

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
المركز الجامعي لعين تموشنت
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut de la Technologie
Département de Génie Electrique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
Filière : ELECTROTECHNIQUE
Spécialité : COMMADE ELECTRIQUE
Thème

Simulation et Commande d'un panneau solaire en régime de défaut

Présenté Par :

- 1) Dib Marwane
- 2) MeradBoudia MohammedRyad

Devant les jurys composés de :

BERRACHED Djelloul		C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
FLITTI Mohamed	MAITRE CONFERENCE CLASSE A.	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
TOUHAMI Aicha		C.U.B.B(Ain Temouchent)	Examineur

Année universitaire 2019/202

Remerciement

On remercie le bon dieu tout puissant et miséricordieux pour nous avoir donné la santé et la volonté de réaliser ce mémoire.

On adresse aussi nos reconnaissances à tous les professeurs et au corps administratifs de département d'électrotechnique pour leurs conseils et leurs connaissances généreusement transmises.

Nous tenons à remercier nos encadreurs M Mohamed Flitti d'avoir posé un sujet très intéressant et pour leurs conseils, leur disponibilité et pour nous avoir fait profiter de leurs connaissances et de leurs qualités tant professionnelles qu'humaines.

Un grand remerciement plein d'amour pour nos parents qui nous ont tellement soutenues avec l'aide et les motivations ainsi que les moyens qu'ils nous ont procuré et nous ont facilité la réalisation de ce projet.

Nos profonds remerciement aux membres de nos deux familles (sœurs et frères) chacun en son nom pour leurs constants soutiens au cours de notre cursus universitaire et particulièrement cette année.

A tous nos amis avec qui nous avons passé d'agréables moments, pour leurs aides et encouragements.

Liste des abréviations et symbole

PV : photovoltaïque

GPV : générateur photovoltaïque

EVA : éthylène-acétate de vinyle

Watt-crête (Wc) : la puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards

DC : courant continu

AC : courant alternatif

SC : semi conducteur

Eg : énergie de la bande de gap (eV)

h : constante de Planck

v : fréquence de la lumière

C : vitesse de la lumière

l : longueur d'onde de la lumière

I : courant fournie par une cellule(Ampère)

V :tension aux borne de la cellule (volt)

I_{ph} : courant photo généré par le générateur photovoltaïque sous éclairément (A).

I_D : courant qui traverse la diode (A).

I_s : courant de saturation de la diode (A).

I_{cc} : courant de court-circuit (A).

V_{oc} : tetion de circuit ouvert (v)

P_c :puissance crête (W).

I_{Rsh} : courant qui traverse R_{sh} (A).

R_s : résistance série du générateur (Ω).

R_{sh} : résistance parallèle du générateur (Ω).

q : charge de l'électron (1.6 10⁻¹⁹ Coulomb).

K : constante de Boltzmann (1.38* 10⁻²³ J/0K).

T : température (absolue) effective de la cellule en Kelvin (°K).

A : facteur de non idéalité de la jonction (1<A>3)

S : la surface de module en (m²).

E : l'éclairement en W/m²

h : Le rendement énergétique

FF : le facteur de forme

I_G : courant du générateur

V_G : tension du générateur ;

N_p : nombre de cellules en parallèle

N_s : nombre de cellules en série

P_m : puissance maximale (W).

I_m : courant maximal (A).

V_m : tension maximale (V)

α : le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur.

T_e : étant la période des impulsions.

f_e : Fréquence de découpage.

I_{sc} : Courant de court circuit (A).

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

I_{pv} : le courant de sortie du GPV (A).

V_{pv} : la tension de sortie du GPV (V)

V_{oc} : Tension à circuit ouvert en Volt (V).

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

PPM : Point de Puissance Maximal

DC: Courant Continu (Direct Current).

PV : Photovoltaïque

GPV: Générateur Photovoltaïque.

PMAX : Puissance Maximal

VOPT : tension optimal

IOPT : courant optimal

CS : convertisseur statique

D : la diode de roue libre

CV : Constant Voltage

Sommaire

Introduction général..... 1

CHAPITRE 1 :Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Généralités sur les systèmes photovoltaïques..... 3

1.1 INTRODUCTION : 3

1.2 Effet Photovoltaïques : 3

1.3 Cellules Photovoltaïques : 4

1.3.1 Structure d'une cellule Photovoltaïques : 4

1.3.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque : 5

1.3.3 Différents types de Cellules Photovoltaïques : 6

1.3.3.1 La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin : 6

1.3.3.2 La cellule photovoltaïque en silicium poly cristallin : 6

1.3.3.3 La cellule au silicium amorphe : 6

1.3.3.4 La cellule photovoltaïque tandem : 6

1.3.3.5 La cellule photovoltaïque CIGS : 7

1.3.4 Modélisation d'une cellule photovoltaïque : 7

1.3.5 Groupements des cellules photovoltaïques : 8

1.3.5.1 Association série : 9

1.3.5.2 Association Parallèle : 9

1.3.5.3 Associations (série parallèle) mixtes:..... 10

1.4 Générateur photovoltaïque (GPV) : 10

1.4.1.1 Caractéristique courant – tension : 10

1.4.1.2 Rendement de la conversion : 12

1.4.1.3 Puissance délivrée par une cellule PV : 12

1.5 Influence de la température et du rayonnement : 13

1.5.1 Influence de la température : 13

1.5.2 Influence du rayonnement :	14
1.6 Module photovoltaïque :	14
1.6.2 Caractéristiques d'un module solaire PV :	16
1.7 Panneaux solaire :.....	16
1.7.1 Système photovoltaïque :.....	17
1.7.1.1 Système photovoltaïque autonome :	17
1.7.1.2 Système photovoltaïque raccordé au réseau :	17
1.7.1.3 Système photovoltaïque hybride :.....	18
1.8 Champs photovoltaïque (PV) :	18
1.9 Orientation des panneaux solaires :.....	19
1.9.1 Choix de l'orientation des modules :	19
1.9.2 Choix de l'inclinaison des modules :	19
1.9.3 Trajectoire apparente du soleil :	20
1.10- Conclusion.....	21

CHAPITRE 2 :Les convertisseurs statique et la commande MPPT
--

2.1 Introduction :	21
2.2 Les Principes de Conversion dans les Systèmes PV :	21
2.3 Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge :.....	21
2.4 Convertisseur DC/DC :	22
2.4.1 Hacheur Buck (dévolteur) :	22
2.4.2 Hacheur boost (élévateur) :.....	24
2.4.3 Hacheur dévolteur-survolteur :.....	26
2.5 Convertisseurs DC/AC :.....	27
2.5.1 Principe générale de fonctionnement :	27
2.5.2 Onduleur Monophasé :	27
2.5.2.1 Onduleur monophasé en demi-pont :	27
2.5.2.2 Onduleur monophasé en pont (Pont H) :.....	28
2.5.3 Onduleur triphasé :	28

2.6 Commande pour la Recherche du Point de Puissance Maximale(MPPT) :	29
2.7 Les Algorithmes MPPT :	30
2.7.1 Algorithme perturbation et observation “Perturb and Observe” (P&O) :	30
2.7.2 Algorithme incrémentation de la conductance :	32
2.7.3 Autres méthodes :	35
2.8 Conclusion :	35

<p style="text-align: center;">CHAPITRE 3 : Simulation et commande d’un panneau solaire en régime de défaut</p>
--

3.1 Introduction :	42
3.2 Système photovoltaïque connecté au réseau :	42
3.2.1 Description du système étudié :	42
3.3 Régime permanent :	43
3.3.1 Résultats de simulations :	44
3.3.2 Analyse et interprétations :	46
3.4 Régime de défaut :	47
3.4.1 Résultats de simulations :	50
3.4.2 Analyse et interprétations :	52
3.5 Conclusion :	52
Conclusion général	42
Bibliographie	54

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure 1.1	types d'énergie solaire.	3
Figure 1.2	Présentation schématique d'une cellule solaire.	4
Figure 1.3	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.	5
Figure 1.4	Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.	7
Figure 1.5	Association de N_s modules solaires en série.	9
Figure 1.6	Association de N_p modules solaires en parallèle.	9
Figure 1.7	Association mixte de NSP branches et de NMS module composés de NC cellules identiques.	10
Figure 1.8	Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.	10
Figure 1.9	Courbe de puissance maximale et caractéristique courant-tension.	12
Figure 1.10	Effet de la température sur la caractéristique I-V.	13
Figure 1.11	Evolutions de la caractéristique courant- tension avec l'énergie reçue.	13
Figure 1.12	Module photovoltaïque.	14
Figure 1.13	Composition d'un module solaire photovoltaïque.	15
Figure 1.14	Système photovoltaïque autonome.	16
Figure 1.15	Système photovoltaïque raccordé au réseau.	17
Figure 1.16	Système hybride PV-Eolien.	18
Figure 1.17	Champ de panneaux montrés en série-parallèle.	18
Figure 1.18	Comment incliner le panneau solaire.	19
Figure 1.19	Représentation de la latitude (hauteur) angulaire et l'azimut.	20
Figure 1.20	Définition de la position du soleil (latitude et azimut).	20
Figure 2.1	Etage d'adaptation entre un GPV et une charge [12].	22
Figure 2.2	convertisseurs DC-DC[12].	22
Figure 2.3	Schéma électrique d'un hacheur buck.	23
Figure 2.4	Schéma électrique d'un hacheur Buck fermé.	23
Figure 2.5	Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert.	24
Figure 2.6	Schéma électrique d'un hacheur boost.	24
Figure 2.7	Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.	25
Figure 2.8	Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.	25
Figure 2.9	Convertisseur dévolteur-survolteur.	26
Figure 2.10	Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur.	26
Figure 2.11	Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC).	27
Figure 2.12	Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Demi-pont.	28
Figure 2.13	Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Pont.	28
Figure 2.14	Schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé En Pont.	29
Figure 2.15	Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.	30
Figure 2.16	Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O).	31
Figure 2.17	caractéristique de tension-puissance du panneau.	32
Figure 2.18	l'algorithme IncCond classique.	34
Figure 3.1	schéma synoptique d'un système photovoltaïque contrôlé par	42

	(MPPT).	
Figure 3.2	Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O).	43
Figure 3.3	variation de l'éclairement en fonction du temps	44
Figure 3.4	variation de température en fonction du temps	44
Figure 3.5	Puissance de panneau (PV)	44
Figure 3.6	La tension générée par le panneau (PV)	45
Figure 3.7	La variation du rapport cyclique	45
Figure 3.8	Puissance de réseau	45
Figure 3.9	Tension de réseau	46
Figure 3.10	Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O) en régime de défaut.	47
Figure 3.11	Bloc défaut triphasé.	47
Figure 3.12	bloc Pulse Generator.	47
Figure 3.13	Paramètre bloc de défaut triphasé.	48
Figure 3.14	Paramètre Pulse Generator.	50
Figure 3.15	Puissance de panneau (PV).	50
Figure 3.16	La tension générée par le panneau (PV).	51
Figure 3.17	Puissance de réseau.	51
Figure 3.18	Tension de réseau.	51

Introduction général

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

Actuellement, la production d'énergie dans le monde est basée presque totalement sur les sources fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire, ces ressources deviennent de plus en plus rares, pendant que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement.

Etant donné le danger que représente les énergies fossiles, trouver une solution économique et peu polluante pour la production d'énergie est devenu primordial.

A ce sujet , Les énergies renouvelables peuvent être des solutions en raison de leur abondance et elles sont inépuisables à l'échelle de temps humain . Parmi les principales ressources d'énergie renouvelable, on distingue l'énergie solaire (l'énergie que transporte le rayonnement solaire), l'énergie éolienne, l'énergie hydro-éolienne (ces éoliennes sous-marines utilisent les courants marins pour produire de l'électricité), l'énergie de la biomasse, l'énergie géothermique et l'énergie hydraulique. On cite comme exemple la conversion du rayonnement solaire, soit par la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique directement utilisable par les systèmes photovoltaïques, ou par les systèmes de concentration du rayonnement solaire afin de produire la vapeur d'eau à haute pression, qui sert à actionner les turbines et en fin produire de l'énergie électrique ainsi que le chauffage . La source d'énergie solaire est une source renouvelable distribuée d'une manière plus au moins équitable sur notre planète terre, qui est disponible partout sur le globe terrestre.

Les panneaux solaires ou photovoltaïques sont l'élément de base de tout système photovoltaïque. Ils sont constitués de cellules photosensibles reliées entre elles. Chaque cellule convertit les rayons provenant du Soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques ont une caractéristique électrique spécifique qui est donnée par le fabricant sous forme de courbes. Ces courbes représentent généralement l'évolution du courant et de la puissance par rapport à la tension du panneau. La caractéristique électrique du panneau est de nature non linéaire et possède un point particulier appelé « Point de Puissance Maximale » (en anglais "Maximum Power Point" MPP). Ce point est le point de fonctionnement optimal pour lequel le panneau opère à sa puissance maximale. L'énergie photovoltaïque dépend fortement des conditions climatiques et de la localisation du site, ce qui rend la position du MPP variable dans le temps et donc difficile à situer.

Dans la plupart des systèmes de production d'énergie photovoltaïque, on trouve une technique ou un algorithme particulier nommé « Maximum Power Point Tracking » (MPPT) qui se traduit par, poursuite du point de puissance maximale. Cette technique, comme son nom l'indique, traque le MPP dans le temps et permet de la sorte de tirer le maximum de puissance que le panneau est apte à fournir. Le MPPT vise à améliorer et à optimiser l'exploitation des systèmes photovoltaïques. Il permet de faire un gain qui peut atteindre 25% d'où son importance. Techniquement, le MPPT fait appel à une interface entre le panneau et la charge qui est généralement un dispositif de conversion de puissance.

L'énergie solaire n'étant pas disponible la nuit, il est nécessaire d'équiper les systèmes photovoltaïques autonomes par des batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'énergie et de la restituer en temps voulu. Pour les systèmes raccordés au réseau de distribution électrique, le stockage de l'énergie est bien évidemment pas indispensable. La présence des batteries exige l'utilisation d'une unité dédiée à la gestion de l'énergie. En effet, ces dernières possèdent deux tensions critiques (tension de surcharge et tension de décharge profonde) qui doivent être respectées sous peine d'usure prématurée ou pire, leur détérioration.

L'évolution continue de l'électronique de puissance, plus particulièrement les dispositifs de conversion de la puissance a permis de concevoir de nouveaux schémas plus sophistiqués et moins encombrants améliorant par la même occasion leur rendement. Cela a une influence directe sur le rendement et le coût global du système photovoltaïque dans son ensemble.

A cet effet, nous avons fait dans notre étude :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les systèmes photovoltaïques (principes de la conversion photovoltaïque. la cellule solaire au générateur photovoltaïque), nous avons présenté aussi les différentes caractéristiques électriques et les paramètres qui peuvent les influencer.

Le second chapitre porte sur les convertisseurs DC/ DC DC / AC et la commande MPPT implanté pour le contrôle et la gestion du système.

Dans le dernier chapitre, nous présenterons la modélisation et les résultats de simulation par MATLAB-SIMULINK d'un PV connecté avec un réseau en régime permanent et en défaut .

Enfin, on terminera notre mémoire avec une conclusion générale qui résumera l'intérêt de notre étude.

CHAPITRE 1 :

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

1.1 INTRODUCTION :

L'exploitation directe de l'énergie solaire au moyen de 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, cette dernière est appelée énergie solaire photovoltaïque (figure 1.1) [1].

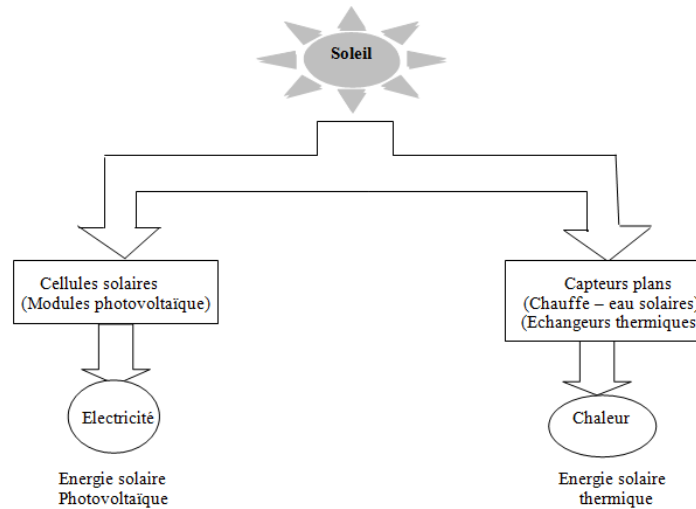


Figure 1.1 : types d'énergie solaire

➤ Énergie solaire thermique

Permet de produire de la chaleur à partir du rayonnement solaire infrarouge afin de chauffer de l'eau ou de l'air. On utilise dans ce cas des capteurs thermiques. Dans le langage courant, ce sont des (chauffe-eau solaire) ou des (capteurs à air chaud) [1].

➤ Énergie solaire photovoltaïque :

Permet de produire de l'électricité par transformation d'une partie du rayonnement solaire grâce à des cellules solaires reliées entre-elles pour former un module solaire photovoltaïque.

Actuellement, les cellules solaires commercialisées sont composées de matériaux inorganiques, comme le silicium [2].

1.2 Effet Photovoltaïques :

Le terme « photovoltaïque » vient du Grec et qui signifie Lumière, il est composé de deux parties : « photos » (lumière) et du nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt.

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière ; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être «arrachés» :

Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire.

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toute fois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs des laboratoires Bell, aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première cellule photovoltaïque, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [3].

1.3 Cellules Photovoltaïques :

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé "effet photovoltaïque" qui a été découvert par E. Becquerel en 1839.

Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants [5].

