REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITEYAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de Technologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Automatique
Spécialité : Automatique et systèmes

Intégration d'un système photovoltaïque au réseau électrique en utilisant des différentes techniques de commande des convertisseurs DC/DC

Présenté par
Mr. CHEBOUTI Abdelmoumen
Mr. GUERRAB Sidali

Proposé et Dirigé par
Dr. MORSLI Abdelkader
Mr .MOUALDIA ABDELHAFIDH

Promotion 2019

ملخص

هذا العمل يتضمن دراسة على الأنظمة الكهروضوئية المتصلة بشبكات توزيع الطاقة الكهربائية. قمنا بدراسة عامة على الأنظمة الفولطية الكهروضوئية و مبدأ تشغيلها عند أقصى قدر ممكن من الاستطاعة باستخدام خوارزمية **MPPT(** نقطة الاستطاعة القصوى للتوليد الكهربائي(، و ذلك باستخدام مقطع الجهد وزيادة التوصيلية والمنطق الضبابي. قمنا بوصل النظام مع شبكة توزيع الضغط المنخفض و ذلك باستخدام عاكس ثلاثي الطور يتم التحكم فيه بتقنية تعديل عرض النبضة **MLI .**قمنا بمحاكاة رقمية ببرنامج الماتالب من أجل فحص النظام الكهروضوئي في حال وصله بالشبكة الكهربائية.

كلمات مفتاحيه: فلوطية كهروضوئية، مقطع، خوارزمية تقصى الاستطاعة القصوى، عاكس، تحكم، تعديل عرض النبضة.

Résumé

Ce travail présente une étude sur les systèmes photovoltaïques (PV) raccordés au réseau de distribution d'énergie électrique. Nous avons effectué une étude générale du générateur photovoltaïque et de son fonctionnement à sa puissance maximale en utilisant un hacheur survolteur commandé par un algorithme MPPT de type Perturber & Observer (P&O) et Incrémentation du conductrance et Logique Flou. Le raccordement du système avec un réseau basse tension BT se fait à l'aide d'un onduleur triphasé commandé par la technique MLI. Des travaux de simulation sous Matlab/Simulink ont été faits pour examiner le fonctionnement du système PV connecté au réseau électrique. **Mots clés :** Photovoltaïque, Hacheur, MPPT, P&O, commande MLI .

Abstract

This work presents a study on the photovoltaic (PV) connected to the distribution of electrical power network. We conducted a general survey of the photovoltaic generator and its operation at maximum power using a boost chopper controlled by an MPPT algorithm P&O Incrementation of Conductivity and Fuzzy Logique . Connecting the system with a low voltage network is done using a three-phase inverter controlled by the PWM technique. Simulation work using Matlab / Simulink has been made to review the operation of the PV system connected to the Electrical network.

Key words: Photovoltaic, chopper, MPPT, Inverter, PWM control.P&O.Fuzzy Logique

Dédicace

Je remercie Dieu le tout puissant qui m'a permet
d'entreprendre mes études
Et les achevés dans la sérénité et de
M'avoir donné le courage pour accomplir
Ce modeste travail que je dédie :
A mes parents ; qui je dis, quoique je
Fasse je ne pourrai estimer vos valeur
Celle qui ma ouvert les yeux sur ce monde, pour
Son affection, son soutien indéfectible, celle qui a
Souffert et qui souffre toujours pour me donner le
Souffle de la continuité * chère maman *
Et celui qui m'a inspiré le sens du sacrifice et de
Patience ; notre exemple, vous êtes toujours le père,
l'enseignant, le
Maitre, qui m'a appris l'alphabet de la vertu et qui a
sens cesse
A ceux qui m'on partage l'existence pour le meilleur et
pour le pire ;
A tous mes amis

GUERRAB SIDALI

Dédicace

Je dédie ce mémoire, aux personnes qui me sont les plus chères :

A mes parents qui m'ont énormément soutenu dans les moments

les plus difficiles, partagé mes joies et mes peines, qui se sont

toujours sacrifiés à mes dépends.

Yasmine et zaki et sami

A mes frères et à mes sœurs

A toute ma famille.

A mes amis et collègues.

MOUMEN

Remerciement

Nous remercions avant tous le Bon Dieu qu'il nous a aidé pour réaliser ce modeste travail.

Nous remercions notre encadreur Mr.Morsli abdelkader pour les effets et le temps qu'il nous a consacré, il nous a beaucoup aidés par ses conseils, son expérience et ses encouragements, nous lui sommes très reconnaissants.

Notre reconnaissance va également à nos enseignants pour leur honorable tache durant notre période d'études.

Merci, à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour accomplir ce travail.

Table des matières

Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque

Généralités sur le système photovoltaïque ..... - 2 -

I.1. Introduction ..... - 3 -

I. 2. Gisement solaire ..... - 3 -

I.3.1. Définition ..... - 4 -

I.3.2. Types d'un système solaire photovoltaïque ..... - 4 -

I.3.2.1. Système autonome ..... - 4 -

I.3.2.2. Système autonome sans batterie ..... - 4 -

I.3.2.3. Système autonome avec batterie ..... - 5 -

I.3.2.4. Système hybride ..... - 5 -

I.3.2.5. Système raccordé au réseau électrique ..... - 6 -

A. Injection de la totalité de la production ..... *- 6-*

B. Injection du surplus de production ..... *-7-*

I.3.3. Les éléments de captages d'un système PV raccordé au réseau électrique ..... - 7 -

I.4. La cellule photovoltaïque ..... - 7 -

I.4.1. Définition ..... - 7 -

I.4.2. Les types des cellules PV ..... - 8 -

I.4.2.1. Cellule au silicium mono-cristallin ..... - 8 -

I.4.2.2. Cellule au silicium poly-cristallin ..... - 8 -

I.4.2.3 Cellule au silicium amorphe ..... - 8 -

I .4.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque ..... - 9 -

I.4.4. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque ..... - 10 -

I.4.4.1. Tension de circuit ouvert V_{co} ..... - 10 -

I.4.4.2. Courant de court-circuit I_{cc} ..... - 10 -

I.4.4.3. Puissance ..... - 11 -

I.4.4.4. Le rendement ..... - 11 -

I .5. Modules photovoltaïques ..... - 11 -

I.5.1. Définition ..... - 11 -

I.6. Les batteries ..... - 12 -

I.6.1. Introduction ..... - 12 -

I.6.2. Batteries plomb-acide pour installations solaires photovoltaïques ..... - 13 -
I.6.2.1. Batteries ouvertes..... - 13 -
I.6.2.2. Batteries à recombinaison..... - 15 -
I.6.2.3. Types de batteries solaires photovoltaïques ..... - 15 -
I.7. Convertisseurs DC/DC ..... - 16 -
I.7.1. Hacheur dévolteur (Buck) ..... - 17 -
I.7.2. Composition du convertisseur..... - 17 -
I.7.2.1. Le transistor MOSFET ..... - 17 -
I.7.2.2. Le condensateur..... - 18 -
I.7.2.3. L'inductance ..... - 18 -
I.7.3. Hacheur survolteur (Boost) ..... - 19 -
I.7.4. Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)..... - 19 -
I.8. Convertisseurs DC/AC (Les onduleurs) ..... - 20 -
I.8.1. Domaine d'utilisation des onduleurs..... - 21 -
I.8.2. Classification..... - 21 -
I.8.2.1. Onduleurs non autonomes ..... - 22 -
I.8.2.2. Onduleurs autonomes ..... - 22 -
I.8.3. Réalisation de l'onduleur..... - 22 -
I.8.4. Interrupteurs bidirectionnels..... - 23 -
I. 9. Connexion et emplacement de l'onduleur photovoltaïque..... - 23 -
I. 9.1. Connexion ..... - 23 -
I. 9.1.1. Installation mono-onduleur (onduleur central)..... - 24 -
I. 9.1.2. Installation avec un onduleur pour chaque string (onduleurs strings)..... - 24 -
I. 9.1.3. Installation multi-onduleurs (Onduleurs modulaires)..... - 24 -
I. 9.2. Emplacement de l'onduleur photovoltaïque..... - 25 -
I.10. Caractéristiques propres d'un onduleur pour systèmes photovoltaïques ..... - 26 -

Chapitre II : Modélisation de système photovoltaïque

II.1. Introduction..... - 28 -
II. 1.1 Définition d'un système PV ..... - 28 -
II.1.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque ..... - 28 -
II.1.2.1 Cas d'une cellule idéale..... - 28 -
II.1.2.1 Cas d'une cellule réelle ..... - 29 -
II.1.2.2 Modèle d'une cellule photovoltaïque avec deux diodes..... - 31 -
II.2 Modèle d'un module photovoltaïque..... - 32 -

II.2.1. Introduction ..... - 32 -
II.3 Modélisation d'une batterie ..... - 33 -
II.4. Modélisation d'un Convertisseurs DC/DC ..... - 35 -
II.4.1. Hacheur parallèle (Boost) ..... - 37 -
II.4.1.1. Modèle mathématique équivalent ..... - 37 -
II.4.1.2. Modèle moyen du hacheur Boost ..... - 38 -
II.4.1.3. Les ondulations des courants et tensions ..... - 39 -
II.4.1.4. Étude du régime continu ..... - 39 -
II.4.1.5. Rapport de conversion et rendement ..... - 39 -
II.5. Le convertisseur DC-AC (l'onduleur) ..... - 41 -
II.5.1. Modélisation de l'onduleur triphasé ..... - 41 -
II.5.2 Commande de l'onduleur (Commande MLI) ..... - 42 -
II.6. Conclusion ..... - 43 -
CHAPITRE III : La commande MPPT
III.1 Introduction ..... - 44 -
III.2 Le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque ..... - 44 -
III.2.1 Principe du MPPT **..... - 44 -**
III.2.2 Chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque avec MPPT **..... - 45 -**
III.3 Classification des commandes MPPT ..... - 45 -
III.3.1 Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du convertisseur statique.... - ……46 -
III.3.2 Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur statique ..... - 45 -
III.4 Critères de Qualité d'une Commande MPPT ..... - 46 -
III.5 Rendements de la chaîne de Puissance ..... - 47 -
III.6 Les Algorithmes MPPT ..... - 47 -
III.7 Les techniques de MPPT ..... - 48 -
III.7.1 Commande perturber et observer (P&O) ..... - 48 -
III.7.1.1 Principe de la commandes « perturbation et observation » (P&O) ..... - 50 -
III.7.1.2 Commande a incrémentation de la conductance (Inc cond) ..... - 51 -
III.7.2 MPPT en logique floue, présentation du système ..... - 53 -
III.7.2.1 Principe de la logique floue ..... - 53 -
III.7.2.2 Description du régulateur floue ..... - 55 -
III.7.3 Autres méthodes ..... - 57 -

III.8 Conclusion ..... - 57 -

CHAPITRE IV

Aucune entrée de table des matières n'a été trouvée.

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1 : Exemple d'un système PV autonome sans batterie. - 5 -
Figure I.2 : Exemple d'un système PV autonome avec batterie. - 5 -
Figure I.3 : Exemple d'un système PV hybride. - 6 -
Figure 1.5 : Injection du surplus de production. - 7 -
Figure 1.6 : Cellule au Silicium Monocristallin. - 8 -
Figure 1.7 : Cellule au Silicium Poly-cristallin. - 8 -
Figure 1.8 : Cellule au Silicium amorphe (couche mince). - 9 -
Figure I.9 : Constitution d'une cellule photovoltaïque (d'après source CEA). - 10 -
Figure I.10 : Caractéristique puissance - tension & courant- tension de la cellule PV. - 11 -
Figure I.11 : Représentation d'un modèle photovoltaïque. - 12 -
Figure I.12: Batterie stationnaire. (Plate-forme de distribution HAWKER Enersys). - 14 -
Figure I. 13 : Batteries Plombs à recombinaison. - 15 -
Figure I.14: Batterie stationnaire à plaques tubulaires - 16 -
Figure I.15 : Batterie monobloc. - 16 -
Figure I.16 : Convertisseur dévolteur réel. - 17 -
Figure I.17 : Représentation symbolique et notation pour le MOSFET à canal N - 18 -
Figure I.18: Structure d'une cellule de MOSFET de faible puissance. - 18 -
Figure I.19 : Inductance simple. - 19 -
Figure I.20 : Convertisseur survolteur réel. - 19 -
Figure I.21 : Convertisseur dévolteur-survolteur réel. - 20 -
Figure I.22: Convertisseur Continu - Alternatif (DC/AC). - 20 -
Figure I.23: Photos d'onduleurs commercialisés. - 21 -
Figure I.24 : Bloc d'interrupteurs bidirectionnel. - 23 -
Figure I.25:Différentes topologies des installations PVconnectés aux réseaux électriques……..…..-24 -
Figure I.26 : Courbes des caractéristiques d'un module photovoltaïque. - 26 -

Chapitre II :

Figure II.1 : Schéma équivalent d'une cellule idéale. **- 29 -**
Figure II.2 : Schéma équivalent d'une cellule réelle. **- 29 -**
Figure II.3 : Circuit électrique d'une cellule PV réelle à deux diodes. **- 31 -**
Figure II. 4 : Le module PV se compose de NPM branches parallèles, chacun de NSMcellules solaires en série **- 32 -**
Figure II. 5 : Modèle d'un circuit équivalent de batterie plomb-acide [26]. **- 33 -**
Figure II. 6 :Circuits équivalents de Buck S fermer en (a), **- 36 -**
Figure II. 7 : Circuits équivalents de Buck S ouvert en (b) **- 36 -**

Figure II.8 : Circuit électrique du hacheur Boost. **- 37 -**
Figure II.9 : Circuit équivalent de Boost, S fermer (a). **- 37 -**
Figure II.10 : Circuit équivalent de Boost, S ouvert (b). **- 38 -**
Figure II.11 : Rapport de conversion Vo/Vi(D), en fonction de RL/Z. **- 40 -**
Figure II.12 : Le rendement **η** (D) d'un circuit Boost en fonction de RL/Z. **- 40 -**
Figure II.13 : Circuit équivalent d'un Onduleur Triphasé [28]. **- 41 -**
Figure II.14 :La modulation de largeur d'impulsion. **- 43 -**

CHAPITRE III :

Figure III.1 : Etage d'adaptation d'un GPV-charge. **- 43 -**
Figure III.2 : La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM. **- 44 -**
Figure III.3 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT- **44 -**
Figure III.4 : Algorithme de MPPT a base de la méthode P&O. **- 48 -**
Figure III.5 : Schéma de converge vers le PPM par P&O. **- 49 -**
Figure III.6 : Trajectoire par Incrémentation de Conductance. **- 51 -**
Figure III.7 : Organigramme du MPPT incrément de conductance. **- 52 -**
Figure III.8 : Le principe de la commande a logique floue. **- 53 -**
Figure III. 9 : Schéma bloc d'une logique floue. **- 54 -**
Figure III.10: Fonction d'appartenance de chacune des variables linguistiques. **- 55 -**

CHAPITRE IV:

Figure.IV 1: Schéma block Module photovoltaïque avec MATLAB - 60 -
Figure IV.3 . La courbe Ppv=f(Vpv). - 61 -
Figure IV.4. La courbe Ppv=f(t). - 61 -
Figure IV.5.La courbe du Tension(Vpv)=f(t). - 62 -
Figure IV.6.La courbe Ipv=f(t). - 62 -
Figure.IV.7: simulation d'un panneau photovoltaïque avec hacheur survolteur - 62 -
Figure.IV.8:Influence de variation de l'éclairement sur les caractéristiques(Ipv=f(Vpv)…… 25° …….. - 63 -
Figure.IV.9:Influence de variation de l'éclairement sur les caractéristiques(Ppv=f(Vpv) - 64 -
Figure.IV.10: Influence de variation de Température sur les caractéristiques (Ipv=f(Vpv) - 64 -
Figure.IV.11: Influence de variation de Température sur les caractéristiques (Ppv=f(Vpv)- 65 -
Figure IV.12 :Température Constantes. - 65 -
Figure IV.13: Irradiation Constantes. - 65 -

Figure IV.14.La courbe Ipv=f(Vpv). ..... - 66 -
Figure.IV 15: La courbe Ppv=f(Vpv). ..... - 66 -
Figure.IV.17 : courbe de Puissance de charge ..... - 68 -
Figure IV.18.Le rapport cyclique D. ..... - 68 -
Figure IV.19 :Visualisateur des règles. ..... - 68 -
Figure.IV.20 : courbe de tension Vabc de réseau ..... - 69 -
Figure.IV.21: THD de la tension ..... - 69 -
Figure.IV.22: courbe de tension Vabc de réseau ..... - 69 -
Figure.IV.23: THD de la tension ..... - 70 -
Figure.IV.24: courbe de tension Vabc de réseau ..... - 71 -
Figure.IV.25: THD de la tension ..... - 71 -

Liste du Tableaux

Tableau I.1 : Type **de batteries utilisables pour les applications photovoltaïques ..... - 16 -**

Tableau III.1 : Les règles de contrôle FUZZY……..….- 55 -

Nomenclature et Abréviation

PV : Photovoltaïque.

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

P&O : Perturbe & Observe.

DC : Courant Continu (Direct Current).

AC : Courant Alternatif (Alternative Current).

MLI, PWM: Modulation de largeur d'impulsion (Pulse Width Modulation).

BT : Basse tension.

Rs : Résistance série [Ω].

Rsh : Résistance parallèle [Ω].

Vt : Tension thermique [V].

h : La constante de Planck (6,62 10-34 Js-1) .

C : La vitesse de propagation (3. 108 ms-1).

λ : Longueur d'onde [m].

Vco : Tension à circuit ouvert [V].

Icc : Courant de court-circuit [A].

ai: Le coefficient de température du courant du court circuit [A/K].

av : le coefficient de température de la tension en circuit ouvert [V/K].

$Gref$: l'ensoleillement de référence (1000W/$m2$).

G : l'ensoleillement [Watt].

Tref: La température de référence (298 °K).

K **:** la constante de Boltzmann (1.38×10−23).

Ipv **:**Le courant délivré par le module photovoltaïque (A).

Vpv :Tension photovoltaïque (V).

Ppv **:** Puissance photovoltaïque (W).

PV : Photovoltaïque.

PPM : Le point de fonctionnement optimal.

MPPT**:** Maximum Power Point Tracking.

GPV : Générateur photovoltaïque.

Ns :Nombre de cellules en série dans un module photovoltaïque.

Np : Nombre de cellules en série dans un module photovoltaïque.

IGBT **:** Transistor bipolaire à grille isolée.

NG : Grand Négative.

PN : Petite Négative.

PP : Petite Positive.

GP : Grand Positive.

Introduction générale

Les énergies renouvelables se manifestent comme une solution potentielle à la réduction de la pollution. Parmi les moyens de production prometteurs (éolien, hydraulique…), le photovoltaïque (PV) apparaît aujourd'hui comme le plus approprié et le plus abouti à la production d'électricité d'origine renouvelable.

Le système PV raccordé au réseau électrique peut servir à fournir d'importantes quantités d'énergie. Cependant, cela nécessite un énorme investissement qui rend le coût de l'électricité produite très élevé. Hormis ses avantages, l'énergie solaire présente quelques inconvénients, par son intensité variable, son caractère intermittent et son coût. La modélisation et la simulation de systèmes utilisant ses énergies sont donc nécessaire pour pouvoir optimiser le rendement de la production.

Notre objectif dans ce présent travail est l'étude de la connexion au réseau électrique d'un générateur photovoltaïque GPV, réalisé en quatre chapitres et une conclusion générale :

Au premier chapitre, on s'intéresse à la description générale et le principe de fonctionnement des systèmes photovoltaïques PV.

Le second chapitre présente la modélisation du système photovoltaïque raccordé au réseau électrique et ses caractéristiques , une étude préliminaire des convertisseurs DC/DC et DC-AC, leur principe de fonctionnement et les différents types existants. Nous avons aussi présenté leur modèle mathématique ainsi que leur commande..

Le troisième chapitre décrit une étude des différents technique de command MPPT(Maximum Power Point Tracking) :

- P&O(perturbation et observation) ;
- IncCond(L'Incrémentation de la conductance) ;

- La logique floue .

Le quatrième chapitre est consacré à la simulation de la commande d'un système PV de génération d'énergie connecté au réseau électrique via un onduleur à (MLI) d'une part. La technique de commande par (MLI) a été appliquée, l'amplification de la tension du générateur photovoltaïque est assurée par un adaptateur d'impédance (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.

Conclusion Générale

Dans ce travail nous avons fait l'étude des systèmes photovoltaïques qui se compose essentiellement d'un générateur Pv (GPV), convertisseur (DC/DC boost),onduleur (DC/AC) ,la commande (mppt) et une charge.

Dans notre travail nous avons présenté les systèmes photovoltaïques en se basant particulièrement au système photovoltaïque raccordés 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.

On a simulé ce système sous Matlab/simulink, on a pris en compte l'influence de variation des conditions climatiques (l'éclairement) sur le MPPT où la puissance de fonctionnement du système est maximale.

La commande MPPT permet la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge et elle le force de fonctionner toujours au point de puissance maximale[16].

Par ce travail, nous souhaitons d'avoir apporté une contribution à l'étude des caractéristiques photovoltaïques de la cellule solaire, l'étude des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique et la commandes MPPT.

Chapitre (I)

Généralités sur lesystèmephotovoltaïque

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 long temps 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.

Cette énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 10 000 W/m² crête dans les zones tempérées et jusqu'à 14 000 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée [1-3].

