

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU



Faculté du Génie Electrique et d'Informatique
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

**Mémoire de fin d'études
de MASTER PROFESSIONNEL**

Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Génie électrique
Spécialité : Automatique et Informatique Industrielles

Thème:

**ETUDE ET SIMULATION D'UN CONVERTISSEUR
ELECTRIQUE INTERCONNECTE AU RESEAU
CONVENTIONNEL**

Réalisé par : YACINI Lounis

Proposé par : M^rBENFDILA Arezki
Dirigé par : - M^rBENFDILA Arezki
M^{me} YAHMI Nadia

Année Universitaire 2015/2016

Ce travail a été partiellement réalisé au CDER Alger

Remerciements

**Avant tout, je remercie ALLAH, le tout
puissant, de m'avoir donné le courage et la
volonté pour accomplir ce travail**

**Nous tenons à remercier mon promoteur BENFDILA
AREZKI**

d'avoir posé un sujet très intéressant et pour ses conseils.

**Nos respectueux remerciements à l'ensemble des
membres du jury pour l'intérêt porté sur mon
travail.**

**je tiens à remercier le CDER pour m'avoir accueillie en
stage qui m'a encadré dans le CDER**

**Qu'il trouve ici l'expression de notre gratitude
. Je veux aussi remercier l'encadreuse NADIA YAHMI
qui m'a aidé pour le bon déroulement de ce
travail et toute personne qui nous a aidé à atteindre
ce point-là.**

Dédicace :

A mes chers parents,

A mes chers frères, à mes sœurs,

Et à tous mes amis,

SOMMAIRE

Sommaire :

Introduction général

Chapitre I : description d'un système photovoltaïque

I-1 Introduction	1
I- 2 Rayonnement solaire.....	1
I-3 L'effet photovoltaïque.....	2
I-4 Générateur photovoltaïque.....	2
I-5 Système de conversion.....	9
I-6 Les différents types de convertisseurs.....	9
I-7 Systèmes photovoltaïques.....	13
I-8 Conclusion	23

Chapitre II : Modélisation et commande de système PV

II-1 Introduction	24
II-2 modalisation d'un module photovoltaïque.....	24
II-3 Les convertisseurs.....	28
II-4 Modélisation de l'interface réseau	37
II-5 Conclusion	40

Chapitre III : Simulation et interprétation des résultats

III-1 Introduction	41
III-2 Système photovoltaïque connecté au réseau proposé	41
III-3 Générateur photovoltaïque	43
III -4 Hacheur survolteur.....	51
III -5 Commande MPPT.....	51
III -6 hacheur survolteur commandé par l'algorithme MPPT <i>P&O</i>	52
III -7- Onduleur.....	53
III -8-Système photovoltaïque connecté au réseau	56
III -9 Conclusion	57

Conclusion général	58
---------------------------------	----

Bibliographie.....	59
--------------------	----

Liste des figures	65
-------------------------	----

Liste des abréviations.....	69
Table des métiers.....	71
Annexe.....	73

INTRODUCTION GENERALE :

Les énergies renouvelables se manifestent comme une solution potentielle à la réduction de la pollution, le photovoltaïque (PV) apparaît aujourd'hui comme le plus approprié et le plus abouti à la production d'électricité d'origine renouvelable pour l'habitat. Ajoutons à cela la libéralisation du marché de l'électricité qui introduit des changements majeurs dans le domaine de l'énergie.

Presque toutes les énergies renouvelables sont des dérivées de l'énergie solaire : le vent, le rayonnement solaire, la force de l'eau sont des produits directs ou indirects de l'activité solaire. Le Soleil envoie chaque année à la surface de la Terre à peu près 10 000 fois plus d'énergie que la planète en consomme. Il est donc légitime d'essayer d'en tirer profit.

L'énergie photovoltaïque, basée sur la conversion du rayonnement électromagnétique solaire en électricité. L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est en forte croissance depuis quelques années car c'est une source inépuisable, non polluante pour l'environnement, silencieuse et non dérangeante pour les riverains. Le développement rapide de l'énergie solaire est apparu progressivement sous forme d'installations de petites puissances raccordées au réseau à Basse Tension (BT) et de fermes solaires connectées directement au réseau à Moyenne Tension (HTA).

Cependant, le Raccordement des systèmes PV au réseau de distribution peut avoir quelques impacts sur les réseaux électriques : impacts sur le changement des flux de puissance (bidirectionnel), sur le plan de tension, sur le plan de protection, sur la qualité de l'énergie ou sur la planification du réseau... D'un autre côté, les caractéristiques, le fonctionnement et les perturbations sur les réseaux de distribution peuvent influencer le fonctionnement des systèmes PV.

La rédaction de notre mémoire se compose de trois chapitres et une conclusion générale :

Au premier chapitre, on fait une description générale du principe de fonctionnement des systèmes photovoltaïques avec le réseau électrique.

Le second chapitre présente la modélisation du système photovoltaïque et ses caractéristiques.

INTRODUCTION GENERALE

Les résultats de simulation sous **MATLAB/SIMULINK** des différents composants du système photovoltaïque sont présentés dans le 3^{ème} chapitre.

Le dernier chapitre est consacré à la simulation de la commande de connexion du système de génération d'énergie au réseau électrique (un système photovoltaïque) via un onduleur à (MLI) d'une part, et alimentant une charge (RL) équilibrée d'autre part. La technique de commande par (MLI) a été appliquée, l'amplification de la tension du générateur photovoltaïque est assurée par un hacheur survolteur, le réglage du bus continu offre la possibilité de gérer le flux des puissances au niveau du bus continu qui permet d'imposer une puissance de référence à transiter au réseau. L'étude par simulation est effectuée sous l'environnement Matlab Simulink.

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

I- 1 Introduction :

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

Photos : Lumière.

Volt : Unité de tension électrique, du nom Alessandro Volta.

Ce phénomène fut découvert au 19ème siècle par le physicien Alexandre Edmond Becquerel .[2]

La première cellule photovoltaïque fut développée début 1954 pour l'alimentation en énergie des satellites. Depuis 1958, les cellules photovoltaïques alimentent seulement le système énergétique des satellites jusqu'à ses premières applications terrestres au début des années 70. Le photovoltaïque fut utiliser pour l'alimentation en énergie de petites maisons isolées et d'équipements de télécommunications.

Aujourd'hui, grâce à sa fiabilité et à son concept respectueux de l'environnement, le photovoltaïque prend une place prépondérante.

Pour comprendre ce phénomène, nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur le rayonnement solaire et les propriétés des semi-conducteurs ; matériaux de base des cellules photovoltaïques. [3]

I- 2 Le rayonnement solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19 % d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement.[4] Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère présente

un maximum pour une longueur d'onde d'environ $0.5\mu\text{m}$, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°k : [4]

- Diamètre de soleil : $D_s = 1.39 \cdot 10^9 \text{m}$.
- Diamètre de la terre : $D_t = 1.27 \cdot 10^7 \text{m}$.
- Distance moyenne soleil-terre : $L_{ts} = 1.5 \cdot 10^{11} \text{m}$.

I- 3 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés semi-conducteurs qui produisent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière.

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie de 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 Etats-Unis, parvinrent à fabriquer la première cellule photovoltaïque. [1]

I- 4 Générateur photovoltaïque

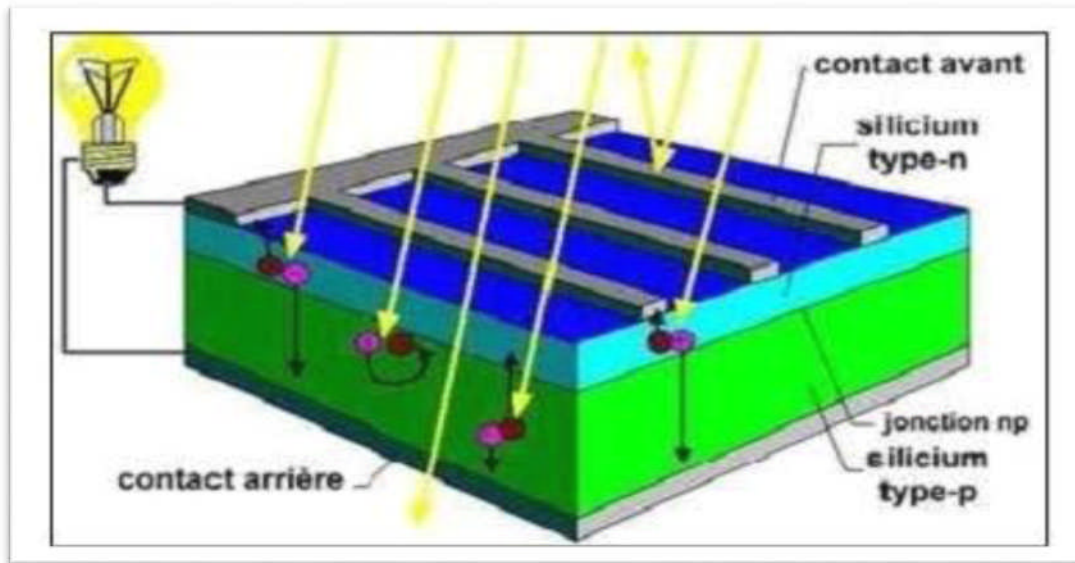
I- 4-1 Cellule photovoltaïque

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des impuretés) sont substitués dans un réseau cristallin. Cette action est appelée dopage. Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type N (exemple: silicium dopé au phosphore). Si au contraire, l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le silicium, le matériau sera déficitaire en électrons: il sera dit de type P (exemple: silicium dopé au brome). [1]

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

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

Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives. Des contacts métalliques en formes de grille, contacts avant et arrière, sont déposés Figure (I.1). [1]



Fig(1.1) : Représentation schématique d'une cellule solaire. [1]

Une cellule photovoltaïque donc est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants : Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ; Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électrons/trous dans le matériau semi-conducteur; Collecte des particules générées dans le dispositif.

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

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trous créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N. [1]

I-4- 2 Module photovoltaïque

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module (voir la figure Fig (I.3)) ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série. [5]



Monocrystallines

Multicristallines

Couche mince

Fig (I.2) : Type de cellules photovoltaïque.

Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle :

- **Les cellules monocrystallines:** Ce sont celles qui ont le meilleur rendement mais aussi celle qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.
- **Les cellules Multicristallines:** Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible.

- **Les cellules amorphes:** Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres. [4]
- **Rendement d'une cellule :**

Le tableau suivant (1-1) présente les différents types des cellules avec leur rendement.

Technologie de cellules	Rendement en Laboratoire	Rendement production
Silicium amorphe (a-Si)	13%	5-9%
Silicium Multicristallines	19.8%	11à15%
Silicium monocristallin (m-Si)	24.74%	13à17%

Tableau 1-1. les différents types des cellules avec leur rendement. [4]

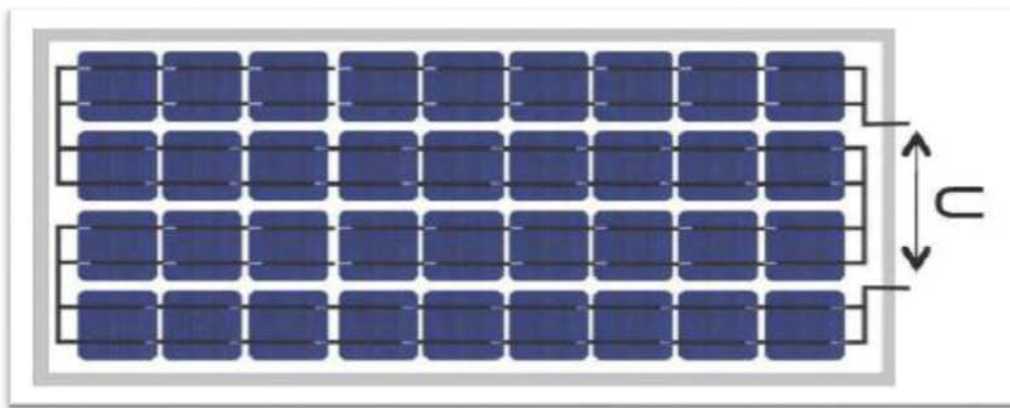


Fig (I.3) Module photovoltaïque.

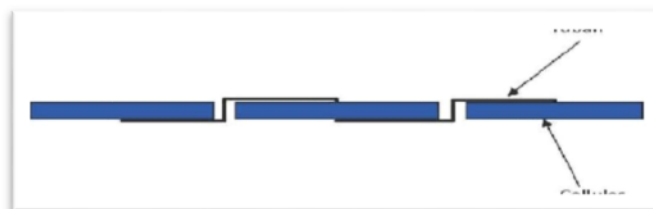


Fig (I.4) Câblage des cellules dans un module. [5]

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

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

I-4-3 Caractéristiques d'un module :

Les modules sont généralement des parallélépipèdes rectangles rigides minces (quelques centimètres d'épaisseur), dont les caractéristiques suivantes:[4]

- **La puissance de crête, P_c** : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m²).
- **La caractéristique $I=f(V)$** : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- **Tension à vide, V_{co}** : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- **Courant de court-circuit, I_{cc}** : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- **Point de fonctionnement optimum, $P_m = V_m * I_m$** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = V_{op} * I_{op}$
- **Rendement** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente, Il est donné par : $\eta = \frac{P_{op}}{P_{inc}} = \frac{I_{op} * V_{op}}{P_{inc}}$
- **Facteur de qualité** : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $\frac{P_m}{V_{co} * I_{cc}}$

I-4-4 Facteurs limitatifs du rendement

I-4-4-1 Influence de l'éclairement :

Le courant I_{cc} varie directement avec le rayonnement lumineux (la relation est proportionnelle), la tension restant relativement constante. On remarque dans la figure (I.4) que le courant optimal est très sensible à l'éclairement. Par contre la tension optimale varie très peu avec l'éclairement. [6]

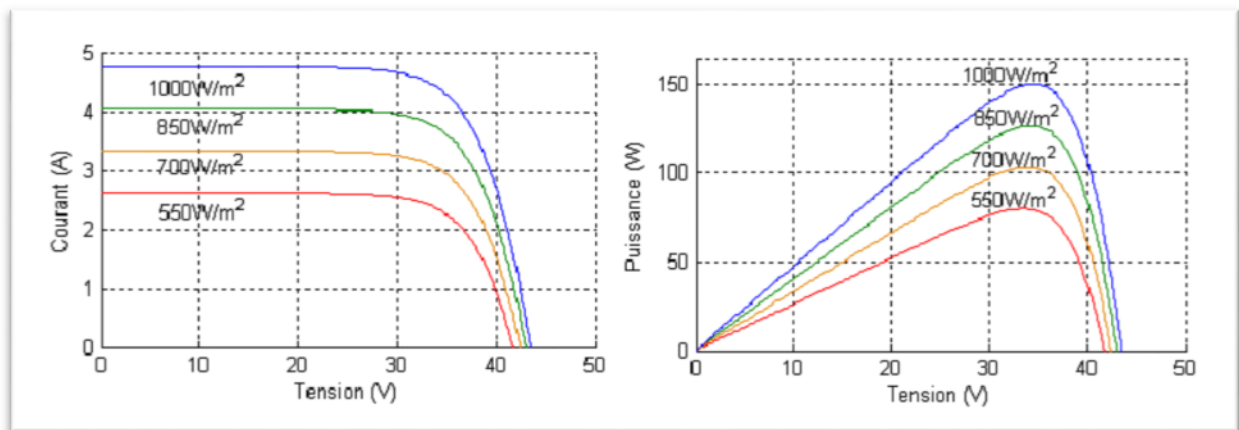


Fig (I.5) Evolution de la caractéristique (I-V) et (P-V) du module en fonction de L'éclairement. [6]

I-4-4-2 Influence de la température

Quand la température diminue, la tension à vide augmente, mais le courant de court circuit diminue dans des proportions moindres Figure (I.4). La diminution du courant de saturation est la principale cause de la chute de courant à basse température.

Aussi, on considère en première approximation que le fonctionnement optimal du générateur PV correspond sensiblement à un fonctionnement à tension optimale constante.[6]

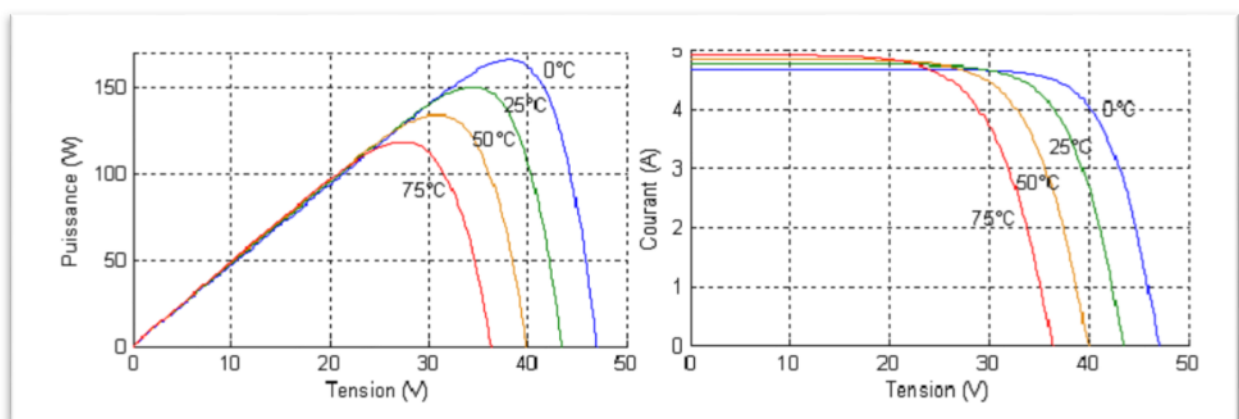


Fig (I.6) Evolution de la caractéristique (I-V) (P-V) du module en fonction de la température.[6]

I-4-4-3 Influence de la résistance série R_s

La résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semi conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule.

Les contacts semi-conducteur – électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion. [2]

I-4-4-4 Influence de la résistance parallèle R_p

La résistance shunt (R_p) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée. [1]

I-4-4-4-1 Influence de l'association série des cellules PV

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d'un volt.

Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau).

Un module de 36 cellules en série (Type GTO136 - 80/2) est suffisant pour obtenir une tension compatible avec la charge. Pour avoir plus de tension, il faut assembler N_s modules en série, par contre pour le courant généré, un nombre N_p de modules en parallèle permet d'ajouter, les diodes de protection série et parallèles protègent le circuit contre le retour de courant [6].

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 [6].

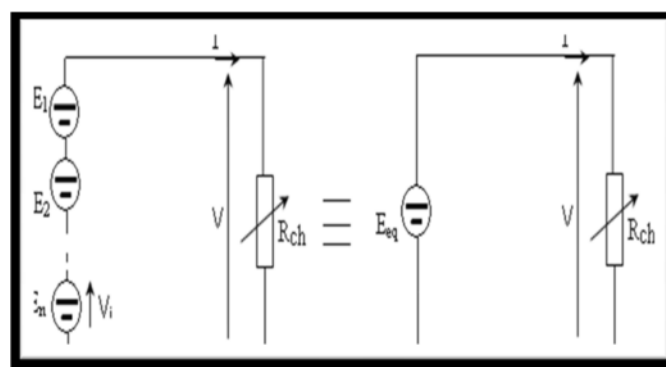


Figure (1.7) : Association de N modules solaires en série

La caractéristique d'un groupement de N_s modules solaires en série est représentée par la figure suivante :



Figure (1.8) : Caractéristique de nombre des modules en série

I-4-4-4-2 Influence de l'association parallèle des cellules PV :

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 [6].

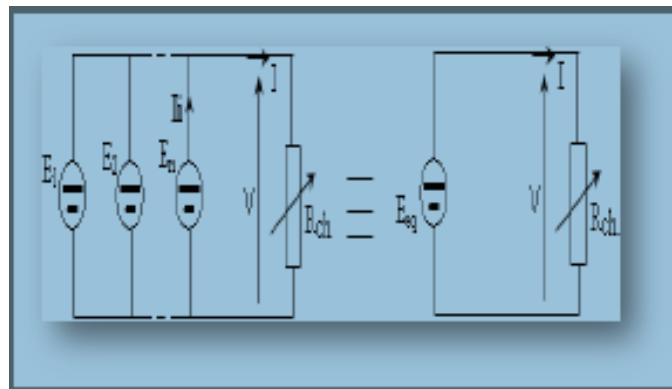


Figure (1.9) : Association de N_p modules solaires en parallèle.

