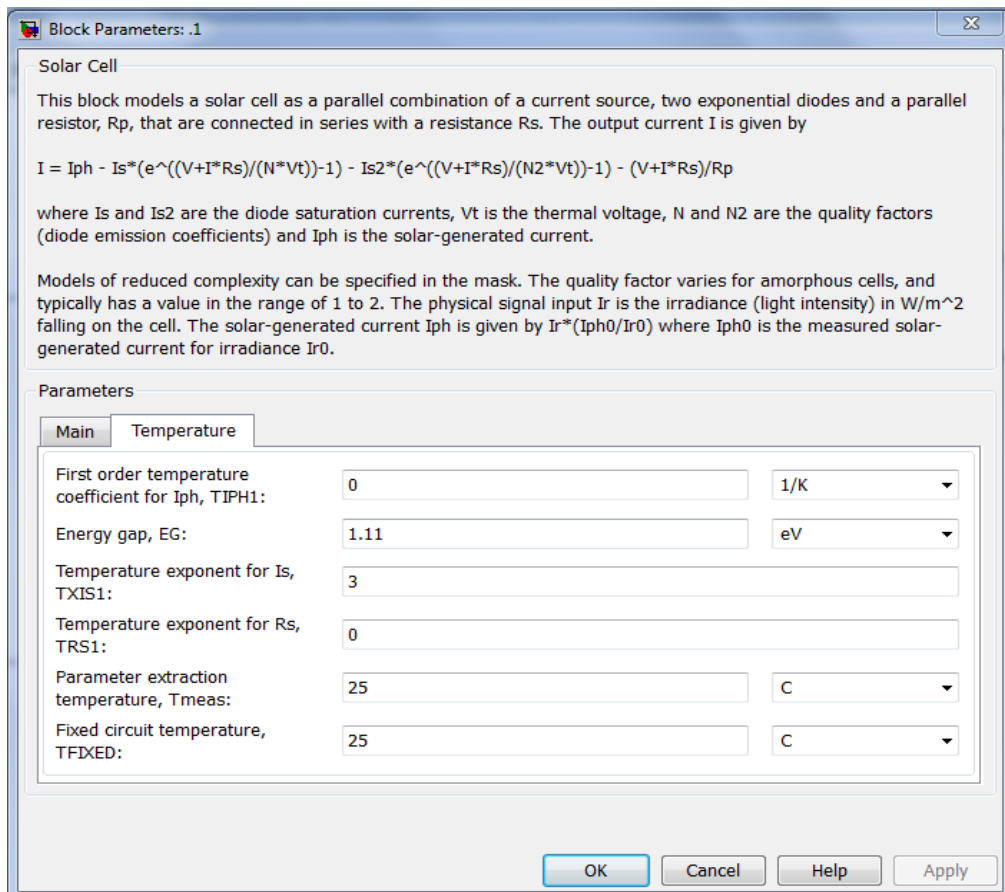
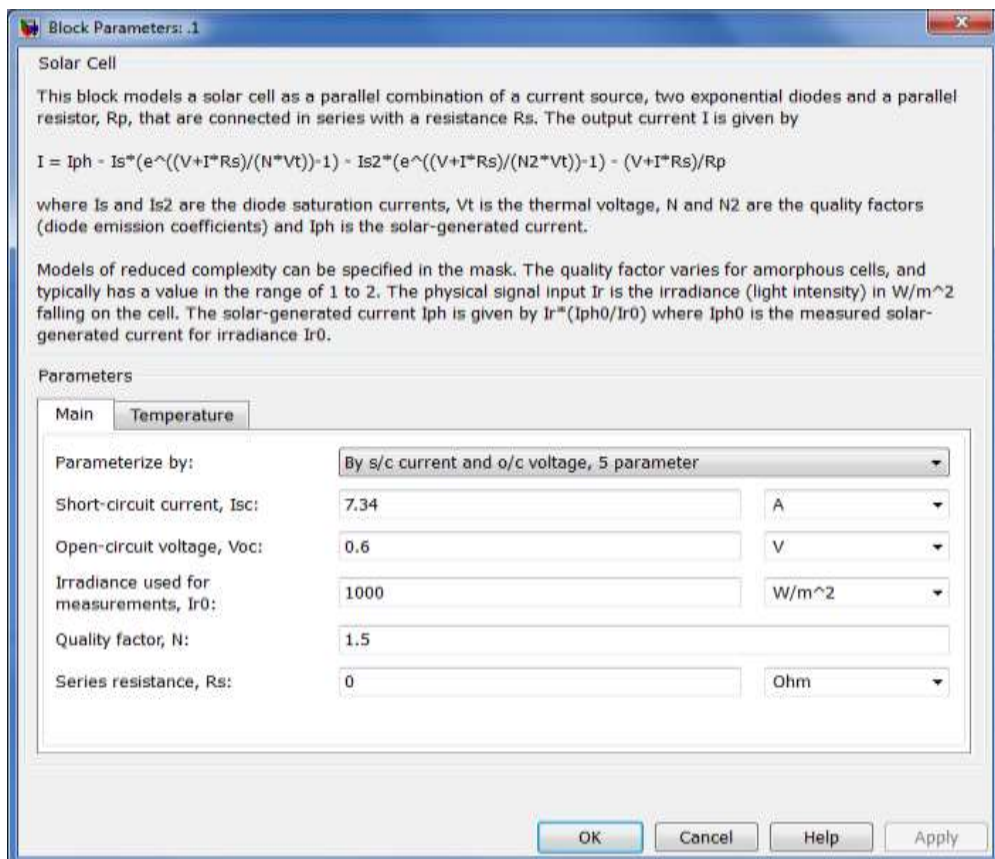
Pour avoir l'échange d'énergie entre le générateur photovoltaïque et le réseau électrique pendant une journée, et de faire une comparaison entre les grandeurs simulées et celles mesurées où les conditions météorologiques (éclairage et température) sont variables.