1.3.1 Structure d'une cellule Photovoltaïques :

Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne. Dans la figure (1.2), un échantillon schématique d'une configuration de la cellule solaire. Elle se compose d'un abri du verre (g), un encapsulant (e) pour éviter la corrosion, un métal en arrière contact (m) afin de réduire les pertes par réflexion du rayonnement incident et deux couches de silicium, une dopée P (dopée au Bore) et l'autre dopée N (dopée au Phosphore) créant ainsi une jonction p-n avec une barrière de potentiel. [1].

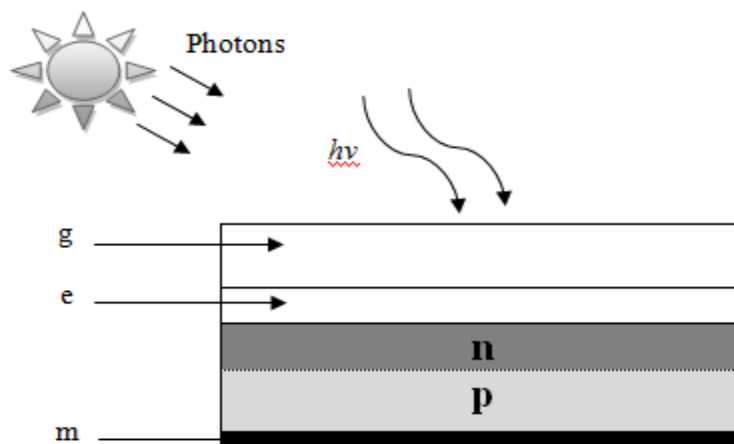


Figure 1.2:Présentation schématique d'une cellule solaire

1.3.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

La jonction p-n de ces deux matériaux semi-conducteurs fonctionne comme une diode. Lorsque cette diode est exposée à des photons dont l'énergie ($h\nu$) est supérieure à celle de l'énergie du matériau semi-conducteurs, appelée l'énergie de bande gap (E_g), le nombre d'électrons libres du semi-conducteur de type p et celui de trous du semi-conducteur de type n augmente considérablement. Si les photons incidents ont une énergie inférieure à E_g , ils ne seront pas absorbés c'est-à-dire leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque. La figure (1. 3) illustre le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

L'énergie des photons est donnée par :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

Avec :

E : énergie de photon (en joules)

h : constante de Planck

ν : fréquence de la lumière (en hertz)

c : vitesse de la lumière (en mètre par seconde)

λ : longueur d'onde de la lumière

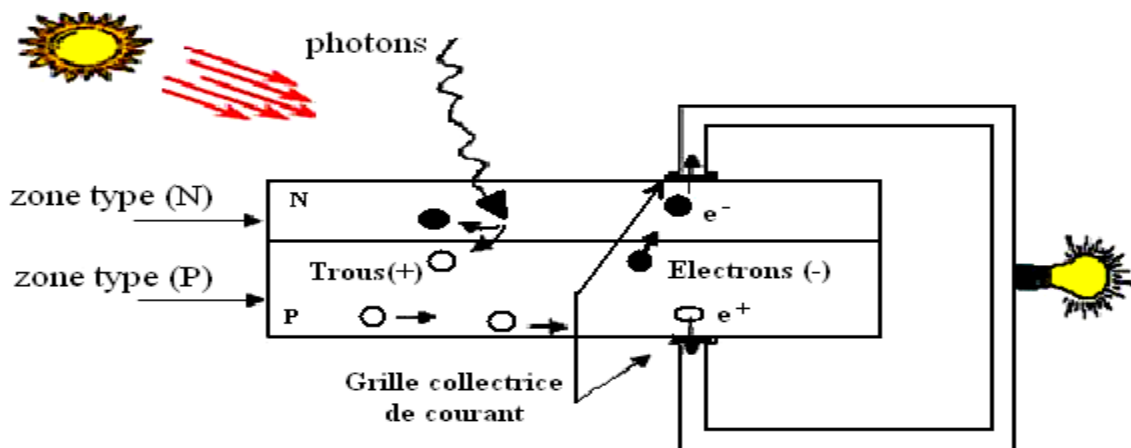


Figure 1.3 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

D'une autre manière, quand un semi-conducteur est éclairé par la lumière du soleil, les photons qui la constituent sont capables de transmettre leurs énergies aux électrons de valence du semi-conducteur pour rompre la liaison qui les maintient liés aux atomes respectifs. Pour chaque liaison rompue, on obtient un électron et un trou libres circulant dans le matériau. Sous l'effet du champ électrique, l'électron va du côté N et le trou du côté P. Les trous se comportent, sous différents aspects, comme des particules avec une charge positive égale à celle de l'électron. La différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [1].

La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (VOC). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (ICC) et dépend fortement du niveau d'éclairement [6].

1.3.3 Différents types de Cellules Photovoltaïques :

1.3.3.1 La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin :

Ce type de cellule photovoltaïque est l'une des plus répandues. Elle est obtenue à partir de silicium monocristallin, appliqué en une tranche simple. Elle permet de composer des panneaux solaires qui vont produire de l'électricité servant à alimenter une habitation ou le réseau public, par exemple.

Cette cellule photovoltaïque offre un rendement d'environ 25 %, l'un des meilleurs sur le marché. La durée de vie des panneaux solaires composés de cellules en silicium monocristallin avoisine les 30 ans, ce qui est très rentable, malgré le coût élevé à l'achat. L'inconvénient de ce type de cellule solaire est qu'elle offre un rendement très faible lorsqu'il n'y a pas assez de soleil. Elle convient donc mieux aux régions les plus ensoleillées.

1.3.3.2 La cellule photovoltaïque en silicium poly cristallin :

Facilement reconnaissable grâce à ses cristaux bleus, cette cellule photovoltaïque se compose d'une seule tranche de silicium. Elle est de forme carrée. On la trouve souvent dans les installations domestiques, agricoles ou industrielles.

La fabrication de ce type de cellule photovoltaïque est plus simple que la version en silicium monocristallin. Son coût est donc moindre. Côté rendement du panneau solaire, on peut espérer entre 10 et 15 %, ce qui est nettement inférieur aux cellules monocristallines. Elle a cependant l'avantage de pouvoir être utilisée par temps nuageux, ceci grâce à sa flexibilité d'irradiation.

1.3.3.3 La cellule au silicium amorphe :

La cellule photovoltaïque au silicium amorphe est composée d'une couche fine de silicium, bien plus fine que les monocristallines ou les poly cristallines. On la trouve essentiellement pour alimenter les appareils de faible puissance, comme les montres solaires, les éclairages de jardin ou encore les calculatrices solaires.

Cette cellule solaire présente de nombreux avantages. Elle est tout d'abord peu chère à fabriquer. Elle peut aussi être intégrée sur tout type de support, flexible ou rigide. Un autre point positif est qu'elle capte les rayons solaires même par temps nuageux. Son principal inconvénient est qu'elle offre un faible rendement, environ 7 % au maximum. Pour être rentable, il faut donc que la surface du panneau solaire soit conséquente. De même, ses performances diminuent dans le temps.

1.3.3.4 La cellule photovoltaïque tandem :

La cellule photovoltaïque tandem est quant à elle conçue à partir de deux couches semi-conductrices simples. Cela peut être une couche de silicium amorphe et une autre de silicium cristallin (mono ou poly) par exemple. Elle montre tout son intérêt pour une utilisation industrielle.

Le rendement de ce type de cellule est intéressant, mais sa fabrication complexe en fait une cellule photovoltaïque chère à produire. Comme pour tous les autres modèles, le nettoyage du panneau solaire doit être optimal afin de profiter d'un rendement constant et

d'une meilleure longévité.

1.3.3.5 La cellule photovoltaïque CIGS :

Ce type de cellule photovoltaïque utilise un matériau semi-conducteur fait d'un alliage de cuivre, d'indium, de sélénium et de gallium. Ce mélange est disposé en couche très fine sur un support.

Ce type de cellule solaire représente la nouvelle génération de cellule photovoltaïque. Elle offre tout d'abord un rendement très intéressant, entre 10 et 20 %. L'un des principaux avantages est qu'elle est conçue avec des matériaux autres que le silicium, moins toxiques. Aussi, le support utilisé peut être flexible, afin de capter un maximum de rayons solaires. Cependant, pour obtenir un bon rendement, il est nécessaire de prévoir une plus grande surface que pour d'autres types de cellules.

1.3.3.6 La cellule en couche mince de tellure de cadmium :

Ce modèle de cellule photovoltaïque est composé lui aussi à partir d'un matériau autre que le silicium. Ici, c'est du tellure de cadmium qui est employé en une seule couche scellée entre deux plaques de verre.

Ce type de cellule photovoltaïque utilise une technologie mise en place pour développer le rendement des panneaux solaires. L'enjeu est doublement intéressant, car il permet aussi de diminuer les coûts. Offrant un coefficient thermique bas, ce type de cellule se compose toutefois de produits toxiques, ce qui est un gros inconvénient .

1.3.3.7 La cellule photovoltaïque multi-jonction :

La cellule photovoltaïque multi-jonction se compose de différentes couches de matériaux semi-conducteurs qui convertissent chaque rayon solaire, quelle que soit l'exposition. Les couches sont empilées, formant la cellule photovoltaïque multi-jonction. Pour l'instant, seuls les engins spatiaux en sont pourvus.

La cellule photovoltaïque multi-jonction offre un rendement optimal, d'environ 40 %. Le seul inconvénient est que ce type de cellule solaire n'est pas commercialisé. En effet, il n'est utilisé que dans le milieu spatial [7].

1.3.4 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque reste l'élément de base de tout générateur photovoltaïque quelle que soit la puissance considérable demandée. Le schéma équivalent de la cellule solaire est présenté dans la figure (1.4), qui consiste en une source de courant idéale, branchée avec une diode en parallèle, deux résistances pour tenir compte des pertes interne [7].

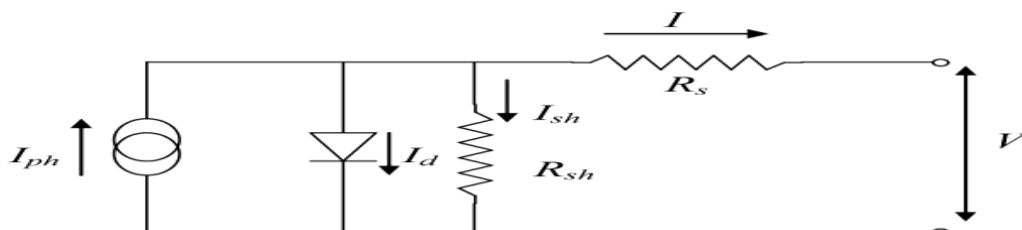


Figure 1.4 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

R série (R_s) représente la résistance série qui tient compte des pertes ohmiques du matériau des métallisations et du contact métal/semi-conducteur, R shunt (R_{sh}) représente une résistance parallèle (ou résistance de fuite) provenant de courants parasites entre le dessus et le dessous de la cellule par le bord en particulier et à l'intérieur du matériau par des irrégularités ou impuretés.

Pour prévoir ses performances, il est très important de connaître son modèle mathématique. Selon la figure (1.4), le courant généré par la cellule photovoltaïque I est donné par [1] :

$$I = I_{ph} - I_D - IR_{sh} \quad (1.2)$$

Où :

IR_{sh} : le courant qui traverse R_{sh} :

$$IR_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1.3)$$

I_D : Le courant traversant la diode est donné par :

$$I_D = I_s \left[\exp \left[q \times \frac{V + R_s I}{A \times K \times T} \right] - 1 \right] \quad (1.4)$$

Avec :

I : courant fournie par une cellule (Ampère).

I_{ph} : photocourant (Ampère).

I_D : courant diode (Ampère).

I_s : courant de saturation de la diode (Ampère).

V : tension aux bornes de la cellule (Volt).

q : la charge de l'électron ($q = 1.602 \times 10^{-19}$ C).

K : la constante de Boltzmann, $k = 1,38 \times 10^{-23}$ j/°k.

T : la température effective de la cellule en Kelvin (°K).

A : le facteur de non idéalité de la jonction ($1 < A < 3$).

R_{sh} : la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction.

R_s : la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions.

1.3.5 Groupements des cellules photovoltaïques :

Les cellules solaires ne sont pas employées seules et cela quel que soit leur type, si ce n'est pour l'alimentation de très petits circuits. Dans la plupart des cas, elles sont regroupées en grand nombre et associées à des dispositifs de régulation ou de stockage de l'électricité, par exemple, en vue de satisfaire une application déterminée.

La tension générée par une cellule photovoltaïque fonctionnant au point de puissance maximale et sous un éclairage de référence de 1 kW/m² est très faible pour être exploitée en milieu industrielle, par exemple pour le pompage de l'eau ou l'alimentation d'une installation électrique domestique. Quant au courant, il est fonction de la surface de captation de la cellule. En général, la puissance fournie par une cellule individuelle étant très petite, nous sommes donc appelés à réaliser des groupements séries ou parallèles des cellules afin de recueillir la tension et le courant nécessaires à une certaine application en fonction de la charge variable ou fixe à alimenter. Le groupement en série permet d'élever la tension disponible, le courant maximum débité (I_c) étant inchangé. Le groupement parallèle permet d'élever le courant débité tout en gardant la tension à vide (V_{co}) inchangée. Le groupement mixte ou série parallèle permet à la fois d'élever le courant et la tension, on parlera dans ce cas de module ou des panneaux solaires.

Il ne faudra connecter en série, en parallèle ou en mixte que les cellules identiques. La puissance maximale s'exprime en Watts crête.

La forme générale de la caractéristique (I-V) d'un module solaire ou photovoltaïque est identique à celle d'une cellule, par conséquent tout ce qui a été dit pour une cellule individuelle restera valable pour un groupement [9].

1.3.5.1 Association série :

En effet, l'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule [10]. La caractéristique d'un groupement de N_s modules solaires en série est représentée par la figure suivante :

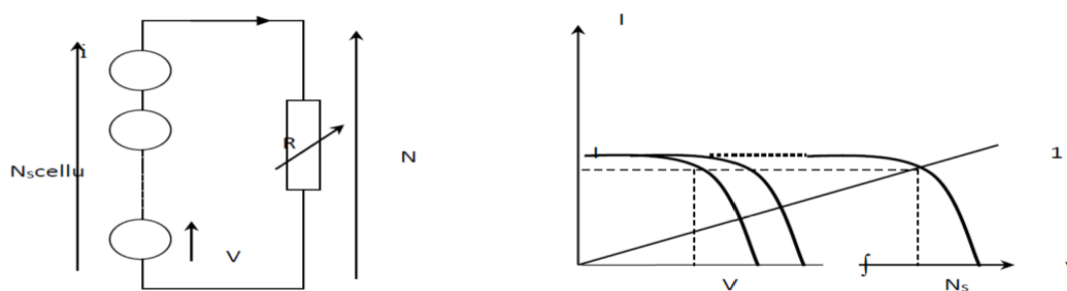
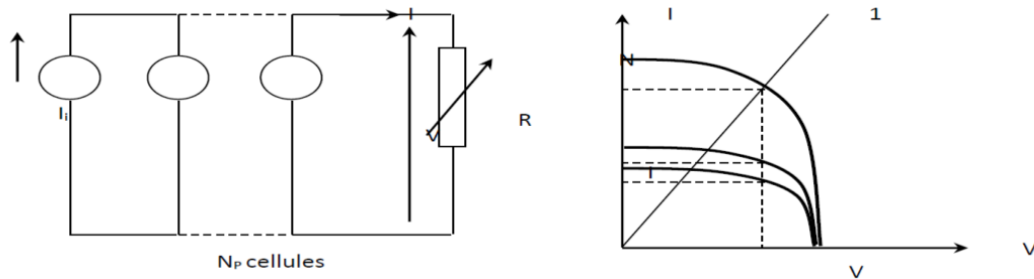


Figure 1.5 : Association de N_s modules solaires en série

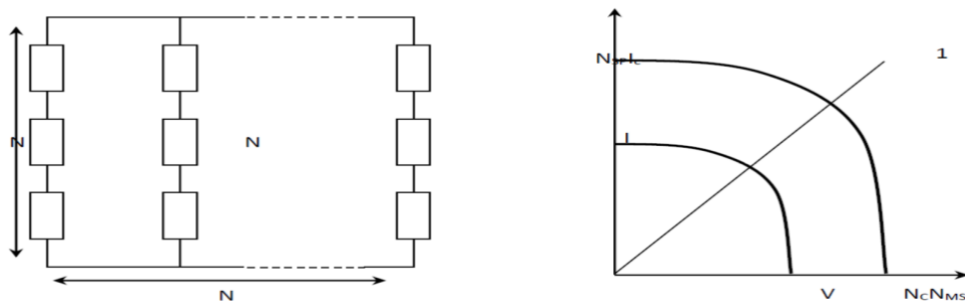
1.3.5.2 Association Parallèle :

Tandis que l'association en parallèle des photopiles délivre un courant égal à la somme des courants individuels et une tension égale à celui d'une seule cellule [10]. La caractéristique d'un groupement de N_p modules solaires en parallèle est représentée par la figure suivante :

Figure 1.6: Association de N_p modules solaires en parallèle

1.3.5.3 Associations (série parallèle) mixtes:

Si pour une application donnée il est nécessaire de faire augmenter le courant et la tension délivrée par les cellules solaires, on réalise un groupement mixte ou groupement série-parallèle. On parlera dans ce cas de module et de panneaux solaires. Un panneau solaire est par définition un ensemble de modules regroupés selon un montage mixte, le module étant à son tour composé d'un ensemble de cellules montés généralement en série. Il est possible d'utiliser un montage de N_C cellules identiques en série sur un module, N_{SP} nombre de branche (placées en parallèle) et N_{MS} nombre de modules par branche. La courbe de fonctionnement de cette association est une courbe semblable à celle de la cellule de base, obtenue en modifiant les échelles sur les deux axes [11].