La caractéristique d'un groupement de N_p modules solaires en parallèle est représentée par la figure suivante :

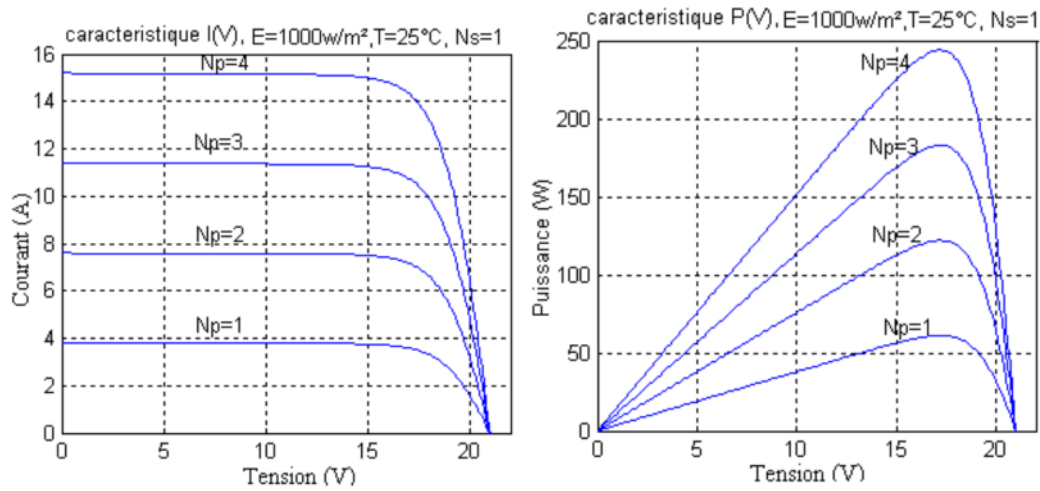


Figure (1.10) : Caractéristique de nombre des modules en parallèles

I-4-5 Panneau solaire

Le panneau solaire ou (champ solaire) (figure (I.6)) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.[4]



Fig (I.11) : Panneau photovoltaïque. [1]

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce que fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui regroupe le tous, Alors cette boîte de dérivation (figure (I.8)) fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie. [4]



Fig (I.12) Boite de dérivation. [5]

Le câblage de ces boites permet d'avoir une sortie en 12,24 ou 48 volts selon les modules, elles sont équipées de deux à douze entrées, selon les tensions de sortie.

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des panneaux PV dépend : [4]

- des besoins en électricité.
- la taille du panneau.
- L'ensoleillement du lieu d'utilisation.
- La saison d'utilisation.

I-5 Système de conversion :

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu-continue), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu-alternatif). [4]

I-6 Les différents types de convertisseurs

Le convertisseur est l'association d'un bloc de puissance et d'un bloque de commande. Son rôle est de régler le transit d'énergie électrique de la source vers le récepteur, en Modifiant éventuellement la forme sous laquelle cette énergie se présente.



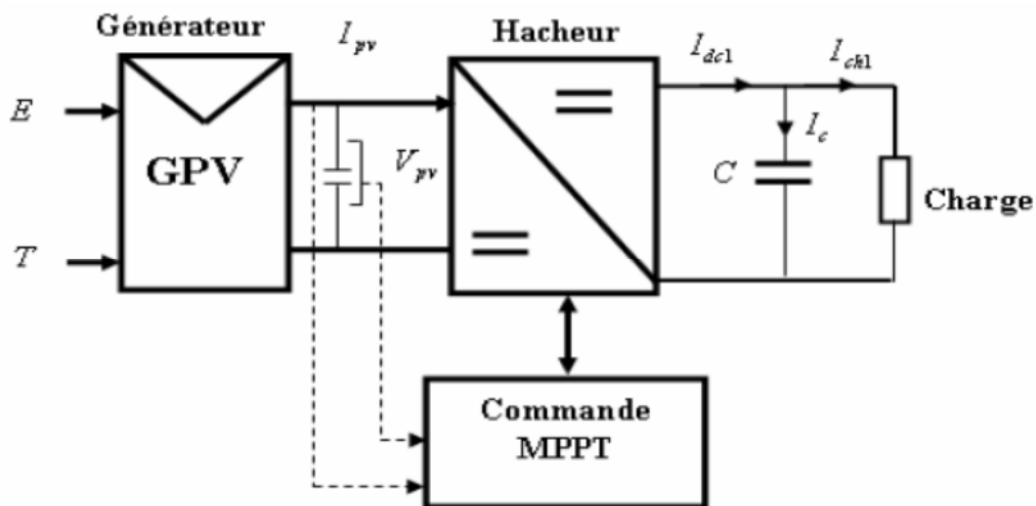
Figure(I.13) Schéma synoptique d'un système de conversion énergétique

Il existe différentes topologies ou schémas de base pour les convertisseurs statiques tels que le Boost, Buck, Buck Boost et convertisseur DC/AC etc.

I-6-1 Convertisseur continu-continu (DC-DC)

Cet étage d'adaptation qui dispose d'une commande MPPT « Maximum Power Point Tracking » ou en français « Recherche du Point de Puissance Maximum » est un organe fonctionnel du système PV et permet la recherche du point de fonctionnement optimal du générateur PV. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisie et des performances recherchées. Cependant, tous les algorithmes performants de recherches de PPM doivent agir sur la variation du rapport cyclique du type du convertisseur de puissance associé, Son rendement se situe entre 90 et 95%.

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi lesquels (dévolteur, survolteur et mixte), sont utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les différentes charges. [1]



Figure(I.14): Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT

I-6-2 Convertisseur continu-alternatif (DC-AC)

Un onduleur (DC-AC) est un dispositif permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue.

Ils sont utilisés en électrotechnique pour : [7]

- Soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables.
- Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes.

On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW). [7]

Les onduleurs sont classés selon le mode de commutation :

- les onduleurs autonomes qui génèrent leur propre fréquence et leur propre tension alternative. Dans ces onduleurs la commutation est forcée.
- les onduleurs non autonomes dont la fréquence et la tension alternative sont imposées par le réseau qu'ils alimentent. Dans ces onduleurs la commutation est naturelle. Elle est naturelle en ce sens que ce sont les tensions alternatives du réseau qui effectuent le transfert du courant d'un thyristor à l'autre.

Selon la nature de la source continue :

- Onduleur de tension : la source DC impose la tension, la charge AC impose le courant sinusoïdal.
- Onduleur de courant : la source DC impose le courant, la charge AC impose la tension sinusoïdale.

I-6-3 Commande de l'onduleur

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Deux méthodes de commande peuvent être utilisées: [8]

- commande par hystérésis
- commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion)

a) Commande par hystérésis : Le principe de contrôle des courants par hystérésis consiste à maintenir chacun des courants générés dans une bande enveloppant les courants de référence. Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation.

En pratique, on utilise La différence entre le courant de référence et celui mesuré est appliquée à l'entrée d'un comparateur à hystérésis dont la sortie fournit directement l'ordre de commande des interrupteurs du bras correspondant de l'onduleur: [8]

b) Commande MLI : L'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) ou Pulse Width Modulation (PWM) permet d'éliminer les premiers rangs d'harmoniques de courant afin d'améliorer le facteur de puissance. Cependant, cette technique ne résout pas totalement le problème des harmoniques de courant.

La modulation MLI est fortement inspirée des techniques utilisées dans la transmission de l'information. [5]

I-6-4 Réseau électrique

Les réseaux électriques sont constitués par l'ensemble des appareils destinés à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'électricité depuis les centrales de génération jusqu'aux maisons de campagne les plus éloignées.

Les réseaux électriques ont pour fonction d'interconnecter les centres de production tels que les centrales hydrauliques, thermiques, photovoltaïque ... avec les centres de consommation (villes, usines...), Il existe cinq principaux types de centrales électriques:

- Les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) dites centrales thermiques classiques,
- Les centrales nucléaires qui sont également des centrales que l'on peut qualifier de thermiques,
- Les centrales hydroélectriques.
- Les centrales solaires ou photovoltaïques.
- Les centrales éoliennes.

Les centrales solaires produisent une quantité d'énergie électrique à travers un champ photovoltaïque qui varie avec le nombre de panneaux photovoltaïques. [9]

I-6-5 Classification des Centrales photovoltaïques connectés au réseau

Un premier classement en fonction de leur taille peut être fait de manière suivante: [8]

a) Centrales de petite taille ($P_w = 1 \text{ à } 10 \text{ KW}$)

Pour les applications sur les toits des maisons et des institutions publiques telles que les écoles, parkings ... elles se connectent au réseau à basse tension.

b) Centrales de taille moyenne ($P_w = 10 \text{ à } 100 \text{ KW}$)

Ce type de système peut être installés et intégrés dans un bâtiment sur un toit ou la façade. Il peut être connecté à la basse ou à la moyenne tension du réseau de distribution électrique selon sa taille.

c) Centrales de grande taille ($P_w \geq 500 \text{ KW}$)

Ce sont des systèmes centralisés et sont la propriété de compagnies d'électricité. On peut également classer ces systèmes selon qu'ils soient munis de batteries de stockage ou non.

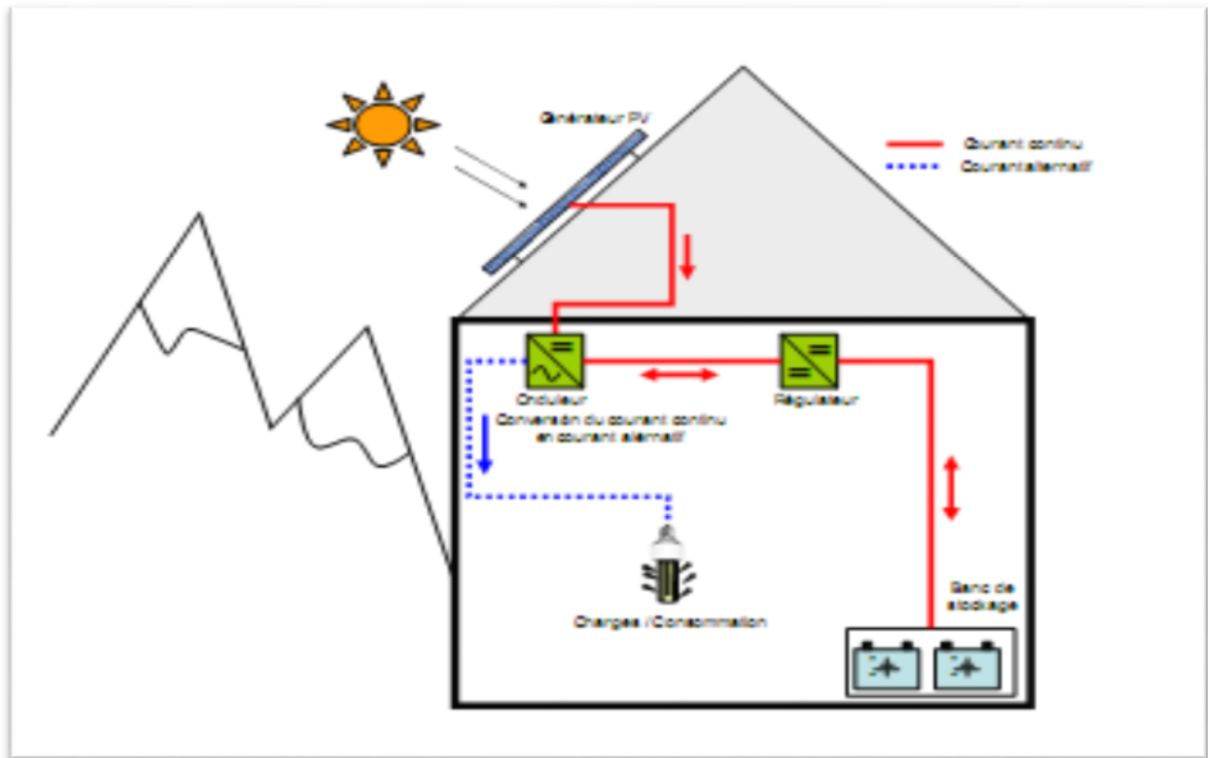
I-7 Les systèmes photovoltaïques :

Les systèmes PV sont classés en deux grandes catégories selon la manière dont l'énergie est utilisée:

- Systèmes isolés et autonomes.
- Systèmes raccordés au réseau électrique.

a). Systèmes autonomes :

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Comme on le remarque sur la Figure (I.11) qui représente l'exemple d'un système PV autonome, un système de stockage est associé aux générateurs PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de la production. [8]

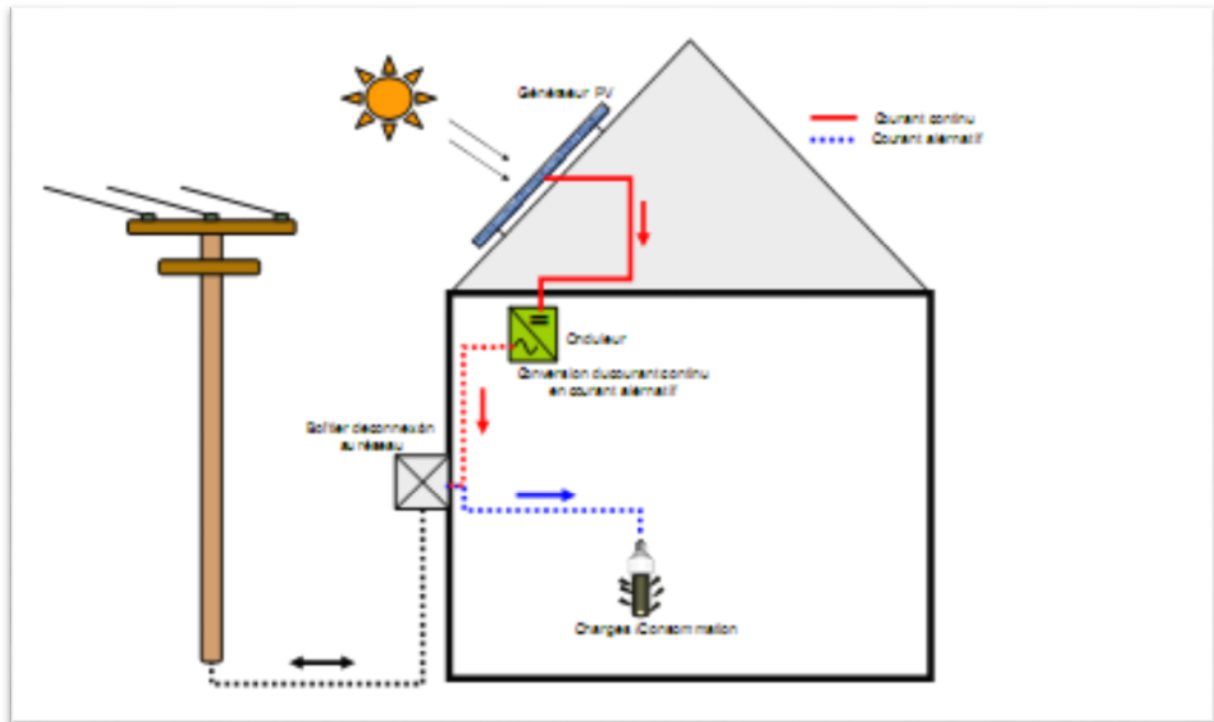


Figure(I.15) Exemple de la structure d'un système PV autonome.

b) Systèmes raccordés au réseau électrique

La Figure (I.12) représente un système PV connecté au réseau électrique, dont le rôle principal est de contribuer à la production d'électricité d'origine renouvelable sur le réseau. D'un point de vue de la physique, l'énergie produite par les modules est directement consommée par les Charges locales de l'habitat. Il peut être aussi connecté par l'intermédiaire d'un convertisseur DC-DC. Un onduleur délivre une tension modulée, elle est filtrée pour réduire le taux d'harmoniques, on obtient alors en sortie de ce dispositif une puissance utilisable pouvant être injecté dans le réseau.

Il existe différentes architectures pour les dispositifs permettant de convertir de la tension continue issue du générateur PV à une tension sinusoïdale utilisable (220V).



Figure(I.16) Exemple de la structure d'un système PV connecté au réseau

Un système photovoltaïque est donc constitué du générateur, et des charges à alimenter. Ces charges sont de type courant continu ou courant alternatif. [8]

I-7-1 Structure générale d'un système photovoltaïque

Les diverses composantes d'un système photovoltaïque sont représentées symboliquement sur le schéma généralisé dans la figure (1-13) ci-dessous.

Cette représentation synoptique recouvre à peu près tous les cas mais il est bien certain qu'un système photovoltaïque ne comporte en général qu'un certain nombre des éléments représentés ici. [2]

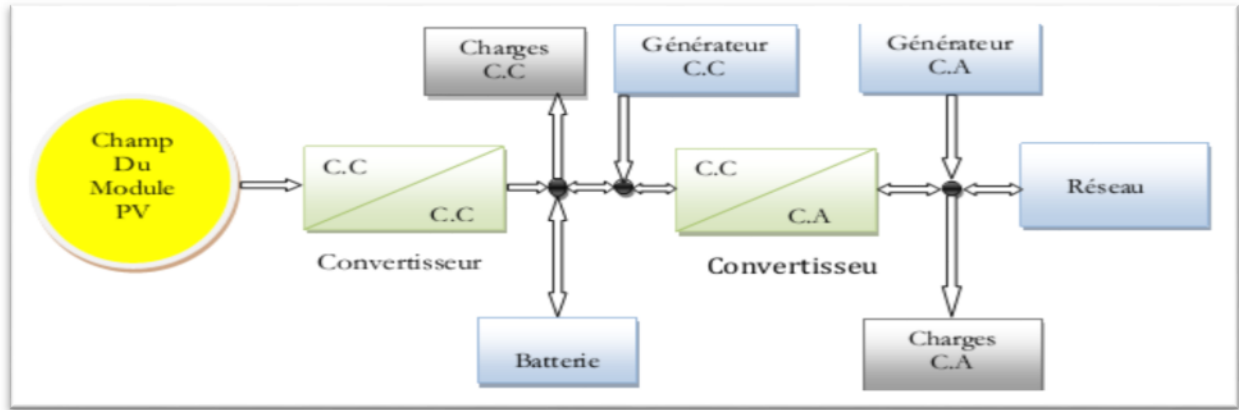


Figure (I.17) Schéma synoptique d'un système photovoltaïque. [2]

I-7-1-1 Systèmes PV connecté directement au réseau :

a) Structure à convertisseur unique

Le dispositif représenté à la figure (I.14) est le plus simple, car il comporte le moins de composants possibles.

Plusieurs modules PV sont connectés en série pour obtenir une tension continue suffisamment grande. Cette solution est une alternative à un hacheur élévateur de tension.

La tension continue obtenue alimente directement un onduleur central, qui fournit la tension sinusoïdale désirée (230 V). Il pourrait être avantageux d'insérer un transformateur pour isoler le système photovoltaïque du réseau.

L'inconvénient majeur de ce dispositif est l'arrêt total et immédiat de la production d'énergie lors d'un problème survenant en amont de l'onduleur. De plus, le contrôle du point de puissance maximum est voisin, car toutes les cellules ne délivrent pas le même courant en raison de leurs différentes structures internes et d'ensoleillement. [8]

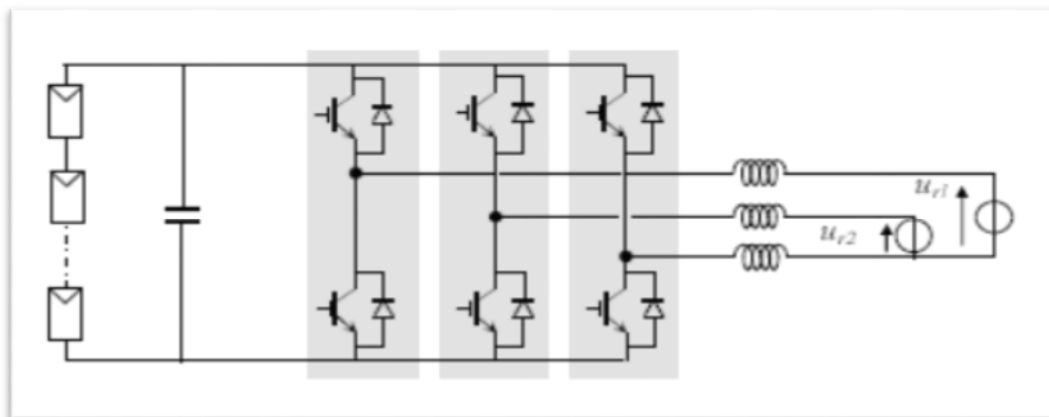
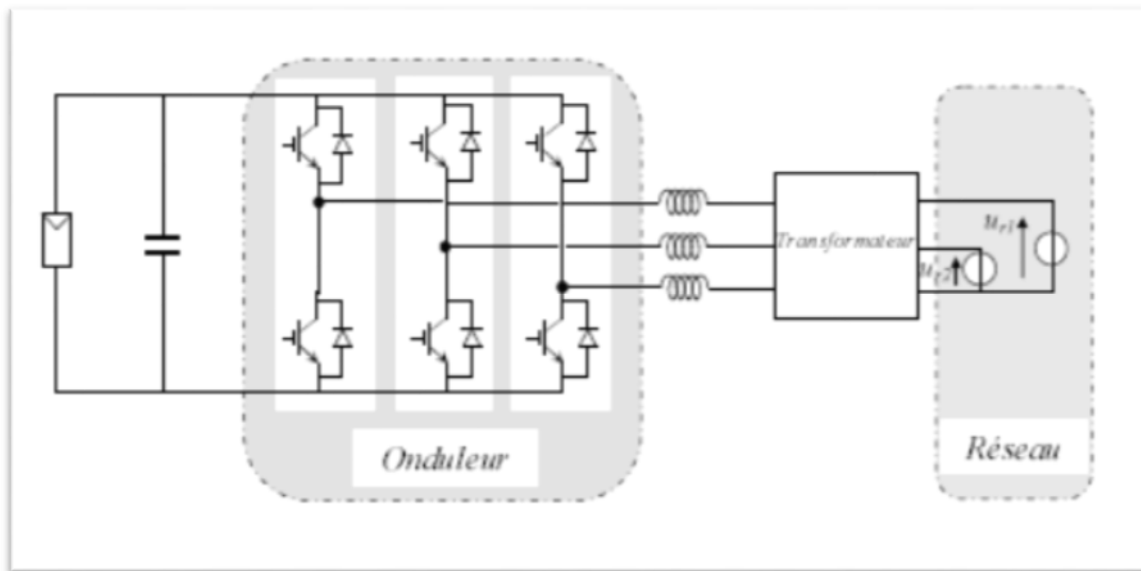


Figure (I.18) Plusieurs modules PV en série à un seul onduleur. [8]

b) Structure avec bus à basse tension alternatif

La figure (I.15) montre un onduleur associé à un circuit de commande qui est connecté directement au module photovoltaïque. La tension de sortie de ce dernier est transformée en une tension de fréquence 50 Hz alternatif. Cette tension est transportée grâce à un bus alternatif (220 V - 50 Hz, par exemple de schéma) vers un transformateur central qui élève le niveau désiré.