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances ainsi le générateur solaire photovoltaïque et leurs performances.

I. 2. Gisement solaire

La source du gisement dont on dispose, on peutrépertorier toutes formes d'énergies en quatre grandes catégories : « les énergies fossiles, lesénergies renouvelables, les énergies nouvelles et les énergies fatales ».les premiers ne sont pasdes énergies renouvelables on à est le pétrole, le gaz naturel, et le charbon, et fossiles nonrenouvelables qui se sont accumulées dans l'écorce terrestre au cours des èresgéologiques, dufait de processus biologiques ou physico-chimiques[3].

Et les énergies Renouvelables ; Comme leur nom l'indique ce sont des sources inépuisablesd'énergies offertes par la nature Elle-même et dont la maitrise garantirait largementl'autonomie de la planète. On y trouve l'énergie solaire, l'énergieéolienne, l'énergiegéothermique, l'énergiemarémotrice, l'énergie de la biomasse.la première source pet trouverleur origine dans les différents flux énergétiques naturels incidents à la surface de la terre, quisont :

- Le rayonnement solaire qui fournit 99,97% de sa densité thermique ;
- La chaleur interne terrestre qui fournit 0,03% de sa densité thermique ;
- Le travail des forces de gravitation.

On trouve qu'il ya des systèmes de captation pour récupérer cette forme d'énergie, et leursapplications de différentes sorts.

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est à l'origine de laquasi-totalité des sources d'énergiesutilisées par l'homme.

Lorsque l'énergie lumineuse (photons) rencontre de la matière, celle-ci transforme unepartie en chaleur. C'est ce qu'on appelle la conversion photo thermique, et c'est sur ceprincipe que sont basés les procédés de capteur plan solaire.

L'énergie solaire pour son utilisation exige un système de captation solaire de deux types :

- Capteur solaire photothermique ;
- Capteur solaire photovoltaïque.

I.3. Le Systèmes photovoltaïque

I.3.1.Définition

Le système photovoltaïque est constitué par une source d'énergie (générateur photovoltaïque), une interface de puissance (les convertisseurs statiques DC-DC et DC-AC avec un système de commande) et une charge. Le rôle principal du convertisseur statique est de faire une adaptation d'impédance de sorte que le générateur délivre le maximum d'énergie [4].

I.3.2.Types d'un système solaire photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques sont actuellement divisés en trois catégories : Autonome, hybride et raccordé au réseau électrique.

I.3.2.1. Système autonome

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans Une zone isolée du réseau électrique. Les systèmes photovoltaïques autonomes sont actuellement divisés en deux types [05].

I.3.2.2. Système autonome sans batterie

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage (exemple: calculatrice), soit que le temps de fonctionnement de la charge n'est pas critique (ex. : pompage photovoltaïque:leRéservoir d'eau sert de stockage).

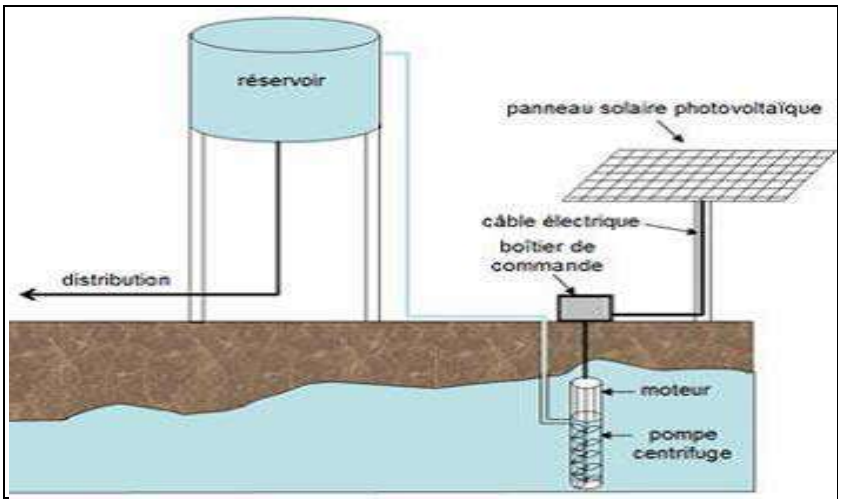


Figure I.1 : Exemple d'un système PV autonome sans batterie.

I.3.2.3.Système autonome avec batterie

C'est le système photovoltaïque le plus commun. Le champ PV sert de chargeur pour la batterie. L'électricité peut alors être utilisée en tout temps. (Ex. l'éclairage d'une maison dans la nuit).

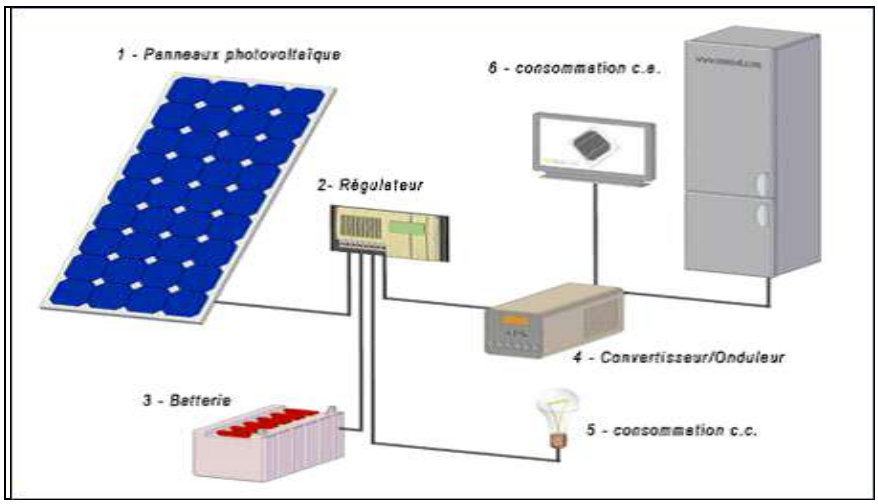


Figure I.2 : Exemple d'un système PV autonome avec batterie.

I.3.2.3.Système hybride

Un système hybride à sources d'énergie renouvelables (SHSER) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable. Ce type de système s'applique particulièrement bien à des sites éloignés où il est important d'avoir de l'électricité à tout moment, où les coûts de transport du carburant sont élevés set où il n'est pas encore rentable d'utiliser le système photovoltaïque seul avec les batteries.

Ils sont souvent utilisés pour de très nombreuses applications d'intérêt sensible et stratégique comme les relais de télécommunication, les postes frontaliers, l'habitat isolé, etc., hors réseau d'électricité conventionnelle [6-7].

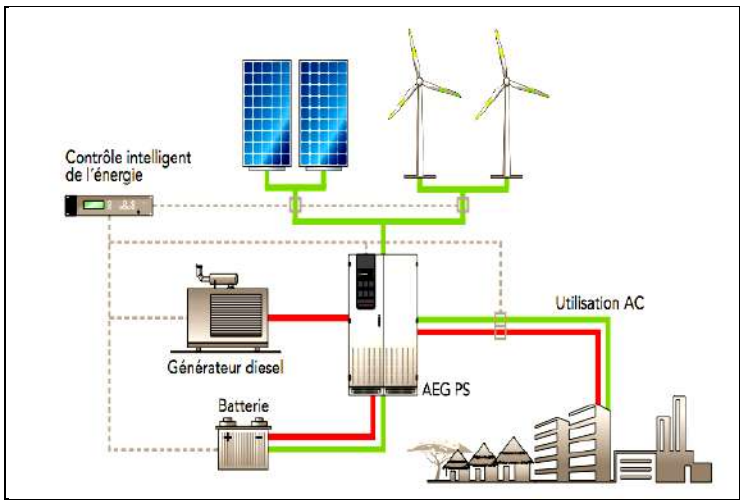


Figure 1.3 : Exemple d'un système PV hybride.

I.3.2.4. Système raccordé au réseau électrique

Le système photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur Courant Continu/Courant Alternatif (DC-AC). Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même. (Figure **I**.4) montre les deux types d'installations existantes pour l'injection de la production solaire[8]:

A. Injection de la totalité de la production

L'énergie produite par les modules est directement injectée sur le réseau électrique. Les périodes d'injections sur le réseau correspondent aux périodes de production photovoltaïque.

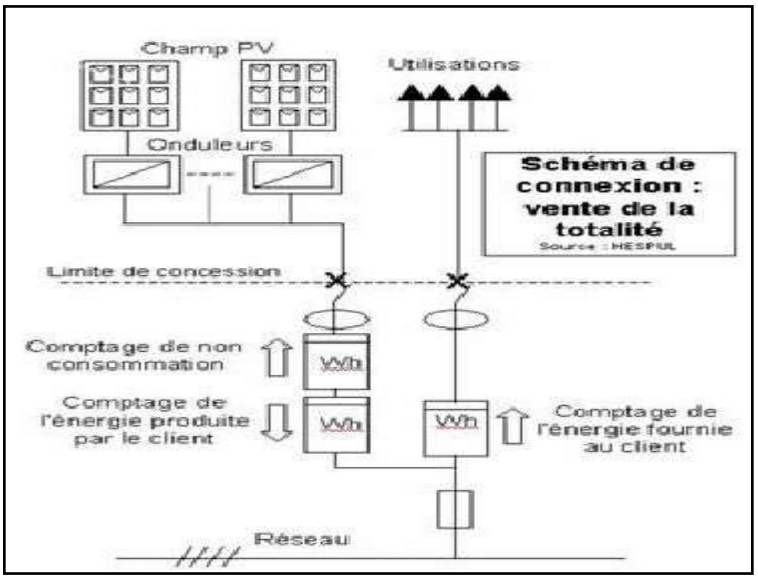


Figure I.4 : Injection de la totalité de la production.

B. Injection du surplus de production

L'énergie produite par les modules est directement consommée sur place par les charges. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation instantanée est injecté sur le réseau.

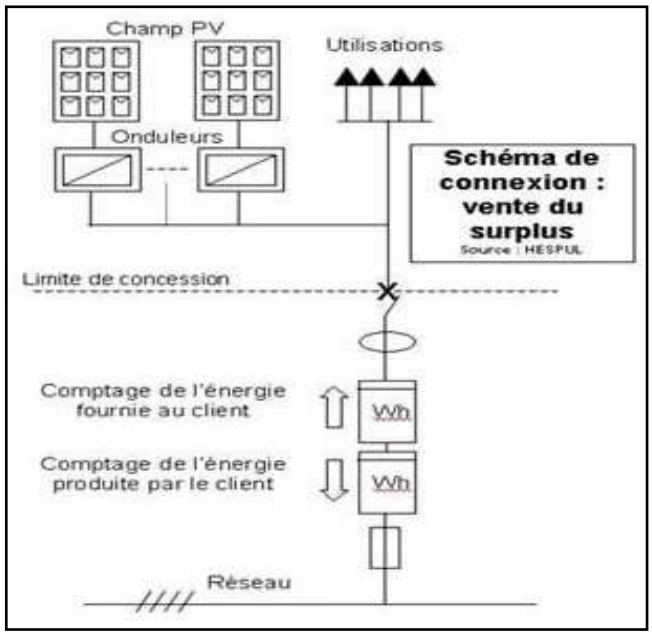


Figure 1.5 : Injection du surplus de production.

I.3.3.Les éléments de captages d'un système PV raccordé au réseau électrique

L'élément de base d'un système PV est la cellule PV. La puissance disponible aux bornes d'une cellule est très faible. Il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle de telles cellules pour obtenir des modules de puissance compatible avec le matériel usuel. Les modules sont ensuite connectés en série pour former une chaine. Enfin, les chaines sont connectées en parallèle pour former un générateur photovoltaïque.

I.4. La cellule photovoltaïque

I.4.1.Définition

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », a été découverte par E. Becquerel en 1839 [9]. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homo-jonction) ou entre deux matériaux

différents (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne.

I.4.2.Les types des cellules PV

Il existe trois grands types des cellules en silicium : mono cristallin, poly cristallin et amorphe[10].

I.4.2.1. Cellule au silicium mono-cristallin

Pour ce genre d'applications technologiques, le silicium pur est obtenu à partir de la silice de quartz ou de sable par transformation chimique métallurgique. Le silicium a un rendement électrique et une durée de vie de l'ordre de deux fois celle du silicium amorphe, mais il est nettement plus cher (figure (I.6)).

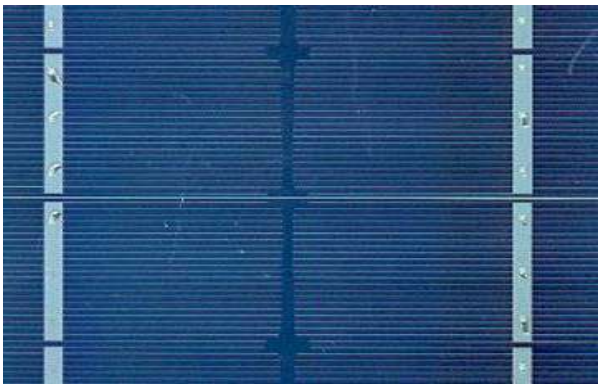


Figure 1.6 : Cellule au Silicium Monocristallin.

I.4.2.2.Cellule au silicium poly-cristallin

Le silicium poly-cristallin montré sur la figure (I.7) est un matériau composé de cristaux juxtaposés obtenus par moulage. Ce matériau est moins coûteux (que le mono-cristallin). Les cellules carrées ou rectangulaires sont faciles à utiliser.

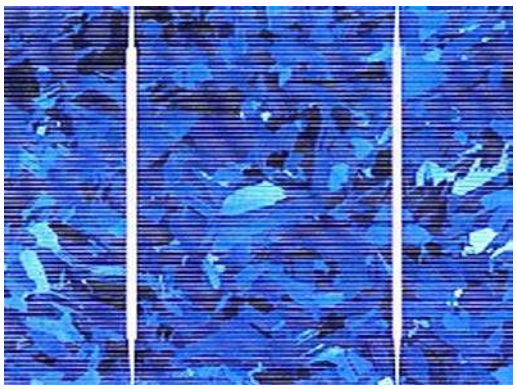


Figure 1.7 : Cellule au Silicium Poly-cristallin.

I.4.2.3Cellule au silicium amorphe

Le silicium absorbe le rayonnement solaire jusqu'à 100 fois mieux qu'en état cristallin; les cellules sont constituées par des couches très minces (figure (I.8)).

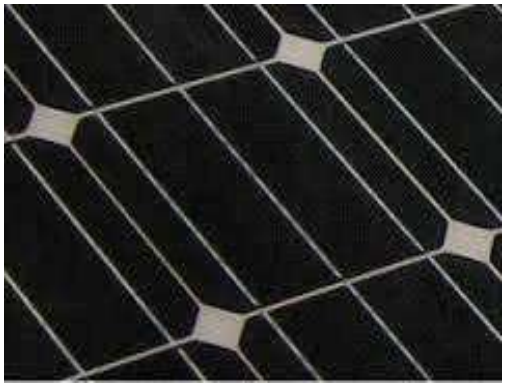


Figure 1.8 : Celluleau Silicium amorphe (couche mince).

I .4.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques exploitent l'effet photoélectrique pour produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire. Cet effet permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques. Le matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit d'électrons. Ces deux parties sont respectivement dites « dopées » de type n et de type p. Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau.

Un atome de silicium compte 4 électrons périphériques. L'une des couches de la cellule est dopée avec des atomes de phosphore qui, eux, comptent 5 électrons (soit 1 de plus que le silicium). On parle de dopage de type n comme négatif, car les électrons (de charge négative) sont excédentaires. L'autre couche est dopée avec des atomes de bore qui ont 3 électrons (1 de moins que le silicium). On parle de dopage de type p comme positif en raison du déficit d'électrons ainsi créé. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

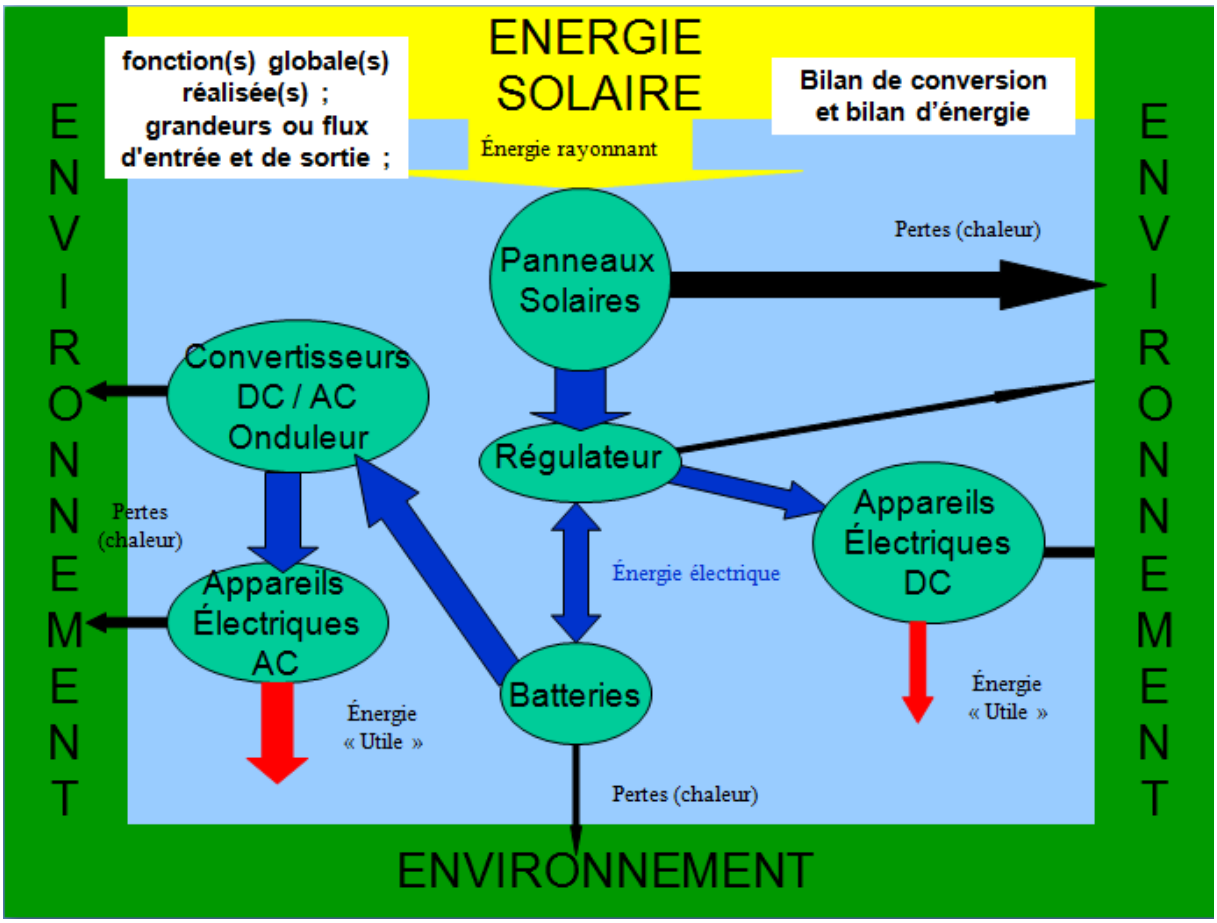


Figure I.9 : Constitution d'une cellule photovoltaïque (d'après source CEA).

En traversant la cellule photovoltaïque, les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium des deux couches n et p. Les électrons libérés se déplacent alors dans toutes les directions. Après avoir quitté la couche p, les électrons empruntent ensuite un circuit pour retourner à la couche n. Ce déplacement d'électrons n'est autre que de l'électricité.

I.4.4. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

I.4.4.1.Tension de circuit ouvert V_{co}

Si on place une cellule sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur à ses bornes, celle-ci va produire une tension continue d'environ 0,6 V, appelée tension en circuit ouvert V_{co} (elle varie légèrement avec l'éclairement). Cette valeur correspond à la tension de coupure d'une diode, ce qui confirme le fait qu'on puisse assimiler une cellule solaire à une jonction P-N. Pour obtenir une tension plus élevée à la sortie du module, il va falloir associer les cellules en série[11].

I.4.4.2.Courant de court-circuit I_{cc}

A l'inverse du cas précédent, si l'on place une cellule en court-circuit, elle va débiter un courant maximal à tension nulle. Ce courant est dit courant de court-circuit I_{cc}. De même que pour la tension, il faudra associer les cellules en parallèle pour augmenter significativement la valeur de l'intensité en sortie du module [8].

I.4.4.3.Puissance

Le but recherché par tous les utilisateurs de générateur photovoltaïque est que l'énergie produite soit la plus optimale possible. La Figure (I.10) représente la caractéristique courant tension d'une cellule sous illumination ainsi qu'une courbe théorique de puissance constante).

Pour l'éclairement considéré, le point de puissance maximale MPPT représente le point où la puissance de la cellule est maximale. Ce point, est associé à une tension maximale V_{pm} et à une intensité maximale I_{pm}. C'est cette puissance qui sera toujours recherchée par des régulateurs de charge afin d'optimiser la charge de la batterie et le fonctionnement du générateur. Par ailleurs, lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement, on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête (W_c) [8].