Figure 1.7: Association mixte de N_{SP} branches et de N_{MS} module composés de N_C cellules identiques.

1.4 Générateur photovoltaïque (GPV) :

Le générateur photovoltaïque GPV représente la partie de production d'énergie électrique.

1.4.1 Caractéristique électrique d'un générateur Photovoltaïque :

1.4.1.1 Caractéristique courant – tension :

La caractéristique courant-tension, illustrée dans la figure (1.8), décrit le comportement de la cellule photovoltaïque sous l'influence des conditions standard (niveau d'éclairement 1000W/m^2 et température ambiante 25°C) [7].

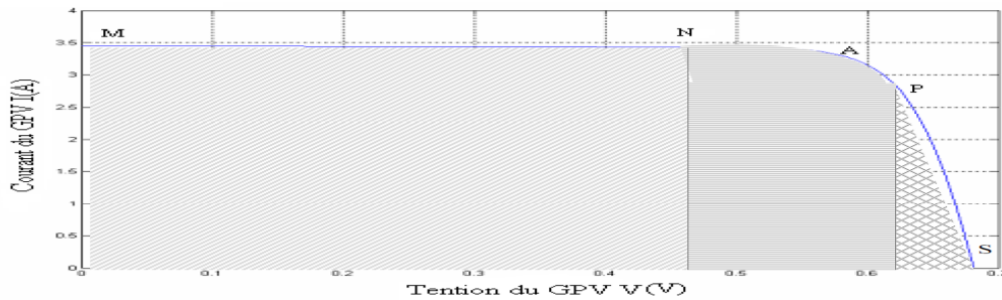


Figure 1.8: Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

Avec :

GPV : le générateur photovoltaïque .

M : le courant de court-circuit I_{cc} .

A : la puissance maximal.

S : la tension de circuit ouvert V_{oc} .

La courbe caractéristique d'une cellule PV (figure 1.8) représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension à ses bornes, depuis le court-circuit, point M (tension nulle correspondant au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert, point S, (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule).

La courbe de la cellule solaire $I=f(V)$ passe par trois points essentiels qui sont:

- Le courant de court-circuit I_{cc} en M ;
- La tension de circuit ouvert V_{oc} en S ;
- La puissance maximale en A ;

En effet, la caractéristique de la cellule solaire $I(V)$, se divise en trois parties [8] :

- La zone (MN) se distingue par le courant qui reste constant, quelle que soit la tension. Dans cette zone, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- La zone (PS) se distingue par une variation du courant correspondant à une tension presque constante, et c'est dans cette région, que le générateur est assimilable à un générateur de tension.
- La zone (NP) correspond au coude de la caractéristique. C'est la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, et elle représente la région préférée pour le fonctionnement (le point optimal peut être déterminé).

Cette caractéristique $I = f(V)$ se met sous la forme mathématique à partir des équations (1.2), (1.3) et (1.4) précédentes comme suit [1] :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left[q \times \frac{V + R_s I}{A \times K \times T} \right] - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1.5)$$

Le courant de court-circuit I_{cc} de la cellule photovoltaïque est exprimé par l'expression suivante, lorsque la tension est nulle ($V=0$) [1] :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left[\exp \left[q \times \frac{R_s I}{A \times K \times T} \right] - 1 \right] - \frac{R_s I}{R_{sh}} \quad (1.6)$$

A un niveau d'éclairement standard (1 kW/m^2), l'effet de la résistance série est négligeable (point M de la figure (1.8)). Dans ce cas, le courant de court-circuit peut être

considéré comme étant équivalent au photo-courant I_{ph} , c'est-à-dire proportionnel à l'éclairement [1].

$$I_{cc} = I_{ph} \quad (1.7)$$

• Tension de circuit ouvert :

Dans le cas du circuit ouvert (point S de la figure (1.8)), la tension du circuit ouvert peut être exprimée analytiquement selon la formule suivante: [1]

$$V_{cc} = \frac{A \times K \times T}{q} \times \ln \left(\frac{I_{ph} + I_s}{I_s} \right) \quad (1.8)$$

1.4.1.2 Rendement de la conversion :

Le rendement de la conversion est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur le module photovoltaïque. Si S est la surface de ce module, et E l'éclairement en W/m², le rendement énergétique s'écrit [1] :

$$\eta = \frac{P_m}{E \times S} \quad (1.9)$$

Avec :

$P_m = I_m \times V_m$, est la puissance maximale.

Ce rendement est souvent mesuré dans les conditions standard, « STC » (Standard Test Conditions) condition d'essai standard, c'est-à-dire sous l'ensoleillement de 1000W/m², à la température de 25C et sous un spectre AM1,5 (air mass: masse d'air en anglais). Ce dernier d'écrit l'angle d'incidence et le trajet parcouru par le rayonnement incident du soleil [7].

1.4.1.3 Puissance délivrée par une cellule PV :

La partie intéressante de la caractéristique courant – tension, pour l'utilisateur, c'est celle qui génère de l'énergie. Donc ce ne sera ni au point de tension de circuit ouvert (point S), ni au point de court circuit (point M), qui ne génèrent aucune énergie puisque la puissance est le produit du courant par la tension. La figure (1.9), représente la caractéristique sous lumière d'une photopile ainsi que des courbes théoriques de puissance .

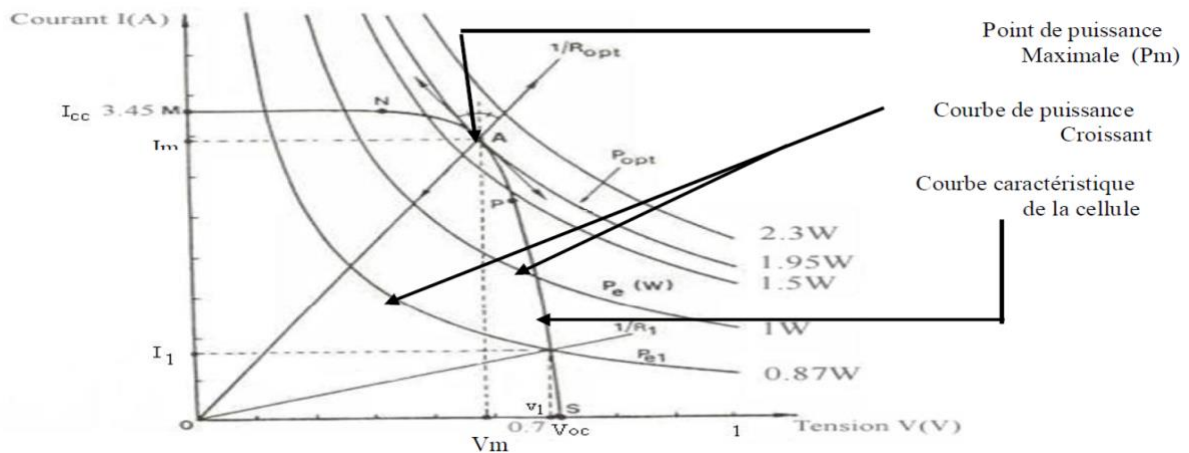


Figure 1.9: Courbe de puissance maximale et caractéristique courant-tension

Au point A (P_m) situé au «coude » de la courbe caractéristique, la puissance de la photopile est maximale pour l'éclairage considéré. Ce point dit de "puissance maximale", est associé à une tension maximale U_m et de courant maximal I_m .

On peut distinguer que plus la courbe est «carrée », plus la puissance maximale est élevée. On mesure cette propriété par "le facteur de forme" défini comme suit [1]:

$$FF = \frac{P_m}{V_{cc} \times I_{cc}} \tag{1.10}$$

1.5 Influence de la température et du rayonnement :

1.5.1 Influence de la température :

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules solaires vu que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à ce paramètre. Sur la figure (1.10), nous reportons les caractéristiques courant-tension pour différentes températures, sous un ensoleillement $1000W/m^2$ et à des températures entre 0 et $75^\circ C$.

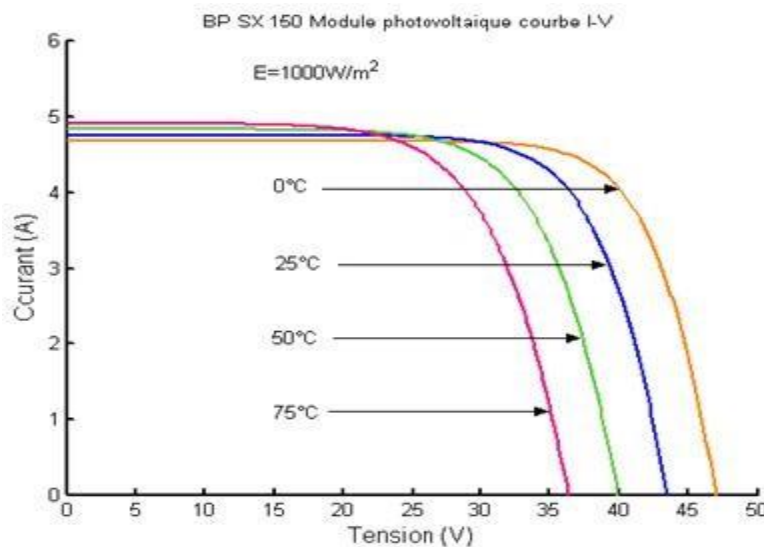


Figure 1.10: Effet de la température sur la caractéristique I-V

On remarque une importante variation de la tension, et une petite variation de l'intensité lorsque la température augmente; ceci peut être expliqué par une meilleure absorption de la lumière.

1.5.2 Influence du rayonnement :

De la même manière que la température, on remarque que la tension V_{co} ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant de court-circuit I_{cc} qui augmente fortement avec l'éclairement. La variation de la caractéristique $I(V)$ est représentée dans la figure suivante :

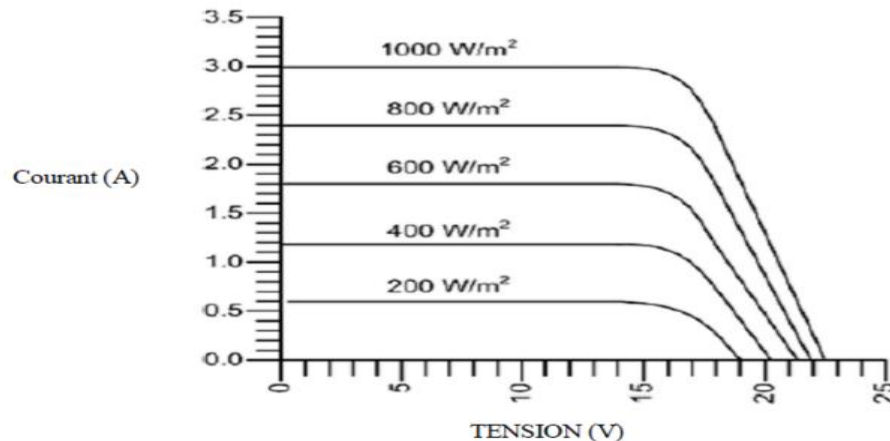


Figure 1.11: Evolutions de la caractéristique courant- tension

Pour différents niveaux d'éclairement figure (1.11), on remarque que le courant est directement proportionnel à l'irradiation à ces niveaux d'éclairement. La tension par contre n'est pas très dégradée lorsque l'irradiation baisse ; donc à température constante :

- I_{cc} est proportionnel à l'ensoleillement.
- V_{co} diminue légèrement avec l'ensoleillement.
- P_{max} est en première approximation proportionnelle à l'ensoleillement.

1.6 Module photovoltaïque :

Pour produire plus de puissance et pour satisfaire les besoins des charges couramment utilisées, il faut envisager un assemblage de plusieurs cellules photovoltaïques, soit en série, soit en parallèle. Cet assemblage forme ce qu'on appelle 'module photovoltaïque'.

Un module photovoltaïque est composé donc de plusieurs cellules solaires reliées les unes aux autres (figure 1.12).

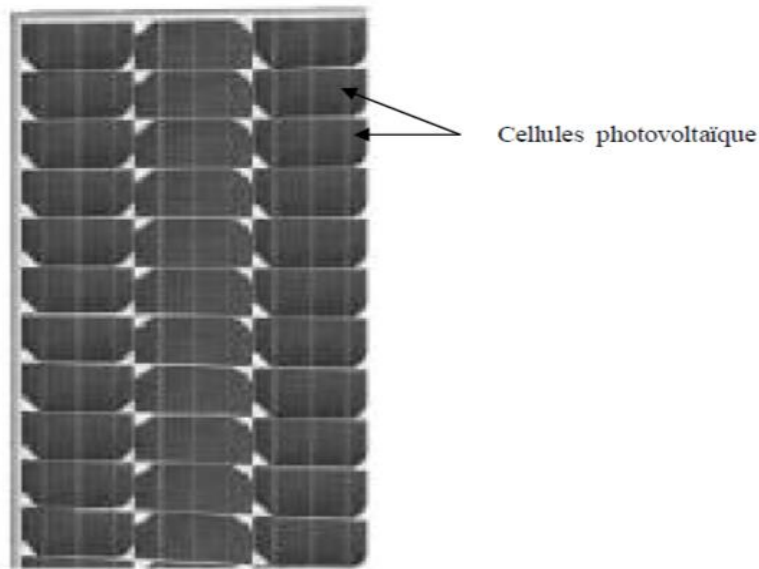


Figure 1.12: Module photovoltaïque

1.6.1 Composition d'un module solaire photovoltaïque :

Un module solaire photovoltaïque est composé généralement de six éléments (figure 1.13) [7]:

- Cadre en aluminium
- Joint pour fixer le module.
- Verre : pour la protection du module.
- Couche de l'EVA (EVA: éthylène-acétate de vinyle) : pour résister aux intempéries et à l'humidité .
- Cellules photovoltaïque .
- Feuille de Tedlar blanc : pour plus de résistance mécanique des grands modules.

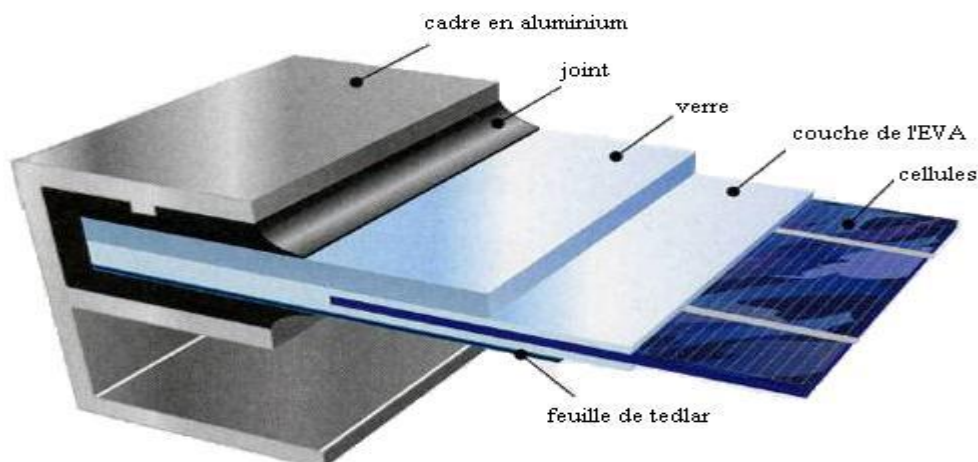


Figure 1.13: Composition d'un module solaire photovoltaïque

1.6.2 Caractéristiques d'un module solaire PV :

- **Puissance de crête, P_c :**

Exprimée en watt-crête (Wc), c'est la puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m²).

- **La caractéristique I/V :**

Courbe représentant le courant (I) débité par le module en fonction de la tension (V) 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 optimal , (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 (équation 1.9).

- **Facteur de forme :**

Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule (équation 1.10).

1.7 Panneaux solaire :

Le panneau solaire est un groupement de plusieurs modules, ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des panneaux PV dépend de :

- La taille du panneau.
- L'ensoleillement du lieu d'utilisation.
- La saison d'utilisation.
- Besoins en électricité.

La puissance délivrée par un panneau est importante dans les heures d'ensoleillement maximal, ce qui nécessite un élément de stockage.

1.7.1 Système photovoltaïque :

Depuis 1958, les cellules PV alimentent seulement le système énergétique des satellites. Les premières applications terrestres sont arrivées au début des années 70.

Aujourd'hui, grâce à leur fiabilité, le PV prend une place prépondérante. Il associe plusieurs composants à fin de former un système PV. Les systèmes photovoltaïques les plus couramment utilisés selon les exigences sont de trois types : autonome, raccordé au réseau et hybride [4].

1.7.1.1 Système photovoltaïque autonome :

Système autonome illustré en Figure I.14, c'est un site isolé qui n'est pas connecté au réseau, il permet de fournir de l'énergie électrique pour le fonctionnement des sites isolés. Ces systèmes nécessitent l'utilisation de batteries d'accumulateur pour stocker l'énergie durant l'absence du soleil.

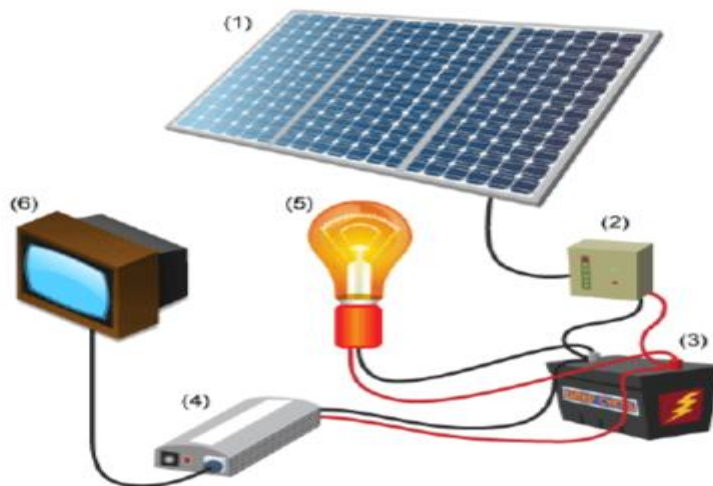


Figure 1.14 : Système photovoltaïque autonome

On peut citer quelques exemples de systèmes autonomes :

- Des balises en mer.
- Les lampadaires urbains.
- Pompage solaire.
- Maison en site isolé.