Le faible niveau de tension dans le bus est l'avantage majeur de ce type de montage, car elle assure la sécurité du personnel. Toutefois, la distance entre le transformateur et le module doit être faible à cause du courant qui traverse les câbles et qui génère des pertes Joule. Il y a un compromis à faire au niveau de la tension du bus alternative.[8]



Figure(I.19) bus à basse tension alternative. [8]

I-7-1-2 Système à bus continu intermédiaire

a) Structure avec convertisseur FORWARD

La figure (I.16) présente un convertisseur FORWARD qui est capable d'augmenter la tension en série du module photovoltaïque jusqu'à 350 V (tension désirée). L'utilisation d'un transformateur pour la connexion au réseau n'est donc pas nécessaire, la conversion continu-alternative se fait de façon relativement simple, grâce à un onduleur centralisé. Les inconvénients majeurs de ce montage sont:

- la capacité doit être relativement importante, à cause des ondulations du courant en sortie du module.

- Le bus continu supportera un signal en créneau qui induira une grande émission d'ondes électromagnétiques et éventuellement des pertes de fuite ; l'induction du transformateur compris dans le convertisseur génèrera des pertes de fuite.
- La tension élevée qui traverse le bus continu réduit la sécurité du personnel d'entretien. [8]

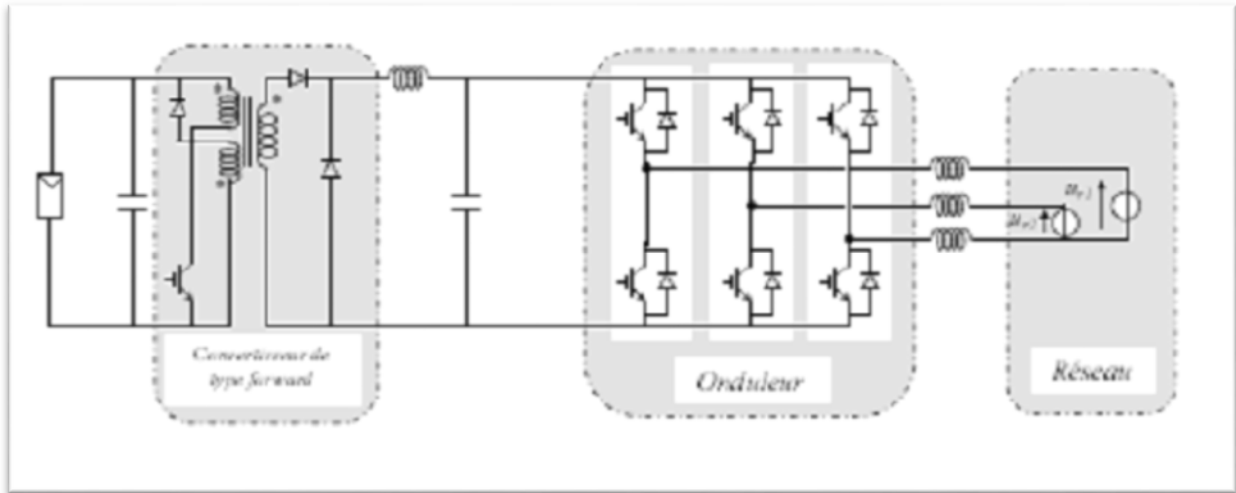


Figure (I.20) Convertisseur de type FORWARD alimentant le bus continu. [8]

b) Structure avec convertisseur de type Fly-back

La figure (I.17) montre une structure à base d'un convertisseur de type fly-back qui élève la tension sortie du module photovoltaïque au niveau de tension désirée.

La caractéristique principale du fly-back se situe au niveau du transformateur qui agit comme l'inducteur principal et qui assure l'isolation galvanique.

Le hacheur est contrôlé pour obtenir un maximum d'énergie du module photovoltaïque et l'onduleur assure une tension constante et le transfert de puissance vers le réseau.

L'inconvénient du transformateur est qu'il génère des pertes et qui augmente le coût de l'installation. [7]

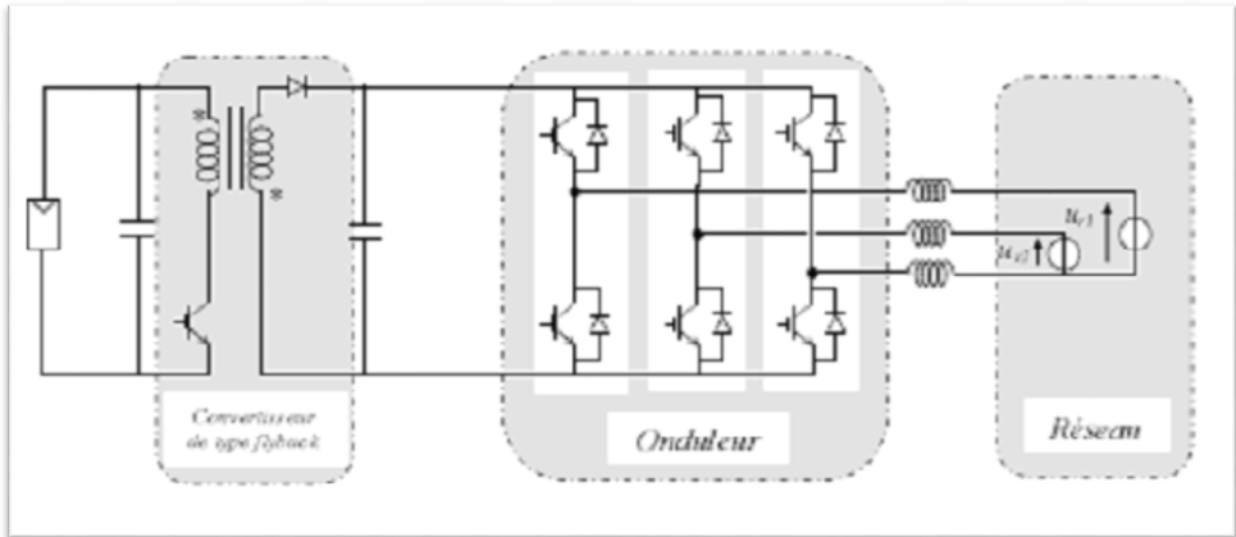


Figure (I.21) Structure avec convertisseur de type Fly-back. [8]

c) Structure avec hacheur et onduleur

La figure (I.18) représente un hacheur qui élève la tension en sortie du module photovoltaïque en une tension de (100 V) délivrée sur le bus continu. Avec le hacheur, il est difficile d'élever la tension en sortie des modules plus de 4 à 5 fois pour obtenir une tension continue suffisamment grande, en raison de la résistance de l'inductance. On adjoint un onduleur pour avoir une sortie sinusoïdale, puis un transformateur pour élever cette tension au niveau désiré (selon le réseau) et pour assurer l'isolation entre la partie " production " et la partie " utilisation ". L'avantage de ce système est que des batteries peuvent être facilement connectées au bus continu pour obtenir un système autonome. Le courant d'entrée est relativement lisse, c'est pour cela que la capacité peut être faible. [8]

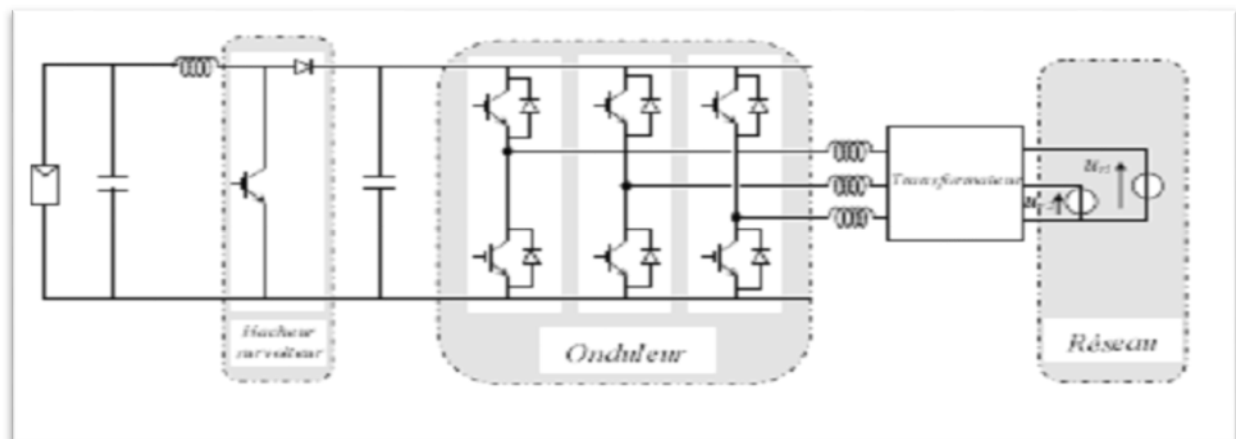


Figure (I.22) Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé. [8]

I-7-2 Configuration des Systèmes PV

Les convertisseurs utilisés doivent être utiles et compatibles pour le traitement de puissance et la synchronisation avec la puissance de service.

En général, quatre types de système PV connecté au réseau sans batterie de stockage sont identifiés, leurs configurations ont été conçues comme suit : [8]

- Onduleur central (Central-plant inverter)
- Hacheur (Multiple-string DC-DC) avec un onduleur unique
- Onduleur Multiple-string
- Onduleur modulaire (Module-integrated inverter)

I-7-2-1 Onduleur central (Central-plant inverter)

Dans les onduleurs centraux, habituellement on utilise un grand onduleur pour convertir la puissance du côté (DC-DC) des modules (PV) à une puissance (AC) sur le côté alternatif. Dans ce système, les modules (PV) sont en série pour former un panneau, et plusieurs de ces panneaux sont reliés en parallèle au hacheur tel que représenté sur la figure(I.19). [8]

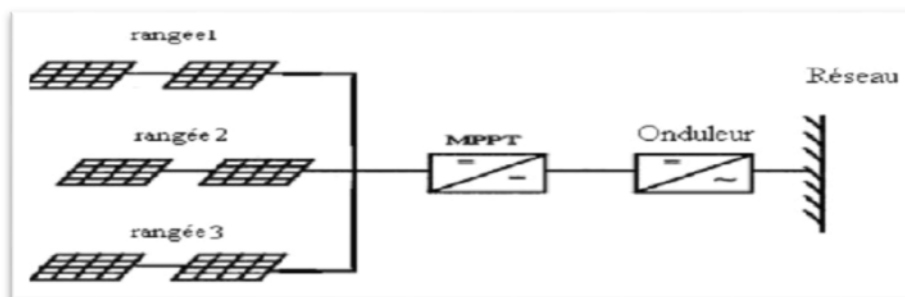


Figure (I.23) Onduleur central (Central-plant inverter). [8]

I-7-2-2 Hacheur (Multiple-string DC-DC) avec un onduleur

Le schéma du montage est donné par la Figure (I.20), Dans le multiple-string du convertisseur (DC-DC), chaque hacheur boost possède un transformateur qui assure l'isolation galvanique et un lien de conversion commun (DC-DC). [8]

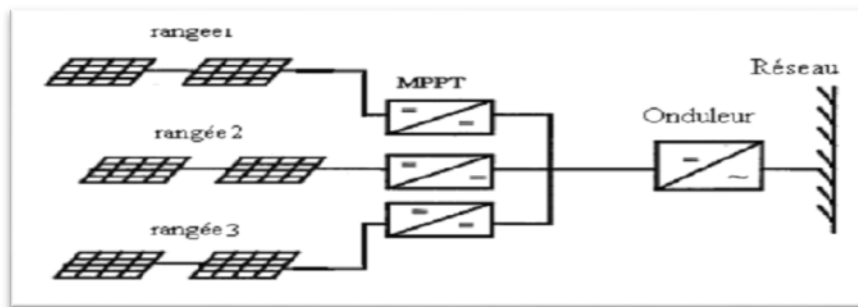


Figure (I.24) Hacheur (Multiple-string DC-DC) et l'onduleur. [8]

I-7-2-3 Onduleur Multiple-string :

La Figure(I.21) montre le schéma fonctionnel d'un système de conversion de multiple convertisseur (multiple-string). Il se comporte d'un ensemble de modules reliés en série du côté (DC), et la conversion individuelle de la puissance de (DC) en (AC) est assurée par un petit onduleur.

Beaucoup de tels onduleurs sont reliés en parallèle du côté (AC). Cet arrangement n'est pas affecté en ombrageant des panneaux. Il n'est pas aussi sérieusement affecté par l'échec de l'onduleur. [8]

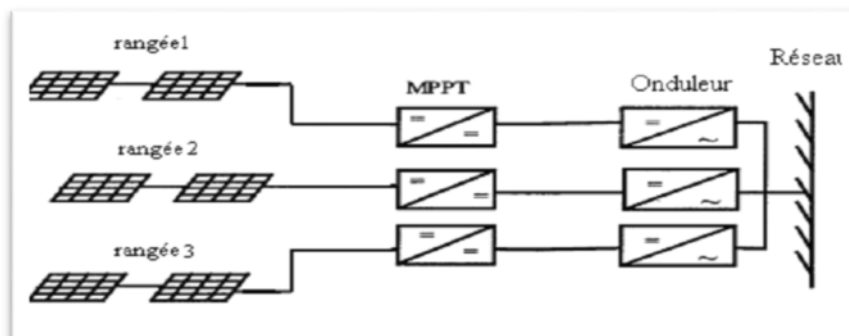


Figure (I.25) Onduleur Multiple-string. [8]

I-7-2-4 Onduleur modulaire (Module-integrated inverter) :

Dans les systèmes d'onduleur modulaire de la Figure (I.22), chaque module photovoltaïque aura un petit onduleur (typiquement 50W à 300W) et aucun câblage n'est requis. On prévoit de petits onduleurs pour réduire le coût. [8]

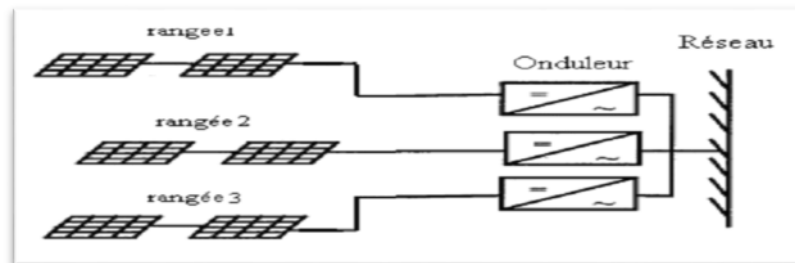


Figure (I.26) Onduleur modulaire (Module-integrated inverter). [8]

I-7-3 Problème de connexion des systèmes photovoltaïques au réseau:

Les problèmes concernant l'interconnexion du système photovoltaïque au réseau sont: [8]

- Le débrogage de système photovoltaïque si le réseau présente une défaillance (le problème d'islanding).
- La protection contre la foudre.
- La qualité de puissance fournie au réseau.
- Les effets des systèmes multiples sur une partie du réseau, en particulier monophasé non équilibré.
- Le dosage fiable des flux de puissance.
- Risque techniques et financiers.

I-7-4 Avantages et inconvénients des systèmes connectés au réseau

a) Avantages

- n'ont pas besoin de stockage d'énergie et éliminent donc le maillon le plus problématique (et plus cher) d'une installation autonome. C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie.
- Pas de gaspillage - tout excédent est livré au réseau - particulièrement intéressant pendant les périodes d'absence de son domicile, pendant le week-end, pendant les vacances quand les

modules continuent à travailler. On évite les pertes d'énergie associées au stockage en batterie lorsque la batterie est complètement chargée par exemple.

- On n'est pas obligé de calculer méticuleusement ses besoins en électricité, et de prévoir des niveaux de demande exceptionnellement très élevés, même si très rares.
- On peut commencer petit et agrandir par la suite sans problèmes de dimensionnement compliqués.
- On peut satisfaire à une partie ou à la totalité de ses besoins.

b) Inconvénients

C'est vraiment la voie royale qui permettra au photovoltaïque de faire sa percée dans nos vies. Cependant...

- La consommation risque de redevenir relativement "invisible," et on pourrait retomber dans le piège de la consommation irréfléchie.
- Les contraintes électriques imposées par les sociétés d'électricité peuvent être rigoureuses, et les onduleurs synchrones doivent répondre aux exigences techniques des compagnies de production et de transport d'énergie. Par exemple, il faut un mécanisme de coupure automatique du courant au réseau dans l'éventualité d'une panne pour éliminer tout risque à ceux qui font les travaux de réparation, mais le plus important, c'est la question du prix payé pour les kWh livrés au réseau...

I-8 Conclusion

Dans ce chapitre on a donné un aperçu sur les différentes notions de l'énergie photovoltaïque et de la constitution d'un système photovoltaïque connecté au réseau, ainsi que les principes de fonctionnement de chaque élément de ce système. Ce qui permet d'introduire à la modélisation et l'analyse de notre système, tel que présenté dans le 2^{ème} chapitre

II -1- Introduction

Après avoir étudié et cité les différents composants du système photovoltaïque, aussi que l'influence des paramètres de ses composants sur le système, nous procédons à sa modélisation du système.

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié. A ce niveau, la condition qui s'impose c'est de connaître les critères d'entrées (donnée de base) c'est-à-dire les données météorologiques au site, les données relatives aux utilisateurs, et les données relatives aux équipements.

Dans ce chapitre, nous représenterons d'abord le modèle d'un générateur photovoltaïque, le modèle du l'hacheur et l'onduleur et en fin par la modélisation du réseau.

II-2 Modélisation d'un module photovoltaïque

II-2-1 Modélisation d'une cellule solaire

a- Cas idéal :

L'équation caractéristique d'une cellule solaire idéale est de la forme :

$$I = I_{CC} - I_D = I_{CC} - I_0 (e^{qv/kt} - 1) \quad (\text{II.1})$$

Le circuit électrique équivalent correspondant à une cellule solaire est :

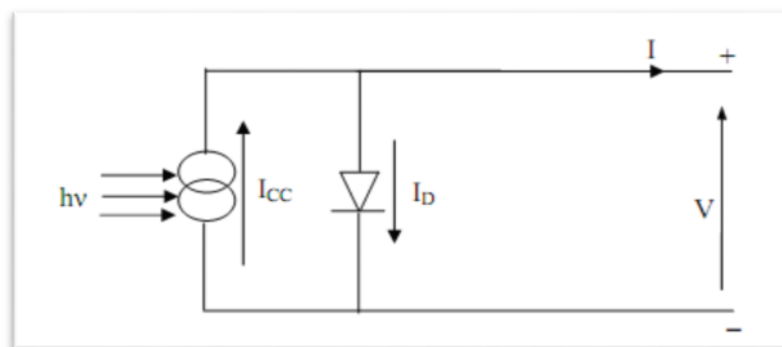


Figure (II.1) Cellule solaire idéale. [4]

I, V : Courant et tension fournis par la cellule.

I_D : Courant de diode donnée par :

$$I_D = I_0 (e^{qv/kt} - 1) \quad (\text{II.2})$$

b- Cas réel :

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la figure (II.2).

Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (D) caractérisant la jonction, une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunt (R_p) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_s).[4]

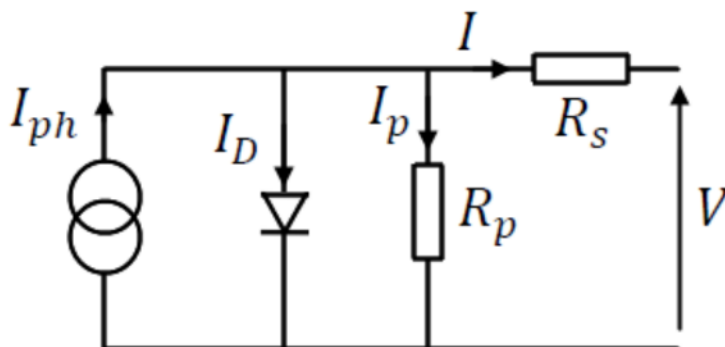


Figure (II.2) Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.[4]

En notant :

$$I = I_{PH} - I_D - I_P \quad (II.3)$$

Avec:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{v+iR_s}{nvT}} - 1 \right) \quad (II.4)$$

$$I_P = \frac{v+iR_s}{R_p} \quad (II.5)$$

$$I_0 = I_{CC} / \left(e^{\frac{v+iR_s}{nvT}} - 1 \right) \quad (II.6)$$

$$I_{CC} = I_{CCr} \left(\frac{G}{1000} \right) \quad (II.7)$$

$$VT = \frac{KT}{q} \quad (II.8)$$

$$I = I_P - I_0 \left(e^{\frac{v+iR_s}{nvT}} - 1 \right) - I_P = \frac{v+iR_s}{R_p} \quad (II.9)$$

La photopile réelle à une résistance série R_s dont l'influence est plus forte lorsque l'appareil fonctionne dans la région de source de tension, Son effet devient très remarquable en module composé de plusieurs cellules connectées en série, la valeur de cette résistance est multiplié par le nombre de cellules. Et une résistance parallèle R_p ayant une influence plus grande dans la région de fonctionnement en source de courant. Son effet est beaucoup moins

remarquable dans un module photovoltaïque comparé à la résistance série, qui devient seulement apparent quand un certain nombre de modules sont reliés en parallèle pour créer un générateur photovoltaïque.