I.4.4.4.Le rendement

Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite Pm et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module. Soit (S**)** la surface du module et (E**)** l'éclairement, ce rendement a pour expression :

$$\mu = \frac{P_{pm}}{E \cdot S} \qquad (I.1)$$

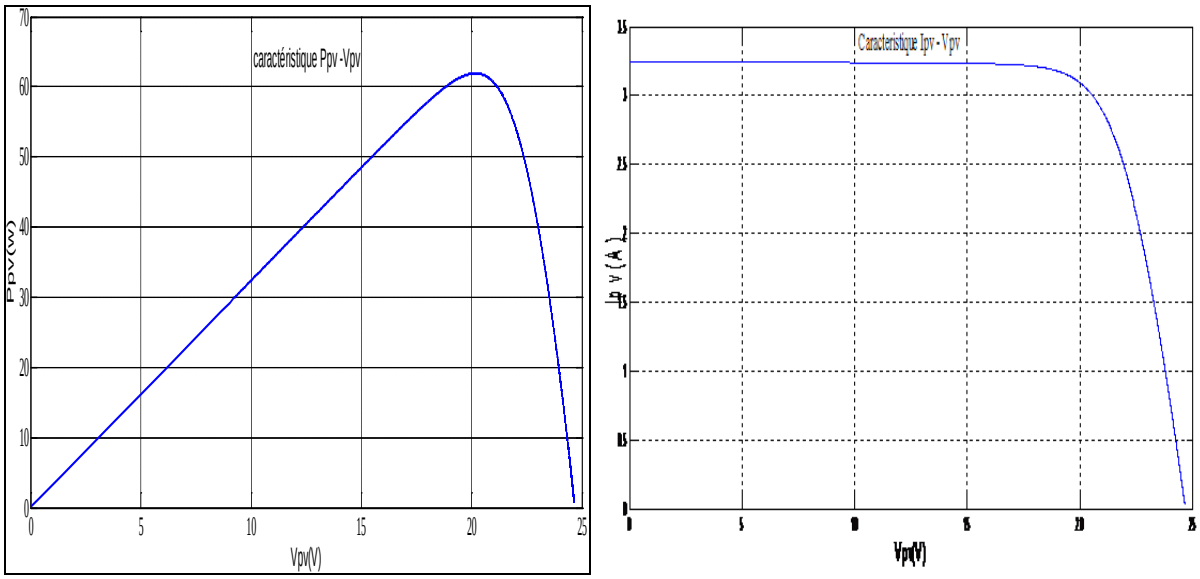


Figure I.10 : Caractéristique puissance - tension & courant- tension de la cellule PV.

I .5. Modules photovoltaïques

I.5.1. Définition

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement 0,5 Volt. En effet pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module PV(Figure I.11).Les cellules sont en soudant le contact avant de chaque cellule au contact arrière de la suivante. Ces cellules sont protégées d'humidité, des chocs et des nuisances par encapsulation dans un polymère EVA (éthylénevynil- acétate) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène. Les modules actuels sont généralement composés de 36 cellules (18 V) ou 72 cellules PV en série (36 V).

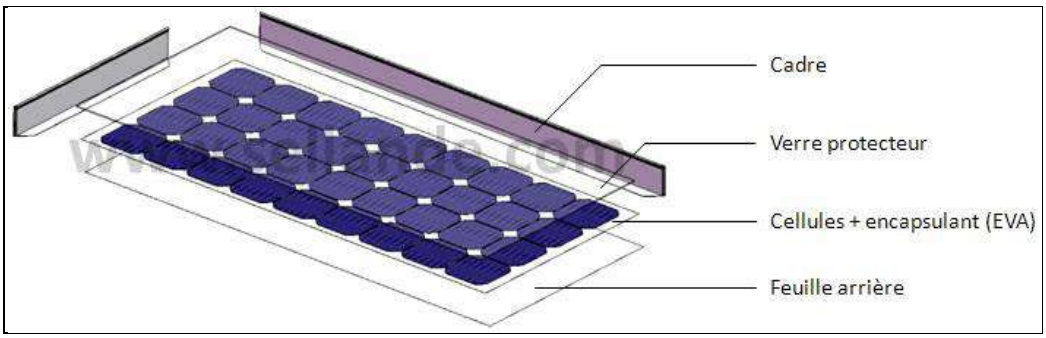


Figure I.11 : Représentation d'un modèle photovoltaïque.

où les connections en série de ces cellules augmentent la tension pour un même courant, tandisque la mise en parallèle accroit le courant en concevant la tension figure (I,11) [13-14].

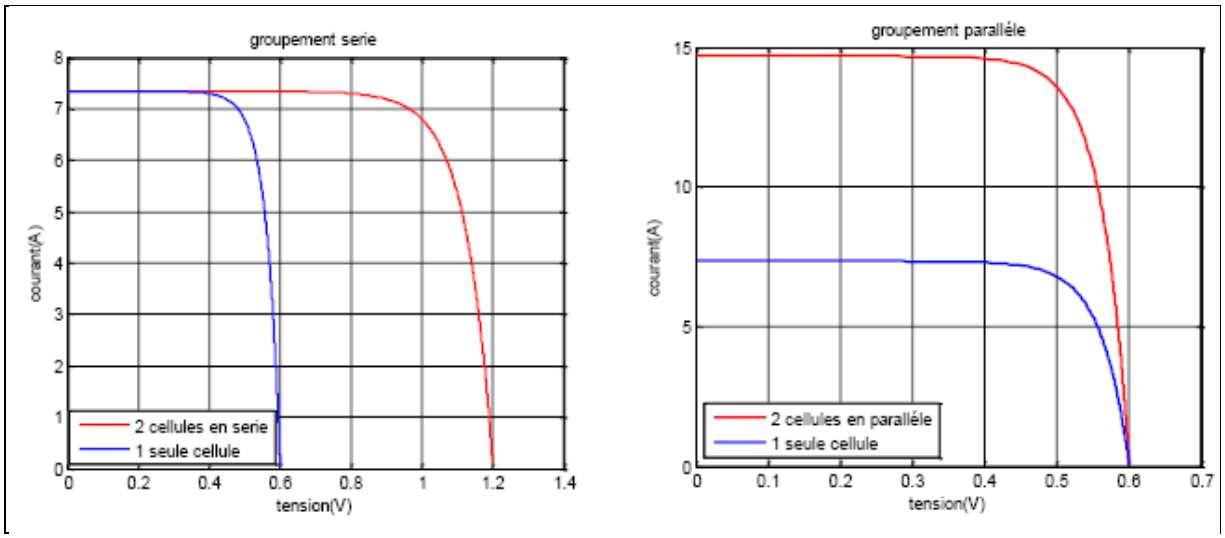


Figure I.11 : Caractéristique résultante d'un groupement de 2 cellules (série et parallèle**).**

I.6. Les batteries

I.6.1. Introduction

Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonomes est en général assuré pardesbatteries, composants utilisés dans la majorité des cas. Seules quelques applications utilisant l'énergieau fildu soleil comme par exemple du pompage ou de la ventilation peuvent se passer d'accumuler l'énergie ;aussi, bien connaître les batteries, est un élément essentiel au succès des systèmes autonomes.

Les batteries utilisées dans les systèmes solaires autonomes sont en général de type plomb-acide. Lesbatteries au cadmium-nickel ne sont plus que rarement utilisées car leur prix est beaucoup plus élevé et ellescontiennent du cadmium (toxique) [15]. Néanmoins, une des différences les plus importantes entre lesbatteries au plomb-acide et celles au nickel-cadmium se trouve au niveau de leur tension de fonctionnement.

Alors qu'une cellule au plomb-acide fournit une tension nominale de 2,0 Volts, la cellule au nickel-cadmiumfournit une tension nominale de 1,2 Volt.Il y a nécessité de stockage chaque fois que la demande énergétique est décalée dans le temps vis-à-vis de l'apport énergétique solaire. En effet :

- la demande énergétique est fonction de la charge à alimenter, les appareils utilisés fonctionnentsoit en continu, soit à la demande ;
- l'apport énergétique solaire est périodique (alternance jour/nuit, été/hiver) et aléatoire (conditionsmétéorologiques).

Ce décalage entre la demande et l'apport énergétique nécessite un stockage d'électricité.

Le systèmetampon utilisé le plus couramment pour les systèmes photovoltaïques est la batterie d'accumulateurs électrochimiques[16].

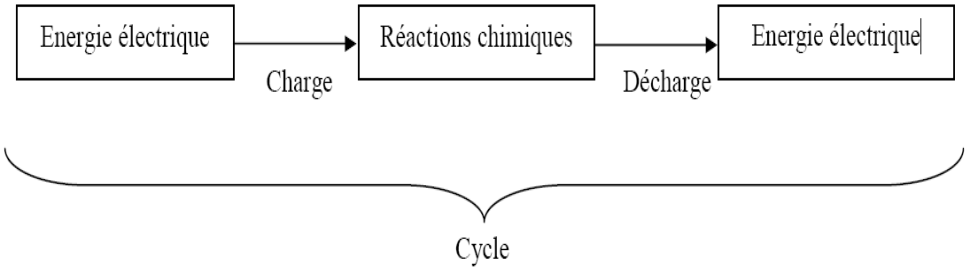


Figure I.12 : Cycle d'une batterie.

I.6.2. Batteries plomb-acide pour installations solaires photovoltaïques

I.6.2.1. Batteries ouvertes

Les batteries au plomb ouvertes sont a priori plus fiables et plus endurantes que les batteries àrecombinaison. Elles sont donc retenues la plupart du temps. Deux types de batteries peuvent être utilisés,selon le type d'usage :

- les batteries dites "stationnaires", qui assurent en général une fonction de secours dans diversesinstallations ;
- ces batteries, adaptées à un cyclage faible, sont utilisées pour les installations photovoltaïques sansappoint diesel, de très longue autonomie, qui sert, notamment, pour des signalisations ou relais detransmission à fort coefficient de sécurité ;
- l'autonomie de ces installations est, par exemple, de l'ordre de un mois et le cycle quotidien mobiliseseulement quelques pour-cent de la capacité totale ;



Source : MASTRA

Figure I.13 : Batteriestationnaire. (Plate-forme de distribution HAWKER Enersys).

- les batteries dites de tractions lourdes utilisées, par exemple, pour les chariots de manutention et quisupportent un cyclage profond quotidien ;
- ces batteries sont utilisables pour les installations d'alimentation en énergie de bâtiments,d'habitations, etc., qui utilisent quotidiennement une part importante, voire la des gaz ;
- totalité, de l'énergie stockée. Trois points doivent être soulignés :

1) Le niveau d'électrolyte devra être reconstitué par de l'eau déminéralisée à une fréquencerelativement élevée, par exemple, mensuelle. Cela impose l'intervention de personnel demaintenance - qui peut être l'utilisateur local, s'il en a l'aptitude -, ou le développement desystèmes de remplissage automatiques et fiables sur de longues périodes. Dans le cas de l'énergiephotovoltaïque où le dimensionnement des panneaux fixe le courant limite productible, il estd'ailleurs envisageable d'utiliser, avec des batteries de type ouvert, des bouchons à recombinaisonà sels de palladium, sans risquer les dangers associés à une surcharge trop forte, et à condition quelessystèmes annexes éventuels (diesel ou autre) ne soient pas susceptibles de faire dépasser lesconditions limite de surcharge ;

2) Une fréquence élevée de déficits de charge doit être proscrite pour ce type de batterie. Elle entraîne,en effet, un phénomène de stratification de concentration de l'électrolyte qui conduit à une fortehétérogénéité de fonctionnement des électrodes et à une sévère réduction de la durée de vie ;

3) La conjonction d'une basse température et d'un état de décharge profond est àproscrire sur unebatterie ouverte, qu'elle soit de type stationnaire ou traction. La concentration de l'électrolyte baisseen effet avec la profondeur de décharge et entraîne le risque de formation de glace au sein desélectrodes, qui seraient alors désagrégées.

I.6.2.2.Batteries à recombinaison

Quoique a priori plus fragiles, les batteries à recombinaison ne sont pas concernées par les deuxderniers points. Leur consommation d'eau est, en effet, négligeable lorsqu'elles sont correctement gérées encharge, et la stratification de leur électrolyte est, de par leur constitution (électrolyte absorbé ou gélifié),limitée naturellement à des niveaux faibles. Lorsque les trois points précédemment exposés peuventdifficilement être gérés, on pourra alors être amené à

choisir des batteries à recombinaison. Pour un usage àbasse température, on utilisera la technologie à recombinaison et électrolyte gélifié (et non pas à électrolyteabsorbé, qui donnerait une moindre sécurité) [3].



Figure I. 14: Batteries Plombs à recombinaison.

I.6.2.3. Types de batteries solaires photovoltaïques

Tableau I. 1 : Types de batteries utilisables pour les applications photovoltaïques [15].

Types de batteries	Capacités	Particularités
Batteries formées d'éléments stationnaires à plaque positive tubulaire (2V) et grande réserve d'électrolyte.	1000 à 3000 Ah	Bien adaptées aux cycles journaliers et saisonniers rencontrés dans les systèmesphotovoltaïques.
Batteries formées d'éléments stationnaires à plaques planes (2V) etgrande réserve d'électrolyte.	10 à 3000 Ah	Durée de vie plus courte que lesprécédentes (nombre de cycles inférieur).
Batteries plomb étanche sans entretien(2V, 6V et 12V).	10 à 500 Ah	Nécessitent très peu de maintenance
Batteries monobloc dérivées de labatterie automobile.	10 à 500 Ah	Aptitude au cyclage moins élevée. Réservées aux petites installations.



(Source : SONNENSCHEIN)

Figure I.15 : Batterie stationnaire à plaques tubulaires



(Source : OLDHAM)

Figure I.16 : Batterie monobloc.

I.7. Convertisseurs DC/DC

Les hacheurs sont des convertisseurs de type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. 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 qu'on a de bons rendements pour les hacheurs [16].

I.7.1. Hacheur dévolteur (Buck)

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension en une autre tension continue de plus faible valeur, Ce type de convertisseur est utilisé pour des applications que l'on peut classer en deux catégories :

- Les applications visant à obtenir une tension continue fixe (et parfois régulée) àpartir d'un générateur de tension continue supérieure.
- Les applications permettant d'obtenir une tension réglable mais toujoursinférieure à celle présente à l'entrée [17].

La figure (I.17) présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur.

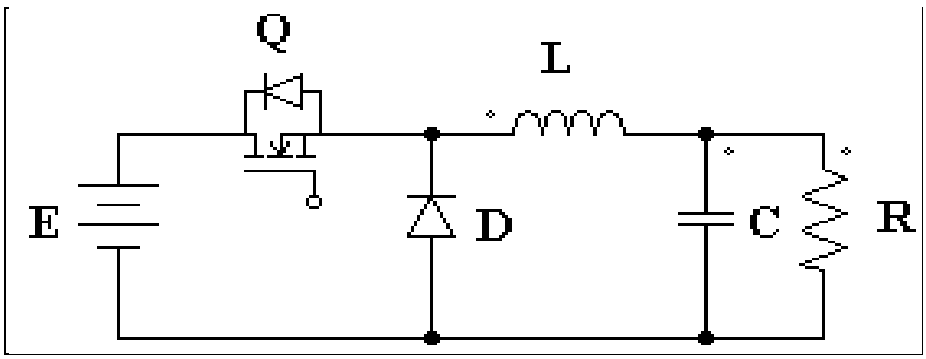


Figure I.17 : Convertisseur dévolteur réel.

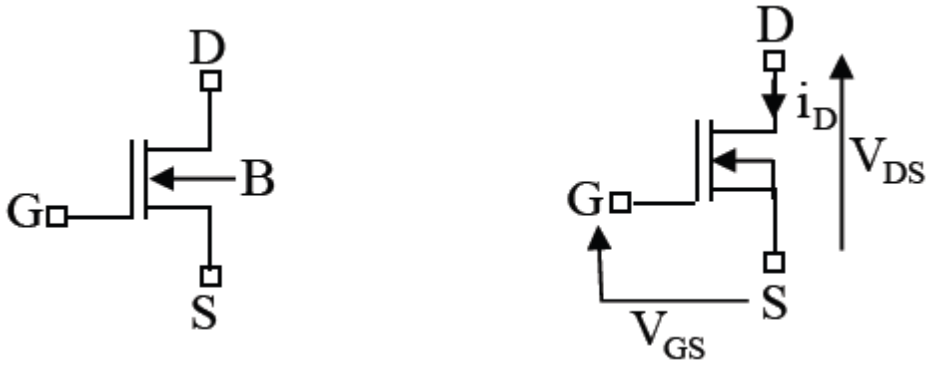
I.7.2.Composition du convertisseur

I.7.2.1. Le transistor MOSFET

Le MOSFET de faible puissance (Metal Oxyde Semi-conductor Field EffectTransistor). La figure (I.18.a) donne la représentation symbolique usuelle. La connexionpartant de la borne reliée au substrat (buck) B se termine par une flèche indiquant lesens passant des deux jonctions substrat - source et substrat - drain.

D'ordinaire le substrat et la source sont reliés. La figure (I.18.b) indique lesnotations utilisées.

Dans un semi-conducteur dopé de type P (figure I.19), on a diffusé deux zones detype N sur les quelles sont soudés les deux contacts de source S et de drain D. Unecouche d'oxyde recouvre la zone P située entre la source et le drain; sur cette couche estsoudé le contact de grille (gate) G. C'est la succession Metal-Oxyde-Semi-conductorsqui donne le préfixe MOS utilisé pour caractériser ce type de transistor [18].



(a) **(b)**

Figure I.18 : Représentation symbolique et notation pour le MOSFET à canal N

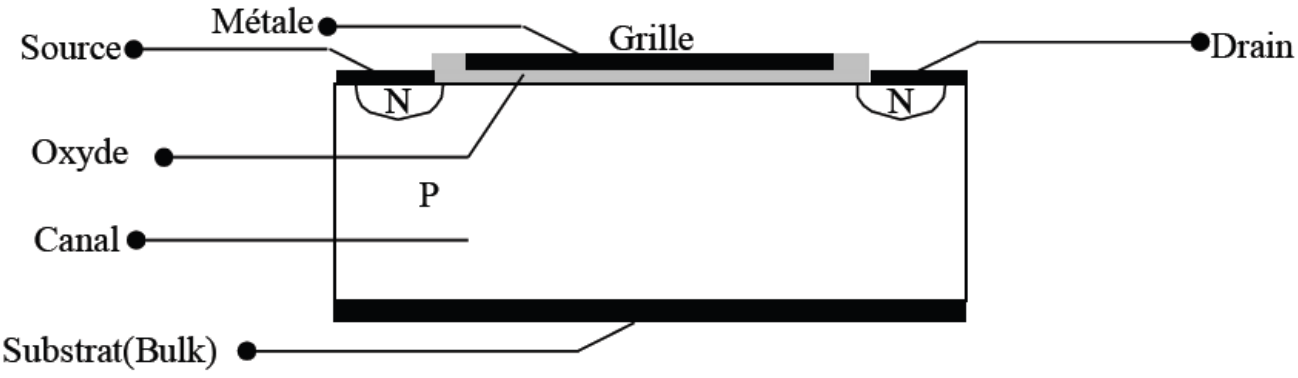


Figure I.19: Structure d'une cellule de MOSFET de faible puissance.

I.7.2.2.Le condensateur

Les condensateurs que nous rencontrons dans les alimentations à découpage remplissent deux rôles distincts : ils servent d'énergie lors des variations de commande ou de charge, et ils servent également de condensateur de découpage ou filtrage vis-à-vis du fonctionnement en haute fréquence de l'alimentation. Ce sont les condensateurs chimique dits à faible résistance série qui présentent des valeurs de capacité importantes, tout en présentant une excellente tenue en fréquence. Le condensateur se caractérise par des grandeurs physiques qui définissent ses domaines d'application**..**

I.7.2.3.L'inductance

Le rôle d'une inductance est de stocker une énergie électrique sous forme magnétique, puis de la restituer. On peut naturellement réaliser des bobinages à air.Mais, l'utilisation de circuits magnétiques tels que présentés après permet :

1. de diminuer l'encombrement, avec la même valeur de l'inductance.
2. de confiner le flux magnétique dans un espace restreint et ainsi de limiter les rayonnements parasites.

Les inductances sont utilisées essentiellement dans des applications de filtrage, de conversion d'énergie (alimentations à découpage...), et d'interrupteurs magnétique (inductances saturables). Le schéma électrique équivalent d'une inductance simple L est le suivant :

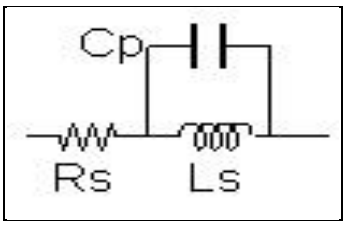


Figure I.20 : Inductance simple.

I.7.3.Hacheur survolteur (Boost)

Un convertisseur Boost (ou Step-Up en anglais), ou hacheur parallèle, est unealimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tensioncontinue de plus forte valeur .On utilise un convertisseur Boost lorsqu'on désireaugmenter la tension disponible d'une source continue [17]. Son schéma de principe debase est celui de la figure (I.21).

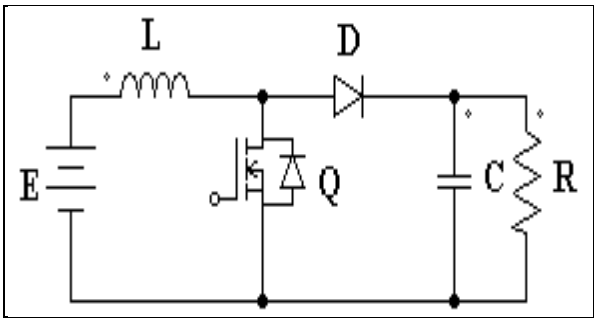


Figure I.21 : Convertisseur survolteur réel.