1.7.1.2 Système photovoltaïque raccordé au réseau :

Système raccordé au réseau, ou non autonome, c'est un système qui injecte l'excès d'énergie dans le réseau de distribution électrique. La figure suivante illustre ce type de système :

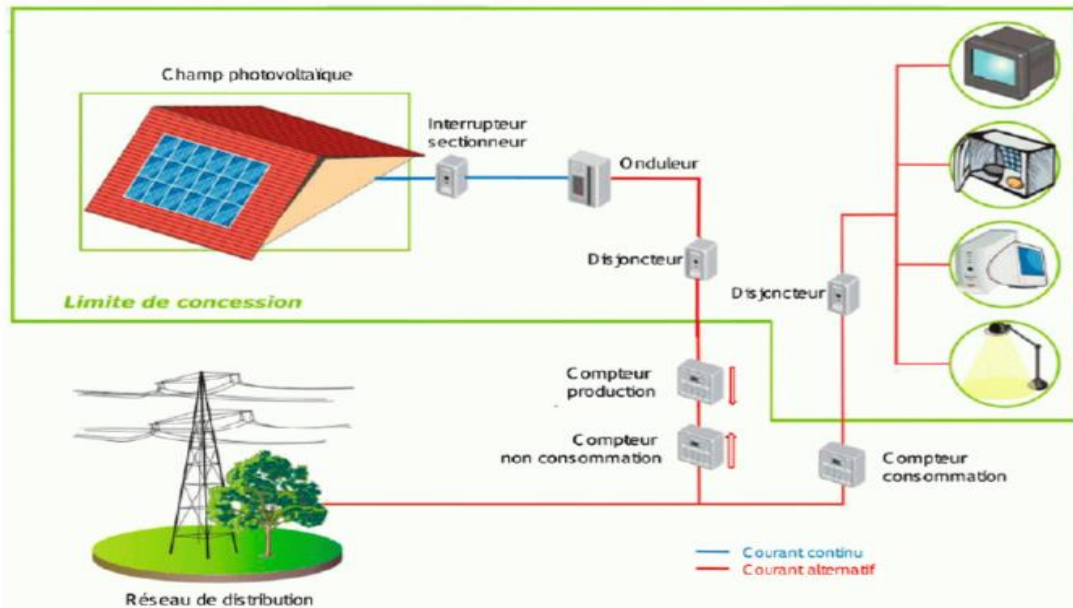


Figure 1.15 : Système photovoltaïque raccordé au réseau.

1.7.1.3 Système photovoltaïque hybride :

Il s'agit des systèmes regroupant des sources d'énergie de nature différente : Eolienne, générateur diesel ou une centrale de cogénération. Ce type d'installation est utilisé lorsque le GPV seul ne couvre pas tout l'énergie requise.

La figure suivante représente le système :

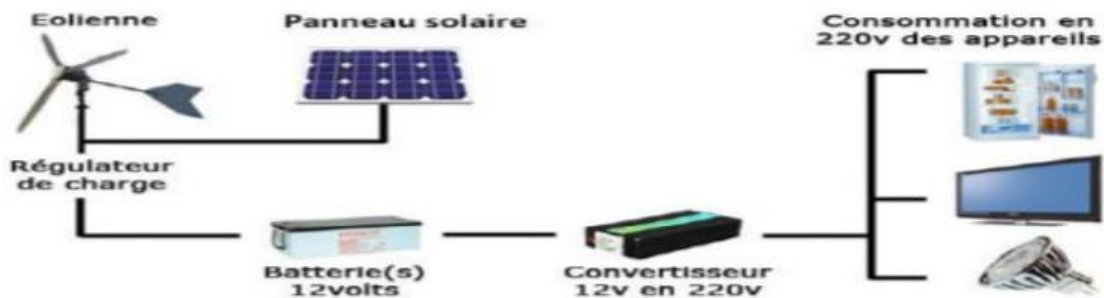


Figure 1.16: Système hybride PV-Eolien

1.8 Champs photovoltaïque (PV) :

Actuellement, la valeur de la puissance d'un module photovoltaïque va de quelques Watt crêtes à quelques dizaines de Watt crêtes. Pour obtenir des puissances supérieures (Kw,... Mw), il est nécessaire d'associer en série et/ou en parallèle des modules formant ainsi le champ photovoltaïque. Un champ photovoltaïque est donc constitué de modules associés électriquement entre elles (Figure 1.17)

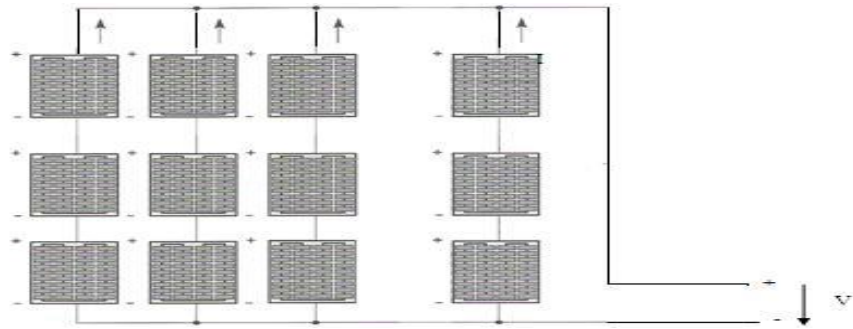


Figure 1.17: Champ de panneaux montrés en série-parallèle

En général, les cellules d'un panneau PV ne sont pas identiques (connaître la caractéristique de chaque cellule individuellement peut s'avérer être un problème de calcul très complexe), mais pour la détermination de la caractéristique (I-V) de l'ensemble, on considère que toutes les cellules, d'un même module, sont identiques et travaillent dans les mêmes conditions de température et d'éclairement. Les chutes de tension dans les conducteurs qui assurent l'interconnexion des cellules sont négligeables. En se basant sur ces suppositions, la caractéristique I-V d'un générateur PV est obtenue directement de celle des cellules en considérant que :

$$IG = Np.I \quad (1.11)$$

$$VG = Ns.V \quad (1.12)$$

Où :

- IG et VG : sont le courant et la tension du générateur .
- Np et Ns : sont le nombre de cellules associées en parallèle et en série dans un module photovoltaïque et pour un champ photovoltaïque.

1.9 Orientation des panneaux solaires :

1.9.1 Choix de l'orientation des modules :

L'orientation des modules doit être plein sud pour les sites de l'hémisphère Nord et plein nord pour les sites de l'hémisphère sud (figure 1.18). L'utilisation d'une boussole est fortement recommandée pour éviter toute approximation qui risquerait d'introduire une perte de puissance consécutive à une mauvaise orientation [8].

1.9.2 Choix de l'inclinaison des modules :

Pour que les modules produisent un maximum d'énergie, il faut que leur surface soit perpendiculaire aux rayons solaires. On doit donc incliner les modules pour qu'ils soient face au soleil. La valeur d'inclinaison correspond à l'angle que font les modules avec l'horizontale. Comme il est difficile de modifier plusieurs fois au cours de l'année l'inclinaison des modules, on choisit généralement une valeur moyenne pour toute l'année [8].

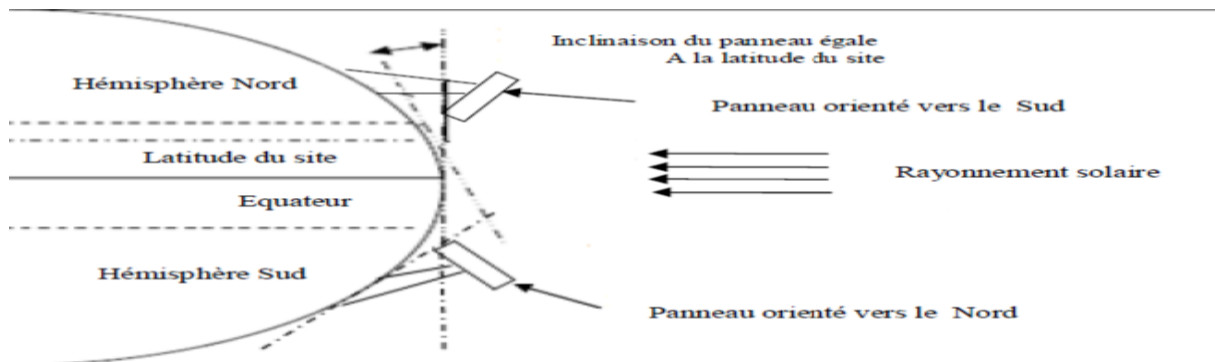


Figure 1.18: Comment incliner le panneau solaire

1.9.3 Trajectoire apparente du soleil :

Pour un observateur situé sur la surface de la terre, le soleil décrit une trajectoire apparente qui dépend de la latitude (hauteur) et la longitude (azimut) du lieu où il se trouve. Rappelons que la latitude est la distance angulaire d'un point quelconque du globe par rapport à l'équateur (de 00 à 900 dans l'hémisphère nord). Quand à la longitude, c'est également un angle, donné par rapport au méridien de Greenwich en se déplace vers l'Est (figure 1.19) [1].

Le déplacement apparent du soleil et d'environ 240° en azimut et de 70° en élévation de latitudes [11].

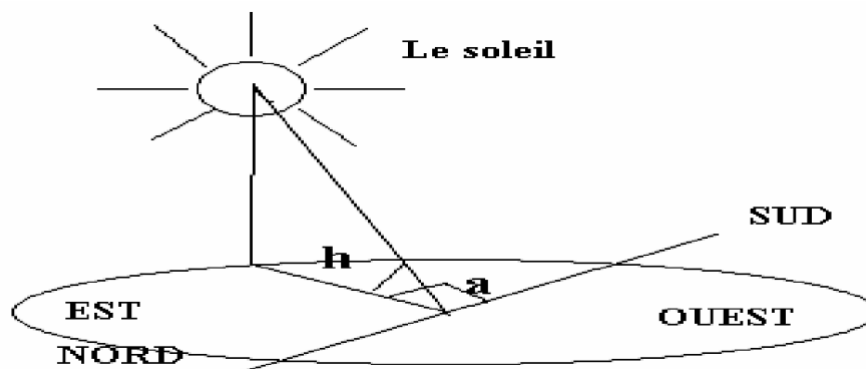


Figure 1.19 : Représentation de la latitude (hauteur) angulaire et l'azimut

Le soleil se déplace au cours de la journée et suivant les saisons (figure 1.20). Le panneau solaire, en revanche, se trouve généralement en position fixe, ce qui entraîne des pertes énergétiques précieuses. Une installation fixe, orientée, dans le cas idéal, vers le sud délivre une puissance qui croît très lentement tôt le matin et diminue fortement l'après-midi. Une part importante de l'énergie récupérable est ainsi perdue.

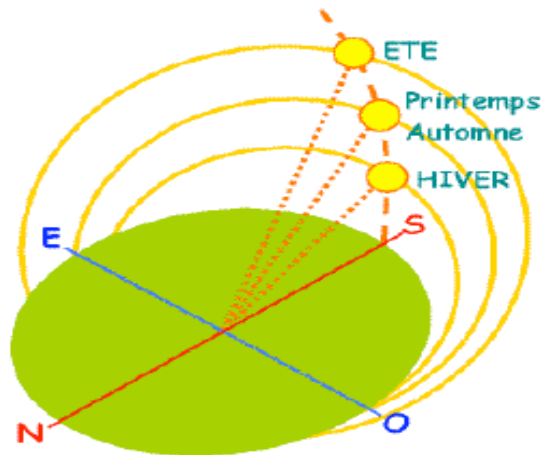


Figure 1.20: Définition de la position du soleil (latitude et azimut)

Si l'installation s'oriente constamment en direction du soleil, elle génère un maximum d'électricité. Une installation fixe de 1 kW et orientée de façon optimale, produit par jour d'ensoleillement, environ 5 kWh d'électricité solaire. La même installation de 1kW avec «suiveur» fournit en revanche jusqu'à 10 kWh par jour. C'est à dire 50% de gains d'énergie en plus. Ainsi, seule une rotation automatique peut permettre au panneau solaire de délivrer une puissance maximale.

1.10- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur le domaine photovoltaïque. On a commencé par donner l'essentiel sur les cellules solaires. La liaison de ces cellules (série et/ou parallèle) a été également traitée. Cette liaison constitue le module photovoltaïque; alors que la liaison de ces modules aboutit au panneau ou générateur photovoltaïque. Et Nous avons vu aussi les caractéristiques courant-tension. De mémé nous avons donné un bref aperçu sur l'orientation des panneaux solaire

CHAPITRE 2

Les convertisseurs statique et la commande MPPT

2.1 Introduction :

Des lois de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'a priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont n'éte modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance [12].

Dans ce chapitre nous présentons les différents types des convertisseurs statiques qu'on peut utiliser dans le système photovoltaïque. une première conversion DC/DC puis une conversion DC/AC. Dans les systèmes photovoltaïques connectés aux réseaux, le convertisseur DC/DC a généralement le rôle d'augmenter la tension pour que l'onduleur puisse réaliser un courant sinusoïdal à la tension du réseau, les convertisseurs sont utilisés pour bien adapter la source à la charge.

On présente aussi ,la commande de ces convertisseurs(MPPT) et quelques techniques existantes qui permettent de faire fonctionner le GPV à sa puissance maximale. quelques méthodes MPPT basées sur réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrémentement de l'inductance et méthode de perturbation et observation.

2.2 Les Principes de Conversion dans les Systèmes PV :

Le générateur PV est l'élément principal d'un système PV. Cependant, pour une application pratique, d'autres éléments sont nécessaires, par exemple pour le stockage de l'énergie, pour la régulation de la circulation du flux d'énergie ou pour l'alimentation du réseau alternatif. Ces composants supplémentaires représentent une part considérable du coût, provoquent la réduction du rendement et influencent considérablement le comportement et les performances de tout le système.

2.3 Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge :

Un GPV présente des caractéristiques $I(V)$ non linéaires avec des points de puissance maximaux(PPM). Ces caractéristiques dépendent au niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans la figure (2.1). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de P_{MAX} disponible [13].

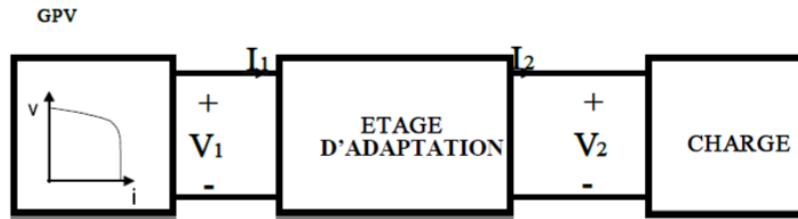


Figure 2.1 : Etage d'adaptation entre un GPV et une charge [12]

L'adaptateur communément utilisé en PV est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC et DC/ AC).

2.4 Convertisseur DC/DC :

La figure 2.2 montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge.

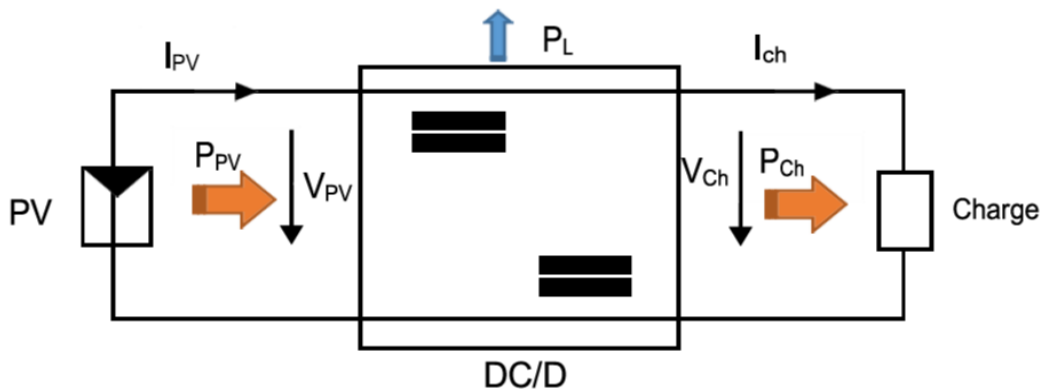


Figure 2.2 : convertisseurs DC-DC[12]

L'utilisation des convertisseurs DC-DC permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Les circuits des hacheurs se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements. Le commutateur est réalisé avec un dispositif semi-conducteur, habituellement un transistor MOSFET ou un IGBT fonctionnant en mode (bloqué/saturé). Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro d'où une dissipation de puissance nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque nulle et par conséquent la puissance perdue sera très faible [14].

2.4.1 Hacheur Buck (dévolteur) :

Le convertisseur Buck dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur dévolteur ou hacheur série. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K (Figure 2.3) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [15].