La caractéristique (I-V) de la photopile représentée sur la figure (II.3) dépend de ses caractéristiques internes (R_s, R_p) et des facteurs externes comme l'irradiation et la température.

Dans les modèles photovoltaïques, on suppose généralement que $I_{PH} = I_{CC}$ parce que dans la photopile réelle, la résistance série est faible et la résistance parallèle est élevée. [4]

Donc l'équation devienne :

$$I = I_{PH} - I_0 \left[e^{\frac{v+iR_s}{nvT}} - 1 \right] \quad (II.10)$$

II-2-2 Caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule solaire

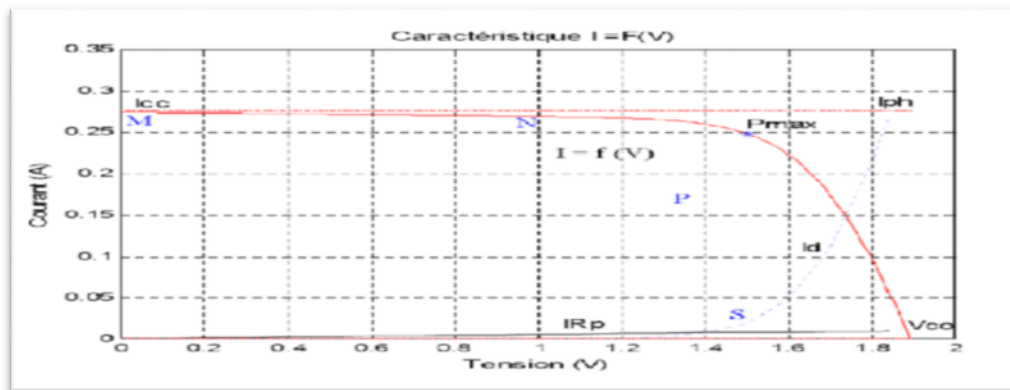


Figure (II.3) La caractéristique (I-V) d'une cellule solaire. [1]

La caractéristique $I = f(V)$ représente la courbe de puissance, sachant que le courant généré est donné par la formule (II.9) et que la cellule fonctionne sous un éclairage fixe E et une température constante T .

Le fonctionnement du module est caractérisé essentiellement par trois zones: [1]

➤ Zone MN : Le courant I est donné presque constant la cellule se comporte comme un générateur de courant (pratiquement constant de valeur voisine de I_{CC}). Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants élevés et des tensions petites.

- Zone PS : Région correspondante aux valeurs élevées de RC. La cellule se comporte comme un générateur de tension en circuit ouvert V_{CO} . Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants petits et des tensions élevées.
- Zone NP : Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances élevées, des courants et des tensions acceptables.

II-3 Convertisseurs

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ photovoltaïque et la charge pour une charge continu (sans stockage avec une charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu-continu), soit entre la batterie et la charge (après stockage, il sera appelé onduleur ou convertisseur continu-alternatif).[10]

Le convertisseur remplit les fonctions suivantes :

- Conversion de courant continu en courant alternatif compatible avec la tension du réseau.
- Optimisation de la tension continue de manière à ce que le champ de modules fonctionne dans des conditions de puissance optimales.
- Sécurité Convertisseur (DC-DC):

Comme on a vu dans le chapitre précédent, les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température.

En plus de ces dépendances, le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépendant à son tour de l'ensoleillement et de la température ainsi que de la charge. Pour que le module fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque.

Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôlé par un mécanisme de poursuite(MPPT) «Maximum Power Point Tracking»

II-3-1 Le convertisseur continu-continu (DC-DC)

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance 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 dans les hacheurs.

La technique du découpage, apparue environ dans les années soixante, a apporté une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement des alimentations séries.

Dans une alimentation à découpage (Figure(II.4)), la tension d'entrée est "hachée" à une fréquence donnée par un transistor alternativement passant et bloqué.

Il en résulte une onde carrée de tension qu'il suffit de lisser pour obtenir finalement une tension continue. [1]

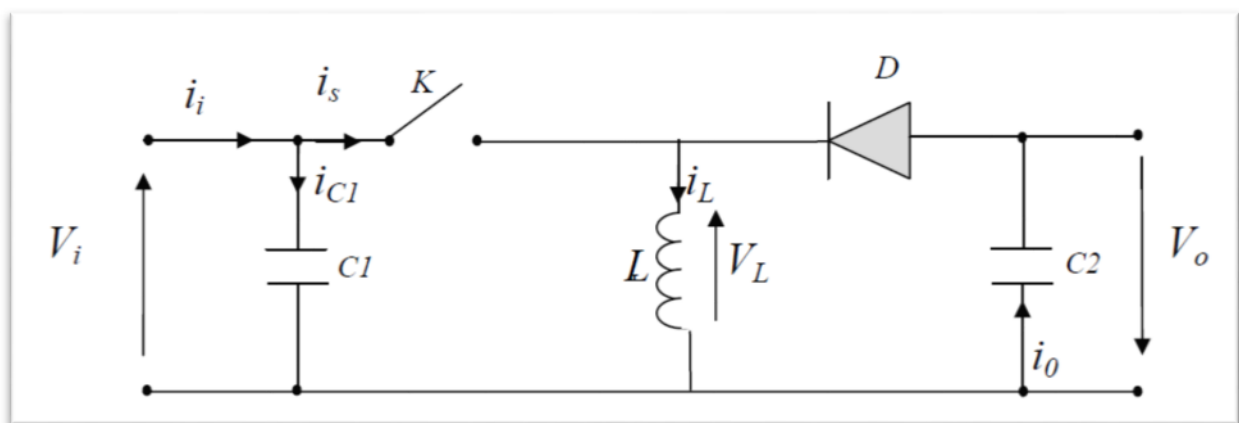
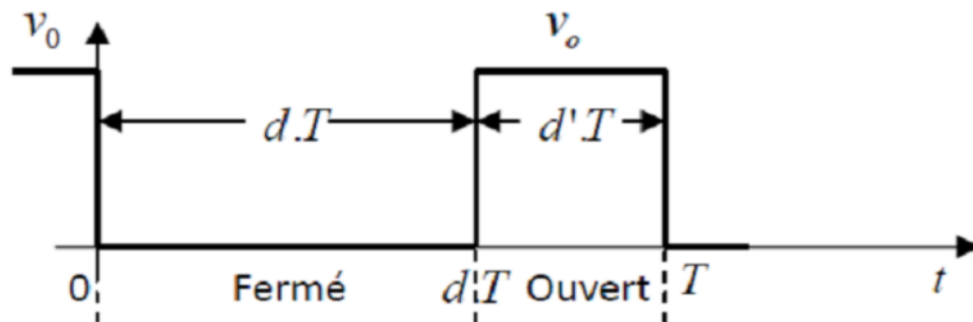


Figure (II.4) Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage.[1]

La régulation de la tension de sortie à un niveau constant est réalisée par une action sur le "rapport cyclique", défini comme la fraction de la période de découpage où l'interrupteur est passant (figure (II.5)). L'interrupteur est un dispositif semi-conducteur en mode tout-rien (bloqué – saturé), habituellement un transistor MOSFET. Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite. [11]

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence Constante f_s avec un temps de fermeture = T_{ds} et un temps d'ouverture = $(1-d) T_s$. Où:

- T_s est la période de commutation qui est égale à $\frac{1}{f_s}$
- d le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0, 1]$).



Figure(II.5) périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.[11]

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi les quels, on présente le principe des trois types des convertisseurs à découpage (dévolteur, survolteur et mixte), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les différents charges.

a) Hacheur dévolteur :

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur Buck ou hacheur série. La figure (II.6) présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure. où le rapport de conversion $M = \frac{v_o}{v_i}$ change avec le rapport cyclique du commutateur. [1]

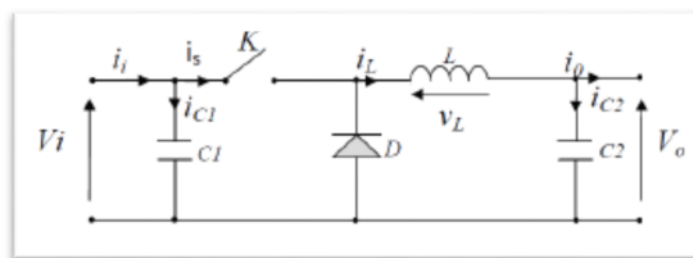


Figure (II.6) Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur. [1]

b) Hacheur survolteur :

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (II.7). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.[1]

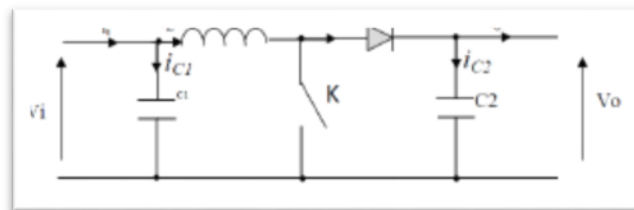
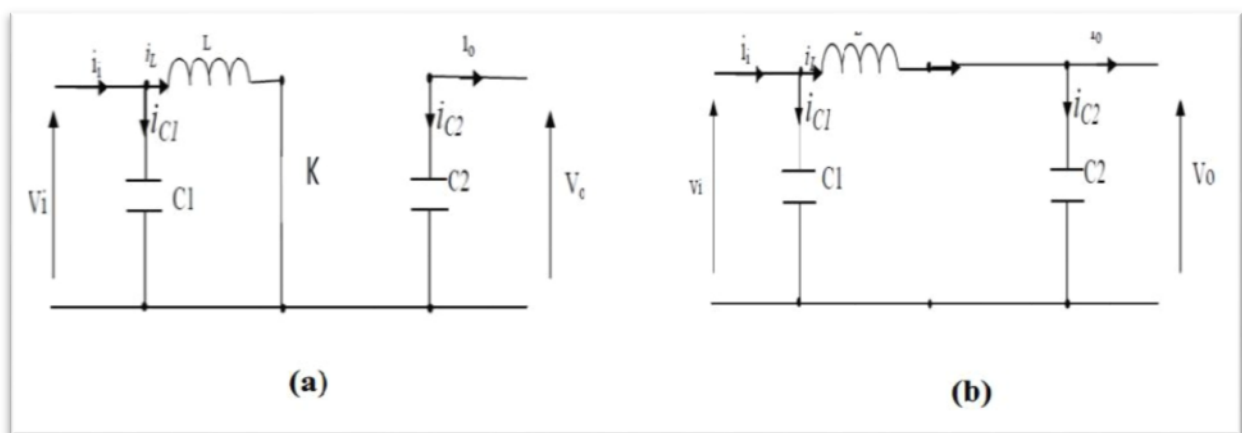


Figure (II.7) Schéma de principe d'un convertisseur survolteur [11]

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (voir figure II.8) des deux phases de fonctionnement donne:



Figure(II.8) Schémas équivalents du hacheur survolteur. [16]

(a) : K fermé, (b) : ouvert

- Pour la première période d.Ts :

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = C1 \frac{dvi(dt)}{dt} = Ii(t) - IL(t) \\ I_{c2}(t) = C2 \frac{dvo(dt)}{dt} = -I0(t) \\ VL(t) = L \frac{dIL(dt)}{dt} = Vi(t) \end{cases} \quad (II.11)$$

Pour la deuxième période $(1-d)T_s$:

$$\begin{cases} \mathbf{Ic1}(t) = \mathbf{C1} \frac{d\mathbf{vi}(dt)}{dt} = \mathbf{Ii}(t) - \mathbf{IL}(t) \\ \mathbf{Ic2}(t) = \mathbf{C2} \frac{d\mathbf{vo}(dt)}{dt} = \mathbf{IL}(t) - \mathbf{IO}(t) \text{ (II.12)} \\ \mathbf{VL}(t) = \mathbf{L} \frac{d\mathbf{IL}(dt)}{dt} = \mathbf{Vi}(t) - \mathbf{V0}(t) \end{cases}$$

On trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur:

$$\begin{cases} \mathbf{IL} = \mathbf{Ii} - \mathbf{C1} \frac{d\mathbf{vi}(dt)}{dt} \\ \mathbf{Io} = (1-d) \mathbf{iL} - \mathbf{C2} \frac{d\mathbf{vi}(dt)}{dt} \text{ (II.13)} \\ \mathbf{Vi} = \mathbf{L} \frac{d\mathbf{IL}(dt)}{dt} + (1-d)\mathbf{V0}(t) \end{cases}$$

II-3-2 Commande MPPT d'un convertisseur DC/DC :

Le coût élevé du générateur photovoltaïque nous impose une utilisation optimale et rationnelle de ce dernier pour aboutir à un fonctionnement économique et rentable. Pour cela, nous devons utiliser le générateur PV dans la région où il délivre sa puissance maximale. [1]

II-3-2 -1 Principe de la commande MPPT :

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV dans des conditions météorologiques et de charge stables. , le principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique D à la valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du panneau PV.[4]

L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC-DC comme représenté sur la figure (II.9). [3]

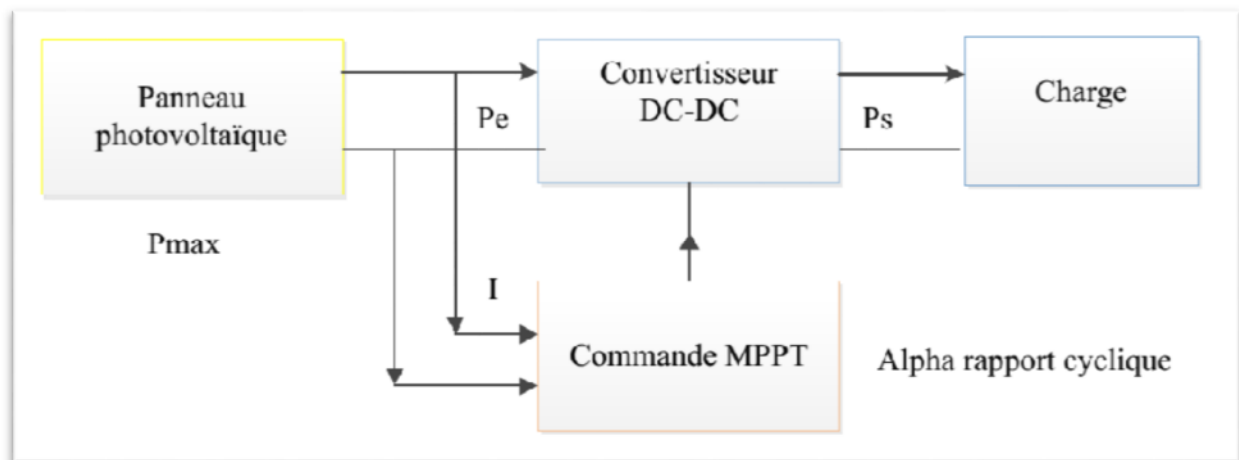


Figure (II.9) Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.[3]

Avec :

Pe : puissance d'entrée

Ps: puissance de sortie

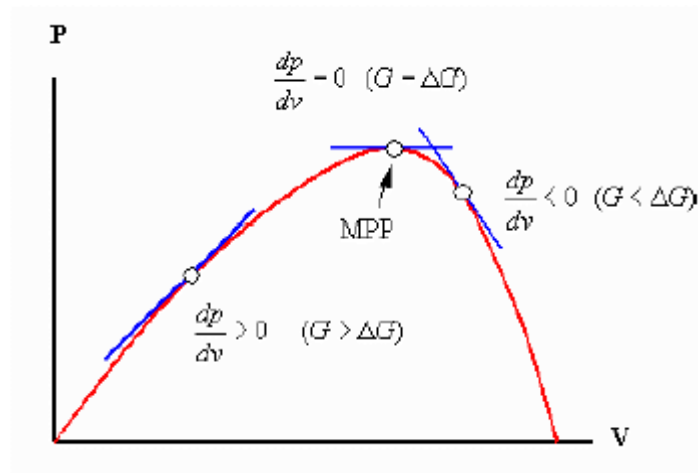
Il y a plusieurs types de commande MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base. Les méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement Hill Climbing, Perturb & Observ (P&O), l'incrément de Conductance (IncCond) et par intelligence artificielle (logique floue, réseaux de neurones).

On va expliquer deux méthodes P&O et logique floue. [10]

• Commande MPPT P&O:

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} ou le courant I_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte. Ces méthodes, aujourd'hui largement utilisées de par leur facilité d'implémentation, présentent cependant quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elles engendrent en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement. [4]

Le principe de cette commande est de générer des perturbations en réduisant ou en augmentant le rapport cyclique D et d'observer l'effet sur la puissance délivrée par le GPV (Figure (II.10)) . [12]



Figure(II.10) Caractéristique de la puissance du générateur PV.

- Si $dP_{pv}/dV_{pv} > 0$, la tension est augmentée, cela induit une augmentation du rapport cyclique $D(k) = D(k-1) + C$.
C la constante d'accrémentition.
- Si $dP_{pv}/dV_{pv} < 0$, la tension est réduite cela ce traduit par une diminution du rapport cyclique $D(k) = D(k-1) - C$

L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P et O) est donné par la Figure(II.11).

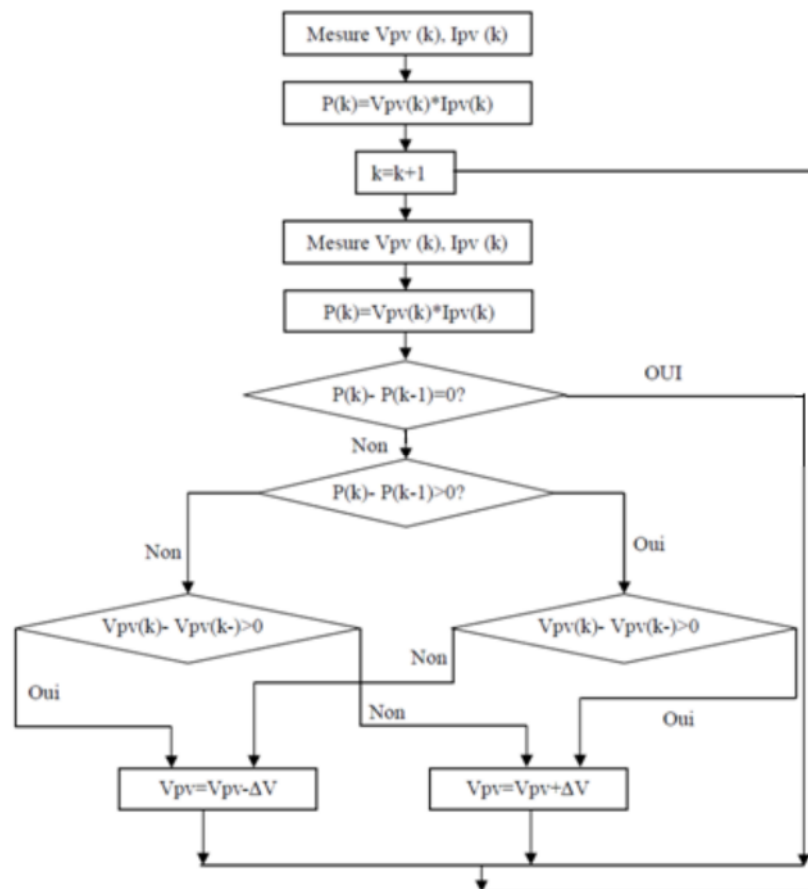


Figure (II.11) Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O)

Convertisseur continu-Alternatif (DC-AC)

L'onduleur triphasé dit deux niveaux est illustré par son circuit de puissance de la figure (II.12). On doit distinguer d'une part les tensions de branche VAN, VBN, VCN mesurées par rapport à la borne négative de la tension continue Vpv, d'autre part, il y a les tensions de phases VAn, VBn et VCn mesurées par rapport à un point neutre flottant représentant une charge équilibrée montée en étoile. Des tensions simples on peut tirer facilement les tensions composées VAB, VBC et VCA. [13]

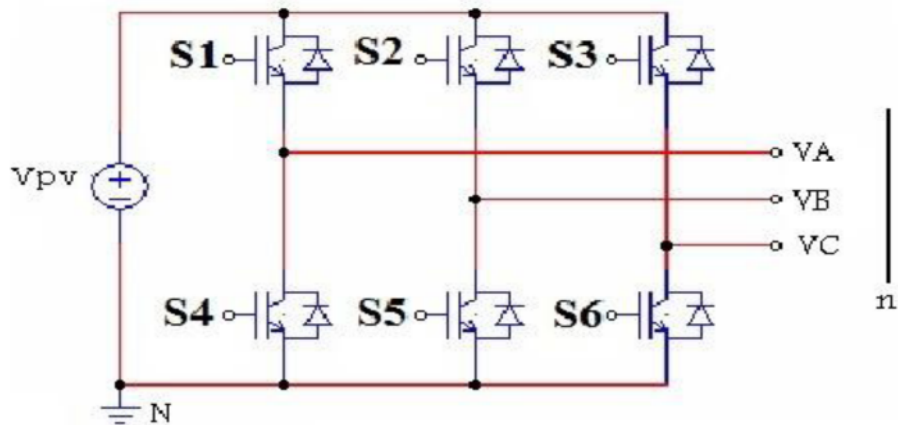


Figure (II.12) Circuit électrique équivalent de l'onduleur de tension [13]

Dans le circuit de puissance de l'onduleur triphasé de la figure (II.12), il est à noter que les états des interrupteurs d'un même bras sont complémentaires. En utilisant ces états des interrupteurs, nous pouvons obtenir les tensions de branche de sortie de l'onduleur mesurées par rapport à la borne négative de la tension du côté continu comme suit : [13]

$$\begin{cases} V_{AN} = S_1 \cdot V_{PV} \\ V_{BN} = S_2 \cdot V_{PV} \\ V_{CN} = S_3 \cdot V_{PV} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Où S1, S2 et S3 désignent les états des interrupteurs des phases A,B et C respectivement.