En première partie, nous avons étudié le principe des systèmes photovoltaïques où on a présenté le modèle des différents éléments qui le constituent (module, générateur, ...) ainsi que les différents types de centrales solaires.



***Annexe***

## Annexe 1: Blok Paramètre



**Annexe 2 :** Algorithme pour trouver le point de puissance maximale dans la cellule PV

```
% Simple MPP "perturb and observe" tracking algorithm
% using Boost DC-DC input current Iref as the control variable
% Pold, Iref and Increment are initialized in InitializeMPPtrackIref.m
% Input: power P to be maximized
% Output: reference current
function y = MPPtrackIref(P)
global Pold;
global Iref;
global Increment;
IrefH = 5; % upper limit for the reference current
IrefL = 0; % lower limit for the reference current
DeltaI = 0.02; % reference current increment
if (P < Pold)
    Increment = -Increment; % change direction if P decreased
end

% increment current reference
Iref=Iref+Increment*DeltaI;
% check for upper limit
if (Iref > IrefH)
    Iref = IrefH;
end
% check for lower limit
if (Iref < IrefL)
    Iref = IrefL;
end

% save power value
Pold = P;
% output current reference
y = Iref;
```



***Références***  
***Bibliographies***

# Références Bibliographiques

- [1]:(2010)<http://www.solarserver.de/gclid=CJWA1ruS-K4CFS4NtAodSzY7xw>.
- [2] : "BOUALEM DENDIB" Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative." Université Ferhat Abbes-Sétif mémoire de magister, Département d'électronique TS4/6338, 2007.
- [3] :S. NAOUAL, "modélisation et extraction automatique des Paramètres d'un générateur," université Ferhat abbas de sétif mémoire de magister, département d'électrotechnique 2010.
- [4] : baroud kendo li, « état de l'art et modélisation des microcentrales », magister en électrotechnique de l'université mentouri de constantine 2007.
- [5] : Olivier Gergaud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat en Electrotechnique de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2002.
- [6]: Belhadj Mohammed, « Modélisation d'un Système de captage photovoltaïque autonome », Mémoire de Magister en Microélectronique –Photovoltaïque, centre universitaire de Bechar, 2008.
- [7]:SiteInternet,<http://www.scribd.com/doc/46661921/Les-energies-renouvelables>, consulté le 12/06/2013.
- [8]: B .Flèche, D. Delagnes, « energie solaire photovoltaïque », STI ELT, juin 2007, énergie solaire photovoltaïque.pdf, consulté janv. 2014.
- [9] : J. Royer et T. Djiako et E. Schiler, B. Sadasy. ‘ Le pompage photovoltaïque’, université d'Ottawa, 1998.
- [10]: M. Dahbi « Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne», Thèse de Doctorat, Université de Bechar, 2007.
- [11]: B. Flèche, D. delagnes, «énergie solaire photovoltaïque», STI ELT juin 2007.
- [12]: Y. Pankow, «Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension application au générateur photovoltaïque », thèse de Doctorat, centre nationale de recherche technologique de lille, 2004.
- [13]: M. messoude, «Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque application au pompage «mémoire de Magister, Université de Constantine, 2006.
- [14]: A.T. singo, « système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », thèse de doctorat, université d'henri poincaré, nancy, 2010.
- [15] : T. Fogelman, « Système photovoltaïque pour les pays en déventement », manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'énergie, (AFME), 1982.
- [16]: C .Bernard, J .Chauvin, D .Lebrun, J. F . Muraz, P. Stassi, « Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'Observatoire Pierre Auger » 2006.
- [17]: A. Guen, « Contribution à l'étude des systèmes de télécommunications mobiles » Thèse de Magister, Université de Tlemcen, Février 1992.
- [18]: [www.solarelectricpower.org](http://www.solarelectricpower.org)
- [19]: M. Z. F.Z. Zerhoun, "Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique," revue des energies renouvelables, vol. 11 , no. N°1, p. 41–49, 2008.
- [20]:A. Saadi, "Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque," Université de Biskra Mémoire de Magister, 2000.
- [21]: S. Brigand, «principe du photovoltaïque », complément technique 2008, [www.Editionsdumoniteur.com](http://www.Editionsdumoniteur.com)