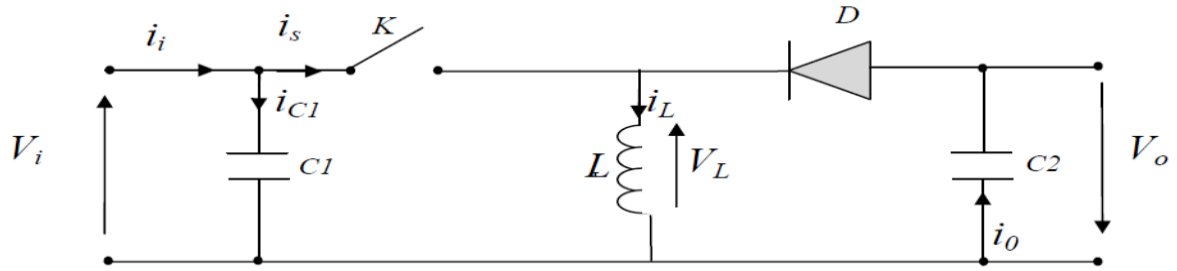


Figure 2.3: Schéma électrique d'un hacheur buck

On note α : le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur.

T_e : étant la période des impulsions.

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , la un courant circule dans le circuit, mais ne passe pas par la diode puisqu'elle est inversement polarisée. L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $f_e = \frac{1}{T_e}$ La source V_i fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps $t \in [\alpha T_e, T_e]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre. La tension à ses bornes est donc nulle [15].

Modèle mathématique équivalent :

Pour savoir le comportement réel nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure 2.4 montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec le commutateur fermé, tandis que la figure 2.4 représente le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant $(1 - \alpha) T_e$ [15].

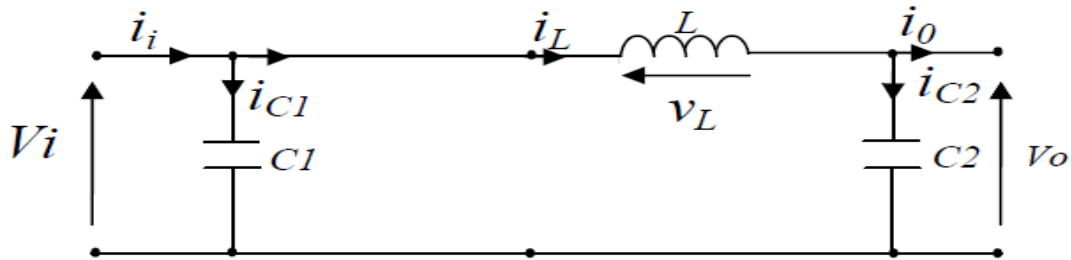


Figure 2.4: Schéma électrique d'un hacheur Buck fermé

Lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff sur le circuit ci-dessus on aura les équations suivantes:

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{C2}(t) = C2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = VL \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{cases} \quad (2.1)$$

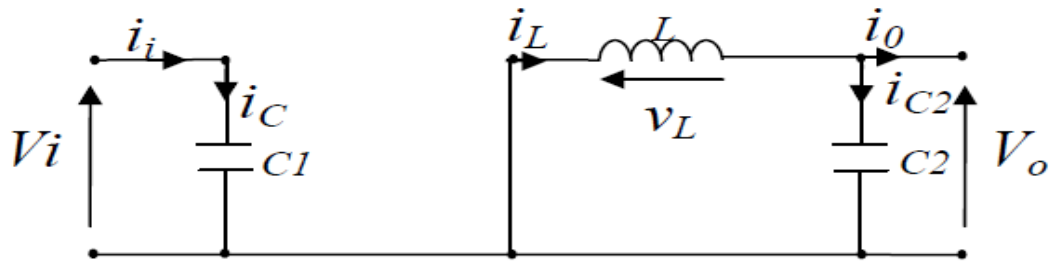


Figure 2.5: Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{C2}(t) = C2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_o(t) \end{cases} \quad (2.2)$$

2.4.2 Hacheur boost (élévateur) :

C'est un convertisseur DC-DC élévateur. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [15]. Connue aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure 2.6. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [16].

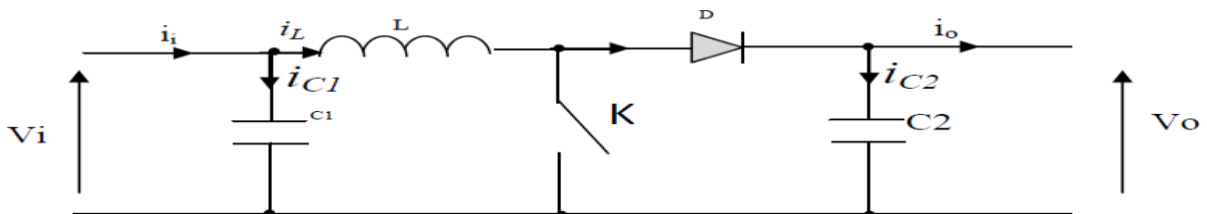


Figure 2.6: Schéma électrique d'un hacheur boost

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée, le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D [15].

Modèle mathématique équivalent :

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. celui de la figure 2.7 présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c.-à-d. d'entre $[0, \alpha T_e]$ [15].

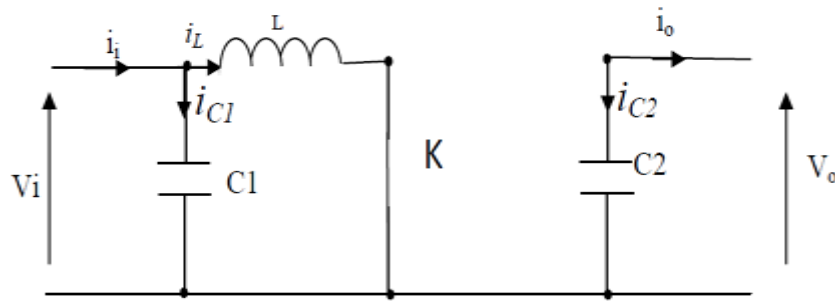


Figure 2.7: Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.

Comme pour le circuit buck, l'application des lois de Kirchoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donnent les calculs suivantes :

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C1 \frac{dV_{i}(t)}{dt} = i_{i}(t) - i_{L}(t) \\ i_{C2}(t) = C2 \frac{dV_{o}(t)}{dt} = -i_{o}(t) \\ V_{L}(t) = L \frac{di_{L}(t)}{dt} = V_{i}(t) \end{cases} \quad (2.3)$$

L'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant:

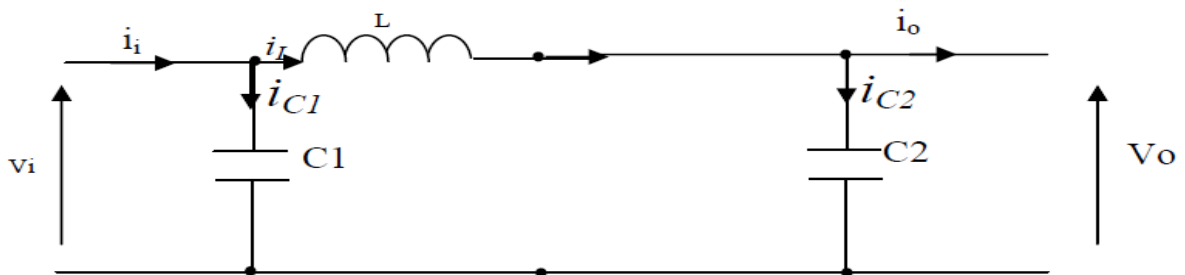


Figure 2.8: Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C1 \frac{dV_{i}(t)}{dt} = i_{i}(t) - i_{L}(t) \\ i_{C2}(t) = C2 \frac{dV_{o}(t)}{dt} = i_{L}(t) - i_{o}(t) \\ V_{L}(t) = L \frac{di_{L}(t)}{dt} = V_{i}(t) - V_{o}(t) \end{cases} \quad (2.4)$$

Avantage de convertisseur BOOST :

Malgré le rendement élevé du convertisseur buck dans les systèmes avec des sources de puissance conventionnelles, le convertisseur boost peut être plus approprié aux systèmes photovoltaïques avec le suiveur du point de puissance maximale (MPPT) puisque le convertisseur fonctionne au mode de courant continu extrayant autant de puissance que possible à partir des cellules solaires. Par conséquent le rendement énergétique du convertisseur boost peut être plus grand que le convertisseur buck. Le convertisseur boost est

généralement employé pour obtenir une tension plus élevée de sortie, tandis que le convertisseur buck est employé pour abaisser la tension de sortie [17].

2.4.3 Hacheur dévolteur-survolteur :

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée; son schéma de base est illustré par la figure (2.9) [20] :

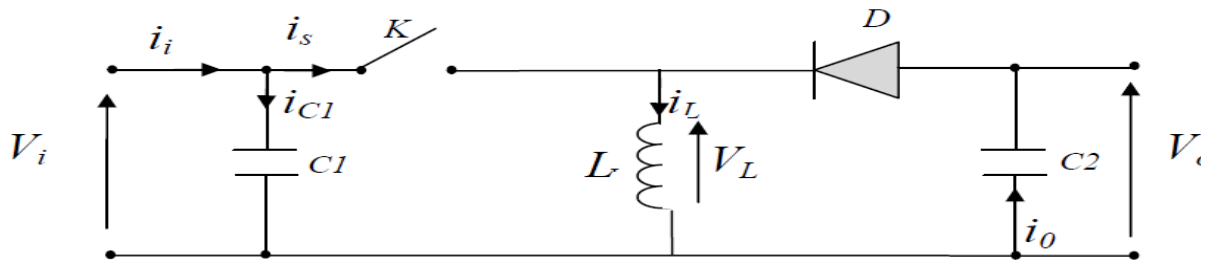


Figure 2.9: Convertisseur dévolteur-survolteur

La figure (2.10) montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur pour les deux cycles deux fonctionnements [20].

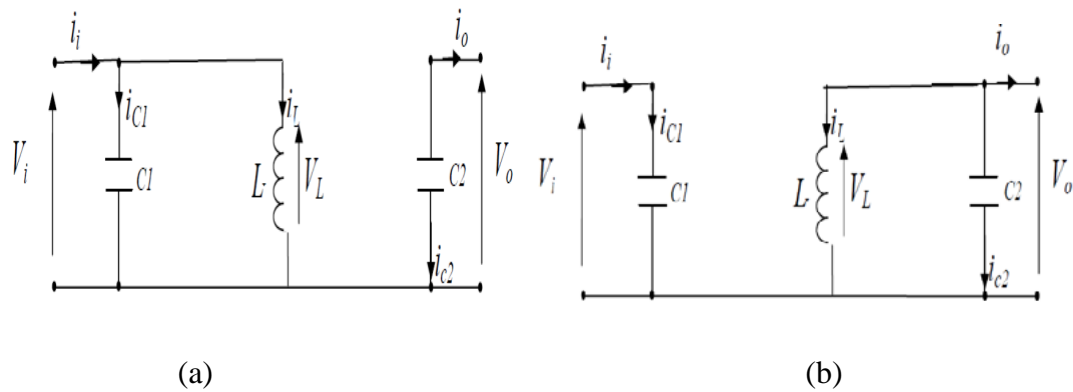


Figure 2.10: Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur,

(a) : K fermé, (b) : K ouvert

Pour la première période αT_e :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{C1}(t) = C1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{C2}(t) = C2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{array} \right. \quad (2.5)$$

Pour la deuxième période $(1-\alpha)T_e$:

$$\begin{cases} iC1(t) = C1 \frac{dvi(t)}{dt} = ii(t) \\ iC2(t) = C2 \frac{dvo(t)}{dt} = iL(t) - i0(t) \\ VL(t) = L \frac{diL(t)}{dt} = V0(t) \end{cases} \quad (2.6)$$

2.5 Convertisseurs DC/AC :

L'onduleur est un convertisseur statique DC/AC de haute performance il convertit la tension continue, en tension alternative contrôlée de façon très précise. La source de tension continue soit un aérogénérateur ou des panneaux solaires.

La commande de l'onduleur est basée sur la prédiction de la tension de sortie d'un pas en avant que nous appellerons « Dead beat control » par cette commande, la tension de sortie de l'onduleur est forcée de suivre une référence sinusoïdale échantillonnée pour la production à la sortie du filtre une onde proche d'une sinusoïde avec un taux de distorsion harmonique très réduit.

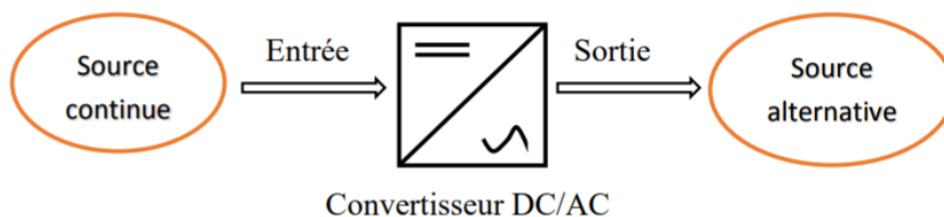


Figure 2.11 : Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)

2.5.1 Principe générale de fonctionnement :

Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une tension/courant continu en tension /courant alternatif. Il est dit autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde .Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion

- Onduleur Monophasé.
- Onduleur Triphasé

2.5.2 Onduleur Monophasé :

Ce type d'onduleur délivrant en sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement destinée aux alimentations de secours. Deux classes d'onduleurs monophasés sont à distinguer, suivant leur topologie.

2.5.2.1 Onduleur monophasé en demi-pont :

Le schéma de principe d'un tel onduleur monté en demi-pont est montré sur la figure (2.12).

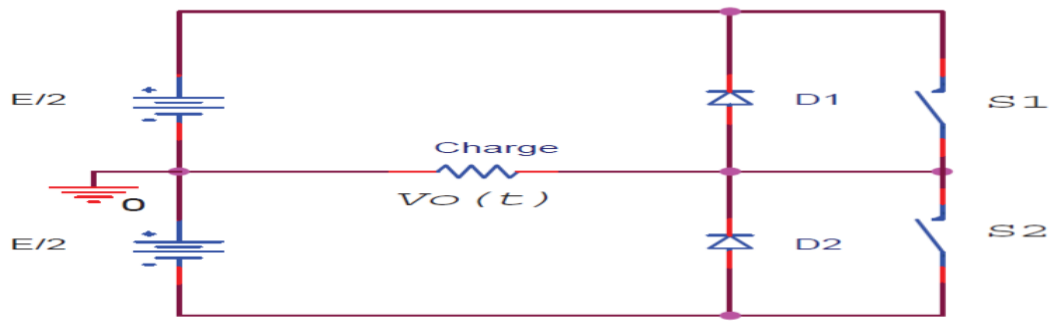


Figure 2.12 : Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Demi-pont

Il est constitué principalement de deux interrupteurs de puissance notés S1 et S2 à commande complémentaire. La durée de conduction de chacun des interrupteurs est alors d'un demi cycle (180°) correspondant à la fréquence du signal de sortie requis.

Lors de la fermeture de l'interrupteur S1, la tension aux bornes de la charge serait donc de $+E/2$, et prend la valeur $-E/2$ quand le second interrupteur, S2 est fermé.

La conduction simultanée des deux interrupteurs est évitée par l'élaboration d'une commande adéquate qui tient compte des différentes caractéristiques des imperfections de ces interrupteurs de puissance (temps de montée t_r , temps de descente t_f et temps de stockage t_s).

Les diodes D1, D2, dites de récupération, assurent la conduction d'un courant négatif en cas de déphasage de ce dernier par rapport à la tension aux bornes de la charge.

2.5.2.2 Onduleur monophasé en pont (Pont H) :

L'onduleur en pont est représenté en figure (2.13) il comporte quatre interrupteurs de puissance désignée par S1, S2, S3 et S4 quand les interrupteurs S1 et S2, sont fermés simultanément la tension imposée aux bornes de la charge prend la valeur $+E$, et de $-E$ lors de la fermeture simultanée des deux autres interrupteurs S3 et S4.

Deux interrupteurs du même bras ne peuvent pas conduire simultanément, à cause d'un court-circuit de la source de tension continue.

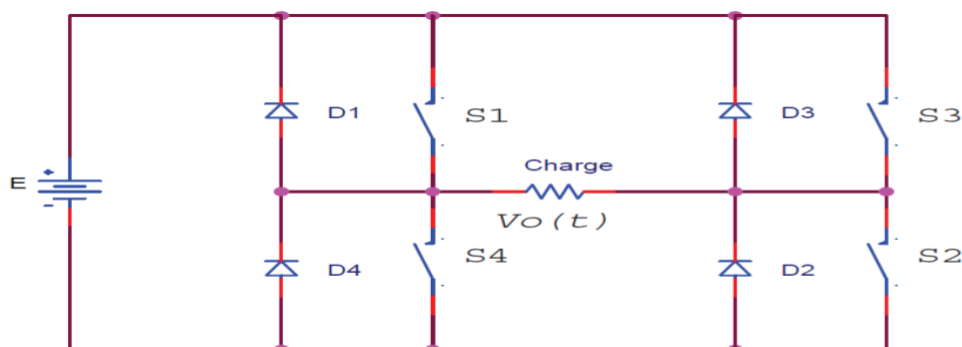


Figure 2.13 : Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Pont

2.5.3 Onduleur triphasé :

Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour des applications de grande puissance. La structure de tel convertisseur se fait par l'association, en parallèle, de trois

onduleurs monophasés en demi pont (ou en pont) donnant trois tensions de sortie déphasées de 120° degrés, l'une par rapport à l'autre.