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{AN} + V_{NB} = V_{AN} - V_{BN} = (S_1 - S_2)V_{PV} \\ V_{BC} = V_{BN} + V_{NC} = V_{BN} - V_{CN} = (S_2 - S_3)V_{PV} \\ V_{CA} = V_{CN} + V_{NA} = V_{CN} - V_{AN} = (S_3 - S_1)V_{PV} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Les tensions composées sont:

$$\begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} V_{PV} \quad (\text{II.16})$$

On peut écrire l'équation (II.16) sous la forme matricielle

$$\begin{cases} V_{An} = \frac{2}{3}V_{AN} + \frac{1}{3}(V_{BN} + V_{CN}) \\ V_{Bn} = \frac{2}{3}V_{BN} + \frac{1}{3}(V_{AN} + V_{CN}) \\ V_{Cn} = \frac{2}{3}V_{CN} + \frac{1}{3}(V_{BN} + V_{AN}) \end{cases}$$

(II.17)

Les tensions simples sont:

$$\begin{bmatrix} V_{An} \\ V_{Bn} \\ V_{Cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{PV}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S1 \\ S2 \\ S3 \end{bmatrix} \quad (II.18)$$

• **Commande à MLI :**

La Figure (II.13) illustre le circuit d'un onduleur monophasé, et la Figure (II.14) donne le principe de la modulation de largeur d'impulsion.

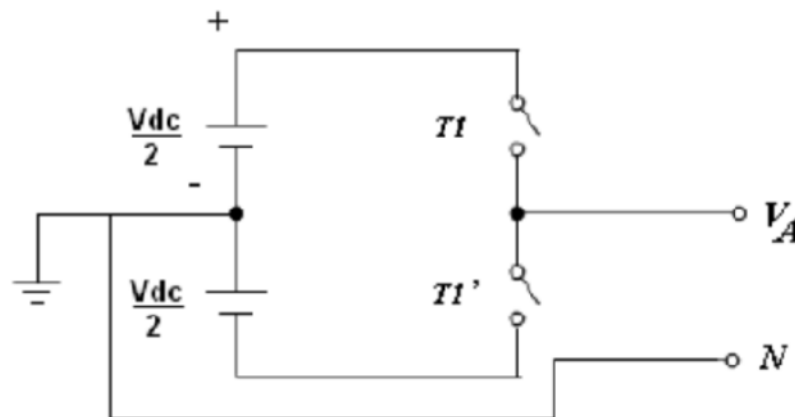


Figure (II.13) Schéma du circuit monophasé d'un onduleur de tension [8]

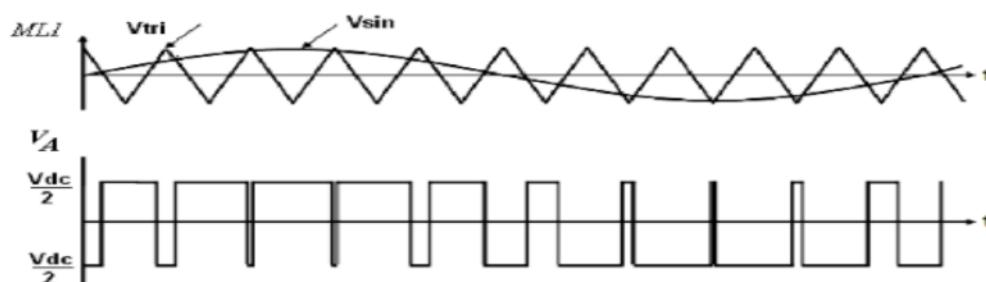


Figure (I.14) Schéma du signal de commande à MLI et la tension (VA) de sortie d'un onduleur monophasé [8]

Comme représenté par la Figure (II.14), la tension délivrée par l'onduleur est déterminée dans ce qui suit :

$$\text{Lorsque } V_{\sin} > V_{tr} i, V_A = \frac{V_{dc}}{2}$$

$$\text{Lorsque } V_{\sin} < V_{tr} i, V_A = - \frac{V_{dc}}{2}$$

II-4 Modélisation de l'interface réseau :

Les charges sont les éléments consommateurs de puissance électrique dans un système. La consommation de cette puissance électrique dépend des caractéristiques de la charge. Une modélisation correcte de ces caractéristiques est indispensable pour représenter finement le comportement de la charge. La Figure (II.15) nous montre le modèle de la charge connectée à l'onduleur de tension: [8]

- le filtre LC
- les charges équilibrées de nature RL
- le réseau électrique base tension

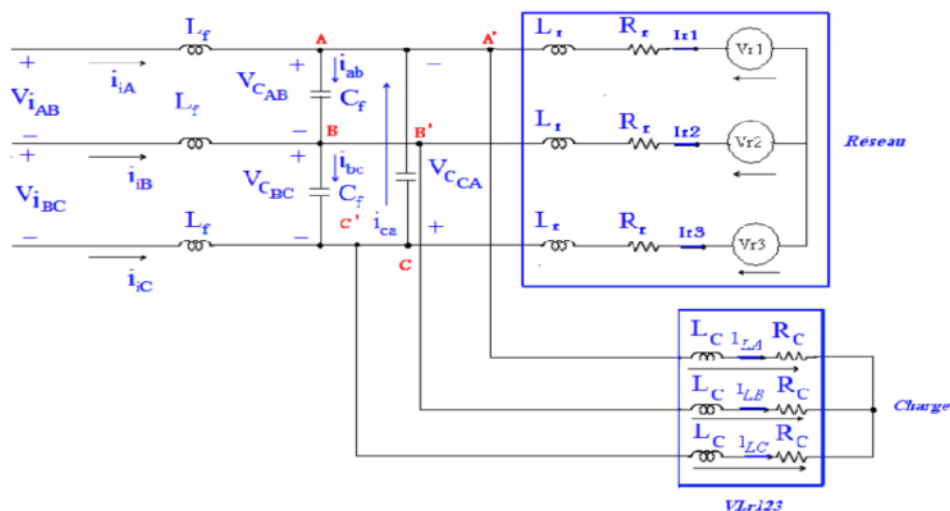


Figure (II.15) Schéma de l'interface de connexion d'un onduleur au réseau électrique alternatif ou à une charge [8]

II-5 Modélisation d'onduleur et du filtre LC et la charge (RcLc) :

Le modèle d'état de l'ensemble de sortie d'onduleur, filtre LC et la charge (Rc Lc) est donnée par la Figure (II.16)

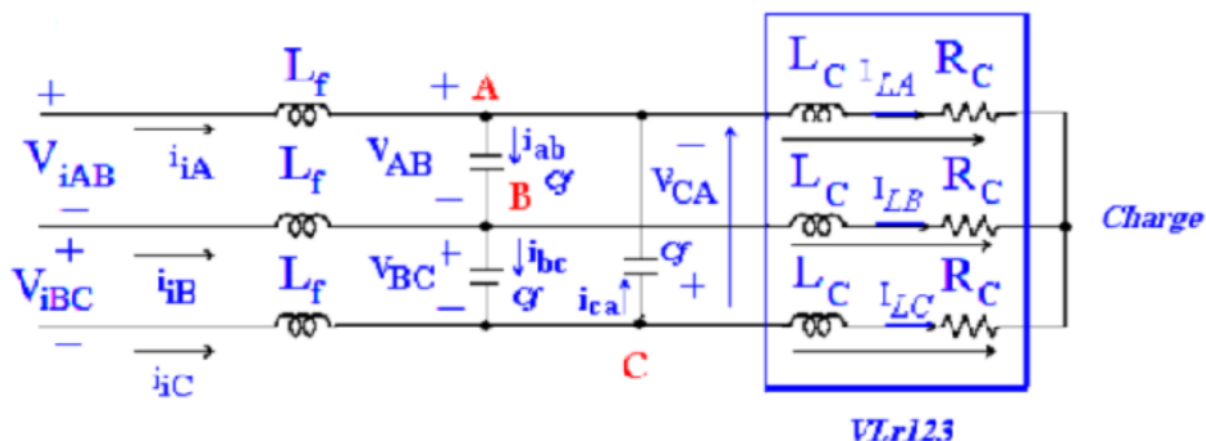


Figure (II.16) Schéma du filtre LC et la charge RL [8]

En appliquant la loi de Kirchhoff aux nœuds A, B, et C, les équations des courants et des tensions du filtre LC décrites par la figure (II.16) , sont données comme suit :

- Nœuds (A) :

$$i_{iA} + i_{ca} = i_{AB} + i_{LA} \Rightarrow i_{iA} + Cf \frac{dV_{CA}}{dt} = Cf \frac{dV_{AB}}{dt} + i_{LA} \quad (II.19)$$

- Nœuds (B) :

$$i_{iB} + i_{BC} = i_{bc} + i_{LB} \Rightarrow i_{iB} + Cf \frac{dV_{AB}}{dt} = Cf \frac{dV_{CA}}{dt} + i_{LB} \quad (II.20)$$

Nœuds (C) :

$$i_{iC} + i_{BC} = i_{ca} + i_{LC} \Rightarrow i_{iC} + Cf \frac{dV_{BC}}{dt} = Cf \frac{dV_{CA}}{dt} + i_{LC} \quad (II.21)$$

Avec :

$$i_{ca} = Cf \frac{dV_{CA}}{dt}, i_{ab} = Cf \frac{dV_{AB}}{dt}, i_{bc} = Cf \frac{dV_{BC}}{dt}$$

En substituant (II.21) dans (II.20), on trouve :

$$i_{iA} - i_{iB} + \left(\frac{dV_{CA}}{dt} - \frac{dV_{AB}}{dt} \right) = C \left(\frac{dV_{AB}}{dt} - \frac{dV_{CA}}{dt} \right) + i_{LA} - i_{LB} \quad (II.22)$$

$$\Rightarrow Cf \left(\frac{dV_{CA}}{dt} + \frac{dV_{BC}}{dt} - 2 \frac{dV_{AB}}{dt} \right) = -i_{iA} + i_{iB} + i_{iLA} - i_{iLB}$$

En substituant (II.22) dans (II.21), on trouve :

$$i_{iB} - i_{iC} + \left(\frac{dV_{AB}}{dt} - \frac{dV_{CA}}{dt} \right) = C \left(\frac{dV_{BC}}{dt} - \frac{dV_{CA}}{dt} \right) + i_{iLB} - i_{iLC} \quad (\text{II.23})$$

$$\Rightarrow Cf \left(\frac{dV_{AB}}{dt} + \frac{dV_{CA}}{dt} - 2 \frac{dV_{CA}}{dt} \right) = -i_{iB} + i_{iC} + i_{iLB} - i_{iLC}$$

En substituant (II.20) dans (II.22) on trouve :

$$i_{iC} - i_{iA} + \left(\frac{dV_{BC}}{dt} - \frac{dV_{CA}}{dt} \right) = C \left(\frac{dV_{CA}}{dt} - \frac{dV_{AB}}{dt} \right) + i_{iLC} - i_{iLA} \quad (\text{II.24})$$

$$\Rightarrow Cf \left(\frac{dV_{BC}}{dt} + \frac{dV_{AB}}{dt} - 2 \frac{dV_{CA}}{dt} \right) = -i_{iC} + i_{iA} + i_{iLC} - i_{iLA}$$

Afin de simplifier l'équation (II.22) et (II.23), nous utilisons le rapport de la somme des tensions algébriques égales à zéro entre les phases de la charge, tel que :

$$V_{AB} + V_{BC} + V_{CA} = 0 \quad (\text{II.25})$$

D'après l'équation (II.22), l'équation (II.23) et (II.24) peuvent être écrites respectivement comme suit :

$$\begin{cases} \frac{dV_{AB}}{dt} = \frac{1}{3Cf} i_{iAB} - \frac{1}{3Cf} i_{iLAB} \\ \frac{dV_{BC}}{dt} = \frac{1}{3Cf} i_{iBC} - \frac{1}{3Cf} i_{iLBC} \\ \frac{dV_{CA}}{dt} = \frac{1}{3Cf} i_{iCA} - \frac{1}{3Cf} i_{iLCA} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Avec :

$$i_{iAB} = i_{iA} - i_{iB}, \quad i_{iBC} = i_{iB} - i_{iC}, \quad i_{iCA} = i_{iC} - i_{iA}$$

$$\text{Et } i_{iLAB} = i_{iLA} - i_{iLB}, \quad i_{iLBC} = i_{iLB} - i_{iLC}, \quad i_{iLCA} = i_{iLC} - i_{iLA}$$

En appliquant la loi des mailles aux tensions du côté de l'onduleur, les équations des courants peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{cases} \frac{di_{iAB}}{dt} = \frac{1}{L_f} V_{LAB} - \frac{1}{L_f} V_{iAB} \\ \frac{di_{iBC}}{dt} = \frac{1}{L_f} V_{LBC} - \frac{1}{L_f} V_{iBC} \\ \frac{di_{iCA}}{dt} = \frac{1}{L_f} V_{LCA} - \frac{1}{L_f} V_{iCA} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

En appliquant la loi des mailles du côté charge, les équations des tensions peuvent être décrites comme suit :

$$\begin{cases} V_{AB} = Lr \frac{d i_{LA}}{dt} + RC i_{LA} - LC \frac{d i_{LB}}{dt} + RC i_{LB} \\ V_{BC} = Lr \frac{d i_{LB}}{dt} + RC i_{LB} - LC \frac{d i_{LC}}{dt} + RC i_{LC} \\ V_{CA} = Lr \frac{d i_{LC}}{dt} + RC i_{LC} - LC \frac{d i_{LA}}{dt} + RC i_{LA} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

L'équation (II.28) peut être réécrite comme suit :

$$\begin{cases} \frac{d i_{LAB}}{dt} = -\frac{Rc}{Lc} i_{LAB} - \frac{1}{Lc} V_{LAB} \\ \frac{d i_{LBC}}{dt} = -\frac{Rc}{Lc} i_{LBC} - \frac{1}{Lc} V_{LBC} \\ \frac{d i_{LCA}}{dt} = -\frac{Rc}{Lc} i_{LCA} - \frac{1}{Lc} V_{LCA} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

II-6 Conclusion :

La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet a été élaborée à partir des modèles de la littérature (champ PV, convertisseurs, le MPPT, filtre et charge) ; cette modélisation est une étape essentielle permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi les paramètres constitutants. Dans un système énergétique photovoltaïque, on désire toujours travailler au voisinage du point de puissance maximale MPP, afin de minimiser au maximum les pertes en énergie produite. Pour voir l'efficacité de la méthode d'optimisation P&O dans le rôle de suivre le point de puissance maximale on va simuler notre système choisi ce qui est présenté dans le 3ème chapitre.

III-1 Introduction :

Dans ce chapitre nous avons simulé sous l'environnement MATLAB /SIMULINK tous les parties représentant le système photovoltaïque connecté au réseau électrique tel que le générateur PV, le hacheur survolteur, l'onduleur et la charge.

Pour améliorer l'efficacité de conversion d'énergie PV, il est nécessaire de poursuivre le point de puissance maximale (MPP) de la source d'entrée, est c'est pour ce la on utilise un système de commande MPPT par une méthode classique P&O.

III-2 Système photovoltaïque connecté au réseau électrique proposé

Le système que nous proposons pour l'étude et la simulation est schématisé par la Figure(III.1)

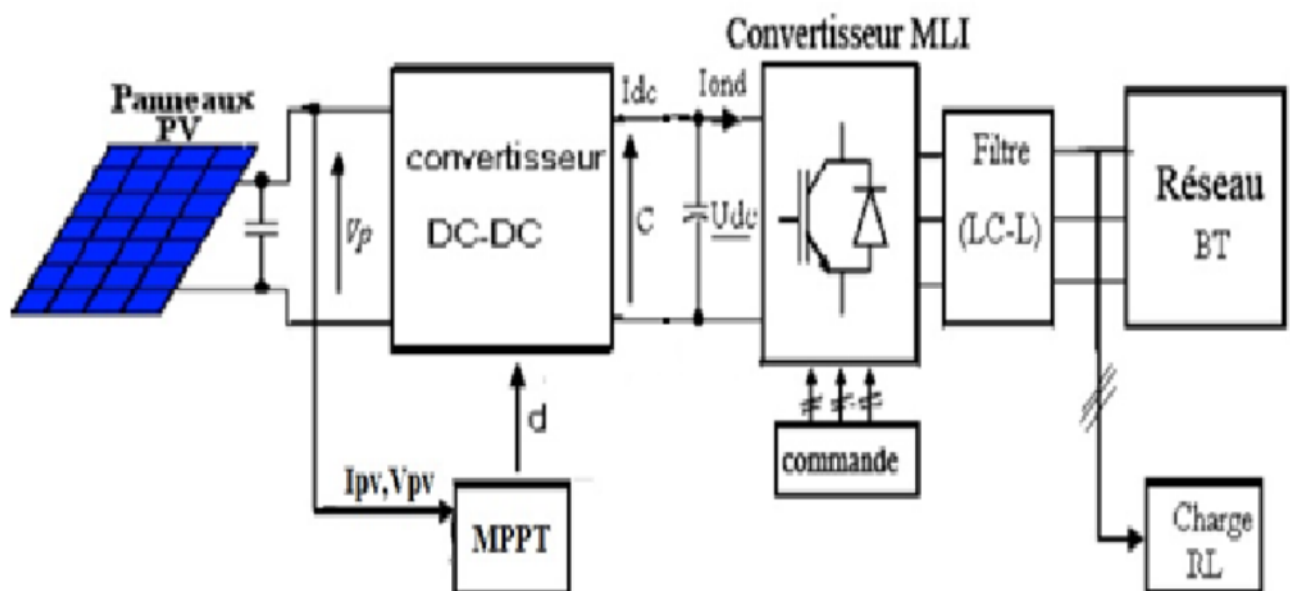


Figure (III.1) Schéma synoptique d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique

Le Système photovoltaïque connecté au réseau électrique représenté par la Figure (III.1) est constitué de:

III-2-1 Générateur photovoltaïque : Formé de 4 modules avec un nombre $N_s = 288$ de cellules en série. Nous avons étudié l'influence des paramètres extérieurs, l'éclairement et la température sur les caractéristiques (courant-tension, puissance-tension).

III-2-2 Convertisseur DC-DC : Ce convertisseur est connu par le nom d'élévateur de tension, qui est l'étage d'adaptation (DC-DC) entre le (GPV) et la charge de sortie.

Cette structure correspond à un système plus communément appelé, système autonome. L'étage d'adaptation dispose d'une commande (MPPT) (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le (PPM) que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque.

III-2-3 Convertisseur DC-AC : Il ya plusieurs type d'onduleur qui peut installer avec un réseau, sont caractérisés par leur technologie et par la forme d'onde qu'ils génèrent [8] :

- Onduleur à onde sinusoïdale
- Onduleur à onde carrée
- Onduleur à onde pseudo-sinusoïdale

On va choisir dans ce travail l'onduleur à onde sinusoïdale commandé par MLI.

III-2-4 Filtre LC : Le filtre LC élimine les harmoniques de découpage presque parfaitement et son comportement est quasiment idéal lorsqu'on travaille à vide (courant de sortie nul) et avec des signaux de fréquences voisines de la fréquence fondamentale.[8]

Pour pouvoir connecter l'onduleur de tension en parallèle avec le réseau et le faire travailler comme une source de courant, il est nécessaire d'utiliser un filtre de raccordement de nature inductive (L ou LCL).

La fonction de ce filtre permet d'une part de convertir le compensateur en un dipôle de courant du point de vue du réseau, et d'autre part de réduire la dynamique du courant, de façon à le rendre plus facile à contrôler.