I.7.4. Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse. Un inconvénient de ce convertisseur est que son interrupteur ne possède pas de borne reliée à la masse, compliquant ainsi sa commande [17]. La figure (I.22) présente le schéma de principe du convertisseur Buck-Boost.

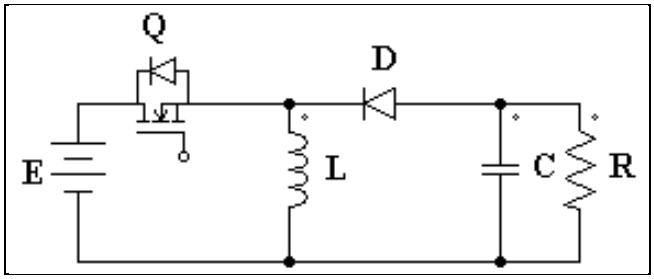


Figure I.22 : Convertisseur dévolteur-survolteur réel.

I.8. Convertisseurs DC/AC (Les onduleurs)

Au niveau mondial, le marché des systèmes photovoltaïques connaît, depuis maintenant plus de 10 ans, un taux de croissance très élevé, de l'ordre de 30 à 40% par an[18]. Cette croissance exceptionnelle, est due principalement aux systèmes photovoltaïques raccordés au réseau de distribution d'électricité, se traduit bien évidemment par des technologiques et une baisse de coûts des modules photovoltaïques mais aussi à des efforts importants de recherche et développement dans le domaine de l'électronique de puissance. L'onduleur est l'appareil qui rend utilisable l'électricité produite par le module photovoltaïque. En effet, les performances techniques et la fiabilité des onduleurs utilisés pour le raccordement des modules photovoltaïques au réseau de distribution d'électricité, sont des paramètres qui peuvent très fortement faire varier la production d'énergie électrique annuelle et donc la rentabilité financière d'un système [19]. Le rendement de l'onduleur doit être supérieur à 90% voire 95%. Comme tout composant électronique, l'onduleur a une durée de vie limitée. Ainsi il faut prévoir de le changer tous les 10 ans environ [18-20]. La figure (I.23)

montre le schéma synoptique de l'onduleur Les panneaux solaires produisent du courant continu.

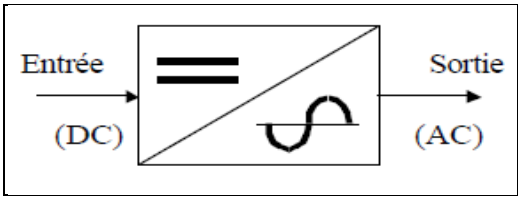


Figure I.23 : Convertisseur Continu - Alternatif (DC/AC).

L'onduleur inclut également des fonctions de sécurité (protection de découplage).Pour des raisons de sécurité, l'onduleur s'arrête automatiquement de fonctionner lorsque le réseau est mis hors tension (coupure de courant de cause accidentelle ou pour travaux). C'est ce qu'on appelle : « la protection de découplage » qui permet de supprimer tout risque d'électrocution lorsque des techniciens font une opération de maintenance sur le réseau.

L'onduleur se présente sous la forme d'un boîtier métallique de petite dimension, muni d'un radiateur (à privilégier) ou d'un ventilateur (à éviter quand c'est possible). En effet le ventilateur peut tomber en panne et l'onduleur passer en surchauffe ...). Il doit être placé sur un support vertical (mur par exemple) et dans un espace ventilé. Il n'émet aucun parasite électromagnétique et ne génère quasiment aucun bruit. Afin de limiter les pertes d'électricité en ligne, il doit être placé le plus près possible des modules photovoltaïques (moins de 10 mètres), voir figure (I.24).



Figure I.24 : Photos d'onduleurs commercialisés.

I.8.1. Domaine d'utilisation des onduleurs

Les onduleurs sont utilisés:

- Comme source de secours ou d'alimentation sans coupure à partir d'une batterie d'accumulateurs lorsque sa fréquence est fixée.

- Pour la variation de vitesse des moteurs à courant alternatif, si sa fréquence est variable.
- Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes (L'Algérie fournit de l'énergie électrique à la Grande-Bretagne, mais la fréquence du réseau anglais est 60 Hz. Il faut donc adapter la fréquence).

I.8.2.Classification

De nombreux essais de classification plus ou moins avantageux, ont été élaborés. En général, les classifications sont liées aux modes de commutation des éléments semi-conducteurs constituant l'onduleur.

Un premier mode de classification qui se présente comme une nécessité, peut être fait, on dissocie grossièrement les différents onduleurs existants en :

- Onduleurs autonomes ;
- Onduleurs non autonomes.

I.8.2.1. Onduleurs non autonomes

Ces onduleurs ne peuvent assurer la conversion que s'ils débitent sur un réseau alternatif déjà alimenté, dont la fréquence et la tension alternative sont imposés par celui-ci.

Le circuit de ces onduleurs qui sont employés dans la majorité des installations de grandes puissances utilise la propriété de réversibilité des redresseurs comportant uniquement des thyristors (parfois des transistors) commandés. Il s'ensuit que la source à courant continu débite de l'énergie qui doit être absorbée par le réseau à courant alternatif, lorsque le thyristor conduit. Il en résulte une conversion d'énergie courant continue en énergie de type courant alternatif.

I.8.2.2. Onduleurs autonomes

Contrairement à un onduleur assisté, un onduleur autonome détermine lui-même sa propre fréquence et sa propre tension alternative. Il dépend essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté. Cela conduit à distinguer :

- Onduleur de tension alimenté par une source de tension continue ;
- Onduleur de courant alimenté par une source de courant continu.

I.8.3. Réalisation de l'onduleur

Qu'il soit à deux ou quatre interrupteurs, le principe de base et la constitution sont les mêmes :

- Créer aux bornes de la charge une tension de valeur positive et négative en alternance.
- Utilisation de l'électronique de puissance.
- Utilisation d'interrupteurs bidirectionnels formés par un transistor et une diode montée en antiparallèle (voir schéma I.25).
- Commande permettant de gérer les interrupteurs.

I.8.4. Interrupteurs bidirectionnels

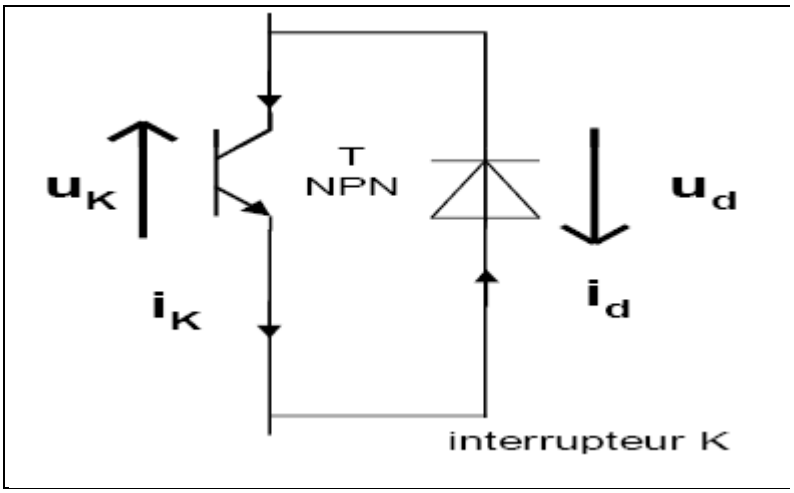


Figure I.25: Bloc d'interrupteurs bidirectionnel.

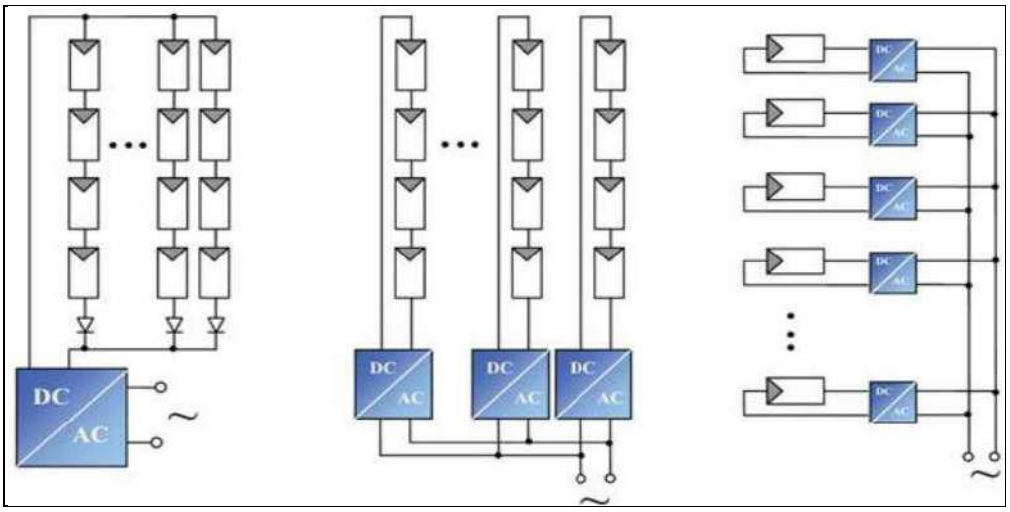
Le transistor constitue l'élément commandé. Il est unidirectionnel tout comme la diode. L'assemblage des deux composants permet de créer un bloc qui sera, lui, bidirectionnel, voir figure (I.25).

I.9. Connexion et emplacement de l'onduleur photovoltaïque

I.9.1. Connexion

Actuellement, il existe principalement trois architectures de techniques d'onduleurs

- Un seul onduleur pour toutes les installations (onduleur simple ou central, figure (I.26.a) ;
- Un onduleur pour chaque string (onduleur string, figure I.26.b) ;
- Installations multi-onduleurs (onduleurs modulaire, figure I.26.c).



a) Onduleur central b) Onduleurs strings c) Onduleurs modulaire

Figure I.26 : Différentes topologies des installations PV connectés aux réseaux électriques[21].

I.9.1.1. Installation mono-onduleur (onduleur central)

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

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

I.9.1.2. Installation avec un onduleur pour chaque string (onduleurs strings)

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

Dans cette configuration, la diode, qui empêche la source de circuler dans le sens inverse, est généralement incluse dans l'onduleur.

Ce dernier réalise un diagnostic de la production et assure également la protection contre les surintensités et les surtensions d'origine atmosphérique du côté DC.

De plus, la présence d'un onduleur sur chaque string limite les problèmes de couplage entre les modules et les onduleurs de même que la réduction des performances causée par l'ombrage ou une exposition différente.

Par ailleurs, avec plusieurs strings, des modules présentant différentes caractéristiques peuvent être utilisés, augmentant par conséquent l'efficacité et la fiabilité de l'ensemble de l'installation.

I.9.1.3. Installation multi-onduleurs (Onduleurs modulaires)

Suivant ce concept, chaque module solaire dispose d'un onduleur individuel. Pour les installations plus importantes, tous les onduleurs sont connectés en parallèle côté courant alternatif. Les onduleurs modulaires sont montés à proximité immédiate du module.

Dans les installations de grande taille, le champ PV est généralement divisé en un plus grand nombre de parties (sous-champs), chacune étant alimentée par un onduleur auquel différents strings sont raccordés en parallèle.

Par rapport à la configuration précédente, le nombre d'onduleurs est dans ce cas inférieur, entraînant une réduction conséquente de l'investissement et des coûts d'entretien.

Cette configuration présente également l'avantage de réduire les problèmes liés à l'ombrage et à la différence d'exposition des strings mais également ceux liés à l'utilisation de modules différents, à condition que les strings du sous champ ayant des modules et une exposition identiques soient raccordés au même onduleur.

De plus, la défaillance d'un onduleur n'implique pas la perte de production de l'ensemble de l'installation (comme dans le cas de l'onduleur unique) mais du sous-champ correspondant uniquement.

Il est recommandé de pouvoir déconnecter chaque string séparément, de manière à ce que les vérifications de fonctionnement et d'entretien requises puissent être réalisées sans mettre hors service l'ensemble du générateur PV.

Dans cette configuration, le diagnostic de l'installation est réalisé par un système de supervision qui vérifie la production des différents strings.

Le système modulaire est en général conseillé pour les petites installations photovoltaïques (de puissance inférieure à 3kWc) du point de vue du prix comme des spécificités techniques.

I.9.2. Emplacement de l'onduleur photovoltaïque

- Le plus proche possible des panneaux photovoltaïques
- Dans un endroit aéré et accessible, protégé de la pluie et du soleil
- Evitez la proximité avec les chambres en raison du bruit produit par l'onduleur en fonctionnement
- Veillez à ce qu'un dispositif de coupure de l'arrivée de courant sur le réseau soit facilement accessible à l'extérieur de la maison.

I.10. Caractéristiques propres d'un onduleur pour systèmes photovoltaïques [22]

L'onduleur couplé au réseau est utilisé pour les installations photovoltaïques. Il permet de transformer le courant continu, produit par les modules solaires, en un courant ondulé conforme à celui du réseau.

Il adapte également le courant produit à la fréquence et à la tension du réseau. Donc la principale caractéristique de l'onduleur PV est la recherche du meilleur point de fonctionnement du système.

En effet, le générateur PV a une courbe caractéristiquenon linéaire (figure I.27).Dans les installations d'habitation, le courant solaire produit est d'abord utilisé par l'habitation elle-même, si le courant produit pour l'habitation est excédentaire, l'excédent est injecté dans le réseau.

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

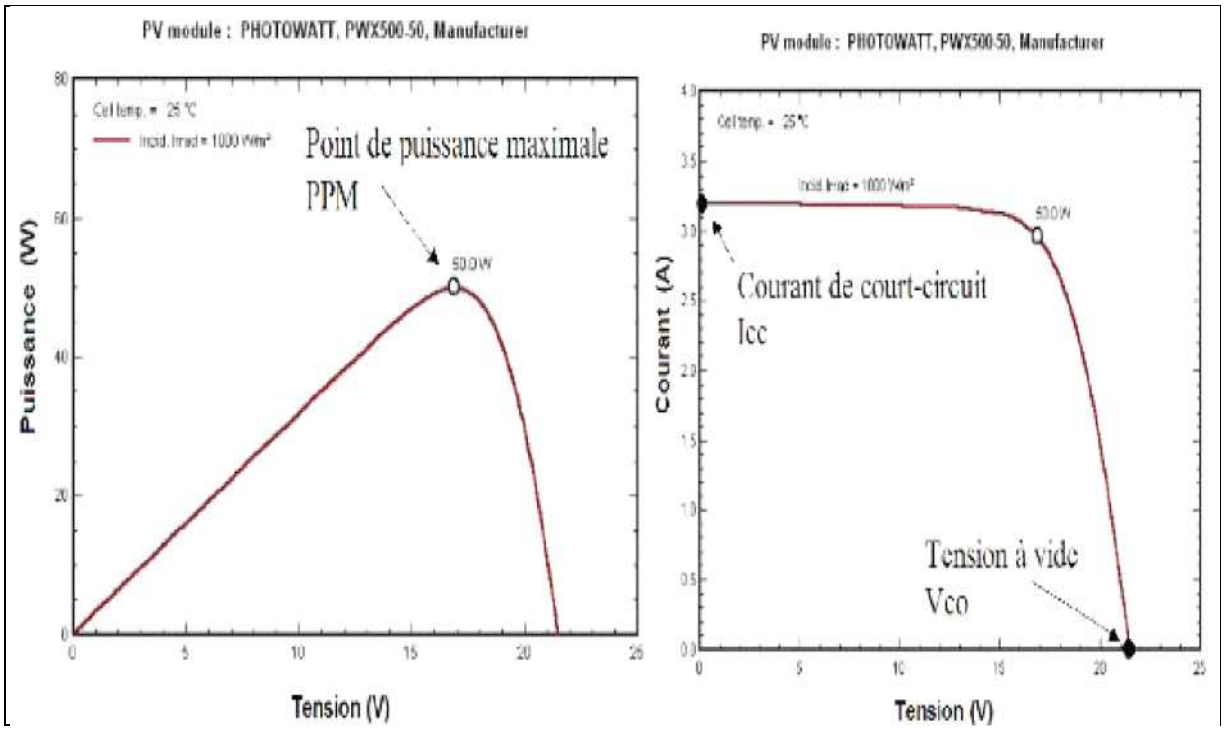


Figure I.27: Courbes des caractéristiques d'un module photovoltaïque.

Le meilleur point de fonctionnement du système correspond au point de cette courbe où la puissance, produit de la tension et du courant, est maximisée. Il se situe au milieu de la caractéristique (Figure I. 27).

En régime permanent établi, la tension et le courant du capteur sont considérés comme constants. L'utilisation d'un onduleur de tension plutôt qu'un onduleur de courant est alors essentiellement motivé par des raisons technologiques figure (I.28).

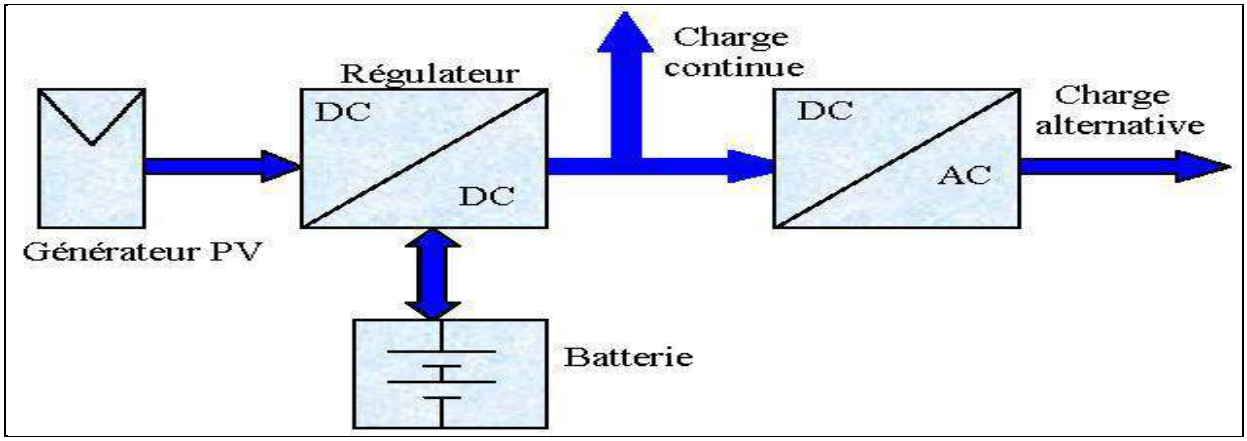


Figure I.28 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec stockage.

Conclusion

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

Dans les chapitre prochains, on présentera une étude sur la modélisation de systèmes photovoltaïques, les convertisseurs DC-DC (hacheurs) et leurs commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale,et le convertisseur DC-AC (onduleur).

Chapitre (II)

Modélisation d'un générateur photovoltaïque

II.1. Introduction

II. 1.1 Définition d'un système PV

L'intérêt essentiel des générateurs photovoltaïques est la possibilité d'autonomie énergétique qu'ils permettent. Les premiers générateurs ont été utilisés en 1958 pour les satellites Vanguard, puis très largement par la suite pour l'espace. Les premières installations photovoltaïques utilisées au sol datent de 1956 et ont été conçues pour des applications en sites isolés et principalement dans les pays en voie de développement où les réseaux de distribution d'énergie sont généralement restreints aux grands centres urbains. Les premiers systèmes conçus ne délivraient que de très faibles puissances, de l'ordre de quelques dizaines de watts, pour subvenir à des besoins très spécifiques, tels que balises de navigation ou émetteurs radio.

Un système photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications les récepteurs. Cet ensemble, appelé aussi "Balance Of System" ou BOS, comprend tous les équipement entre le champ de modules et la charge finale, à savoir la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser les modules, le câblage, la batterie en cas de stockage et son régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif [18].

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un module solaire photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée.

II.1.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

II.1.2.1 Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connectée à une charge peut être schématiser par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la Figure (II.1) qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale [17].

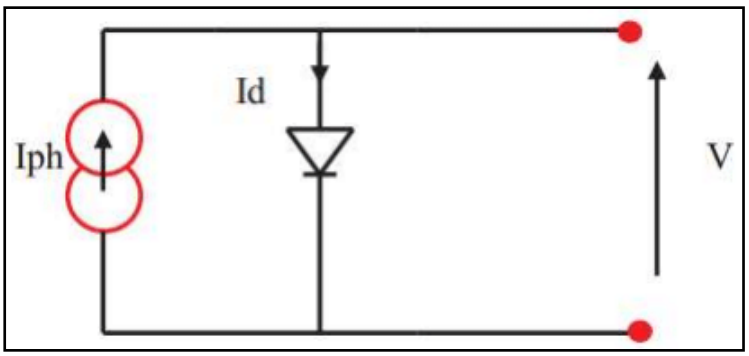


Figure II.1 : Schéma équivalent d'une cellule idéale.

Les équations retenues de ce modèle sont:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \qquad \text{(II.1)}$$

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

$$I_{ph} = I_{sc} = \frac{E}{E_{ref}} \qquad \text{(II.2)}$$

E: L'éclairement absorbé par la cellule ;

E_{ref}: L'éclairement de référence (1000 W/m^2) ;

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{v_d}{v_t}} - 1\right) \text{(II.3)}$$

I_o : Courant de saturation inverse de la diode [A] ;

$$V_t = \frac{NKT}{q} \qquad \text{(II.4)}$$

V_t : Tension thermique [V] ;

N : Facteur d'idéalité de la photopile ;

K : Constant de Boltzmann (1,38×10^{-23}j /K) ;

q : Charge de l'électron (1,603×10^{-19}C).