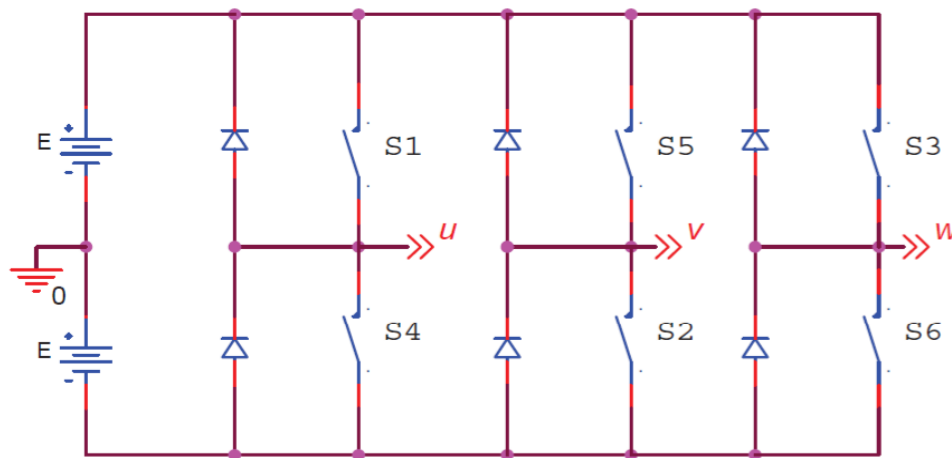


Figure 2.14 : Schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé En Pont

Figure (2.14) illustre la topologie d'un onduleur triphasé à six interrupteurs de puissance. Le décalage entre les signaux de commande est de 60° [22].

2.6 Commande pour la Recherche du Point de Puissance

Maximale(MPPT) :

La connexion entre une source et une charge peut être optimisée en ajustant le rapport cyclique α de la CS au but de maximiser la puissance délivrée à la charge plusieurs étaient appliqués.

Parmi ces techniques, on trouve la technique de la Poursuite du Point de Puissance Maximale MPPT.

Un MPPT, (Maximum Power Point Tracking)est un principe permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens [18].

La figure 2.15 représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT. Comme présenté sur la figure, la commande MPPT est associée à un quadripôle possédant des degrés de liberté qui permettent de faire une adaptation entre le GPV et la batterie.

Dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC, pour que la puissance fournie par le GPV corresponde à la puissance maximale (P_{max}) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la batterie. La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le GPV à sa valeur optimale de fonctionnement (quelles que soient les fluctuations atmosphériques température et l'éclairement) [19].

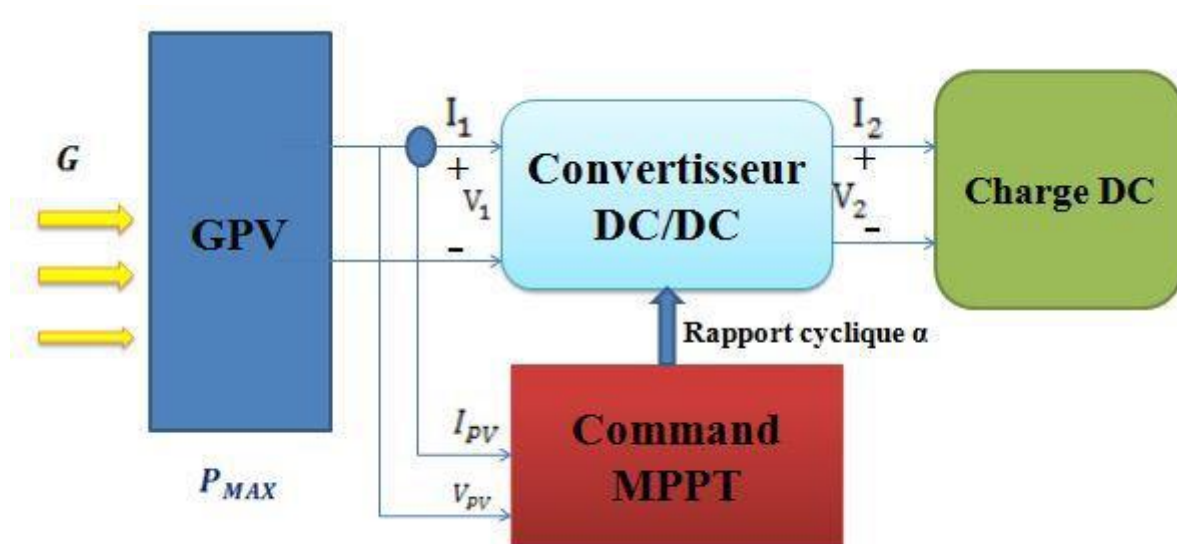


Figure 2.15: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

2.7 Les Algorithmes MPPT :

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV.

2.7.1 Algorithme perturbation et observation “Perturb and Observe” (P&O) :

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche de MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{PV} et I_{PV} respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température. La méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension V_{PV} et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du panneau photovoltaïque. [21] .

La figure (2.16) représente l'algorithme de la méthode P&O. À chaque cycle, V_{PV} , I_{PV} sont mesurés pour calculer $PPV(k)$. Cette valeur de $PPV(k)$ est comparée à la valeur $PPV(k-1)$ calculée au cycle précédent.

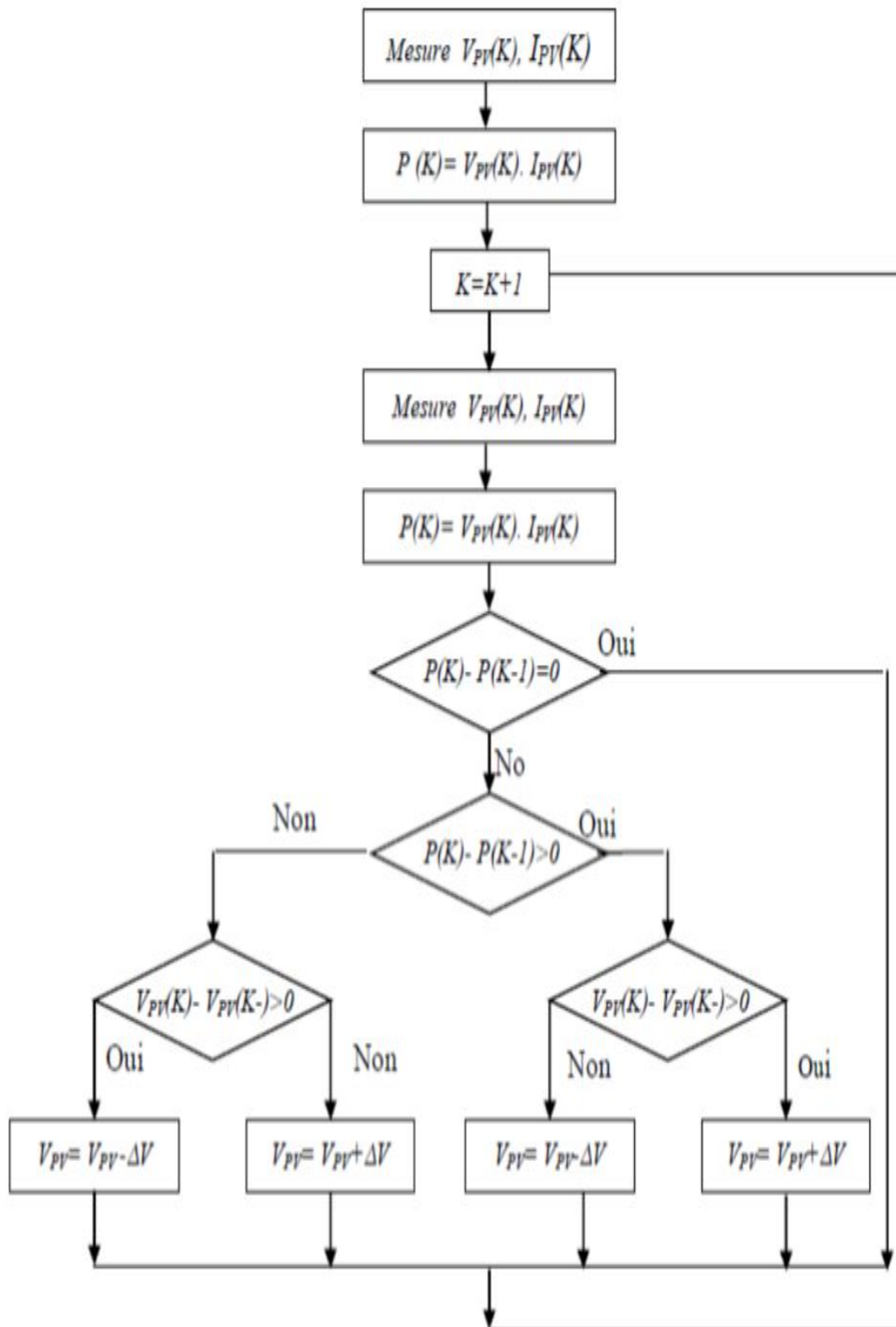


Figure 2.16: Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O)

Si la puissance de sortie a augmenté, VPV est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance de sortie a diminué, VPV est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent. VPV est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT.

Quand le point de puissance maximale est atteint, VPV oscille autour de la valeur optimale VOP. Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas de l'incrémentation de la perturbation. Si ce pas d'incrémentacion est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement .

D'autre part, si le pas est petit, les pertes, lors des conditions de changements atmosphériques lents ou stables, seront inférieures mais le système ne pourra pas répondre rapidement aux changements rapides de la température ou de l'éclairement. Le pas idéal est déterminé expérimentalement en fonction des besoins.

Il est important de noter qu'avec l'algorithme P&O, la variable à contrôler peut être soit la tension soit le courant du GPV. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV.

Un inconvénient de la méthode P&O est qu'elle peut échouer lors d'un rapide changement des conditions atmosphériques. [21]

2.7.2 Algorithme incrémentacion de la conductance :

L'algorithme par incrémentacion de conductance se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro .Figure 2.17

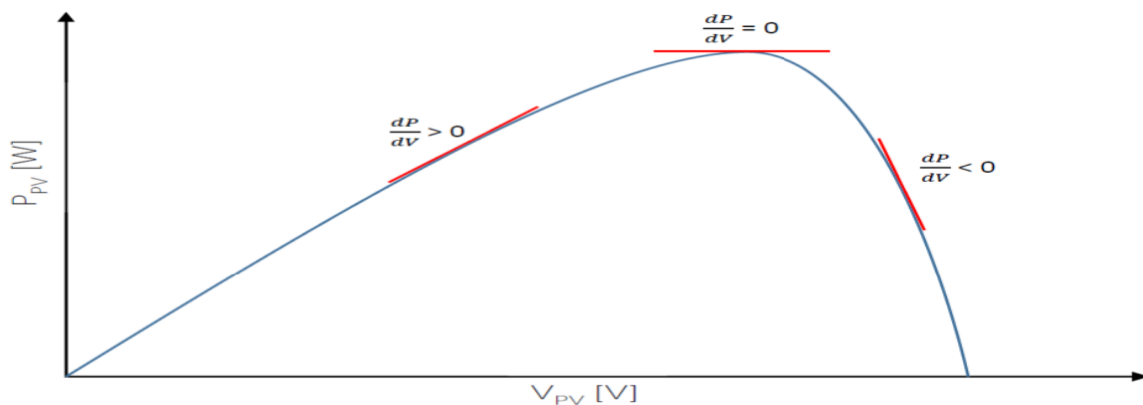


Figure 2.17 : caractéristique de tension-puissance du panneau

On observer que :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{dV} = 0 \quad \text{au MPP} \\ \frac{dP}{dV} > 0 \text{ à gauche du MPP} \\ \frac{dP}{dV} < 0 \text{ à droite du MPP} \end{array} \right. \quad (2.7)$$

Puisque :

La puissance du panneau solaire est donnée par :

$$P = V \times I \quad (2.8)$$

Et sa dérivée partielle est donnée par :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (2.9)$$

Donc, l'équation (2.10) peut être écrite comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \text{ le point de fonctionnement est sur le MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \text{ le point de fonctionnement est à gauche du MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \text{ le point de fonctionnement est sur la droite du MPP} \end{array} \right. \quad (2.10)$$

Le PPM peut être atteint en comparant à chaque instant la valeur de la conductance (IPV/VPV) avec celle de l'incrément de conductance (dIPV/dVPV). Si l'incrément de conductance (dG) est supérieur à l'opposé de la conductance (-G), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le MPP. La Figure 2.18 montre l'algorithme de cette méthode [23].

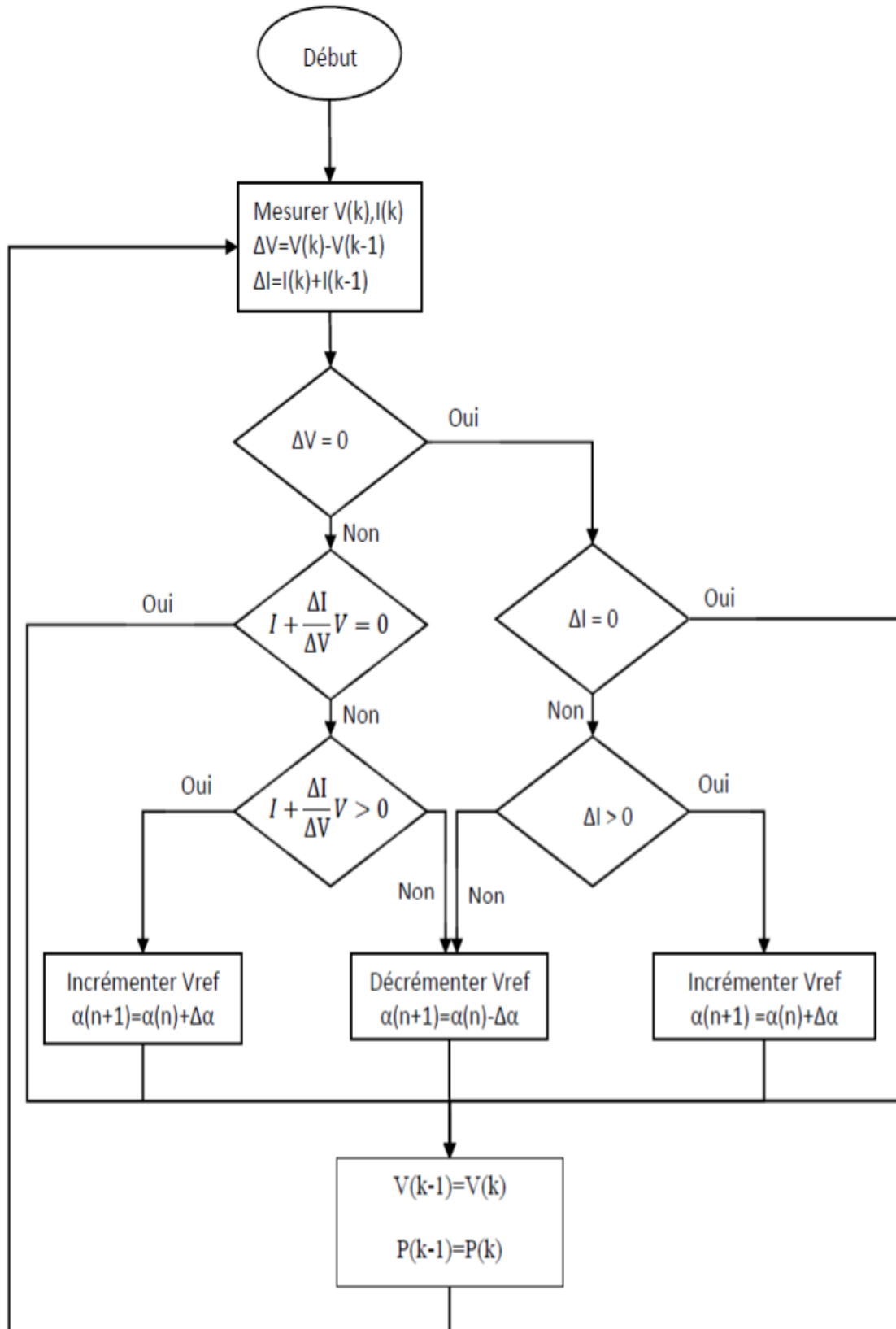


Figure 2.18 : l'algorithme IncCond classique

2.7.3 Autres méthodes :

Il existe dans la littérature d'autres algorithmes MPPT plus complexes qui font parfois appel à des techniques nouvelles. On peut citer :

- les algorithmes basés sur la logique floue.
- les algorithmes à base de réseau de neurones.
- les algorithmes d'identification en temps réel du MPP.
- Dans le cas où la charge est une batterie, il existe un algorithme qui vise à maximiser uniquement le courant de charge puisque la tension en sortie est constante. Cet algorithme fait ainsi appel à un seul capteur ce qui réduit considérablement le coût.
- l'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance) .
- la méthode de l'oscillation forcée .

2.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présentés les différents convertisseurs à savoir DC/DC et DC/AC. Pour la première partie on a décrit les différents types d'hacheurs et leurs principes de fonctionnements, pour le second convertisseur, on a présenté les onduleurs sur les onduleurs, leurs fonctionnements, et plus précisément les onduleurs triphasé à trois niveaux largement utilisés dans les systèmes PV.

Dernièrement on a passé à la description de la commande MPPT, le principe de recherche du MPPT, les techniques les plus réponsus dans la gestion des systèmes photovoltaïques.

CHAPITRE 3

Simulation et commande d'un système PV en régime de défaut

3.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'étude par simulation du comportement d'un PV connecté avec un réseau actif, durant la simulation deux tests de performance sont envisagés :

- Régime permanent .
- Court-circuit monophasés et triphasés côté réseau .

Les résultats de simulation de notre modèle sont obtenus à l'aide du logiciel Matlab/Simulink en utilisant la technique de la commande MPPT décrite au chapitre 2. Étant donné que le système de contrôle du PV utilise techniques (perturbation et observation), le modèle est simulé avec un pas de temps faible (quelques seconde). En utilisant un tel pas de temps faible, il est possible d'observer la réponse du système globalement au cours du démarrage du système, les changements majeurs et même les variations au moment des défauts. Toute fois, cela ralentit le processus de simulation et génère une quantité énorme de données. Cela peut servir, éventuellement, à approfondir l'étude des signaux résultants.