Le filtre de type (L) permet de diminuer les harmoniques autour de la fréquence de commutation. Pour obtenir cela, la valeur de cette inductance doit être relativement élevée, cependant cette augmentation peut mettre en risque la capacité de compensation du système. Le filtre (LCL) est l'autre alternative de raccordement. [8]

III-2-5 La charge : nous avons choisi une charge équilibrée (RL) sur le côté (AC) Alternatif.

III-2-6 Le réseau électrique: Il représente le réseau électrique de distribution publique d'amplitude $V_r = 220$ V et de fréquence $f = 50$ Hz.

III-3 Générateur photovoltaïque

On va choisir dans ce travail le générateur PV de 4 modules BP SX150s en série, qui contient de 72 cellules solaire en série dans chaque module.

Les caractéristiques électriques de ce panneau photovoltaïque sont données par le tableau suivant :

Caractéristiques électriques	$E=1000\text{w/m}^2, T=25\text{ c}$
Puissance maximale de module (P_{\max})	150 W
Courant de court-circuit (I_{cc})	4.75 A
Tension de circuit ouvert (V_{oc})	43.5 V
Courant au point de MPPT (I_m)	4.35 A
Tension au point de MMPT (V_m)	34.5 V
Nombre de modules en série (N_s)	4

Tableau (III-1) caractéristiques de panneau BP SX150s [14]

III-3-1-1 caractéristiques de panneau BP SX150s:

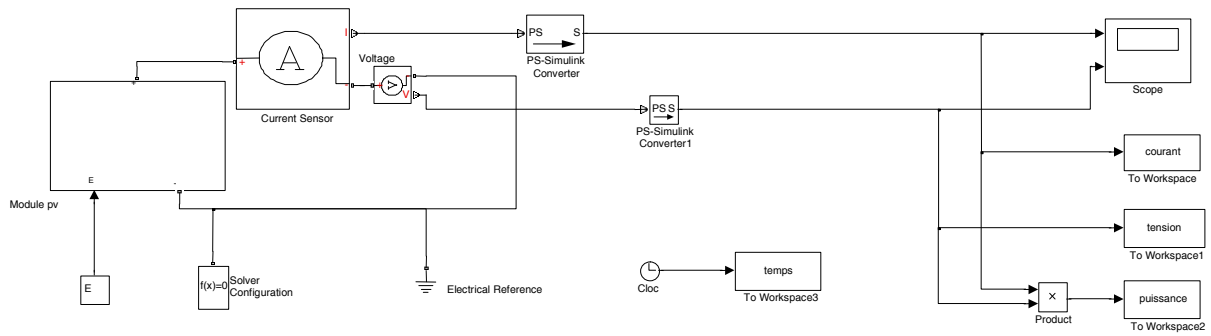


Figure (III.2) : Module photovoltaïque sous MATLAB

La simulation d'un module PV sous les conditions standard ($E=1000 \text{ w/m}^2$ et $T=25 \text{ }^\circ\text{c}$) donnée les courbes présenté dans la figure

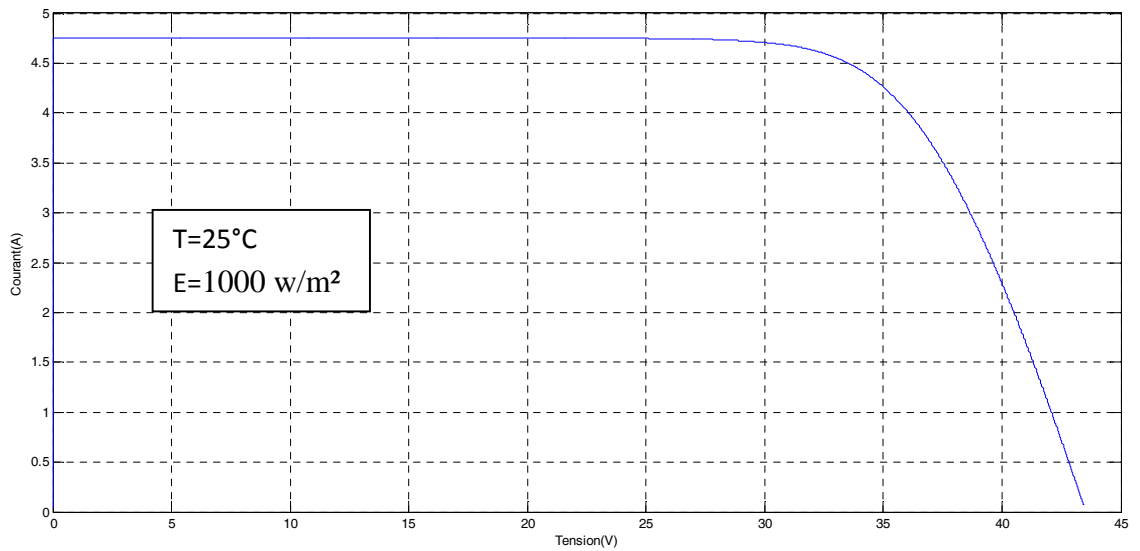


Figure (III.3) Caractéristique (V-I) d'un module PV

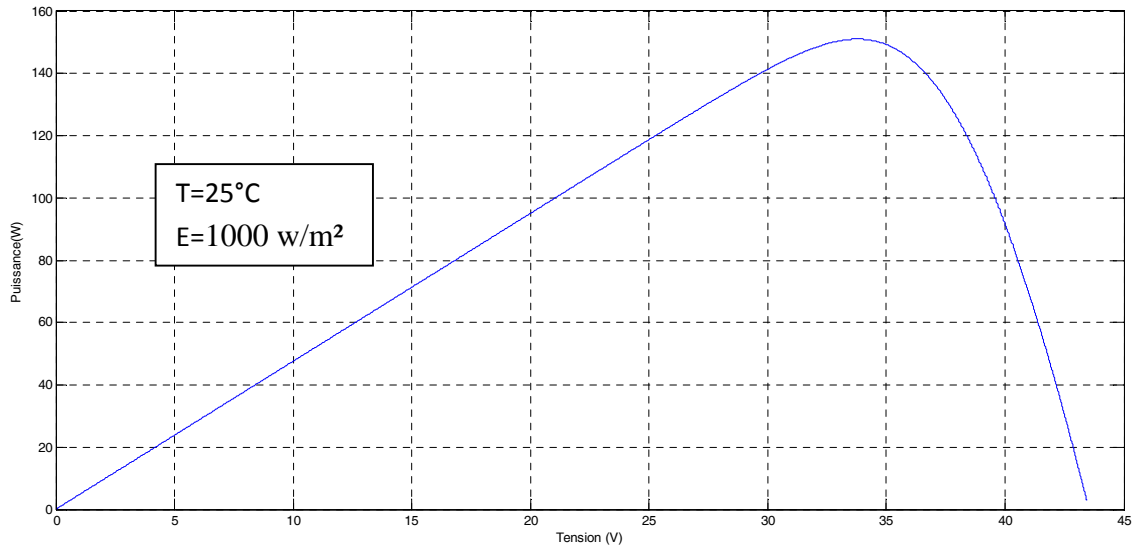


Figure (III.4) caractéristique (V-P) d'un module PV

III-3-1-2 caractéristiques de 4 modules BP SX150s en série:

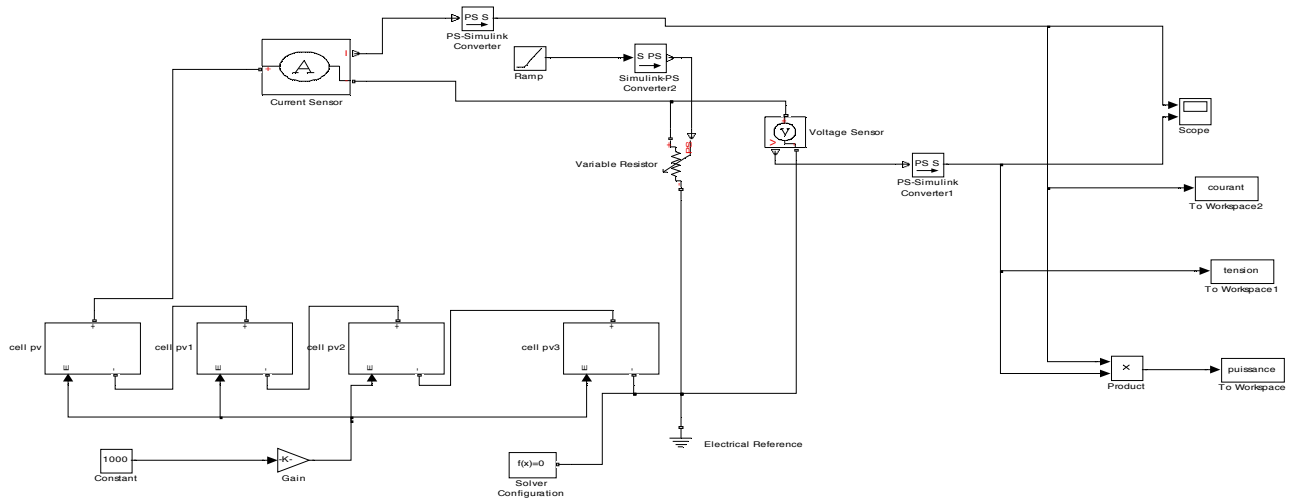


Figure (III.5) : quatre Modules photovoltaïque en série sous MATLAB

La simulation du quatre modules PV sous les conditions standard $E=1000 \text{ w/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ donnée les courbes présenté dans la figure (III.6 et 7)

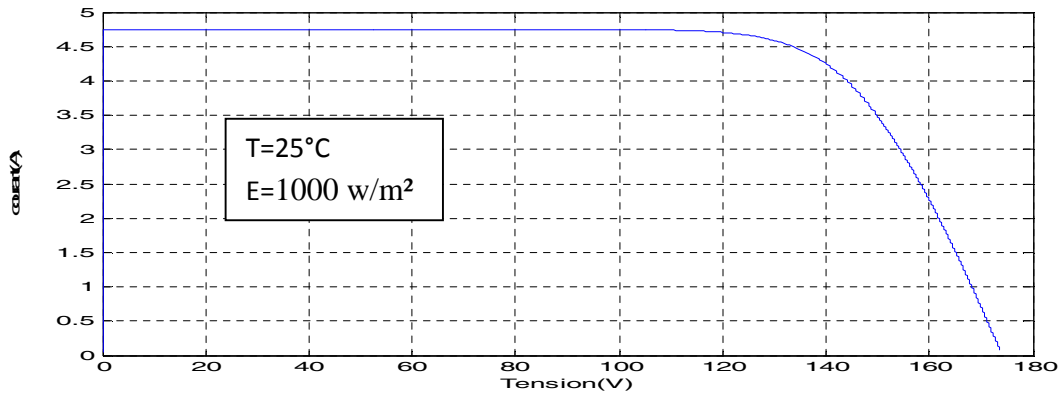


Figure (III.6) Caractéristique (V-I) de 4 modules BP SX150s en série

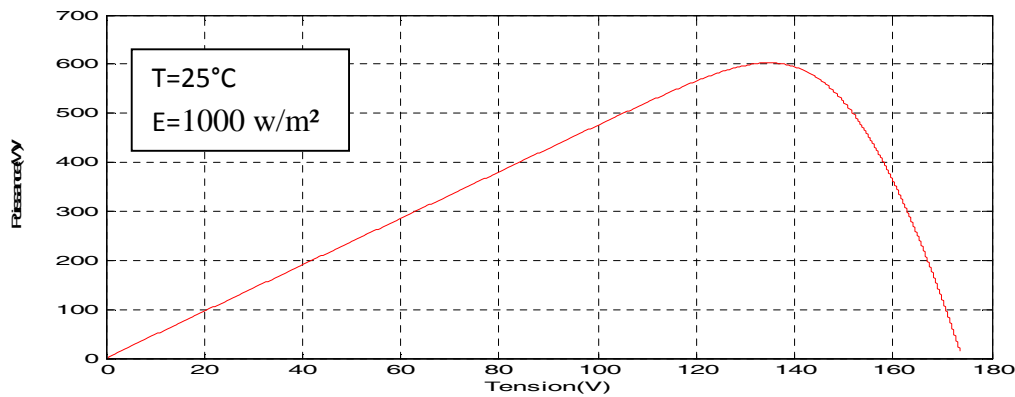


Figure (III.7) caractéristique (V-P) de 4 modules BP SX150s en série

III-3-2 Simulation du générateur (GPV) à éclairement et température, résistance variable :

Afin de constater l'influence des conditions externes de l'éclairement et de la température et Resistances (parallèle et série) sur les caractéristiques (I-V) (P-V), nous avons adopté les méthodes suivantes:

A - l'influence de l'éclairement :

on fixe la température à ($T=25^\circ$) et on fait varier l'éclairement dans une gamme suffisante, en faisant varier l'éclairement (E) entre 200 et 1000 avec un pas de 200, la caractéristique ($I=f(V)$) est donnée par la figure (III.8) et la caractéristique ($P=f(V)$) est donnée par la figure (III.9) :

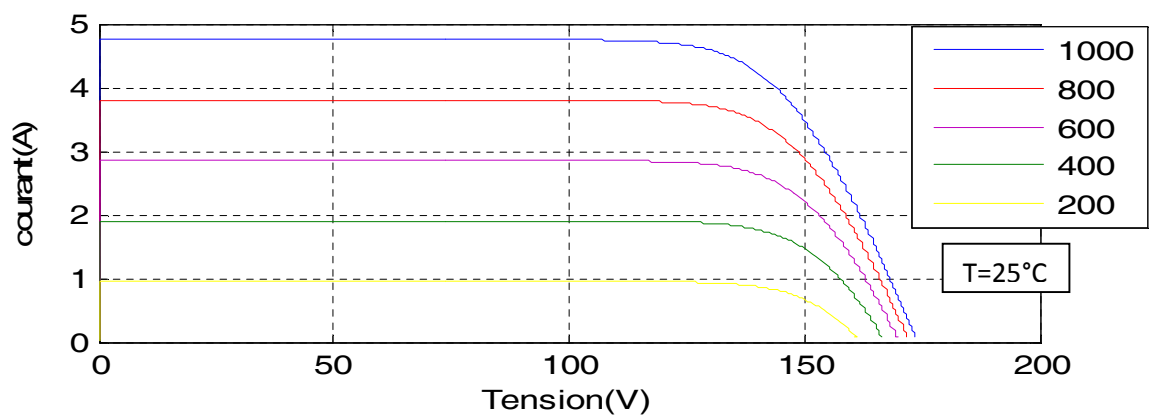


Figure (III.8) Influence de variation de l'éclairement sur la caractéristique (V-I)

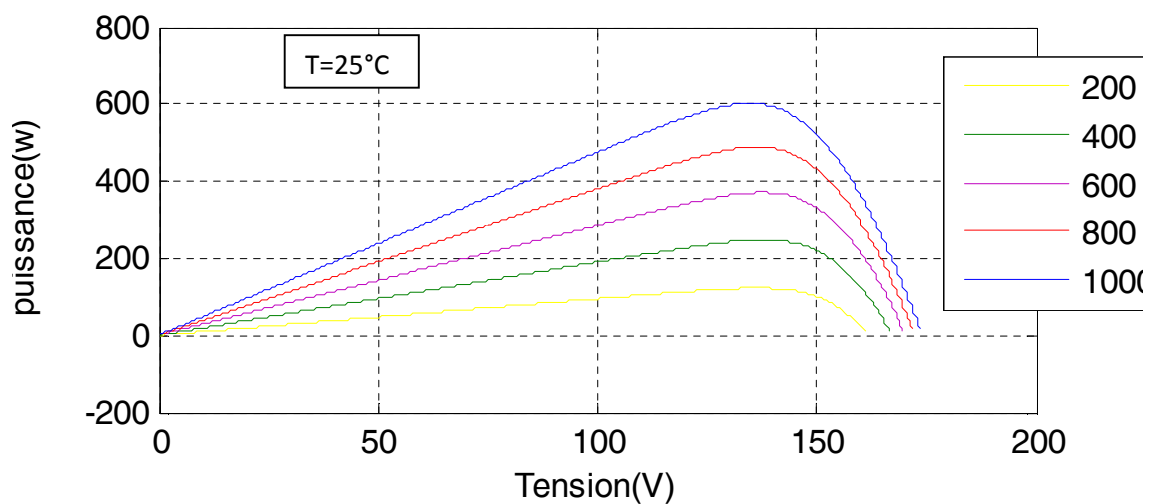


Figure (III.9) Influence de variation de l'éclairement sur la caractéristique (V-P)

Pour différentes valeurs (200, 400, 600, 800, 1000) w/m^2 et $T=25^\circ\text{C}$, la figure (III.8) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique (V-I) on constate que le courant subit une variation importante alors que la tension à vide varie légèrement car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension du circuit ouvert est une fonction logarithmique.

D'après les résultats représentés sur la figure (III.9), le point de puissance maximale est directement proportionnel à l'éclairement qui rend le module comme étant plus efficace lorsque l'éclairement est important.

B - l'influence de température : Pour un éclairement constant ($E=1000 \text{ w/m}^2$), on varie la température afin de voir l'influence de cette dernière par rapport aux caractéristiques de générateur PV.

En faisant varier la température ambiante (T) entre (0° et 75°) avec pas de 25°

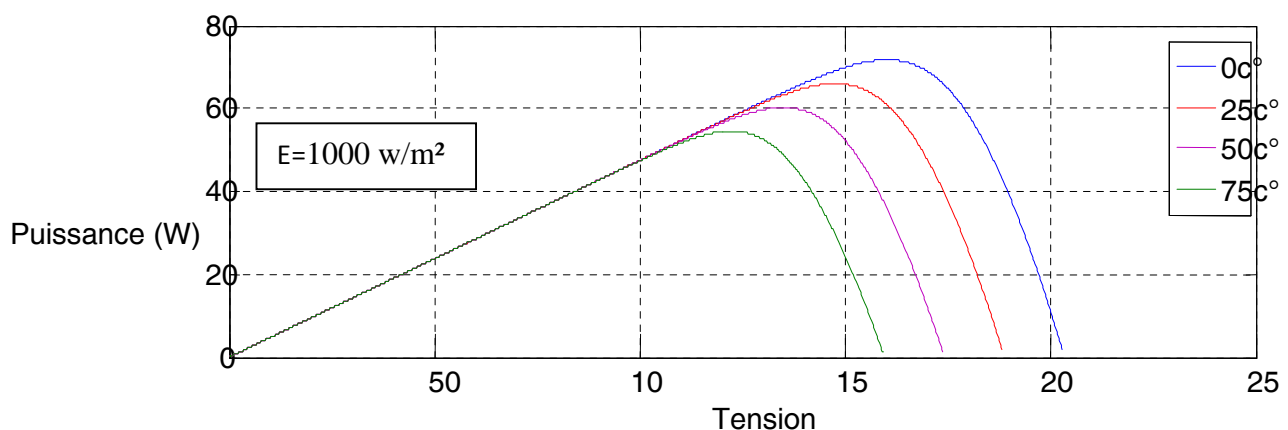


Figure (III.10) Influence de variation de température sur la caractéristique (P-V)

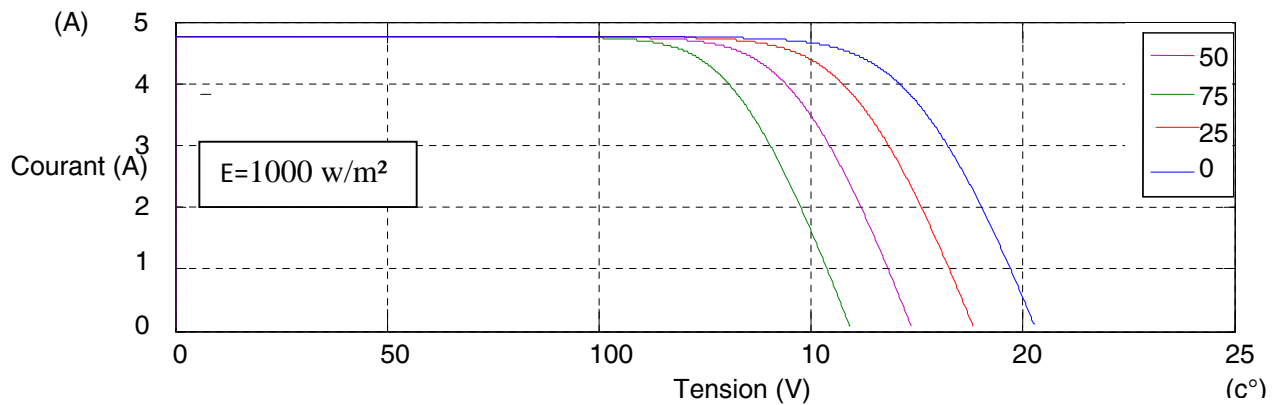


Figure (III.11) Influence de variation de température sur la caractéristique (I-V)

La température joue un rôle très important dans le comportement des cellules solaires son augmentation entraine une augmentation du courant des photonique d'un coté et une diminution de la tension du circuit.

D'après les résultats obtenus aux figures (III.10 et 11), nous pouvons constater :

- Une légère augmentation de la valeur du courant.
- Une diminution de la valeur de la tension à vide.
- Une diminution de la puissance maximale disponible.