II.1.2.1 Cas d'une cellule réelle

La performance d'une cellule solaire est limitée par l'influence de deux phénomènes physiques assimilables à deux résistances R_s et R_{sh} (Figure II.2) [5].

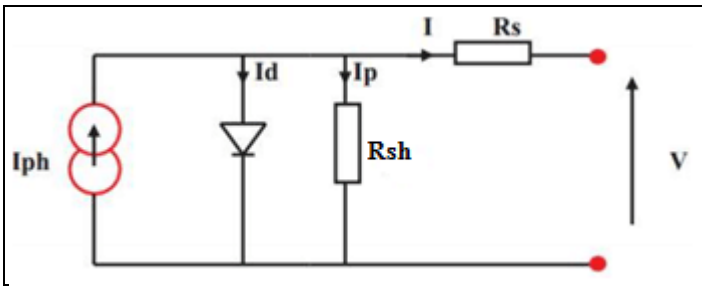


Figure II.2 : Schéma équivalent d'une cellule réelle.

R_s : Résistance série, due essentiellement aux pertes par effets Joule à travers les grilles de collectes et la résistance propre des semi-conducteurs, ainsi qu'aux mauvais contactes (Semi - conducteur, électrodes) ;

R_{sh} : Résistance parallèle, dite « Shunt », provient des pertes par recombinaisons dues essentiellement à l'épaisseur, aux effets de surface, ainsi qu'au non idéalité de la jonction PN [5].

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

$$I = I_{ph} - I_s \left(exp\left(\frac{q(V+R_sI)}{AkT}\right) - 1\right) - \frac{V+R_sI}{R_{sh}} \qquad \text{(II.5)}$$

où :

I_{ph} : le courant photonique de la diode [A] ;

I_s : le courant de saturation inverse de la diode [A] ;

q : la charge de l'électron(1.603×10^{-19}C) ;

A : le facteur d'idéalité de la diode dépendant de sa technologie (matériau) est compris généralement entre 1 et 2 ;

K : la constante de Boltzmann (1.38×10^{-23}).

Le courant I_{ph} varie avec la température suivant l'équation (II.6) :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}}\left(I_{sc} + a_i\left(T - T_{ref}\right)\right) \qquad \text{(II.6)}$$

où :

I_{sc} : le courant de court circuit standard (aux conditions standards

T_{ref} : la température de référence (298,15 °K)

a_i : le coefficient de température du courant du court circuit (A/K)

G_{ref} : l'ensoleillementde référence (1000W/m^2) ;

G : l'ensoleillement (W/m^2).

Le courant de saturation Is varie avec la température selon l'équation (II.7)

$$I_s = \frac{I_{sc}+a_v\left(T-T_{ref}\right)}{exp\left(\frac{V_{oc}+a_v\left(T-T_{ref}\right)}{AkT}\right)-1} \qquad \text{(II.7)}$$

V_{oc} : la tension en circuit ouvert de la cellule (V) ;

a_v: le coefficient de température de la tension en circuit ouvert (V/K).

Le courant de sortie (A) d'un panneau PV constitué de N cellules montées en parallèle est donné par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left(exp\left(\frac{q(Vm+R_sI)}{n_{1kt}}\right) - 1\right) - \frac{V_m+R_sI}{R_{sh}} \qquad \text{(II.8)}$$

La puissance *P* délivrée par le panneau est le produit $V_m.I$en Watt.

II.1.2.2Modèle d'une cellule photovoltaïque avec deux diodes

Mesures réelles sur des cellules dans diverses conditions de fonctionnement, cependant, montrent la nécessité d'un modèle plus sophistiqué. En particulier, la résistance interne de dispositif doit être prise en considération. Ceci mène à largement utilisé "modèle de deux diode" comme le montre la Figure (II.3) [26]

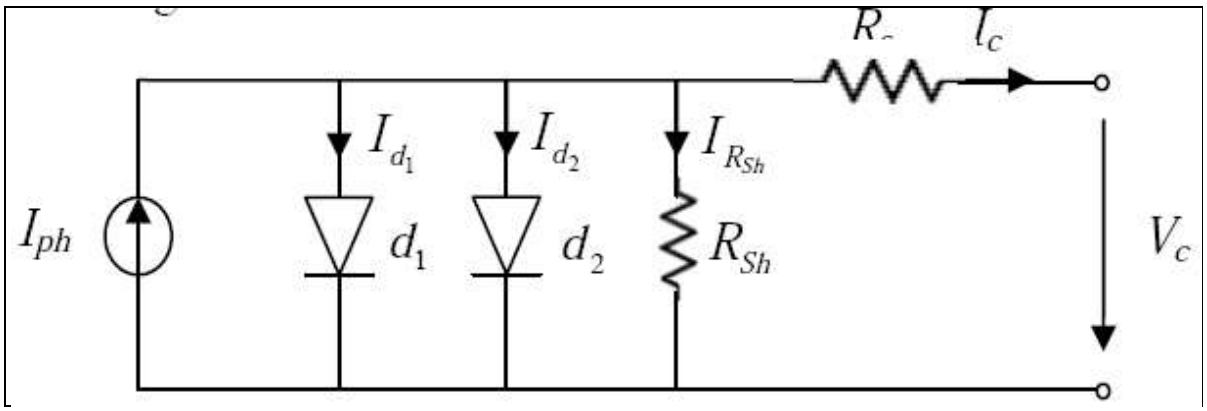


Figure II.3 : Circuit électrique d'une cellule PV réelle à deux diodes.

$$I_c = I_{ph} - I_{s1}[e^{\frac{q(V_c+I_cR_s)}{n_{1kT_{ck}}}} - 1] - I_{s2}[e^{\frac{q(V_c+I_cR_s)}{n_{2kT_{ck}}}} - 1] - \frac{V_c + I_cR_s}{R_{sh}} \text{(II. 9)}$$

où :

$I_c$et V_c : le courant de sortie [A] et la tension de sortie de la cellule photovoltaïque [V] ;
I_{ph} :le photocourant généré [A];
I_{s1}et , I_{s2} : les courants de saturation de la diode [A] ;
$n_1$et n_2 : les facteurs d'idéalité de la diode ;
$R_s$et R_{sh} : la résistance série et shunt (ou parallèle) respectivement [Ω];
T_{ck}: la température absolue [°K].

L'équation contient également la charge élémentaire constante q (1,602.10^{-19}C) et la constante de Boltzmann k (1,380.10^{-23}J/K). Le photo-courant I_{Ph}est égale à sa valeur maximums d'insolation1 avec *S* en pourcent (I_{ph}= $S.I_{phmax}$).

Il est évident à partir de l'équation (II-10), que la caractéristique courant-tension dépend fortement de l'ensoleillement et de la température. La dépendance de la température est encore amplifiée par les propriétés du photo-courant *ph I* et des courants de saturation inverse de la diode [26].

$$I_{ph(T_{ck})} = I_{ph|(T_{ck}=298k}[1 + (T_{ck} - 298k).5.10^{-4})] \quad \text{(II.10)}$$

$$I_{s1} = K_1 T_{ck}^3 . e^{-\frac{E_g}{kT_{ck}}} \quad \text{(II.11)}$$

$$I_{s2} = K_2 T_{ck}^{\frac{5}{2}} . e^{-\frac{E_g}{kT_{ck}}} \quad \text{(II.12)}$$

où $E_g$est la bande-trou (band-gap) d'énergie du semi-conducteur en Joule.

$$K_1 = 1{,}2\ A/cm^2.K^3 \quad \text{(II.13)}$$

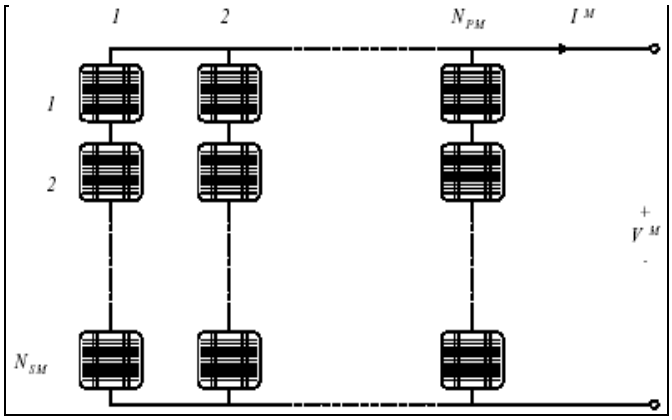
$$K_2 = 2{,}9.10^5 A/cm^2.K^{\frac{5}{2}} \quad \text{(II.14)}$$

II.2 Modèle d'un module photovoltaïque

II.2.1. Introduction

Les cellules sont généralement regroupées en "modules", qui sont encapsulés avec divers matériaux pour protéger les cellules et les connecteurs électriques de l'environnement.

Les constructeurs fournissent des cellules photovoltaïques dans les modules, composé de *NPM* branches parallèles, chacun avec *NSM* cellules solaires en série, comme le montre la Figure (II.4).



Figur. II. 4 : Le module PV se compose de NPM branches parallèles, chacun de NSM cellules solaires en série [23].

Le modèle utilisé pour simuler les performances du module PV (groupement de cellules en série) est déduit du modèle de la caractéristique d'une cellule solaire par l'équation suivante, avec *z* cellules photovoltaïques raccordées en série [23,26] :

$$I = I_{ph} - I_{s1}[e^{\frac{q(V+I_{zR_s})}{zn_1kT_{ck}}} - 1] - I_{s2}[e^{\frac{q(V+I_{zR_s})}{zn_2kT_{ck}}} - 1] - \frac{V_c+IzR_s}{zR_{sh}} \quad \text{(II.15)}$$

Un module photovoltaïque est composé d'une série et en parallèle de cellules solaires, avec les autres composantes de blocage et de dérivation des diodes. Bien que la fabrication et la taille des cellules solaires varie, en général une seule cellule a une tension relativement faible capacité de manutention de l'ordre de 0,6 V. Afin d'emballer les cellules solaires comme un dispositif plus pratique la plupart des fabricants de produire des modules solaires, un groupe de cellules solaires connectées en série et en parallèle afin d'accroître la capacité de manipulation de la tension et le courant. Si une variété de connexion existe pour une multitude d'applications, un système commun pour la PHV modules utilisés dans la grille liée production d'électricité est une connexion de 72 cellules en série. A titre d'exemple, le Shell SQ150-PC module qui est composé des nominale de tension et de courant de 34 V, 4,4 A [23].

II.3 Modélisation d'une batterie

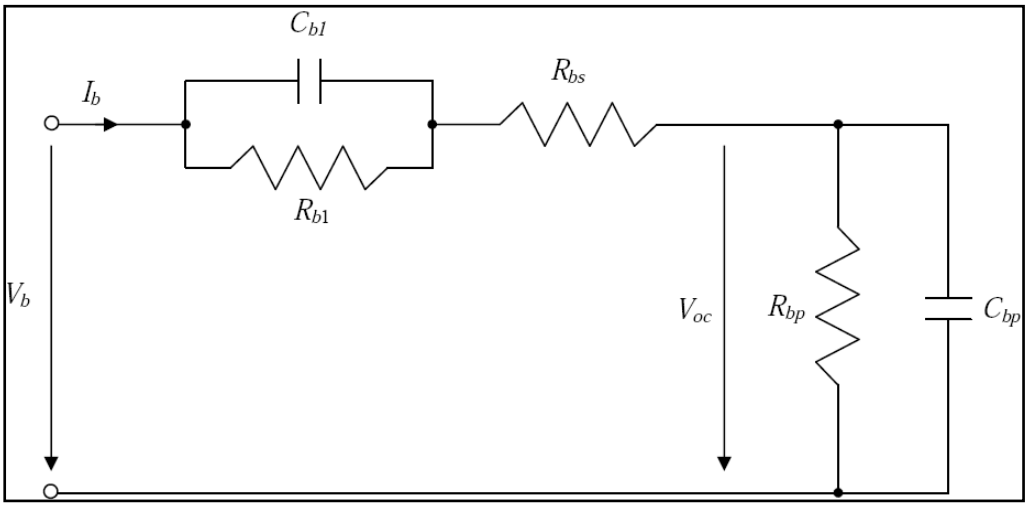


Figure II. 5 : Modèle d'un circuit équivalent de batterie plomb-acide [26].

Ce nouveau modèle de batterie comprend des éléments équivalents pour toutes les grandes caractéristiques de fonctionnement d'une batterie plomb-acide : La capacité électrochimique de la batterie est représentée par le condensateur dont la charge C_{bp}dont le résultat d'un flux d'électrons au cours du temps et est linéaire pour les conditions d'un courant constant dans une région de 10 à 90 pour cent du niveau de charge maximum. La valeur du C_{bp}est dérivée de l'expression générale de l'énergie dans un condensateur:

$$E_c = \frac{1}{2}CV_c^2 \quad \text{(II.16)}$$

Avec *C* étant la capacité du condensateur et $V_C$étant la tension. Contrairement à un condensateur, une tension de batterie ne sera pas égale à zéro à son état le plus bas de charge.

Ceci est équivalent à un condensateur dont le niveau minimum de charge égale à l'énergie $E_{c,min}$.

La capacité de la batterie entièrement chargée est représentée par un niveau maximum de charge de l'énergie $E_{c,max}$.

Ceci est indiqué par l'équation suivante pour l'ensemble de l'énergie stockable dans une batterie.

$$E_B = E_{c,max} - E_{c,min} = \frac{1}{2}CV_{max}^2 - \frac{1}{2}CV_{min}^2 = \frac{1}{2}C_{bp}\,(V_{max}^2 - V_{min}^2) \quad \text{(II.17)}$$

L'énergie $E_B$est soit donnée par le fabricant de la batterie directement en kilowattheures (kWh), soit il est spécifié en ampères-heures (Ah - qui doit être transformé dans les unités utilisées pour la production d'énergie (kWh) par multiplication de la tension spécifié de fonctionnement).

Les tensions V_{max} et V_{min} sont la charge maximale et la charge minimale de la batterie en circuit ouvert respectivement. D'après l'équation (II-17) on a :

$$C_{bp} = \frac{2E_b}{V_{max}^2 - V_{min}^2} \quad \text{(II.18)}$$

La résistance interne de la batterie est représentée par les deux résistances série R_{bs}et R_{b1}. La résistance en bloc d'électrolyte et de plaque est représentée par la résistance R_{bs}, alors que la résistance R_{b1} représente la diffusion de l'électrolyte.

Les modèles également R_{b1}(avec le petit condensateur C_{b1}) l'effet de surtension ou de polarisation dela batterie. Ce que représente le phénomène de chutes de tension en circuit ouvert de la batterie dès que lacharge est connectée.

De même, un saut brusque de tension peut être observé avec l'application d'un courant de charge. Utilisation de la notation indiquée sur la Figure (II.6) la surtension peut être exprimée comme la différenceentre la tension de la batterie en circuit ouvert V_{oc}et la tension terminale de la batterieV_b. R_{b1}et C_{b1}forment un réseau RC parallèle avec une constante de temps$T = R_{b1} \cdot C_{b1}$de sorte que :

$$V_b = V_{oc} + R_{b1}(1 - e^{-t/T})I_b + R_{bs}.I_b \quad \text{(II.19)}$$

Une autre caractéristique très importante d'une batterie est d'auto-décharge, représentée par la résistance R_{bp} en parallèle avec le condensateur principal C_{bp}. Elle est causée par l'électrolyse de l'eau à haute tension et par des fuites lentes à travers les bornes de la batterie à basses tensions. Le circuit de la Figure (II.6) décrit les caractéristiques d'une batterie plomb-acide d'une manière complète mais pourtant très simplifiée.

L'impédance équivalente d'une d'entrée dune batterie plomb-acide est représentée par :

$$Z(s) = R_{bs} + (R_{b1} \| C_{b1}) + (R_{bp} \| C_{bp})$$

$$= R_{bs} + \frac{R_{b1}}{R_{b1}.C_{b1}s+1} + \frac{R_{bp}}{R_{bp}.C_{bp}s+1} \qquad \text{(II.20)}$$

Pour l'utilisation dans le système du modèle mathématique, il est nécessaire de transformer (II-20) enun seul terme de la forme suivante:

$$Z(s) = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \qquad \text{(II.21)}$$

où les coefficients $a_i$et $b_j$sont employés pour représenter les différents composants [26,27] :

$$a_2 = R_{bs} R_{b1} R_{bp} C_{b1} C_{bp} \qquad \text{(II.22)}$$

$$a_1 = R_{bs} R_{b1} C_{b1} + R_{bs} R_{bp} C_{bp} + R_{b1} R_{bp} C_{bp} + R_{bp} R_{b1} \qquad \text{(II.23)}$$

$$a_0 = R_{bs} + R_{b1} + R_{bp} \qquad \text{(II.24)}$$

$$b_2 = R_{b1} R_{bp} C_{b1} C_{bp} \qquad \text{(II.25)}$$

$$b_1 = R_{b1} C_{b1} + C_{bp} R_{bp} \qquad \text{(II.26)}$$

$$b_0 = 0 \qquad \text{(II.27)}$$

II.4. Modélisation d'un Convertisseurs DC/DC

Pour obtenir le modèle mathématique du convertisseur, il faut l'étudier en deux phases de fonctionnement (*S* fermer, et *S* ouvert). Puis, faire un modèle « moyen » (*Averaged Model*) qui relie les différentes grandeurs moyenne d'entrée et de sortie du convertisseur

Les variables dynamiques du circuit sont I_L, V_{c1}, V_{c2}, associés aux composants dynamiques L,C_1,C_2.Les équations qui relient les dérivées $\frac{di_l}{dt}$et $\frac{dv_c}{dt}$, avec les variables d'entrée et de sortie ainsi que les composantes de convertisseur et les variables dynamiques I_L, *vc* sont de la forme :

$$\frac{dv_c}{dt} = f(I_L, V_C, L, R_L, C) \qquad \text{(II.28)}$$

$$\frac{di_l}{dt} = g(I_L, V_C, L, R_L, C) \qquad \text{(II.29)}$$

Les grandeurs temporelles sont représentées par des lettres minuscules alors que les grandeurs moyennes sont représentées par des majuscules,

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits, on obtient les systèmes d'équations suivants :

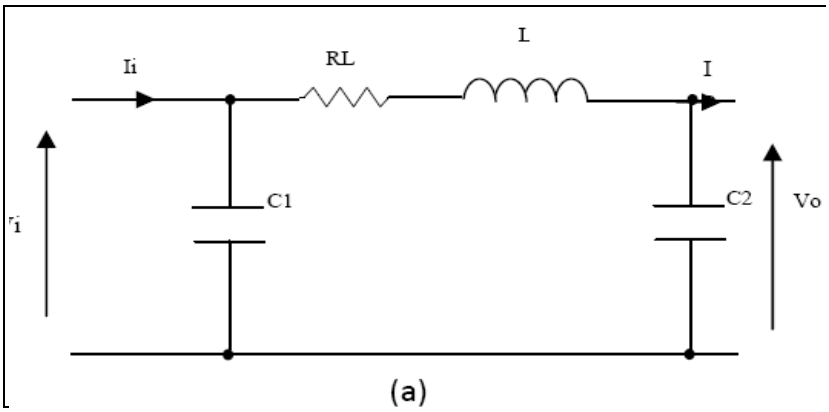


Figure II. 6 : Circuit équivalent de Boost, S fermer (a).

0 < t <DTs

$$i_{C1} = C_1 \frac{dvi}{dt} = i_i - i_L \qquad \text{(II.30)}$$

$$i_{c2} = C_2 \frac{dvo}{dt} = i_L - i_o \qquad \text{(II.31)}$$

$$v = L \frac{d_{iL}}{dt} + R_L i_L = v_i - v_o \qquad \text{(II.32)}$$

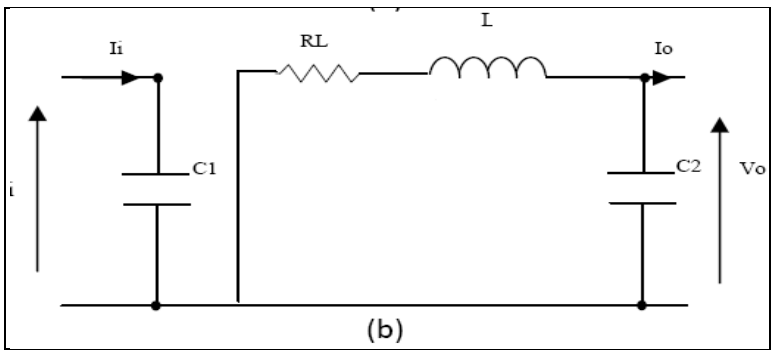


Figure II. 7 :: Circuit équivalent de Boost, S ouvert (b).

.

DTs < t < Ts

$$i_{C1} = C1\frac{dvi}{dt} = i_i \qquad \text{(II.33)}$$

$$i_{C1} = C2\frac{dvo}{dt} = i_L - i_O \qquad \text{(II.34)}$$

$$vL = L\frac{diL}{dt} + R_L i_L = -vo \qquad \text{(II.35)}$$

II.4.1.Hacheur parallèle (Boost)

Le convertisseur Boostest connu par le nom d'élévateur de tension abaisseur de courant.Le schéma de la Figure (II.8) représente le circuit électrique du Boost. Durant le temps DTs, le Transistor S est fermé, le courant dans l'inductance croit progressivement de l'énergie , jusqu'à la fin du premier intervalle . Le Transistor S s'ouvre et l'inductance *L* délivre le courant $I_L$et ainsi génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge Z à travers la diode D.