3.2 Système photovoltaïque connecté au réseau :

3.2.1 Description du système étudié :

Un générateur photovoltaïque de 100 kW est connecté à un réseau de 25 kV via un convertisseur élévateur CC-CC et un convertisseur source de tension triphasé à trois niveaux (VSC). Le système de contrôle (MPPT) implémenté dans le convertisseur élévateur (ici on adopte la technique ('Perturb & Observe')).

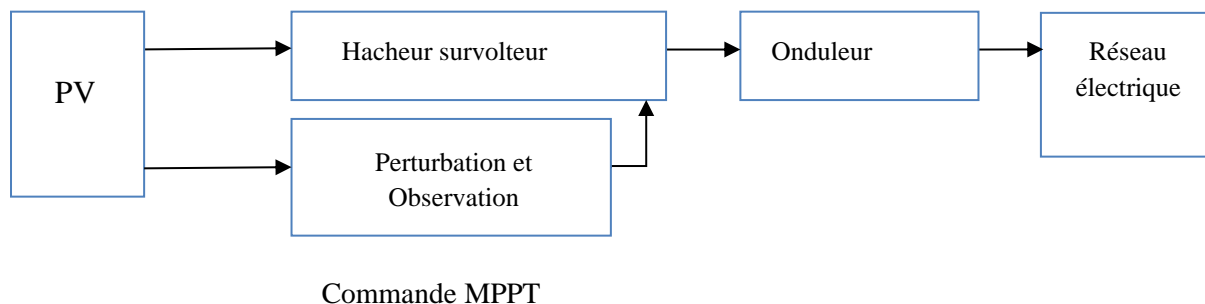


Figure 3.1 schéma synoptique d'un système photovoltaïque contrôlé par (MPPT)

Le modèle contient les composants suivants :

- **Générateur photovoltaïque** fournissant un maximum de 100 kW à un rayonnement solaire de $1000 \text{ W} / \text{m}^2$.
- **Convertisseur boost DC-DC**
- **VSC triphasé à 3 niveaux**
- **Transformateur de couplage triphasé 100 kVA 260V / 25kV .**
- **Réseau de distribution.**

Le générateur photovoltaïque de 100 kW se compose de 66 chaînes de 5 modules 305,2 W connectés en série connectés en parallèle ($66 * 5 * 305,2 \text{ W} = 100,7 \text{ kW}$). Les spécifications du fabricant pour un module sont les suivantes:

- Nombre de cellules connectées en série: 96
- Tension en circuit ouvert: $V_{oc} = 64,2 \text{ V}$
- Courant de court-circuit: $I_{sc} = 5,96 \text{ A}$
- Tension et courant à la puissance maximale: $V_{mp} = 54,7 \text{ V}$, $I_{mp} = 5,58 \text{ A}$

Le bloc de panneaux photovoltaïques possède deux entrées qui vous permettent de faire varier l'irradiance solaire (entrée 1 en W / m^2) et la température (entrée 2 en degrés C). Les profils d'éclairement et de température sont définis par un bloc Signal Builder qui est connecté aux entrées du générateur photovoltaïque.[24]

3.3 Régime permanent :

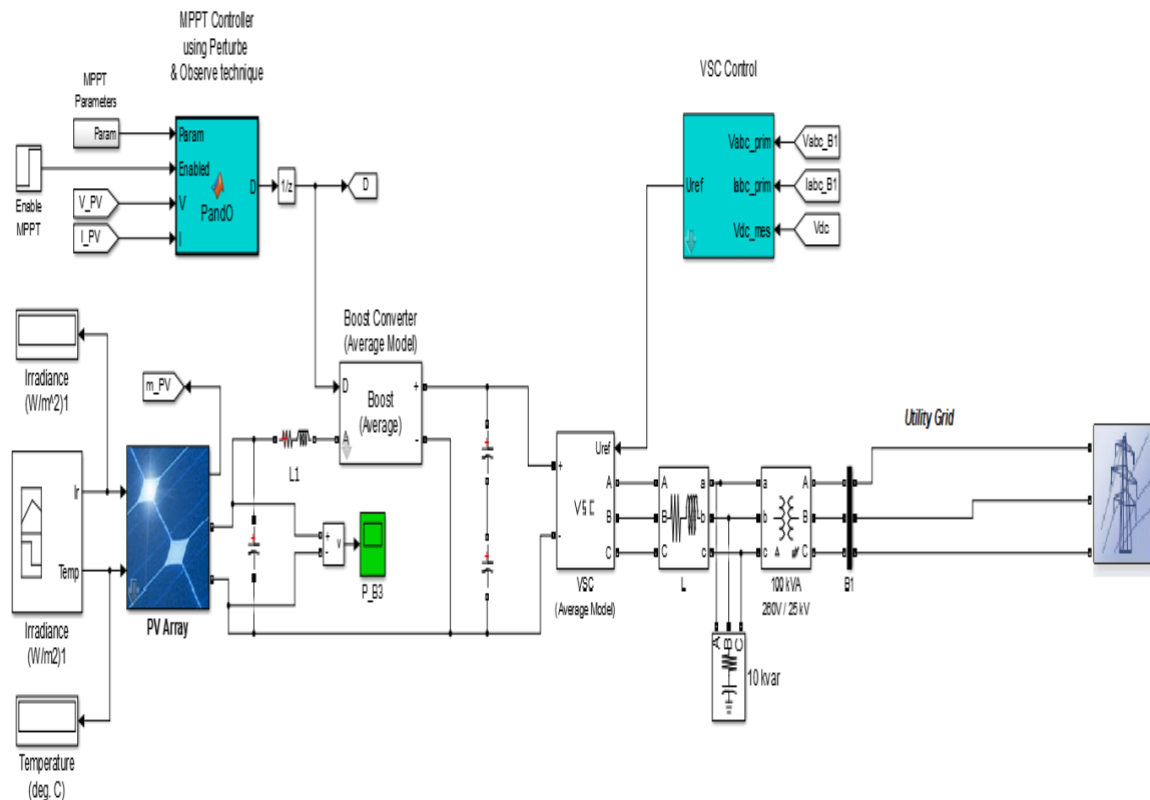


Figure 3.2 : Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O).

3.3.1 Résultats de simulations :

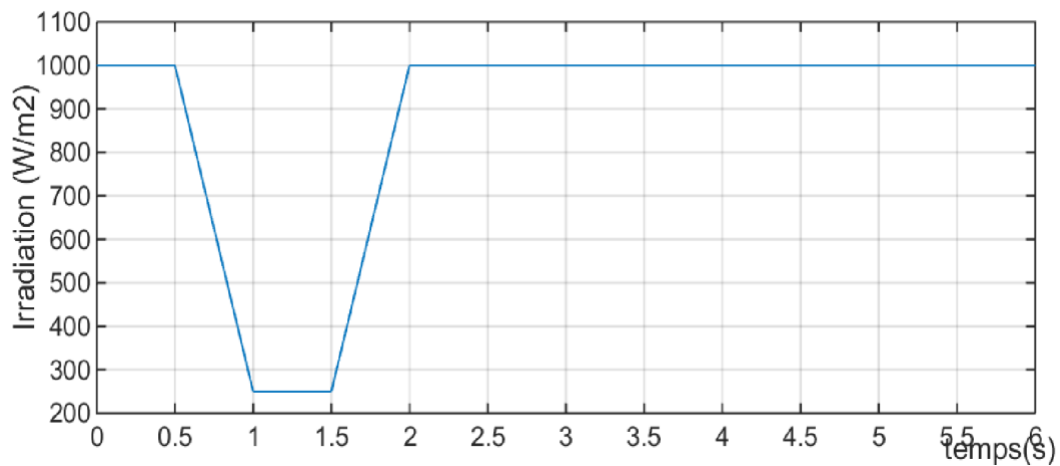


Figure 3.3 : variation de l'éclairement en fonction du temps

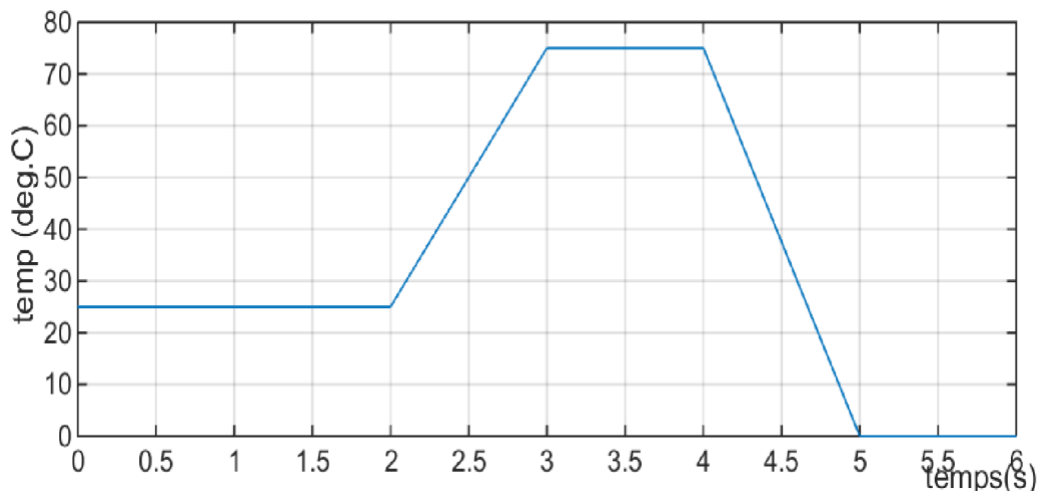


Figure 3.4 : variation de température en fonction du temps

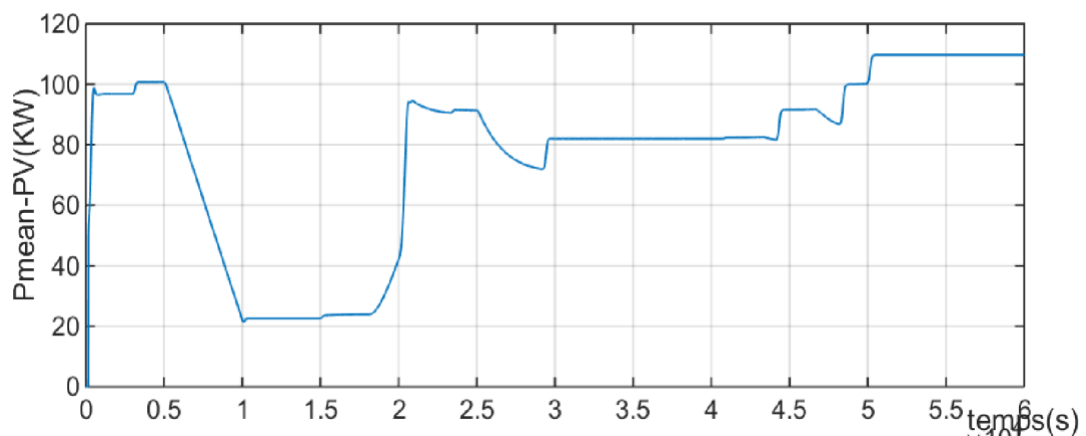


Figure 3.5: Puissance de panneau (PV)

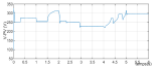


Figure 3.6: La tension générée par le panneau (PV)

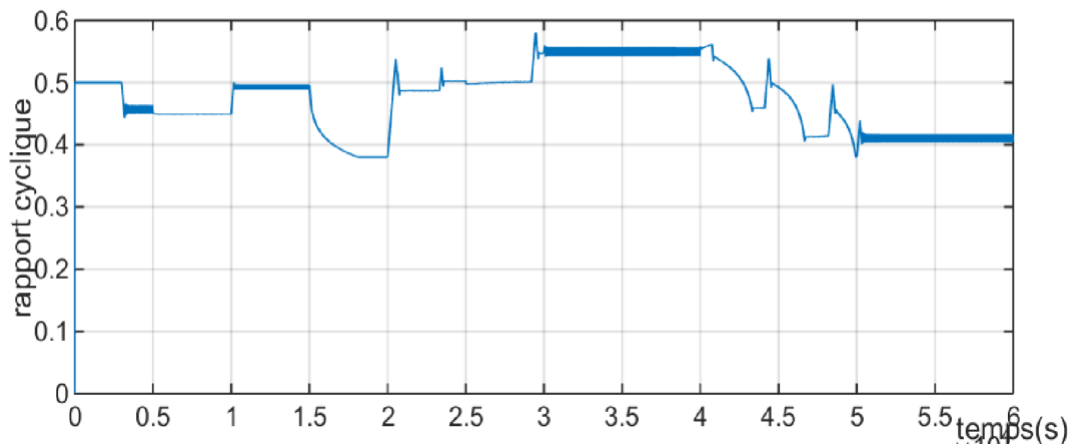


Figure 3.7: La variation du rapport cyclique

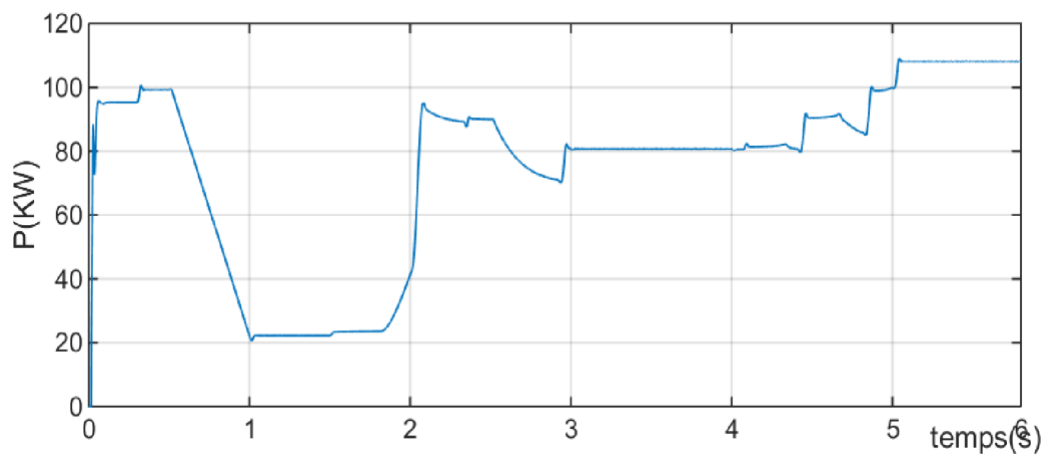


Figure 3.8: Puissance de réseau



Figure 3.9 : Tension de réseau

3.3.2 Analyse et interprétations :

- De $t = 0$ s à $t = 0,3$ s :

le rapport cyclique du convertisseur élévateur est fixe ($D = 0,5$ comme indiqué sur la *Figure 3.7*). La tension PV résultante est donc $V = (1-D) * V_{dc} = (1-0,5) * 500 = 250$ V (voir *Figure 3.6*). La puissance de sortie du générateur photovoltaïque est de 96 kW voir (*Figure 3.5*) tandis que la puissance maximale spécifiée avec un rayonnement de 1000 W / m^2 est de 100,7 kW. Observer sur la portée du réseau que la tension et le courant de la phase A à un bus de 25 kV sont en phase (facteur de puissance unitaire).

- De $t = 0,3$ s à $t = 0,5$ s :

le générateur photovoltaïque fonctionne dans des conditions de test standard (25 degrés C, 1000 W / m^2). Le rapport cyclique D varie entre 0,450 et 0,459. Tension PV = 273,5 V ($N_{ser} * V_{mp} = 5 * 54,7 = 273,5$ V) et puissance moyenne = 100,7 kW conformément aux spécifications des modules PV.

- De $t = 0,5$ s à $t = 1,0$ s :

l'irradiance solaire est réduite de 1000 W / m^2 à 250 W / m^2 , la puissance a aussi diminué. On peut voir que ce type de contrôleur MPPT ne suit la puissance maximale que lorsque l'irradiance reste constante.

- De $t = 1,0$ s à $t = 1,5$ s :

Lorsque l'irradiance reste constante et égale à 250 W / m^2 , le rapport cyclique D varie entre 0,466 et 0,474. La tension et la puissance PV correspondantes sont $V_{PV} = 265$ V et $P_{mean} = 24,4$ kW.

- De $t = 1,5$ s à $t = 6,0$ s :

l'irradiance solaire est rétablie à 1000 W / m^2 , puis la température varie entre 50 degrés. C. et 0 deg. C. afin d'observer l'impact de la température. Notez que la puissance de sortie PV maximale (107,5 kW) est obtenue à la température minimale (0 deg. C).

3.4 Régime de défaut :

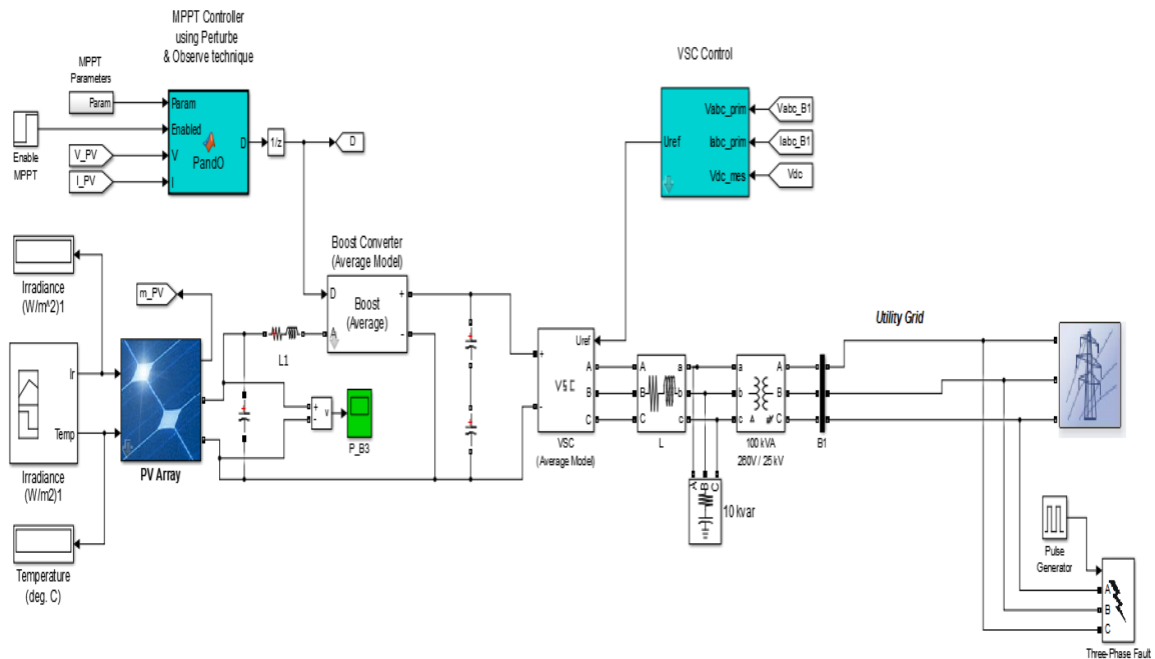


Figure 3.10 : Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O) en régime de défaut.