C - Influence de la résistance série R_S :

On fixe la température à 25°C et l'éclairement à $1000\text{W}/\text{m}^2$ et la résistance parallèle à 1Mohm , on varie la résistance série afin de voir l'influence de cette dernière par rapport aux caractéristiques I-V et P-V de la cellule photovoltaïque.

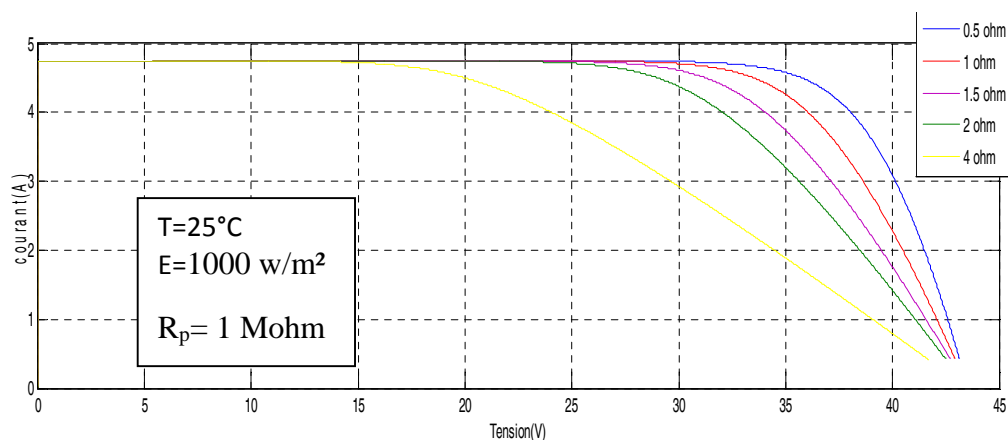


Figure (III.12) : Influence de la résistance série sur la caractéristique (I-V)

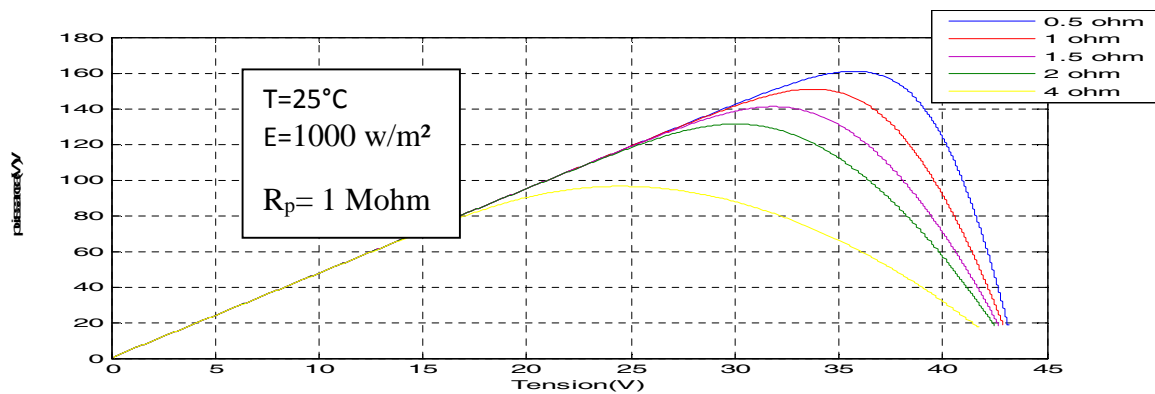


Figure (III.13) : Influence de la résistance série sur la caractéristique (P-V)

Comme on le voit sur la Figure (III.12) La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension elle ne modifie pas la tension du circuit ouvert, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court circuit.

L'augmentation de la résistance série se traduit par une diminution de pente de la courbe de puissance comme le montre la figure(III.13).

C -2 : Influence de la résistance parallèle RP :

On fixe la température à 25°C et l'éclairement à 1000W/m² et la résistance série à 1ohm: on varie la résistance parallèle afin de voir l'influence de cette dernière par rapport aux caractéristiques I-V et P-V de la cellule photovoltaïque.

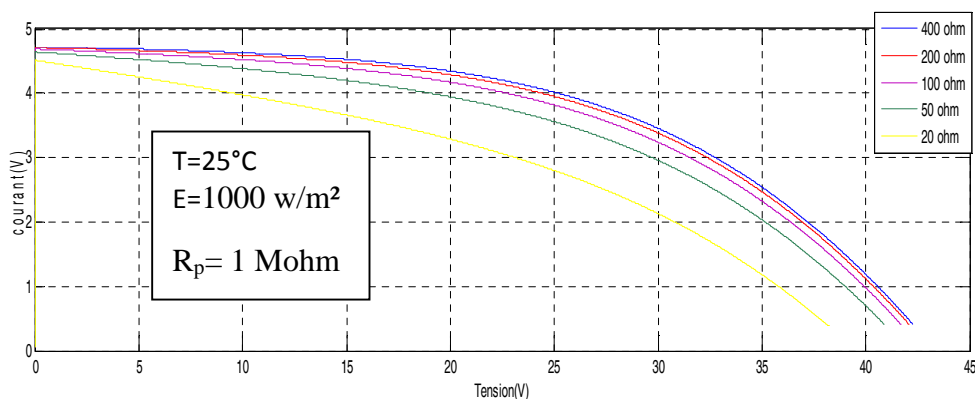


Figure (III.14) : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique (I-V)

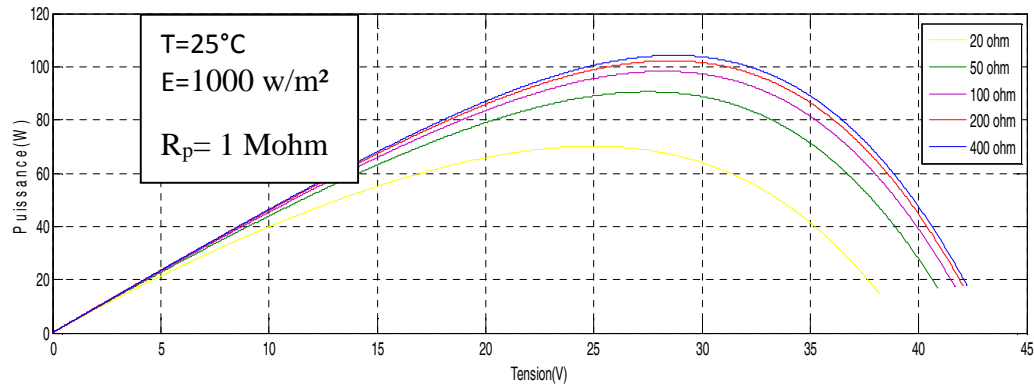


Figure (III.15) : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique (P-V)

Comme on le voit sur la Figure (III.14) La résistance parallèle agit sur la pente de la courbe de tension- courant dans la zone où la cellule fonctionne en tant que générateur de courant

L’augmentation de la résistance série se traduit par une augmentation de pente de la courbe de puissance comme le montre la Figure (III.15).

III -4 Hacheur survolteur :

Parmi les techniques de commande à MPPT du hacheur (Boost) décrites au chapitre II, nous avons choisi la méthode de perturbe & observe. Le schéma de simulation est donné par la Figure(III.1)

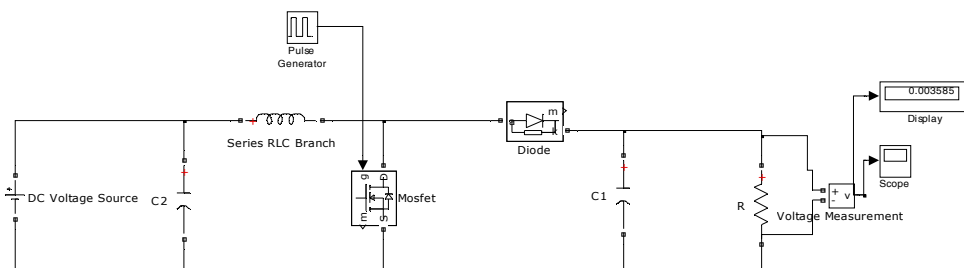


Figure (III.16) : simulation d’un hacheur Boost

III -5 Commande MPPT:

On va simuler la commande de P&O à partir de l’organigramme qui présente dans le chapitre précédent.

La simulation de perturbe et observe présenté sur la figure (III.10) suivante :

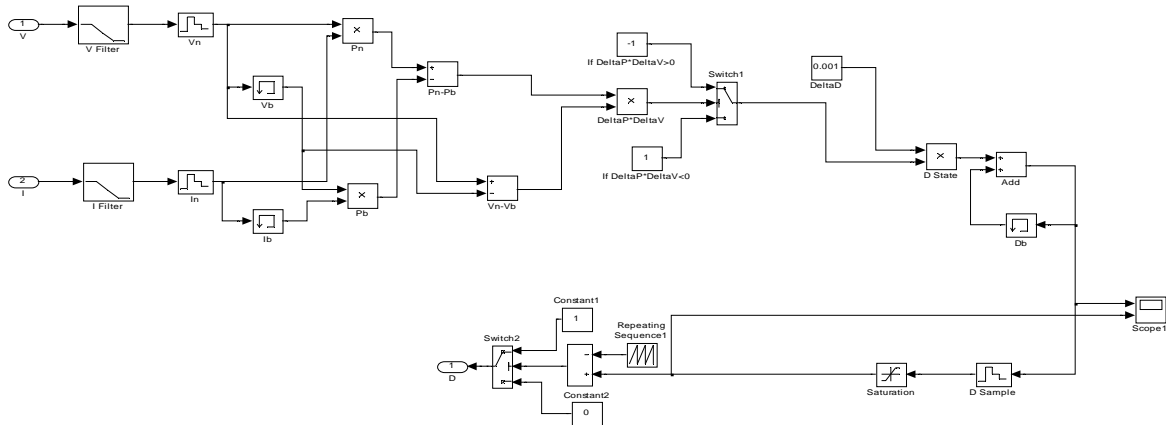


Figure (III.17) : Simulation de block MPPT par P&O

III -6 Hacheur survolteur commander par l’algorithme MPPT P&O : On va alimenter une charge $R=10 \Omega$, et on commande l’hacheur par la méthode de Perturbe & observe, la réalisation de cette configuration présenté sur la figure (III.14) qui implémenté sur Matlab /Simulink.

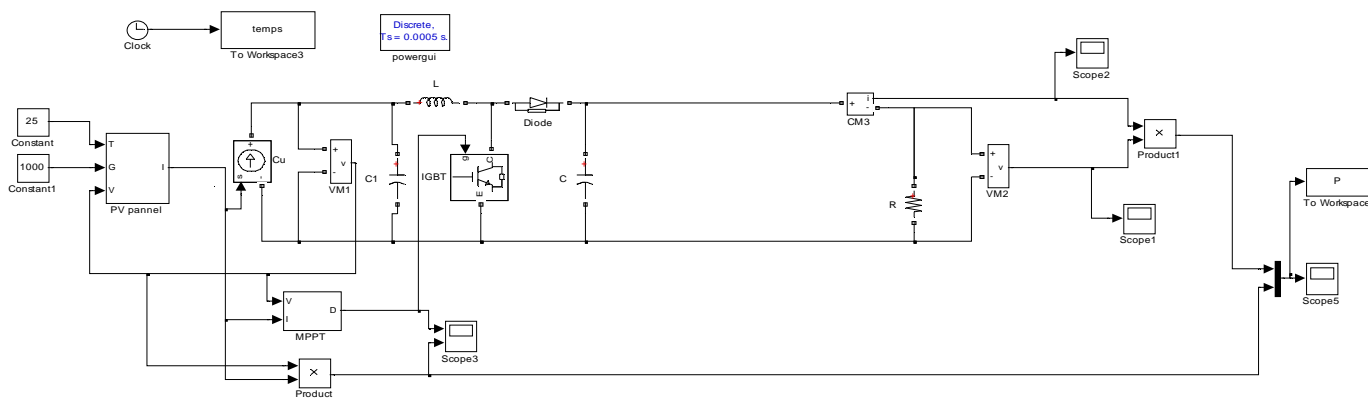


Figure (III.18) Simulation de hacheur boost commandé par MPPT (P&O)

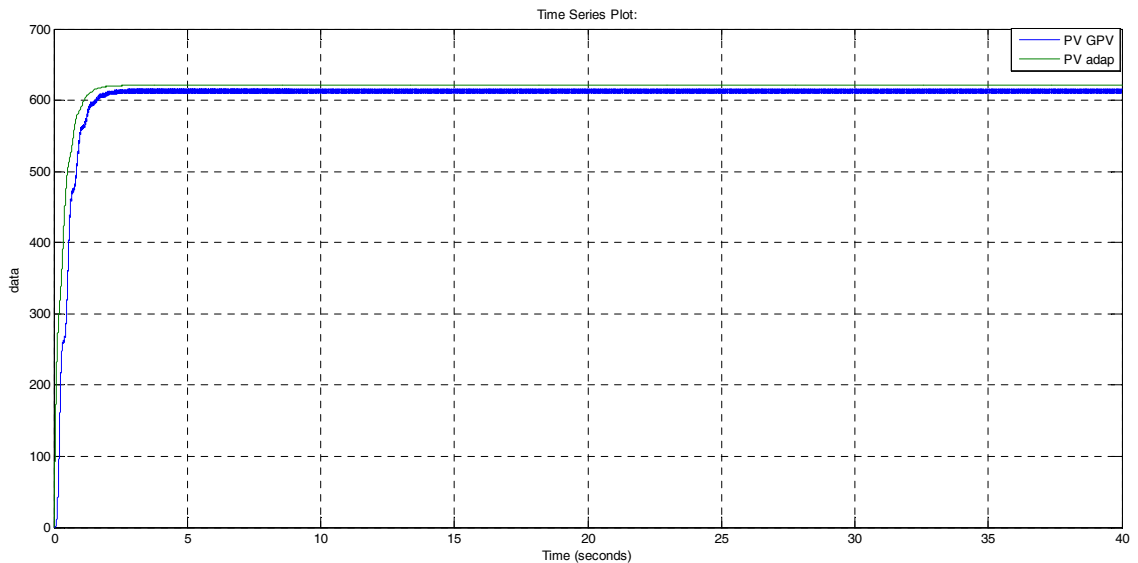


Figure (III.19) signal de puissance a l'entrée et la sortie de hacheur.

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation » sont représentés par les figures (III.16). Cette figure représente la puissance générée par le générateur photovoltaïque, ainsi que la puissance à la sortie du système photovoltaïque. Ces résultats montrent que l'hacheur survolteur et la commande MPPT par la méthode P&O effectuent correctement leurs rôles, Et la commande MPPT adapte le générateur PV à la charge: transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

III -7- Onduleur : On va choisir dans ce travail l'onduleur triphasé commandé par MLI

III -7-1 Commande MLI : La simulation de commande MLI (sinus-triangle) réalisé sous Matlab et présenté sur la figure (III.15)

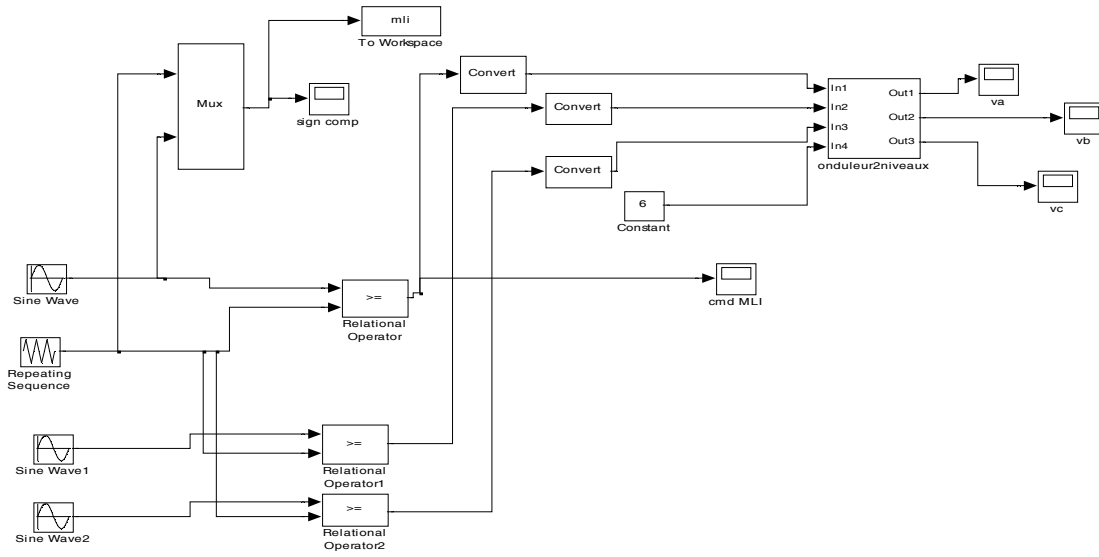
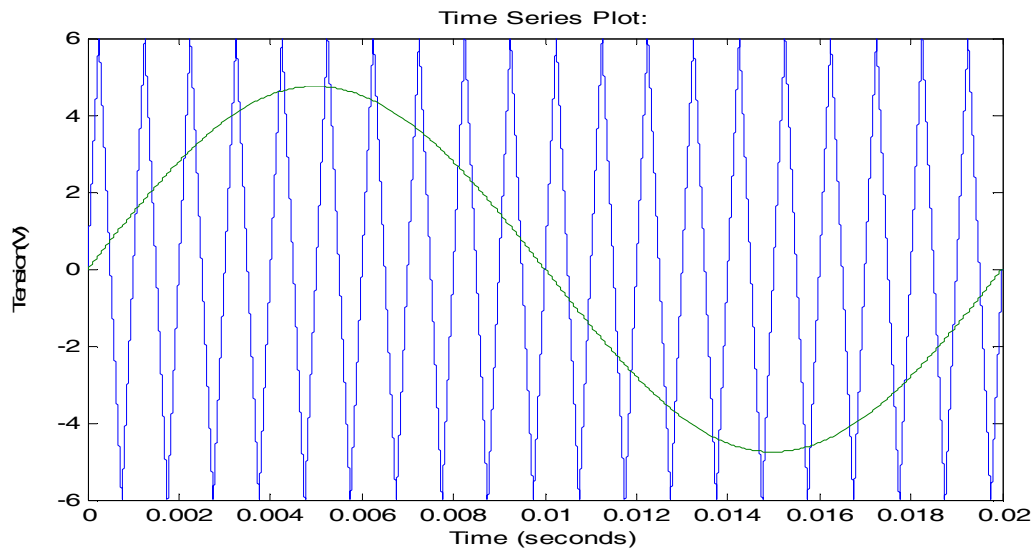


Figure (III.20) : Simulation de l'onduleur triphasé commandé par MLI (sinus-triangle)



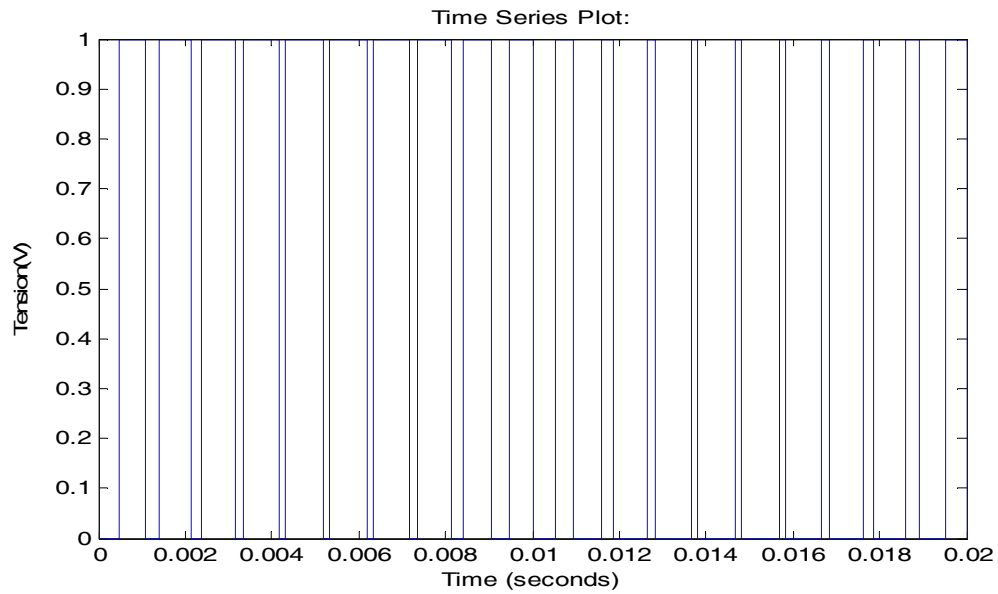


Figure (III.21) signaux de commutation

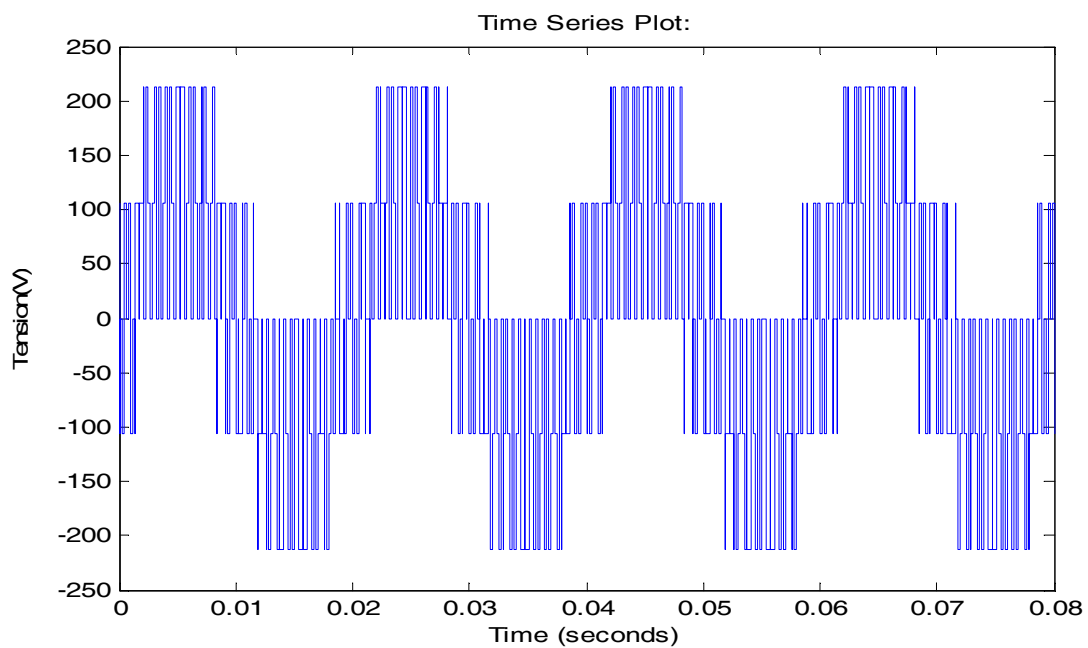


Fig (III.22) signal de tension(Vad) de sortie de l'onduleur

III -8 Système photovoltaïque connecté au réseau :