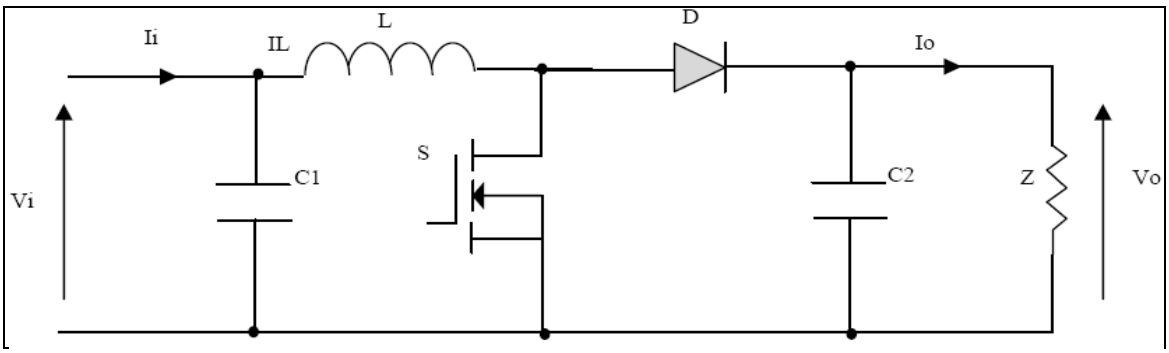


Figure II.8 : Circuit électrique du hacheur Boost.

II.4.1.1.Modèle mathématique équivalent

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement (Figure II.9).

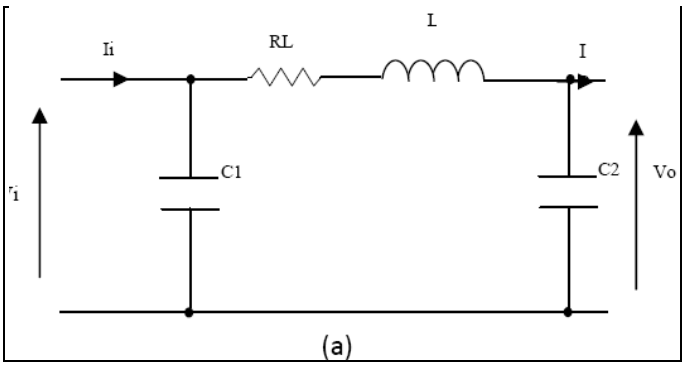


Figure II.9 : Circuit équivalent de Boost,S fermer (a).

0 < t < DTs

$$i_{C1} = C_1 \frac{dvi}{dt} = i_i - i_L \quad \text{(II.36)}$$

$$i_{C1} = C_2 \frac{dv_O}{dt} = -i_O \quad \text{(II.37)}$$

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - R_L i \quad \text{(II.38)}$$

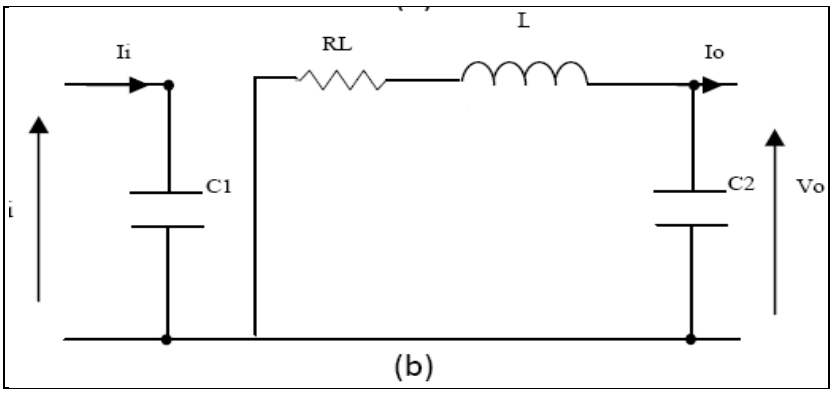


Figure II.10 : Circuit équivalent de Boost, S ouvert (b).

DTs < t < Ts

$$ic1 = C1 \frac{dvi}{dt} = i_i - i_L \quad \text{(II.39)}$$

$$ic2 = C2 \frac{dvo}{dt} = i_L - i_O \quad \text{(II.40)}$$

$$v_L = L \frac{diL}{dt} = v_i - v_O - R_L I_L \quad \text{(II.41)}$$

II.4.1.2. Modèle moyen du hacheur Boost

Comme pour le Buck, en appliquant la relation II.41 sur les systèmes d'équations (II. 36-41), on trouve le modèle moyen:

$$< \frac{dx}{dt} > Ts = \frac{dx}{dt\,(DTs)} \,.\, DTs + \frac{dx}{dt\,\big((1-D)Ts\big)} .\, (1-D)Ts \text{(II.41)}$$

$$C_1 \frac{dvi}{dt} Ts = DTs(i_i - iL) + (1-D)Ts(il - io) \quad \text{(II.42)}$$

$$C_2 \frac{dvo}{dt} Ts = DTs i_O + (1-D)Ts(i_L - io) \quad \text{(II.43)}$$

$$L \frac{diL}{dt} Ts = DTs(vi - R_L i_L) + (1-D)Ts(v_1 - vo - R_L i_L) \quad \text{(II.44)}$$

En arrangeant les termes des équations précédentes, pour qu'on puisse interconnecter le Boost avec les autres blocks de simulation, on obtient la modélisation dynamique du hacheur Boost.

$$i_L = i_i - C_1 \frac{dv1}{dt} \qquad \text{(II.45)}$$

$$i_O = (1 - D) i_L - C2 \frac{dvo}{dt}) \qquad \text{(II.46)}$$

$$v_L = (1 - D) vo + R_L i_L + L \frac{diL}{dt} \qquad \text{(II.47)}$$

II.4.1.3. Les ondulations des courants et tensions

Comme pour le circuit Buck la pente du courant $I_L$et des tensions V_{c1}et V_{c2}pendant la première période de fonctionnement est donnée par :

$$\frac{diL}{dt} \approx \frac{vL}{L} = \frac{Vi - R_L i_L}{L} \qquad \text{(II.48)}$$

$$\frac{dV_{c1}}{dt} \approx \frac{i_{c1}}{C_1} = \frac{i_L - i_o}{C_1} \qquad \text{(II.49)}$$

$$\frac{dV_{c2}}{dt} \approx \frac{i_{c2}}{C_2} = \frac{-i_o}{C_2} \qquad \text{(II.50)}$$

Les valeurs crête à crête des courants et des tensions sont :

$$I_i C_C = 2\Delta V_L = \frac{Vi - R_L I_L}{\mathrm{L}} DTs \qquad \text{(II.51)}$$

$$V_i C_C = 2\Delta V_i = \frac{Ii - R_L}{\mathrm{C1}} DTs \qquad \text{(II.52)}$$

$$V_O C_C = 2\Delta V_i = \frac{-I_O}{\mathrm{C2}} DTs \qquad \text{(II.53)}$$

Les valeurs des composantes à choisir pour des ondulations données sont :

$$L = \frac{V_i}{2\,\Delta I_L} DT_s \qquad \text{(II.54)}$$

$$C_1 = \frac{I_i - I_L}{2\,\Delta V_L} DT_s \qquad \text{(II.55)}$$

$$C_o = \frac{-I_0}{2\,\Delta V_0} DT_s \qquad \text{(II.56)}$$

II.4.1.4. Étude du régime continu

Comme pour le circuit Buck, en remplaçant les dérivées des signaux par des zéros, ainsi onpeut remplacer les signaux de convertisseur par leurs grandeurs moyennes, cela simplifie lessystèmes d'équations précédents comme suit :

$$I_i = I_L \quad \text{(II.57)}$$

$$I_0 = (1-D)I_L \quad \text{(II.58)}$$

$$V_i = (1-D)V_O + I_L R_L \quad \text{(II.59)}$$

II.4.1.5. Rapport de conversion et rendement

En utilisant les relations (II.57-59), on peut calculer le rapport de conversion *VO/Vi* :

$$M(D) = \frac{V_i}{V_O} + \frac{1}{(1-D)+\frac{R_L I_L}{V_O}} = \frac{1}{1+\frac{R_L I_O}{(1-D)^2 V_O}} \frac{1}{1-D} = \frac{1}{1+\frac{R_L}{(1-D)^2 Z}} \frac{1}{1-D} = \eta \frac{1}{1-D} \quad \text{(II.60)}$$

On remarque que le rendement η ne dépend pas seulement de la charge complexe Z du convertisseur et des résistances parasites des composantes, mais elle dépend aussi du rapport cyclique D. Ainsi il est recommandé, pour que le boost fournisse un bon rendement, de ne pas dépasser des rapports cycliques D supérieur a une certaine valeur, fixée par la qualité de l'inductance et la charge utilisée(Figure II.12).

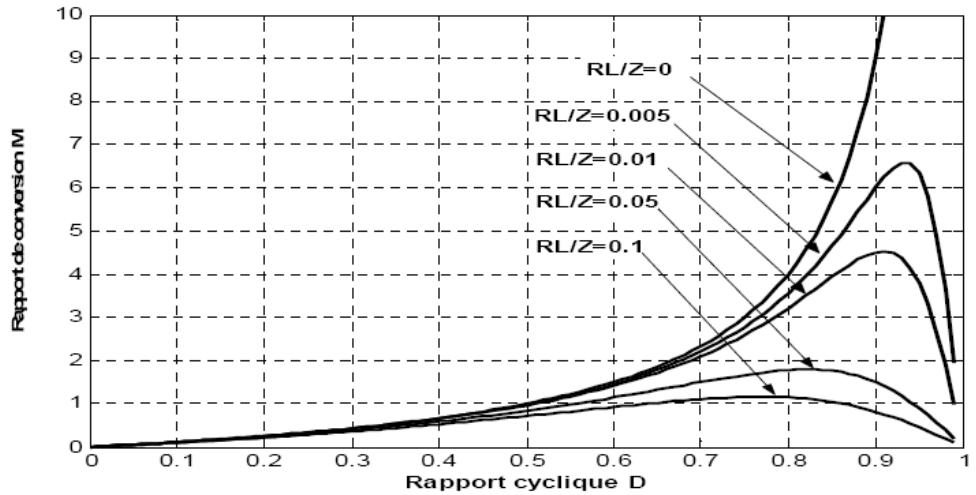


Figure II.11 : Rapport de conversion Vo/Vi(D), en fonction de RL/Z.

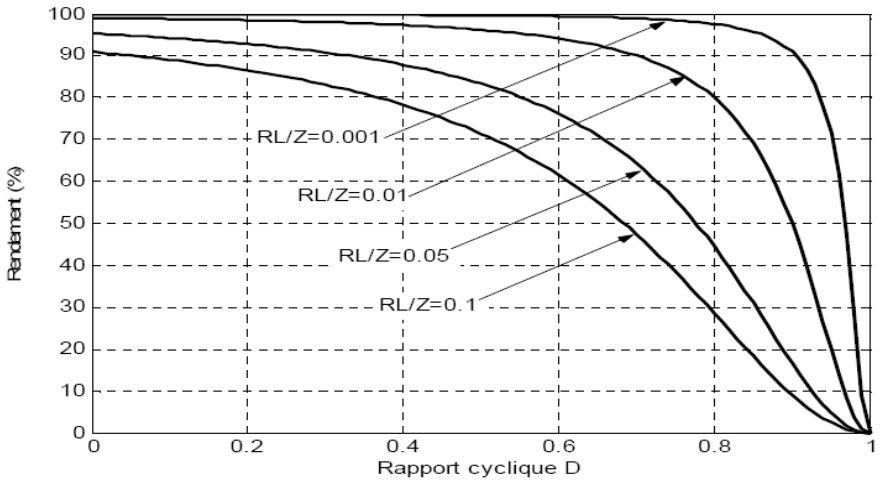


Figure II.12 : Le rendement η(D) d'un circuit Boost en fonction de R_L/Z.

II.5.Le convertisseur DC-AC (l'onduleur)

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu généré par le générateur PV encourant alternatif. Il utilise des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortieprésente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types decharges, des pertes à vide considérables surtout pour des faibles puissances [26].

Les onduleurs sont utilisés en électrotechnique pour :

- 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.

II.5.1. Modélisation de l'onduleur triphasé

Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour des applications de grandepuissance. La structure de tel convertisseur se fait par l'association , en parallèle, de troisonduleurs monophasés en demi pont (ou en pont) donnant trois tensions de sortie déphaséesde 120° degrés, l'une par rapport à l'autre [27].

La Figure (II.13) illustre la topologie d'un onduleur triphasé à six interrupteurs de puissance.

Le décalage entre les signaux de commande est de 60°. [27].

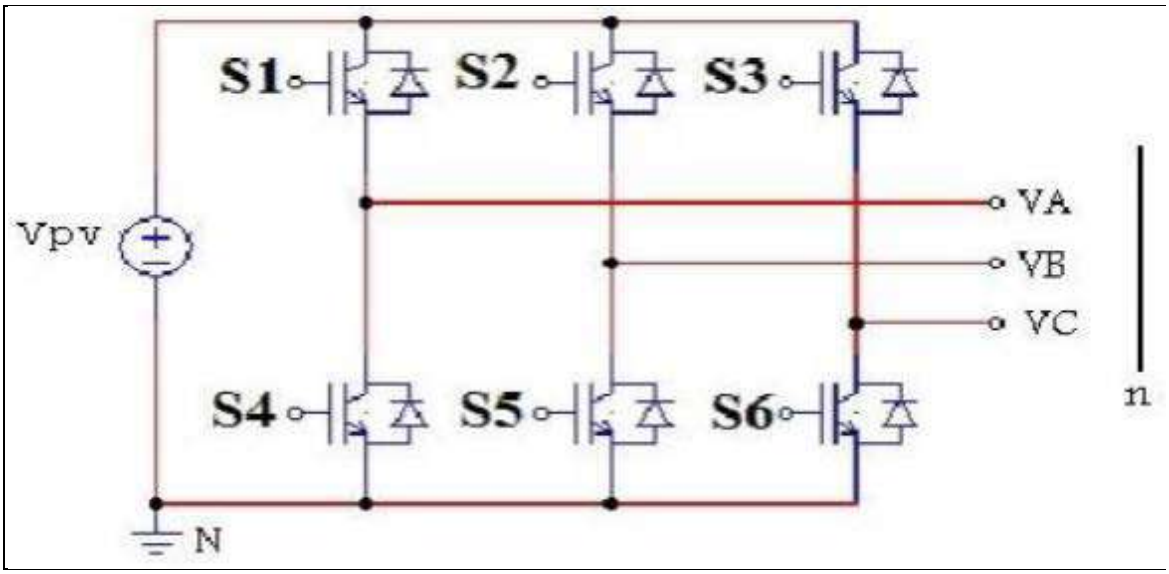


Figure II.13 : Circuit équivalent d'un Onduleur Triphasé [28].

Dans le schéma de l'onduleur triphasé (Figure II.13) ; il est à noter que les états desinterrupteurs 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 [28] :

$$V_{AN} = S_1 \cdot V_{PV} \quad \text{(II.61)}$$

$$V_{BN} = S_2 \cdot V_{PV} \quad \text{(II.62)}$$

$$V_{AN} = S_1 \cdot V_{PV} \quad \text{(II.63)}$$

où $S_{1,2}$ et S_3 désignent les états des interrupteurs des phases A, B, C respectivement.

Les tensions composées sont :

$$V_{AB} = V_{AN} + V_{NB} = V_{AN} - V_{BN} = (S_1 - S_2)V_{PV} \quad \text{(II.64)}$$

$$V_{BC} = V_{BN} + V_{NC} = V_{BN} - V_{CN} = (S_2 - S_3)V_{PV} \quad \text{(II.65)}$$

$$V_{CA} = V_{CN} + V_{NA} = V_{CN} - V_{AN} = (S_3 - S_1)V_{PV} \quad \text{(II.66)}$$

On peut écrire l'équation (II.64-66) sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad \text{(II.67)}$$

Les tensions simples sont :

$$V_{AN} = (\frac{2}{3})V_{AN}(\frac{1}{3})(V_{BN} + V_{CN}) \quad \text{(II.68)}$$

$$V_{BN} = (\frac{2}{3})V_{BN}(\frac{1}{3})(V_{AN} + V_{CN}) \quad \text{(II.69)}$$

$$V_{AN} = (\frac{2}{3})V_{CN}(\frac{1}{3})(V_{AN} + V_{BN}) \quad \text{(II.70)}$$

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \frac{V_{PV}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad \text{(II.71)}$$

II.5.2 Commande de l'onduleur (Commande MLI)

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture desinterrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension deréférence [29].

Pour avoir des tensions sinusoïdales à la sortie de l'onduleur, on utilise la techniquede modulation de largeur d'impulsion (MLI ou PWM pour pulse Width Modulation en anglais), en appliquant aux interrupteurs des créneaux de commande de largeur variable avecune périodicité constante. Cette stratégie est obtenue par la comparaison d'un signal de la

tension de référence sinusoïdale d'amplitudeVr et de fréquence$V$, à un signaltriangulaire(porteuse) d'amplitudeVp et de fréquencefp.Le taux de réglage est égal au rapportde l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de l'onde de modulation. La sortiedu comparateur permet, par l'intermédiaire de transistors de puissance, le pilotage d'unephase de l'onduleur. Les autres phases sont pilotées par des ensembles identiques , déphaséesde 120° .Le principe de cette commande est illustré sur la figure (II.19) [30].

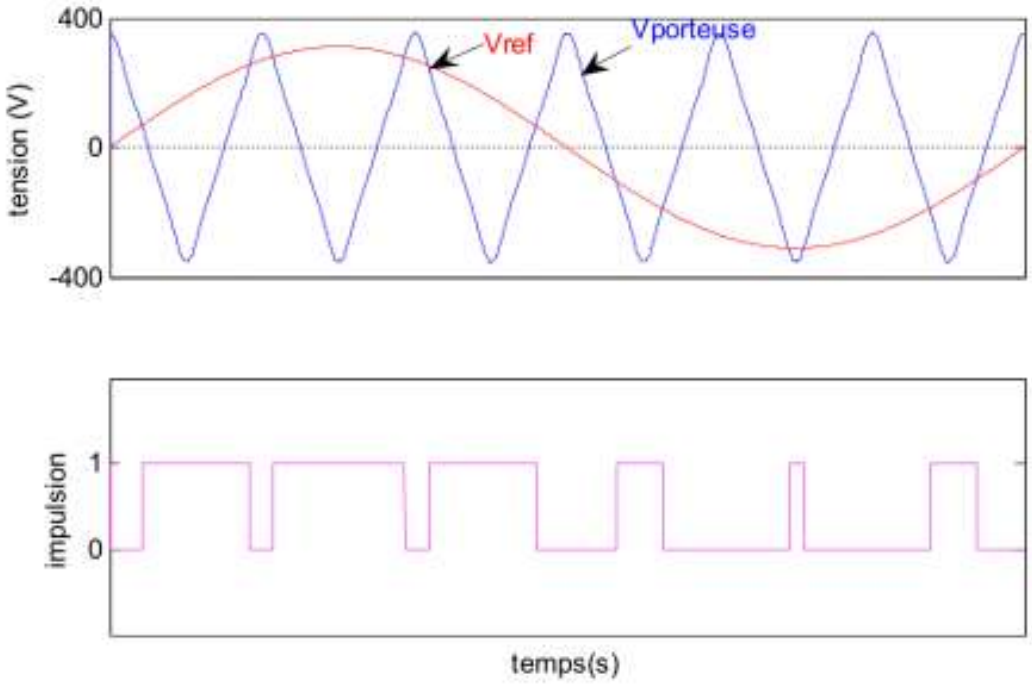


Figure II.14La modulation de largeur d'impulsion

La technique MLI est caractérisée par [30] :

- L'indice de modulation m qui représente le rapport entre la fréquence de la porteuse de celle de la référence (modulante) $m = \frac{f_p}{f_r}$
- L'indice d'amplitude r qui représente le rapport entre l'amplitude de la référence et celle de la porteuse $r = \frac{V_p}{V_r}$

II.6. Conclusion

La modélisation de chaque composant de puissance pour un système photovoltaïque a été élaborée à partir des modèles de la littérature (champ PV, convertisseurs, le MPPT) ; 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 constituants. 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 4ème chapitre.