Pour montrer le rôle de la commande MPPT (P&O) , on a ajouté un bloc défaut relié au réseau (figure 3.11).

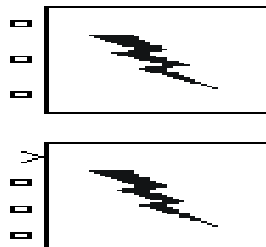


Figure 3.11 : Bloc défaut triphasé

Ce bloc défaut Triphasé met en œuvre un disjoncteur triphasé dans lequel les temps d'ouverture et de fermeture peuvent être contrôlés soit à partir d'un signal Simulink externe (mode de contrôle externe) par un bloc Pulse Generator (figure 3.12) .

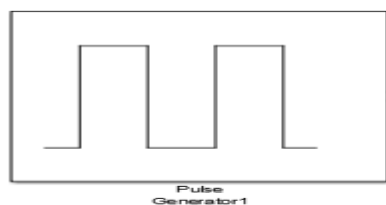


Figure 3.12 : bloc Pulse Generator

Soit à partir d'une minuterie de contrôle interne (mode de contrôle interne).

Le bloc de défaut triphasé utilise trois blocs de disjoncteur qui peuvent être activés et désactivés individuellement pour programmer des défauts phase-phase, des défauts phase-terre ou une combinaison de défauts phase-phase et de terre.

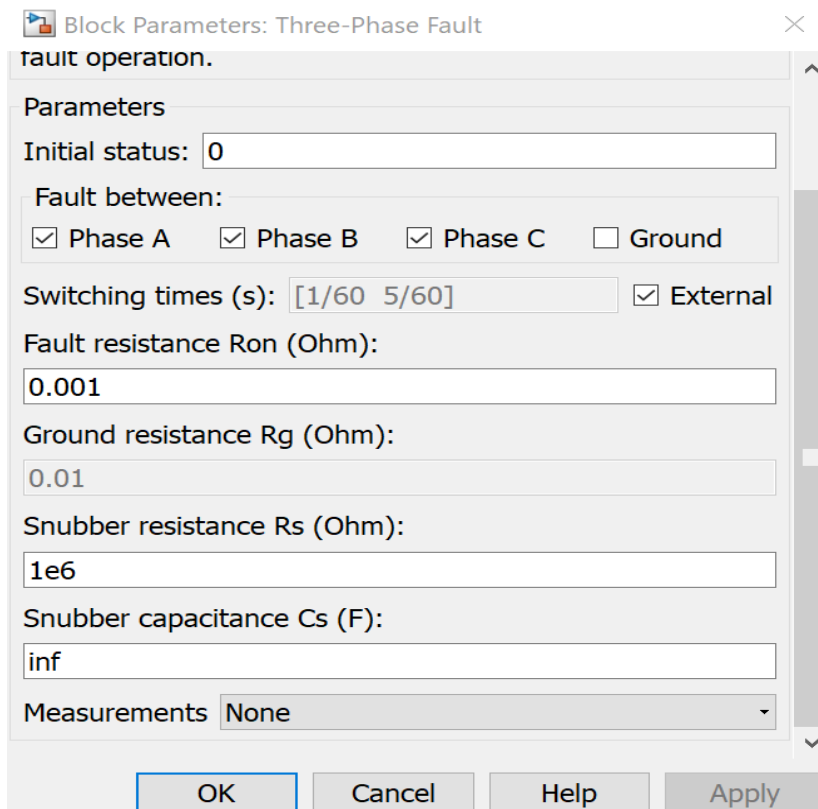


Figure 3.13 : Paramètre bloc de défaut triphasé

La résistance de terre R_g est automatiquement réglée sur 10^6 ohms lorsque l'option de défaut à la terre n'est pas programmée. Par exemple, pour programmer un défaut entre les phases A et B, vous devez sélectionner uniquement les paramètres de bloc **Phase A** et **Phase B**. Pour programmer un défaut entre la phase A et la terre, vous devez sélectionner les paramètres **Phase A** et **Terre** et spécifier une petite valeur pour la résistance de terre.

Si le bloc Défaut triphasé est défini en mode de commande externe, une entrée de commande apparaît dans l'icône de bloc. Le signal de commande connecté à la quatrième entrée Simulink doit être soit 0, qui ouvre les disjoncteurs, soit une valeur positive, qui ferme les disjoncteurs. Pour plus de clarté, un 1signal est couramment utilisé pour fermer les disjoncteurs. Si le bloc Défaut triphasé est réglé en mode de contrôle interne, les heures de commutation et l'état sont spécifiés dans la boîte de dialogue du bloc.

État initial

L'état initial du disjoncteur de défaut est généralement la valeur par défaut, 0(ouvert). Cependant, vous pouvez démarrer la simulation en régime permanent avec le défaut initialement appliqué sur le système.

Phase A

S'il est sélectionné, la commutation de défaut de la phase A est activée. S'il n'est pas sélectionné, le disjoncteur de la phase A reste dans l'état spécifié dans le paramètre Etat initial . La valeur par défaut est sélectionnée.

Phase B

S'il est sélectionné, la commutation de défaut de la phase B est activée. S'il n'est pas sélectionné, le disjoncteur de la phase B reste dans l'état spécifié dans le paramètre Etat initial . La valeur par défaut est sélectionnée.

Phase C

S'il est sélectionné, la commutation de défaut de la phase C est activée. S'il n'est pas sélectionné, le disjoncteur de la phase C reste dans l'état spécifié dans le paramètre Etat initial . La valeur par défaut est sélectionnée.

Sol(Ground)

S'il est sélectionné, la commutation de défaut à la terre est activée. Un défaut à la terre peut être programmé pour les phases activées.

Temps (s) de commutation

Spécifiez le vecteur des temps de commutation lors de l'utilisation du bloc disjoncteur triphasé en mode de contrôle interne. A chaque temps de transition, les disjoncteurs de défaut sélectionnés s'ouvrent ou se ferment en fonction de l'état initial. Ce paramètre n'est pas disponible si le paramètre **Externe** est sélectionné. La valeur par défaut est [1/60 5/60].

Externe

S'il est sélectionné, ajoute un quatrième port d'entrée au bloc de défaut triphasé pour un contrôle externe des temps de commutation des disjoncteurs de défaut. Les temps de commutation sont définis par un signal Simulink (0 ou 1) connecté au quatrième port d'entrée du bloc. La valeur par défaut est effacée.

Résistances aux défauts Ron

La résistance interne, en ohms (Ω), des disjoncteurs de défaut de phase. Ce paramètre ne peut pas être défini sur 0. La valeur par défaut est 0.001.

Résistance au sol Rg

Ce paramètre n'est disponible que si le paramètre **Ground** est sélectionné. La résistance de terre, en ohms (Ω). Ce paramètre ne peut pas être défini sur 0. La valeur par défaut est 0.01.

Résistance des amortisseurs Rs

Les résistances de l'amortisseur, en ohms (Ω). Définissez ce paramètre sur inf pour éliminer les amortisseurs du modèle. La valeur par défaut est 1e6.

Capacité d'amortisseurs Cs

Les capacités d'amortissement, en farads (F). Réglez ce paramètre sur 0 pour éliminer les amortisseurs ou sur inf pour obtenir des amortisseurs résistifs. La valeur par défaut est inf.

Dans notre travail , le bloc Défaut triphasé est réglé sur le mode de contrôle externe, une entrée Simulink (Pulse Generator) est ajoutée au bloc pour contrôler l'ouverture et la fermeture des trois disjoncteurs internes.

- Le temps de simulation est 6sec .
- la durée de perturbation est 0.2 sec (3.33%).
- Délai avant impulsion est a la 5ème sec.

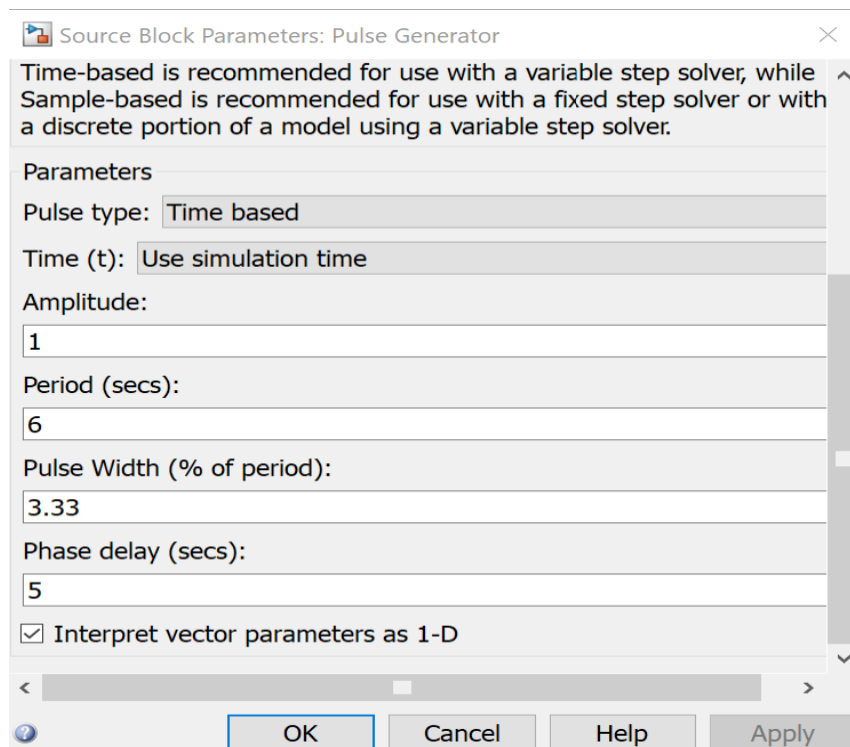


Figure 3.14 : Paramètre Pulse Generator

3.4.1 Résultats de simulations :



Figure 3.15 : Puissance de panneau (PV)

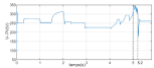


Figure 3.16 : La tension générée par le panneau (PV)

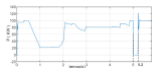


Figure 3.17 : Puissance de réseau



Figure 3.18 : Tension de réseau

3.4.2 Analyse et interprétations :

Dans cette partie, à partir de l'étude du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation » en régime de défaut nous élaborons les différents blocs nécessaires à une simulation du procédé sous Matlab. Le schéma d'ensemble est donné par la Figure 3.10. Les résultats de simulation du système sont illustrés dans les figures ci-dessus. Ces derniers représentent la tension et la puissance générées par le générateur photovoltaïque, ainsi la tension et la puissance de réseau.

De $t=0s$ jusqu'à $t=5s$, on remarque que le système fonctionne comme ci son fonctionnement en régime permanent. A la 5^{ème} secondes, un court circuit entre les phases a été créé pendant une durée de 0.2 sec ou $V=0v$ (Figure 3.18). On remarque l'influence de ce défaut sur les réponses de système, ou la puissance de réseau devienne nulle (tend vers le zéro; Figure 3.17).

A cet instant, on observe des perturbations au niveau de la puissance de panneau (Figure 3.15) et la tension générée par la génératrice (Figure 3.16). Concernant la puissance, elle se diminue jusqu'à la valeur -50 KW puis s'augmente sous forme des pics. Au contre la tension générée, elle s'augmente jusqu'à la valeur $V=350V$ puis elle se diminue sous la même forme qu'on a cité au niveau de la puissance de panneau.

A $t=5.2s$ le système se stabilise, les réponses reprennent ses valeurs initiales rapidement à l'aide de la commande MPPT « perturbation et observation ».

Enfin, les résultats qu'on a obtenu montrent que l'hacheur survolteur et la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles.

3.5 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons modélisé et simulé tous les équipements représentant le système photovoltaïque connecté au réseau électrique, tel que le générateur photovoltaïque, hacheur survolteur et la commande MPPT « perturbation et observation » .

D'après les résultats obtenus de la simulation, on remarque :

- Les performances du générateur PV se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement.
- La commande MPPT stabilise le système rapidement lorsqu'en a un défaut.

Conclusion général

Le travail qu'on a présenté porte sur l'analyse d'une simulation et commande d'un panneau solaire en régime de défaut adapté par une commande numérique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV. Dans un premier temps, on a donné des généralités sur les systèmes PV, principe de l'effet PV, cellule PV. Ainsi le générateur photovoltaïque et leurs performances.

On a étudié, dans un deuxième temps, quelques types convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme l'hacheur dévolteur, l'hacheur survolteur et l'hacheur mixte (dévolteur-survolteur). Ainsi, on a décrit le mécanisme de la poursuite pour l'extraction de la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement. On a présenté les méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrément de l'inductance et la méthode de perturbation et observation. Cette dernière méthode est utilisée dans ce travail cause de sa simplicité, et son exigence seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque.

Finalement, on a étudié le comportement d'un PV connecté avec un réseau. Pour ce la, on a étudié d'abord le système en régime permanent .Puis , en régime de défaut .

D'après les résultats de la simulation obtenus, on peut dire que :

- Les performances du générateur se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement.
- Le convertisseur CC-CC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles.

Ces résultats, forts intéressants, montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques.

Bibliographie

[1]: A. Labouret, M. Viloz « Energie Solaire Photovoltaïque ». 2eme édition, Dunod, Paris 2003/2005.

[2]: « Energies renouvelables : les promesses des cellules solaires organiques », Communiqué De Presse National/Paris/ 1er Avril 2009.

[3] : F. Chekired, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA», mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.

[4]:BOUALEM, DENDIB, "Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative.", Université Ferhat Abbes-Sétif Mémoire deMagister, Département d'électronique, 2007.

[5]: B. Mohammed, « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome », Mémoire de Magister, Option : Microélectronique – Photovoltaïque, Centre Universitaire De Bechar 2007/2008.

[6]: M. Angel, C. Pastor, «Conception Et Réalisation De Modules Photovoltaïques Electroniques» Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse Spécialité : Conception des Circuits Microélectroniques et Microsystèmes. septembre 2006.

[7] : <http://www.egcf-rousseau.com/F. Antony, C. Dürschner–Karl, H. Remmers> « Le photovoltaïque pour tous » 2006.

[8] : A. Tsamda, K. Mahmoud «Développement d'un logiciel de dimensionnement des installations photovoltaïques », Mémoire d'Ingénieur d'Etat En Electrotechnique , Département de Génie Electrique, Promotion Juin 2007, Ecole Nationale Polytechnique Alger.

[9] : DS005516, LM35 datasheet: Précision centigrade temperaturesensors, National Semiconductor, November 2000.

[10] : S. Djerroud, A. B. Stambouli, N. Benabadji; “Mise au point d'un dispositif automatique de caractérisation du module solaire à base d'un microcontrôleur PIC16F877, Application au module solaire hybride en a-Si:H ”, Revue des Energies Renouvelables ; 13 (4) : 613 – 623. 2010.

[11] : <http://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf>.

[12] : Yassine LASMI. Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes. Université Sétif -1 (ALGERIE)

[13]: M. Frederick design and implémentation of a digitallycontrolled stand-alonephotovoltaic power supply”, Department of electrical. Power engineering, Norwegianuniversity of science and technology.sbragstads plass 2e, 7491 Trondheim, Norway

[14] : A. Tchaposingo “système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome ”, Thèse de doctorat université Henri Poincaré 2010.

[15] : M.N.Mchalikh et CH.Hmada''Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau '' Mémoire de Master Université KasdiMerbah–Ouargla 2013.

[16] : Sobaihi Khaled, " Etude et réalisation d'un hacheur de Tracking du Point de Puissance Maximale (MPPT) a contre réaction de tension", Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2003

[17] : H. LEQUEU – [DIV435] – Fichier : IUT-EDP-9, 2004/2005.

[18] : Home Energy, «Etude comparative de panneaux solaires photovoltaïques», Rapport de stage de fin de D.U.T. Mesures Physiques, Université Paris VII 2, place Jussieu 75005 PARIS, Mai 2006/Juillet 2006.

[19] : W.Xiao, « A Modified Adaptative Hill Climbing Maximum Power Point Tracking (MPPT) Control Method for Photovoltaic Power Systems», université de Columbia, 2003

[20] : MANSOURI Abdallah << Commande des Onduleurs Multiniveaux>>, MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, 2015/2016.

[21] : LITIM Ahlam et ABID Zouleykha<< Application de la Logique Floue pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque>>, Mémoire de Fin d'Etudes, 2017.

[22] : O. BELABBASSI , M. REZMA 'Contribution a l'étude et dimensionnement d'unsystème hybride photovoltaïque / réseau sone gaz' mémoire d'ingénieur d'étatuniversité de Laghouat , 2011. ,

[23] : AkihiroOi, " design and simulation of photovoltaic water pumping system", faculty of cali- forniapolytechnic state university, 2005 .

[24] : www.mathworks.com