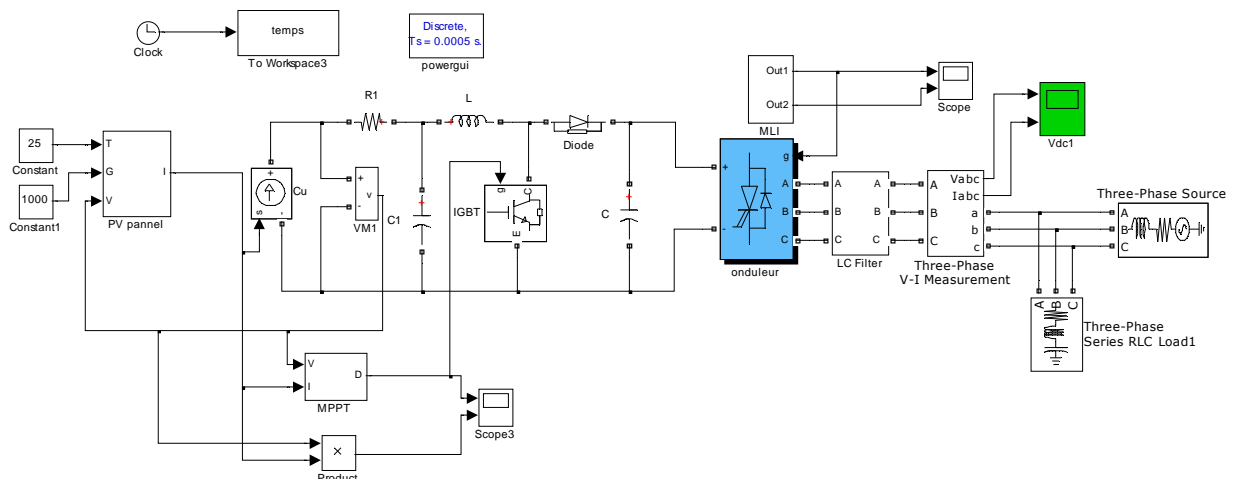
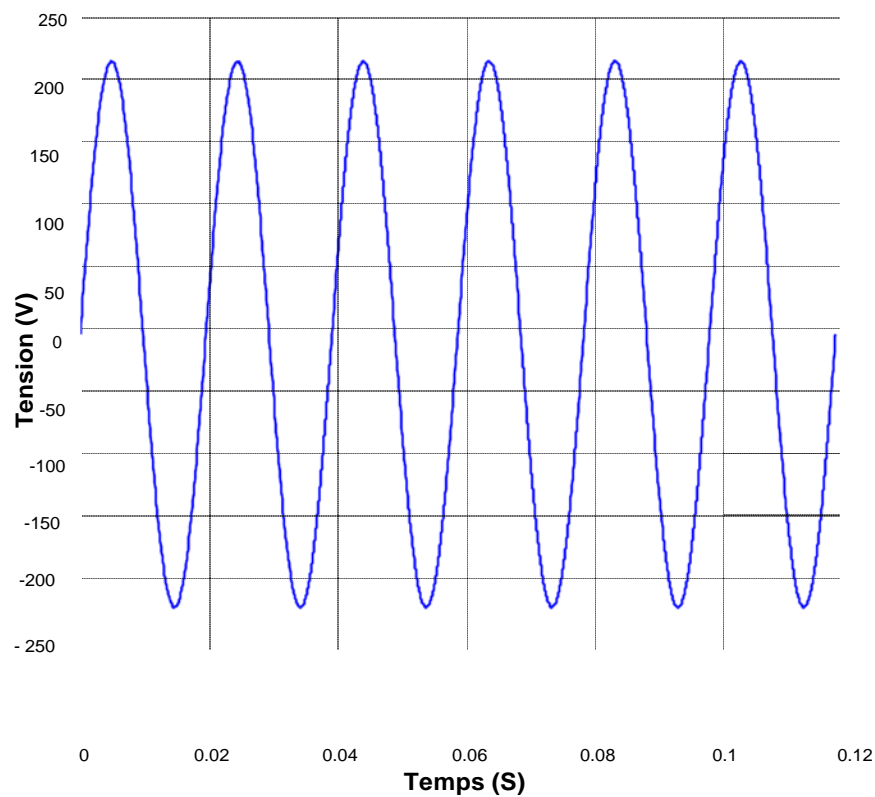


Figure (III.23) schéma de simulation d’un système photovoltaïque connecté au réseau électrique

Le système global n’est pas simulé à cause du manque des paramètres, la Figure (III.24) représente la tension estimée d’une seule phase



Figure(III.24) courbe de tension entre une seule phase de réseau

III-9 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons simulé tous les équipements représentant le système photovoltaïque connecté au réseau électrique, tel que le générateur photovoltaïque, l'hacheur commandé pour la recherche du point de puissance maximale par la méthode P&O et l'onduleur commandé par MLI et en fin le réseau électrique.

Les résultats obtenus de tension et la courbe de point de fonctionnement maximal par la simulation sont très suffisants, et se rapprochent à ceux présentés dans la littérature.

CONCLUSION GENERALE

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

Dans ce cadre nous avons présenté les systèmes d'énergie renouvelable en portant un intérêt particulier au système photovoltaïque connecté au réseau qui est constitué essentiellement d'un générateur photovoltaïque (GPV) et un convertisseur DC-DC Boost, un onduleur commandé par MLI et le réseau électrique, ce système est simulé sous l'environnement Matlab/simulink, on a pris en compte l'influence de variation des conditions climatiques (l'éclairement) sur le MPP où la puissance de fonctionnement du système est maximale.

La commande MPPT soit classique P&O permet la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge et elle force le de faire fonctionner toujours au point de puissance maximale.

Ce travail a été partiellement réalisé au CDER Alger, nous souhaitons d'avoir apporter une contribution à l'étude des caractéristiques photovoltaïques de la cellule solaire, l'étude des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique et la commandes MPPT classique.

Comme perspective à ce travail, il serait intéressant de procéder à l'implémentation matérielle des techniques MPPT simulées, afin de valider les résultats de simulation et confirmer les performances obtenues.

Bibliographie

Bibliographié

[1] : BENSACI Wafa « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT » Thème de Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla 2012.

[2] : M. SLAMA Fateh « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique » Thème de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF.

[3] : Mr. Yassine LASMI « Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes » Thème de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF, 2013.

[4] : Mr.MEFLAH AISSA « Modélisation et commande d'une chaîne de pompage photovoltaïque » Thème de Magister, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEN 2012.

[5] : MECHALIKH M.Nadjib, HAMADA Charaf Eddine « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau » Thème de Magister, Université KASDI MERBAH – OUARGLA 2013.

[6] : Melle NAKOUL Zakia « Optimisation d'une centrale solaire à base d'un générateur pv [Application Aux Sites Tlemcen Et Bouzaréah] » Thème de Magister, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEN 2010.

[7] : Violaine Didier « Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances » Rapport de HESPUL, 2007.

[8] : Bendjamâa Ibrahim « Modélisation et commande d'un système De stockage photovoltaïque » Thème de ABOU-BAKR BELKAID _TLEMCEN 2012.

[9] : Mister R « Généralités sur les réseaux électriques » article sur fr.scribd.com, 2008.

[10] : Bendjamâa Ibrahim « Modélisation et commande d'un système De stockage photovoltaïque » Thème de ABOU-BAKR BELKAID _TLEMCEN 2012.

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

[12] : Z. Ayache, A. Bendaoud, H. Slimani, B. Benazza, H. Miloudi, A. Bentaallah
« Commande MPPT et Contrôle d'un Système Photovoltaïque par la Logique
Floue » Article de Laboratoire IRECOM, Université Djilali Liabès Sidi Bel Abbès.

[13]: Mr BOUZID Allal El Moubarek « Onduleur triphasé commandé par la Stratégie
d'Élimination d'Harmonique « SHE » », Thème de Magister, UNIVERSITE de Oran,
2010.

[14] : BP Solar BP SX150 - 150W Multi-crystalline Photovoltaic Module Datasheet, 2001.

Liste des figures

Liste des figures :

Chapitre I: Description d'un système photovoltaïque

Fig (I.1) Représentation schématique d'une cellule solaire

Fig(I.2) les type de cellules photovoltaïque

Fig (I.3) Module photovoltaïque.

Fig (I.4) Câblage des cellules dans un module

Fig (I.5) Evolution de la caractéristique (I-V) et (P-V) du module en fonction de l'éclairement

Fig (I.6) Evolution de la caractéristique (I-V) (P-V) du module en fonction de la température

Figure (1.7) : Association de N modules solaires en série

Figure (1.8) : Caractéristique de nombre des modules en série

Figure (1.9) : Association de N_p modules solaires en parallèle.

Figure (1.10) : Caractéristique de nombre des modules en parallèles

Fig (I.11) Panneau photovoltaïque.

Fig (I.12) Boite de dérivation.

Fig(I.13) Schéma synoptique d'un système de conversion énergétique

Fig(I.14): Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT

Fig (I.15) Exemple de la structure d'un système PV autonome.

Fig(I.16) Exemple de la structure d'un système PV connecté au réseau

Fig (I.17) Schéma synoptique d'un système photovoltaïque

Fig (I.18) Plusieurs modules PV en série à un seul onduleur.

Fig(I.19) bus à basse tension alternative

Fig (I.20) Convertisseur de type forward alimentant le bus continu

Fig (I.21) Structure avec convertisseur de type fly-back.

Fig (I.22) Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé.

Fig (I.23) Onduleur central (Central-plant inverter)

Fig (I.24) Hacheur (Multiple-string DC-DC) et l'onduleur.

Fig (I.25) Onduleur Multiple-string.

Fig (I.26) Onduleur modulaire (Module-integrated inverter).

Chapitre II : Modélisation et commande de système PV

Fig (II.1) Cellule solaire idéale

Fig (II.2) Schéma électrique équivalent d'une cellule PV

- Fig (II.3) La caractéristique (I-V)
- Fig (II.4) Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage
- Fig(II.5) périodes fermeture et ouverture d'un commutateur
- Fig (II.6) Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur
- Fig (II.7) Schéma de principe d'un convertisseur survolteur
- Fig(II.8) Schémas équivalents du hacheur survolteur
- Fig (II.9) Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT
- Fig (II.10) Caractéristique de la puissance du générateur PV
- Fig (II.11) Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O)
- Fig (II.12) Circuit électrique équivalent de l'onduleur de tension
- Fig (II.13) Schéma du circuit monophasé d'un onduleur de tension
- Fig (I.14) Schéma du signal de commande à MLI et la tension de sortie d'un onduleur monophasé
- Fig (II.15) Schéma de l'interface de connexion d'un onduleur au réseau électrique alternatif ou à une charge
- Fig (II.16) Schéma du filtre LC et la charge RL

Chapitre III : Simulation et interprétation des résultats

- Fig (III.1) Schéma synoptique d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique
- Fig (III.2) Module photovoltaïque sous MATLAB
- Fig (III.3) Caractéristique (V-I) du module PV
- Fig (III.4) Caractéristique (V-P) d'un module PV
- Fig (III.5) Module photovoltaïque sous MATLAB
- Fig (III.6) Caractéristique (V-I) de 4 modules BP SX150s en série
- Fig (III.7) Caractéristique (V-P) de 4 modules BP SX150s en série
- Fig (III.8) Influence de variation de l'éclairement sur la caractéristique (I-V)
- Fig (III.9) Influence de variation de l'éclairement sur la caractéristique (P-V)
- Fig (III.10) Influence de variation de température sur la caractéristique (I-V)
- Fig (III.11) Influence de variation de température sur la caractéristique (P-V)
- Fig (III.12) Influence de la résistance série sur la caractéristique (I-V)
- Fig (III.13) Influence de la résistance série sur la caractéristique (P-V)
- Fig (III.14) Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique (I-V)
- Fig (III.15) Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique (P-V)

Fig (III.16) Simulation d'un hacheur boost.

Fig (III.17) Simulation de block MPPT par P&O

Fig (III.18) Simulation de hacheur boost commandé par MPPT (P&O)

Fig (III.19) Signal de puissance a l'entrée et la sortie de hacheur.

Fig (III.20) Simulation de l'onduleur triphasé commandé par MLI (sinus-triangle)

Fig (III.21) Signaux de commutation

Fig (III.22) Signal de tension(V_{ad}) de sortie de l'onduleur

Fig (III.23) Schéma de simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique

Fig (III.24) Courbe de tension entre une seul phase de réseau

Liste des abréviations

Liste des abréviations

I_{op} Courant optimum (A)

V_{op} Tension optimum (V)

P_m Puissance maximal (W)

I_D Courant de diode (A)

I_{Ph} Photo-courant, dépendant de l'intensité de l'irradiation (A)

I_P Le courant dérivé par la résistance parallèle (A)

I_0 Courant de saturation de diode, dépendant de la température (A)

I_{cc} Le courant de court-circuit de référence (A)

V_{co} La tension de circuit ouvert. (V)

V_T La tension thermique. (V)

I_{ccr} Courant de court-circuit de référence. (A)

R_P Résistance en parallèle. (Ω)

R_s Résistance en série (Ω)

G : L'irradiation solaire (W / m²)

q : Charge d'électron $q= 1.602.10^{-9} \text{ c (C)}$

k Constante de Boltzmann $k=1.381.10^{-23} \text{ J/K (J / K)}$

n Facture de non idéalité de la jonction

T La température effective de la cellule en kelvin (K)

D Est appelé rapport cyclique, et compris entre 0 et 1

PV Photovoltaïque

GPV Générateur Photovoltaïque

FF Facteur de forme

MPPT Maximum Power Point Tracking

P&O Perturbation et Observation

DC Courant Continu

AC Courant Alternatif

TABLES DES MATIERES

Table des matières :

Introduction général

Chapitre I : description d'un système photovoltaïque

I-1 Introduction	3
I- 2 Rayonnement solaire.....	3
I-3 L'effet photovoltaïque.....	4
I-4 Générateur photovoltaïque.....	4
I-4-1 la cellule photovoltaïque.....	4
I-4-2 Le module photovoltaïque.....	6
I-4-3 Caractéristiques d'un module.....	8
I-4-4 Facteurs limitatifs du rendement.....	8
I-4-4-1 Influence de l'éclairement.....	8
I-4-4-2Influence de la température.....	9
I-4-4-3 Influence de la résistance série R_S	10
I-4-4-4 Influence de la résistance parallèle R_P	10
I-4-4-4-1 Influence de l'association série des cellules PV	10
I-4-4-4-2 Influence de l'association parallèle des cellules PV	11
I-4-5 Le panneau solaire.....	12
I-5 Système de conversion.....	13
I-6Les differentstype de convertisseurs.....	13
1-6-1 Le convertisseur continu-continu (DC-DC)	14
1-6-2 Le convertisseur continu-alternatif (DC-AC)	15
I-6-2-1 Commande de l'onduleur.....	15
a- Commande par hystérésis.....	16
b- Commande MLI.....	16
I-6-4Réseau électrique.....	16
I-6-5 Classification des Centrales photovoltaïques connectés Classifications Réseau.	17

Centrales de petite taille ($P_w = 1 \text{ à } 10 \text{ KW}$)	17
Centrales de taille moyenne ($P_w = 10 \text{ à } 100 \text{ KW}$)	17
Centrales de grande taille ($P_w \geq 500 \text{ KW}$)	17
I-7 Systèmes photovoltaïques.....	17
a- Les systèmes autonomes.....	17
b- Les systèmes raccordés au réseau électrique.....	18
I-7-1 Structure générale d'un système photovoltaïque.....	29
I-7-1-1 Systèmes PV connecté directement au réseau.....	20
a) Structure à convertisseur unique.....	20
b) Structure avec bus à basse tension alternatif.....	21
I-7-1-2 Système à bus continu intermédiaire.....	21
a) Structure avec convertisseur forward	21
b) Structure avec convertisseur de type fly-back	22
c) Structure avec hacheur et onduleur	23
I-7-2 Configuration des Systèmes PV	24
I-7-2-1 Onduleur central (Central-plant inverter).....	24
I-7-2-2 Hacheur (Multiple-string DC–DC) avec un onduleur	24
I-7-2-3 Onduleur Multiple-string	25
I-7-2-4 Onduleur modulaire (Module-integrated inverter)	26
I-7-3 Problème de connexion des systèmes photovoltaïques au réseau.....	26
I-7-4 Avantages et inconvénients des systèmes connectés au réseau.....	26
a) Avantages.....	26
b) Inconvénients.....	27
I-8 Conclusion	27
 Chapitre II : Modélisation et commande de système PV	
II-1 Introduction	28
II-2 modalisation d'un module photovoltaïque.....	28
II-2-1 la modélisation d'une cellule solaire	28
a- Cas idéal	28
b- Cas réel.....	29
II-2-2 Caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule solaire.....	30
II-3 Les convertisseurs.....	31
II-3-1 Le convertisseur continu-continu (DC-DC)	32

a-Hacheur dévolteur	33
b- Hacheur survolteur	34
II-3-2 Commande MPPT d'un convertisseur DC/DC	35
II-3-2-1Principe de la commande MPPT.....	35
II-4 Modalisation de l'interface réseau.....	40
II-5Modalisation d'onduleur et du filtre Lc et la charge Rc-Lc	42
II-6 Conclusion	44

Chapitre III : Simulation et interprétation des résultats

III-1 Introduction	45
III-2 Système photovoltaïque connecté au réseau électrique proposé	45
III-2-1 Générateur photovoltaïque	46
III-2-2 Convertisseur DC-DC	46
III-2-3Convertisseur DC-AC	46
III-2-4Filtre LC	46
III-2-5 La charge	47
III-2-6 Le réseau électrique.....	47
III-3 Générateur photovoltaïque	47
III-3-1 caractéristiques de panneau BP SX150s.....	48
III-3-1-2 caractéristiques de 4 modules BP SX150s en série.....	49
III-3-2 Simulation du générateur (GPV) à éclairement et température, résistance variable.....	50
A- l'influence de l'éclairement.....	51
B- l'influence de température.....	52
C- 1 Influence de la résistance série RS.....	53
C -2 Influence de la résistance parallèle RP.....	54
III -4 Hacheur survolteur.....	55
III -5 Commande MPPT.....	56
III -6 Hacheur survolteur commandé par l'algorithme MPPT <i>P&O</i>	56
III -7- Onduleur	57
III -7-1 Commande MLI.....	57
III -8-Système photovoltaïque connecté au réseau	60
III -9 Conclusion	61

Conclusion générale	62
Bibliographie	63
Annexe	65

ANNEXE

Annexe :

1-Paramètre de la GPV utilisé:

Caractéristiques électriques	E=1000w/m ² , T=25 c
Puissance maximale de Gpv (P _{max})	600 W
Courant de court-circuit (I _{cc})	4.75 A
Tension de circuit ouvert (V _{oc})	174 V
Courant au point de MPPT (I _m)	4.35 A
Tension au point de MMPT (V _m)	138 V
Nombre de modules en série (Ns)	4

2-Paramètre de l'hacheur utilisé:

Condensateur 1	330 μF
Condensateur 2	1100 μF
résistance série	0.0001 Ω
Inductance	30e-2 H

3- Paramètre de commande MLI:

Signale sinusoïdale	
Amplitude (V)	5
Fréquence (rad/s)	5*2*pi
Signale triangulaire	
Amplitude (V)	6
Fréquence (rad/s)	2*2000*pi