Chapitre (III)

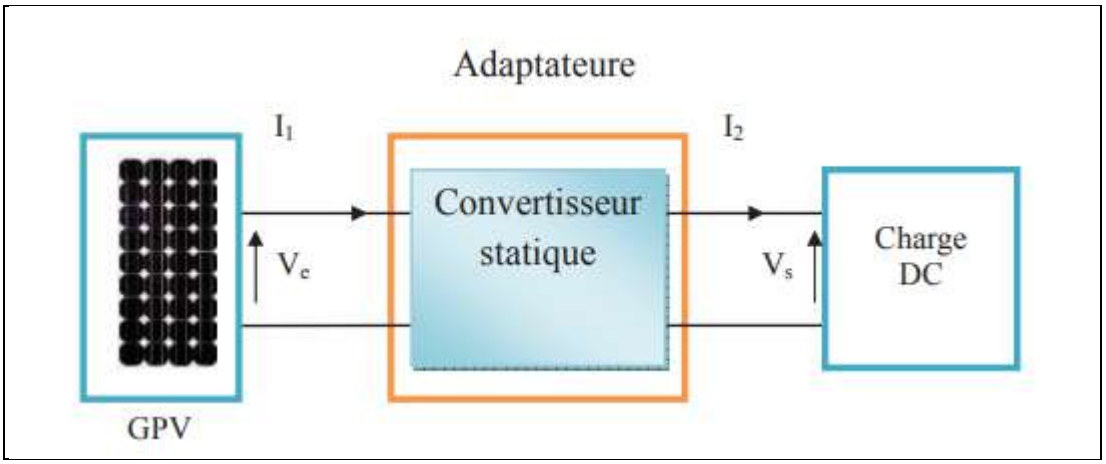
Méthodes de poursuivre de point de puissance maximum (MPPT)

III.1Introduction

Le bloc de MPPT est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV qui dépend des conditions météorologiques et de la variation de la charge stables. Son principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique D à la valeur adéquate de manière à maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau PV[30] .

III.2Le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque

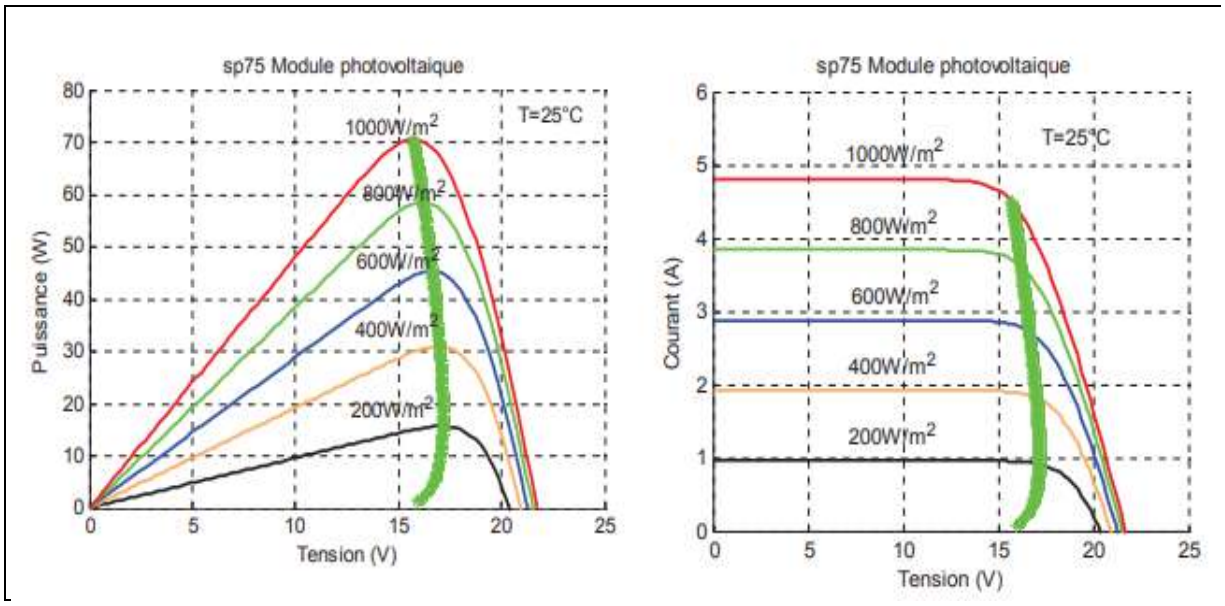
La conception de système PV optimiser est par nature difficile. en effet, coté source ,pour générateur PV , la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement de la température ,mais aussi du vieillissement global du système .coté charge , que ce soit de nature continue (DC) ,ou bien alternative (AC), comme le réseau électrique ,chacune a son comportement propre qui peut être aléatoire .pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimale ,la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique f qui jouera le rôle d'adaptateur (Figure III.1) . [33 ,34]



FigureIII.1 : Etage d'adaptation d'un GPV-charge.

III.2.1 Principe du MPPT

Un MPPT, de l'anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant. La Figure (III.2) représente la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur.



FigureIII.2 : La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM.

III.2.2Chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque avec MPPT

La Figure (III.3) représente le schéma de principe d'un convertisseur MPPT classique. La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique, à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP. [42 ,43]

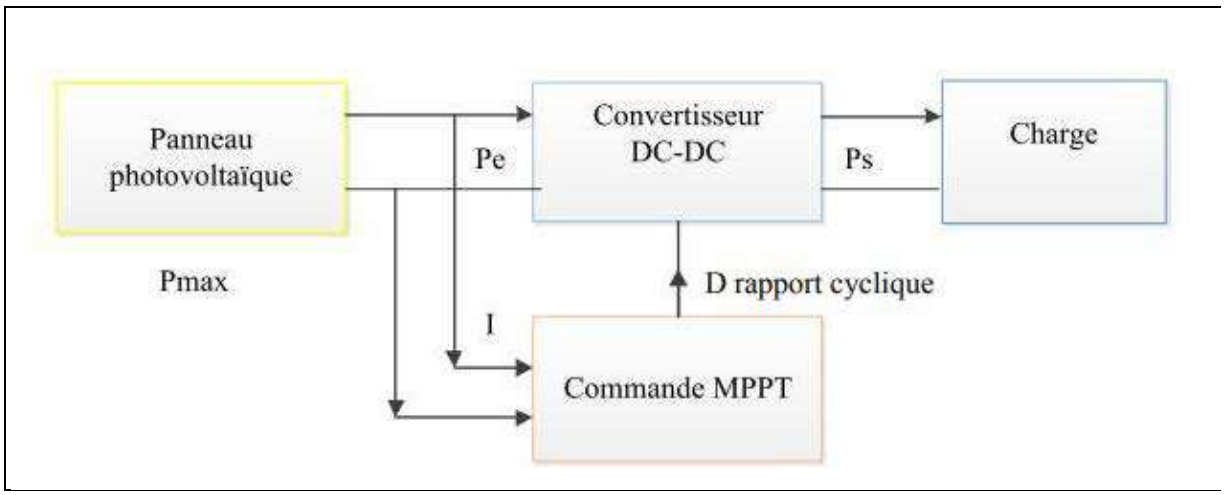


Figure III.3: Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

III.3Classification des commandes MPPT

III.3.1 Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du convertisseur statique

Ce type de commandes MPPT effectue une recherche du MPP selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. La commande nécessite alors la mesure du courant et de la tension en entrée du convertisseur. D'autres types de commandes MPPT sont basées sur la régulation du courant du GPV, supposant que ce dernier soit une image proportionnelle à la puissance. Ceci permet de s'approcher le plus proche possible du courant optimal I_{opt}. Ce type de commande ayant besoin d'un seul capteur est plus facile à mettre en œuvre et a un coût bas.

III.3.2 Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur statique

Dans la littérature, il existe des algorithmes basés sur les paramètres de sortie du convertisseur statique. En effet, ce type utilise la tension et le courant de sortie du convertisseur ou alors uniquement l'un des deux. Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie sont principalement utilisées quand la charge est une batterie. Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{max} est faite à travers le rendement du convertisseur. Plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, tous les systèmes avec un seul capteur sont imprécis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial. [30] [38].

III.4 Critères de Qualité d'une Commande MPPT

Pour savoir si un gain est apporté par l'utilisation d'une commande MPPT d'un type ou d'un autre, des critères de qualité sont utilisés. Dans un premier temps, la commande MPPT doit avoir un niveau de simplicité important favorisant une faible consommation et un coût raisonnable. De plus, concernant ses performances, la commande MPPT doit avoir un bon comportement en dynamique et en statique pour assurer une adaptation rapide aux changements climatiques. Elle doit aussi pouvoir piloter l'étage d'adaptation de telle sorte qu'en régime statique, le point de fonctionnement du GPV soit le plus près possible du MPP dans n'importe quelle condition météorologique ou état de la charge alimentée. Aussi, la stabilité et la robustesse du système doit être assurée.

En résumé, l'utilisation d'un type de commande MPPT par rapport à une connexion directe doit apporter un gain énergétique et économique quantifiable. Il est important de

préciser qu'il n'existe pas de standard international qui définisse comment il faut mesurer les performances d'une commande MPPT [40].

III.5Rendements de la chaîne de Puissance

Le rendement total de l'étage d'adaptation entre le GPV et la charge continue se compose de divers types de rendements reliés à chaque partie de la chaîne.

Le rendement maximum de la conversion photons-électrons du panneau solaire η_{pv} est donné par :

$$\eta_{\boldsymbol{pv}}=\frac{\boldsymbol{P}\text{max}}{\boldsymbol{GA}\text{eff}} \quad \text{(III.1)}$$

Où P_{max} est le maximum de puissance potentiellement disponible à la sortie du panneau, G est l'irradiante (W=m²) et A_{eff} est la surface effective du panneau PV.

La puissance P effectivement délivrée par un GPV dépend en plus de la commande utilisée dans le convertisseur. Le rendement du point de fonctionnement (Rendement MPPT) permet de mesurer l'efficacité de la commande qui contrôle le convertisseur statique que le module PV fournis la puissance maximale.

$$\eta_{\boldsymbol{mppt}}=\frac{\boldsymbol{P}}{\boldsymbol{P}\text{max}} \quad \text{(III.2)}$$

Enfin, le rendement du convertisseur noté convη est défini par :

$$\eta_{\boldsymbol{conv}}=\frac{\boldsymbol{P}\text{out}}{\boldsymbol{P}} \quad \text{(III.3)}$$

Avec Pla puissance délivrée en sortie du convertisse.

Le rendement total de la chaîne de conversion totalη est donné par :

$$\eta_{\boldsymbol{total}} = \eta_{\boldsymbol{pv}}\eta_{\boldsymbol{mppt}}\eta_{\boldsymbol{conv}} \quad \text{(III.4)}$$

III.6 Les Algorithmes MPPT

Il existe dans la littérature plusieurs algorithmes MPPT. Les plus utilisés sont [41]:

- Algorithme de la Tension Constante (CV, Constant Voltage) ;
- Algorithme du Courant constant (Constant Courant) ;
- Perturbation et Observation (P&O, Perturbe and Observe) ;
- Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance) ;
- Les algorithmes P&O et IncCond font partie de la technique appelée Hill Climbing (monté de pente) ;

- Algorithme à base de logique floue.

Si les valeurs des paramètres du modèle mathématique du panneau sont connues, alors le courant et la tension du panneau peuvent être calculés à partir des mesures de l'ensoleillement et de la température. La tension VMPP peut être directement calculée et choisie comme tension de fonctionnement du panneau. Un tel algorithme est appelé algorithme MPPT basé sur le modèle.

Bien qu'intéressant, cet algorithme n'est généralement pas pratique, car les paramètres ne sont pas connus avec une certitude et peuvent varier considérablement d'un panneau à un autre du même fabricant. De plus, le coût d'un capteur de lumière précis (pyranomètre), fait que cette méthode n'est pas réalisable.

III.7 Les techniques de MPPT

Il existe différents types de contrôleurs MPPT, mais tous ces contrôleurs sont basés en général sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique.

Dans ce chapitre nous allons présenter trois commandes MPPT les plus utilisés dans les systèmes photovoltaïques.

III.7.1 Commande perturber et observer (P&O)

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répondue dans la recherche de MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{PV} et I_{PV} respectivement , elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température [38] .Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension V_{pv} et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du panneau photovoltaïque.

La Figure (III.4) représente l'algorithme de la méthode P&O. . [35]

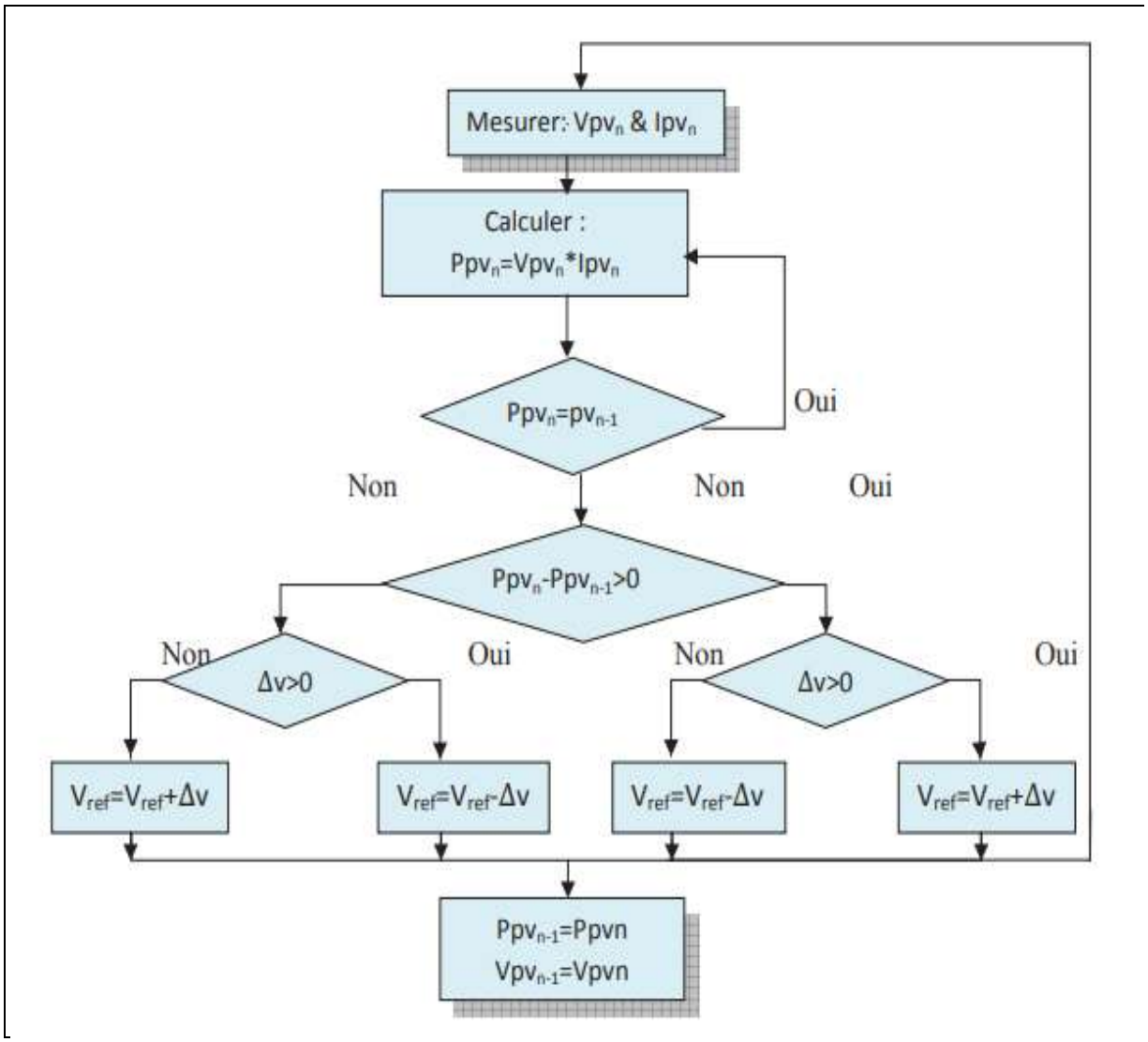


Figure III.4 : Algorithme de MPPT a base de la méthode P&O. . [35]

Si la puissance de sortie a augmenté, V_{pv} est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance de sortie a diminué, V_{pv} est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent. V_{pv} est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT. Quand le point de puissance maximale est atteint, V_{pv} oscille autour de la valeur optimale V_{op} Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas de l'incrémentation de la perturbation. Si ce pas d'incrémentation est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement.. [39]

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

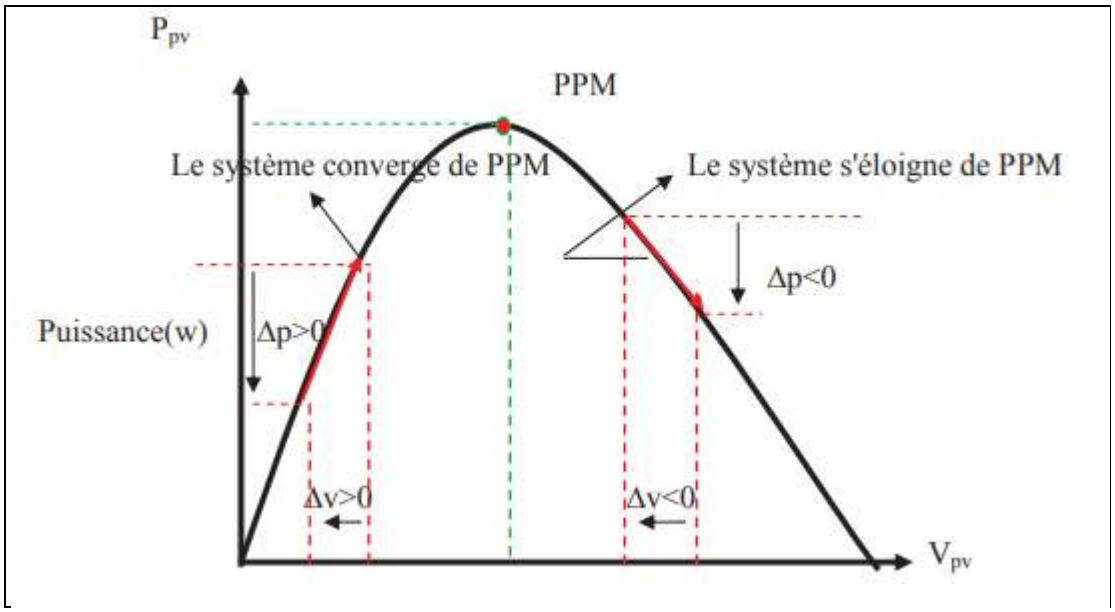


Figure III.5 : Schéma de converge vers le PPM par P&O.

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

III.7.1.1 Principe de la commandes « perturbation et observation » (P&O)

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} , on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv}, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroit. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de la tension sur la caractéristique P_{pv} (V_{pv}), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM. Elle permet aussi de générer des perturbations en augmentant ou en réduisant le rapport cyclique D et d'observer l'effet sur la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque. Si une

augmentation brutale de l'ensoleillement est produite, on aura une augmentation de la puissance du panneau. L'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continu dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce que l'éloigne du vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains de fonctionnement et des pertes de puissance. Pour remédier à l'inconvénient majeur de la déviation de cette méthode lors de la recherche du MPP durant l'augmentation rapide des niveaux d'insolation, une version améliorée de cet algorithme est proposée.

III.7.1.2 Commande a incrémentation de la conductance (Inc cond)

L'Incrémentation de la conductance est la commande de MPPT qui se base sur la connaissance de la variation de la conductance du générateur photovoltaïque pour connaitre la position relative du MPP, pour appliquer une action du contrôle adéquate poursuivant le MPP (Figure III.5).

Ainsi, la conductance du panneau photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du générateur photovoltaïque comme indiqué ci-dessous :

$$G = \frac{I_{\text{pv}}}{V_{\text{pv}}} \quad \textbf{(}\text{III.5)}$$

Et la variation de la conductance peut être définie par :

$$\Delta G = \frac{\Delta I\text{pv}}{\Delta V\text{pv}} \quad \textbf{(}\text{III.6)}$$

Cette commande est basée sur le fais que la pente de la courbe caractéristique de puissance du panneau est nulle au MPP, positive a gauche et négative a droite.