- [22]: .S.ABADA ‘ Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic’ Mémoire Maître es Sciences , Université laval, 2011.
- [23]: C. CABAL ‘Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque Thèse de doctorat université de Toulouse III ,2008.
- [24]: M.ARROUF ‘Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branche sur un générateur photovoltaïque’, thèse doctorats université de Constantine,2007.
- [25]: V. Boitier , P. Maussion , C. CABAL ‘Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques’, université de Toulouse, revue 3E.I, N°54, pp 90-96, septembre 2008.
- [26] :F. Ansari ,A. K. Jha‘ Maximum power point tracking using perturbation and observation as well as incremental conductance algorithm’ international journal of research in engineering & applied sciences, issn: 2294-3905, PP 19-30,2011.
- [27] :Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque, Y .PANKOW, Thèse doctorat, LEEPL, 2004
- [28]: Residential photovoltaic energy storage system. IEEE Trans. on Industrial Electronics, S. J. Chiang, K.T. Chang, and C.Y. Yen. 1998.
- [29] : Rural south africa and photovoltaic weak grid interface systems.M.N. Mather, M. Malengret, and J.H Enslin. EPE Lausanne, 1999.
- [30]: Topology for decentralised solar energy inverters with a low voltage ac bus. B. Lindgren. EPE Lausanne, 1999.
- [31] : Petibon Stéphane, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Doctorat de l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2009.
- [32]: Abbassen Lyes, «Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », Mémoire de Magister En Electrotechnique, Option machines électriques Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2011.
- [33] : Belhadj Mohammed, « Modélisation d'un Système de captage photovoltaïque autonome », Mémoire de Magister en Microélectronique –Photovoltaïque, Centre Universitaire de Bechar, 2008.
- [34] : Ralf Bettenhausen, «Onduleurs pour systèmes photovoltaïques autonomes et couplés au réseau de distribution», Master 1 Physique et Ingénierie, Spécialité Conversion des énergies Rapport de stage, Université de la Réunion, France <http://www.youscribe.com/catalogue/ressources-pedagogiques/education/etudes-superieures/rapport-de-stage-1388648>, consulté janv. 2014.
- [35]: Bendjamâa Ibrahim, «Modélisation et commande d'un système De stockage photovoltaïque», Mémoire de Magister En L" Ecole Doctorale : énergies renouvelables, Université Abou Bakr Belkaid , Tlemcen, 2011/2012.
- [36]: T. Cunnyngham, «Cascade multilevel inverters for large hybride-Electric vehicle applications with varaint DC sources », Thèse de Master, Université de Tennessee, 2011.
- [37] " Commande D'un Convertisseur AC/DC Triphasé à quatre bras En Régime Déséquilibré ", Mémoire de magister , Ecole Militaire Poly technique (EMP), Alger, 2009.
- [38]“Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique”. Mémoire de Magister en électrotechnique Université de Constantine Avril 2009
- [39] kamel Barra and djamel rahem, “Predictive direct power control for photovoltaic grid connected system:An approach based on multilevel converters,” Energy Conversion and Management 78 (2014) 825–834