Si$\frac{dP}{dV} = 0$au MPP**(**III.7)

Si$\frac{dP}{dV} > 0$à gauche de MPP**(**III.8)

Si$\frac{dP}{dV} < 0$à droite de MPP**(**III. 9)

Puisque :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V\frac{dI}{dV} = I + V\frac{\Delta I}{\Delta V} \textbf{(}\text{III.10)}$$

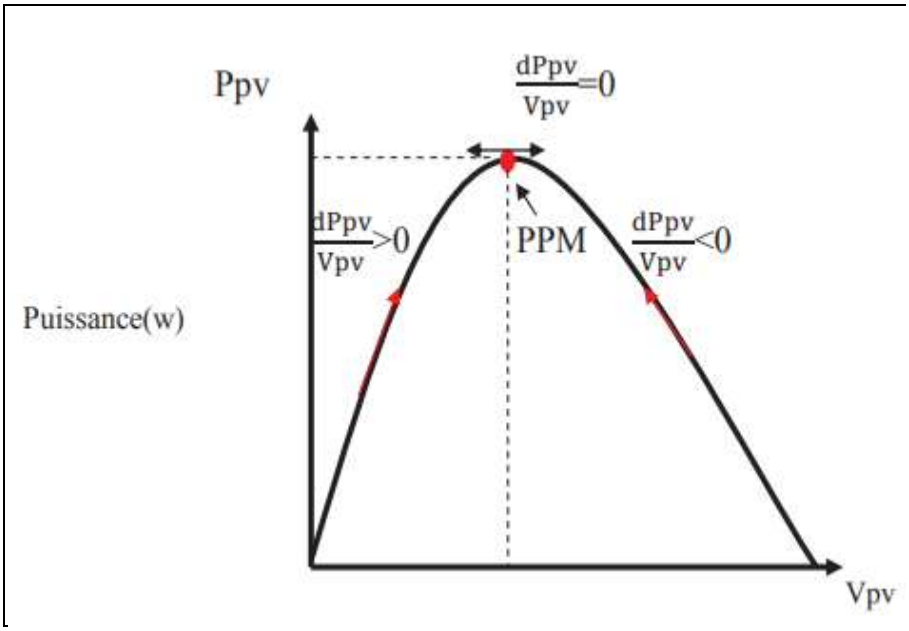


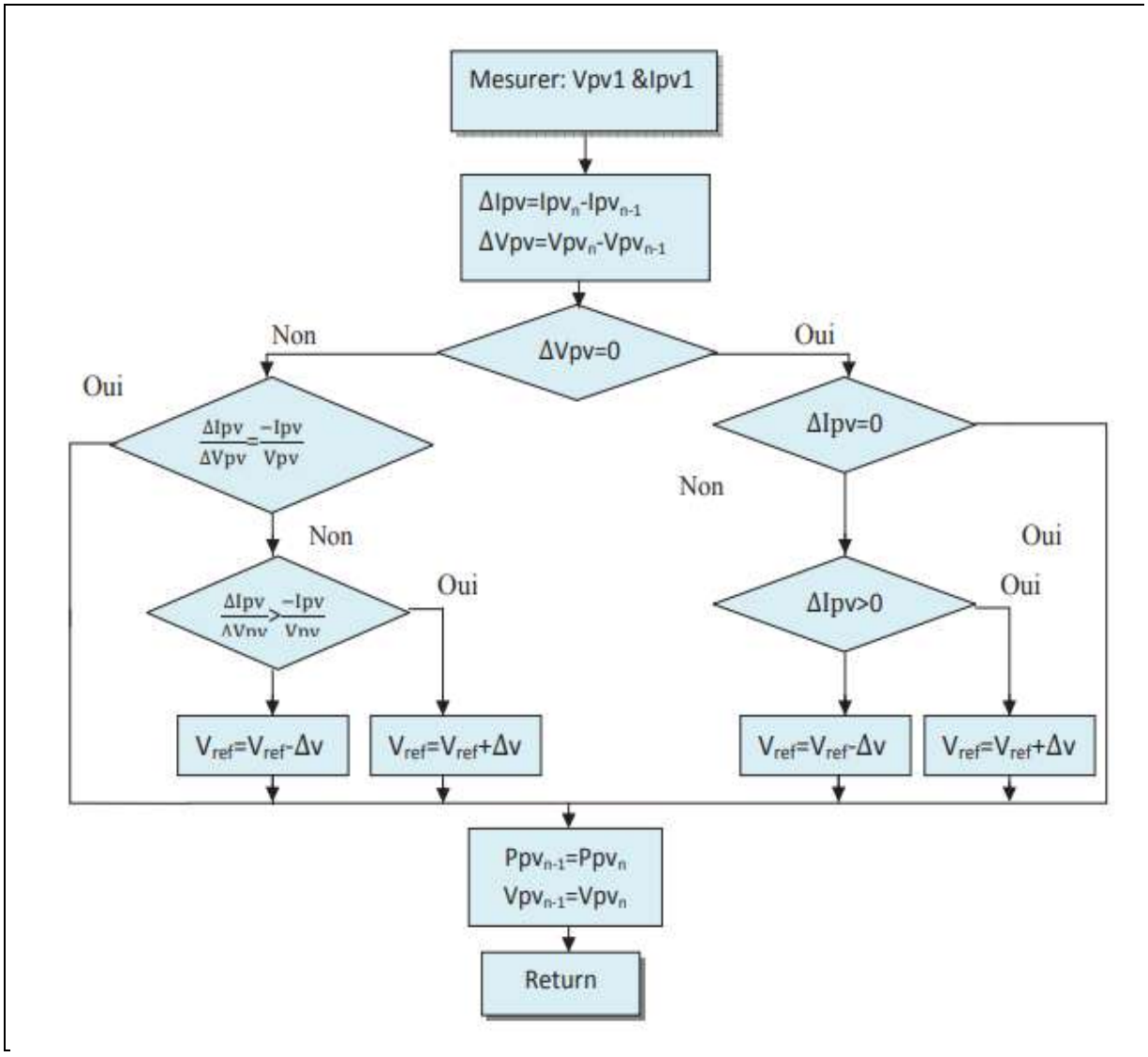
Figure III.5: Trajectoire par Incrémentation de Conductance.

Le MPP peut donc être poursuivi en comparant la conductance instantanée (G_{ci} = I/V) à l'incrémentation de la conductance , comme le montre l'organigramme de la Figure (III.6). V_{ref} est la tension de référence pour laquelle le panneau PV est forcé à fonctionner. Au Une fois que le MPP est atteint, le point de fonctionnement correspondant est maintenu, à moins qu'un changement dans ΔI est noté, indiquant un changement des conditions atmosphériques et donc du MPP. L'algorithme augmente ou diminue V_{ref} pour suivre le nouveau MPP. La taille de l'incrément détermine la rapidité de la poursuite du MPP. Une poursuite rapide peut être obtenue avec un incrément plus grand, mais le système ne pourrait pas fonctionner exactement au MPP et oscille autour de celui-ci. Il y a donc, comme pour la méthode P&O, un compromis entre rapidité et précision. Cette méthode peut être améliorée en amenant le point de fonctionnement près du MPP dans une première étape, puis d'utiliser l'algorithme IncCond pour suivre exactement le MPP dans une deuxième étape. Généralement, le point de fonctionnement initial est réglé pour correspondre à une charge résistive proportionnelle au rapport de la tension de circuit ouvert V_{CO} sur le courant de court-circuit I_{CC}. Ces deux solutions assurent que le vrai MPP est poursuivi s'il existe plusieurs maxima locaux. Une manière moins évidente pour effectuer la méthode IncCond est d'utiliser la conductance instantanée et l'incrémentation de la conductance pour générer un signal d'erreur.

$$e = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \text{(III.11)}$$

La mesure de la tension et du courant instantanés du panneau PV nécessite deux capteurs. La méthode IncCond se prête parfaitement à la commande par microcontrôleur, qui

peut garder en mémoire les valeurs précédentes de la tension et du courant. Les tensions et courants du panneau sont monitoires, de telle manière que le contrôleur peut calculer la conductance et la conductance incrémentale, et décider de son comportement. Cet algorithme implique un nombre important de calcule. Commande MPPT IncCond est illustré dans la Figure (III.6).



FigureIII.6 : Organigramme du MPPT incrément de conductance. . [37]

III.7.2 MPPT en logique floue, présentation du système

III.7.2.1Principe de la logique floue

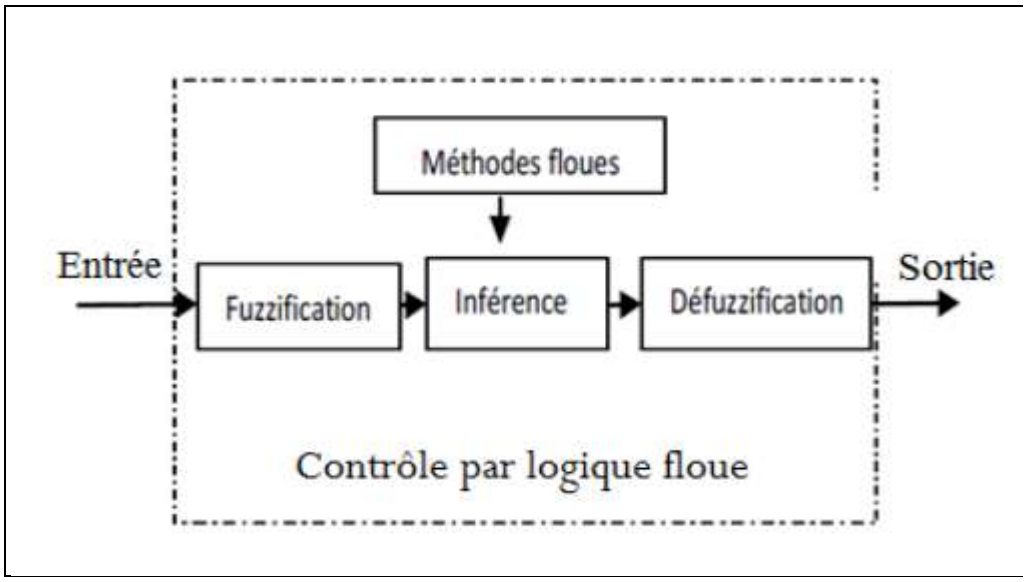
Récemment, la commande par logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point maximum de puissance MPPT, cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste et relativement simple à élaborer telle ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle àréguler. La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes, qui

sont : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification. Étant de savoir avec quels degrés d'appartenance. Plusieurs méthodes peuvent répondre à cette question. De notre part, nous avons utilisé la méthode MAX-MIN. Enfin, il nous faut réaliser l'opération inverse de la fuzzification, ici nous devons calculer une valeur numérique compréhensible par l'environnement extérieur à partir d'une définition floue est c'est le but de la défuzzification.. [31]

A l'état actuel, les deux domaines d'applications de la logique floue qui deviennent plus en plus importants sont :

- La conception de régulateurs pour des procédés difficilement modélisables.
- La conception de régulateurs non linéaires pour des procédés modélisables.

Pour notre part, nous utiliserons la logique floue pour améliorer les performances du contrôle de MPPT(Figure III.7).



FigureIII.7 : Le principe de la commande a logique floue.

- **La fuzzification :** permet de rendre floues les variables d'entrée. Une étape préliminaire consiste à définir un intervalle de variation maximale autorisée pour les variables d'entrées. Le but de la fuzzification est de transformer les variables d'entrée en variables linguistiques ou variables floues. Dans notre cas, on a deux variables d'entrées qui sont l'erreur E(k) et la variation d'erreur CE à l'instant k qui sont définis comme suit : V_{PV} et I_{PV}.

Les variables E et là ΔE sont exprimés comme suit :

$$E(n)=\frac{P(n)-P(n-1)}{V(n)-V(n-1)} \qquad \text{(III.12)}$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1) \quad \text{(III.13)}$$

- **L'inférence** : est une étape qui consiste à définir un rapport logique entre les entrées et la sortie ;
- **Défuzzification :** La défuzzification peut être fonctionné normalement par deux algorithmes:
    1. La méthode de critère maximale (MCM) ;
    2. La méthode Centre une gravité.

Enfin, il nous faut réaliser l'opération inverse de la fuzzification.

Dont ce qui suit, on va détailler les étapes de réalisations du Contrôleur floue.

III.7.2.2Description du régulateur floue

Le régulateur floue, proposé pour l'optimisation du système, est représenté par la Figure (III.8).

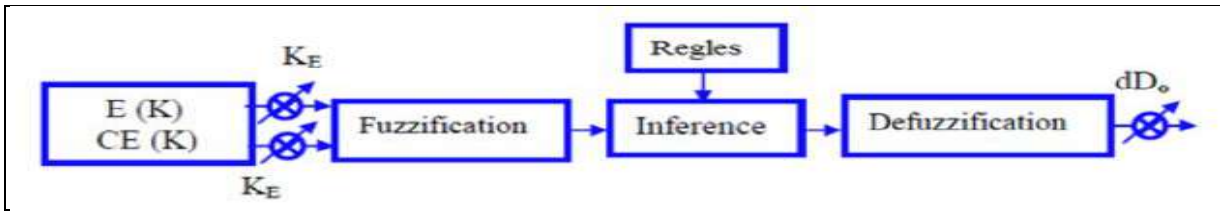


Figure III.8 : Schéma bloc d'une logique floue.

Dans le cas du réglage par la logique floue, on utilise dans ce cas, des formes trapézoïdales et triangulaires pour les fonctions d'appartenance. Bien qu'ils n'existent pas de règles précises pour la définition des fonctions d'appartenance, quelques directives générales sont données, afin de conduire à un choix convenable (Figure III.9).. [31]

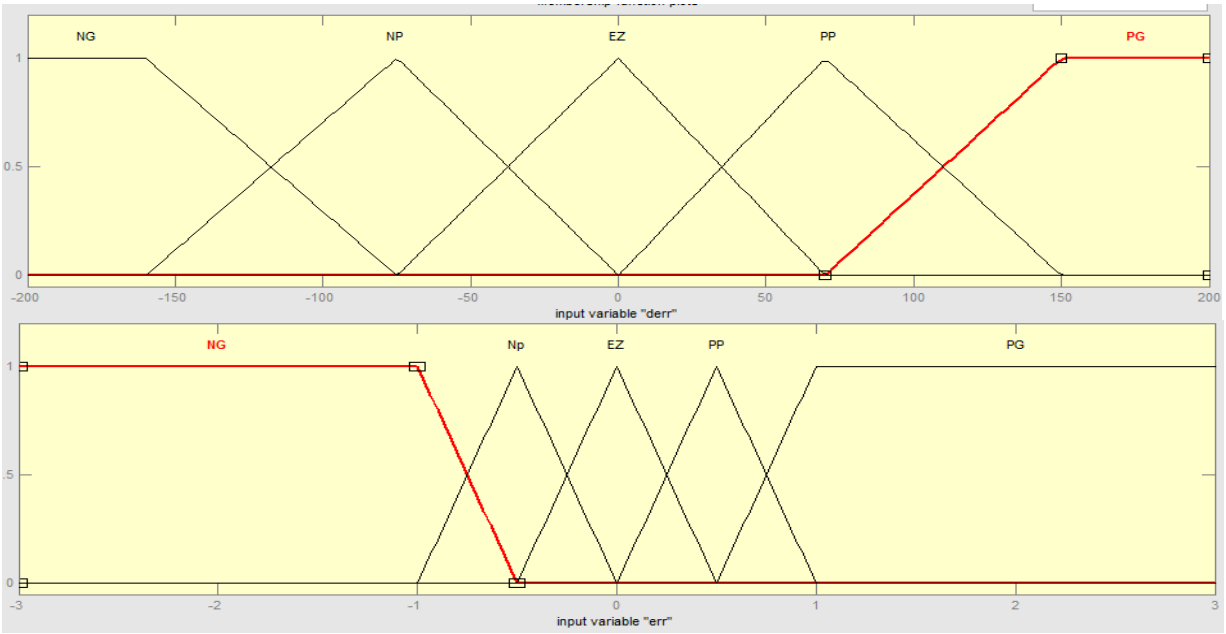


Figure III.9 : Fonction d'appartenance de chacune des variables linguistiques.

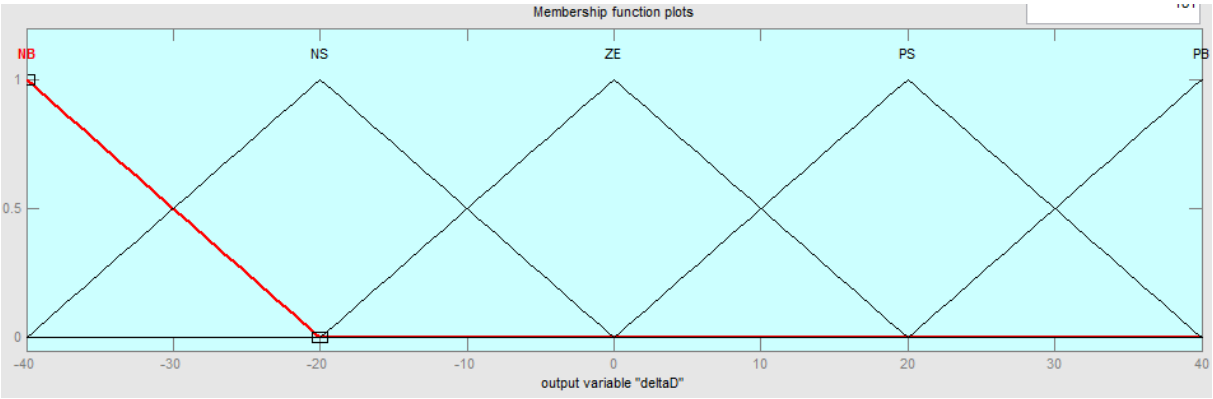


Figure III.10 : Fonction d'appartenance de la variable de sortie D

Les règles floues permettent de déterminer le signal de sortie du régulateur en fonction des signaux d'entrée. Elles relient le signal de sortie aux signaux d'entrée par des conditions linguistiques prenant en compte l'expérience ou le savoir-faire acquis par un opérateur humain.

Ces considérations conduisent à adopter une table de décision anti-diagonale, résumant les règles choisies ; cette table qui Figure dans le Tableau (III.1).

NB : Negative BIG

NP : Negative Small

EZ :Equal Zero

PB : Positive Big

PS :Positive Small

TableauIII.1 : Les règles de contrôle FUZZY.

ΔE / **E**	**NB**	**NS**	**ZE**	**PS**	**PB**
NB	**ZE**	**ZE**	**NB**	**NB**	**NB**
NS	**ZE**	**ZE**	**NS**	**NS**	**NS**
ZE	**NS**	**ZE**	**ZE**	**ZE**	**PS**
PS	**PS**	**PS**	**PS**	**ZE**	**ZE**
PB	**PB**	**PB**	**PB**	**ZE**	**ZE**

III.7.3Autres méthodes

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

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

III.8 Conclusion

Les résultats obtenus avec un Contrôleur flou (technique non conventionnelle) sont meilleurs que ceux obtenus avec des algorithmes de contrôle conventionnels (P&O). Ainsi le contrôle par logique floue peut être vu comme un pas vers un rapprochement entre le contrôle mathématique précis et la prise de décision humaine. Ce dernier a prouvé qu'il a de meilleures performances, temps de réponse rapide et erreur à l'état permanent très faible, et qu'il est robuste aux différentes variations des conditions atmosphériques.

Chapitre (IV)

Simulation d'un système photovoltaïque raccordé au réseau

IV.1. Introduction

Dans le chapitre II nous avons fait une modélisation des différents modèles de panneaux photovoltaïques. Nous allons réaliser maintenant dans ce chapitre, on présentera une étude de simulation d'un système photovoltaïque raccordé au réseau adapté par une commande MPPT numérique . Ce système est comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur « boost », une commande MPPT :

- Algorithme de contrôle de MPPT Perturbation et Observation (P&O) ;
- Algorithme de contrôle de MPPT Incrément de conductance (IncCond) ;
- Algorithme de contrôle de la logique floue(FL) .

Le contrôle de la puissance, ainsi que la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink.

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

IV.2.Simulation numérique

Différentes simulations sont effectuées pour évaluer les performances du système. Les différentes parties du système (panneaux photovoltaïques, convertisseur DC/DC, convertisseur DC/AC,et réseau) sont modélisées par des blocs séparés puis reliés entre eux d'une manière cohérente. les méthodes choisie

- Perturbation et Observation (P&O).
- IncCond
- Logique flou

IV.3. caractéristiques de panneau :

Le Schéma block qui représente la simulation sur matlab est représenté dans (la figure .VI.1)

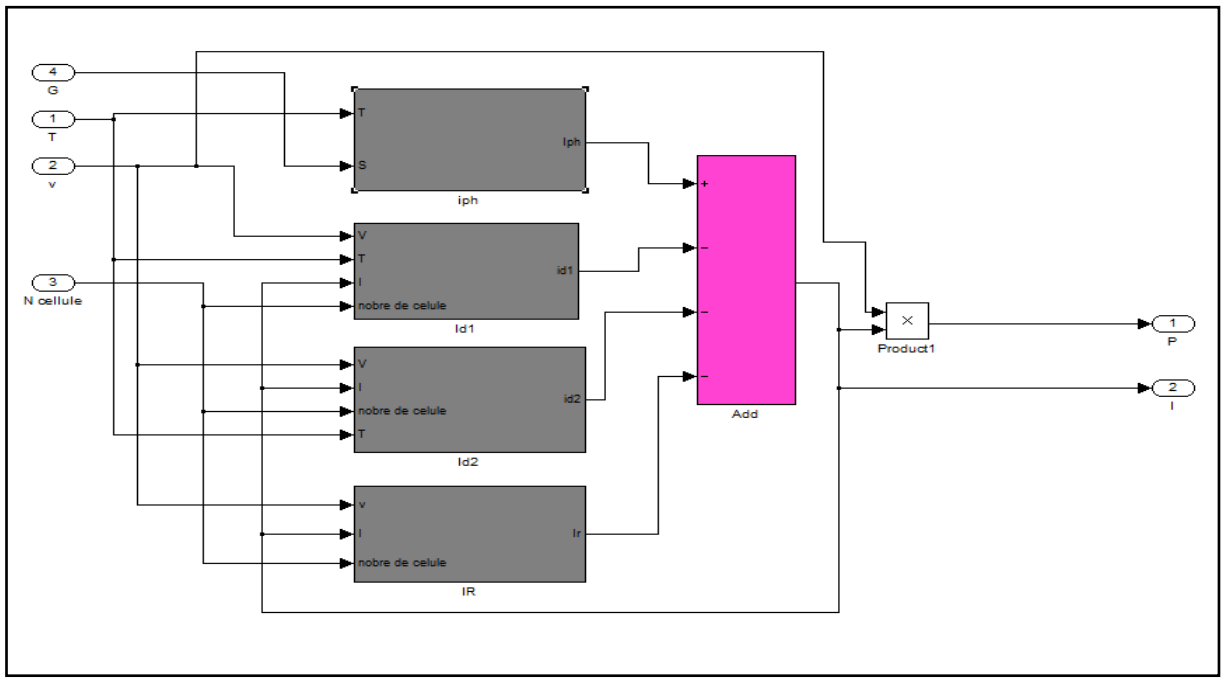


Figure.IV 1: Schéma block Module photovoltaïque avec MATLAB

La simulation d'un générateur PV sous les conditions standard (E=1000 w/m² et T=25°), a donné les courbes présenté dans les figures suivants :

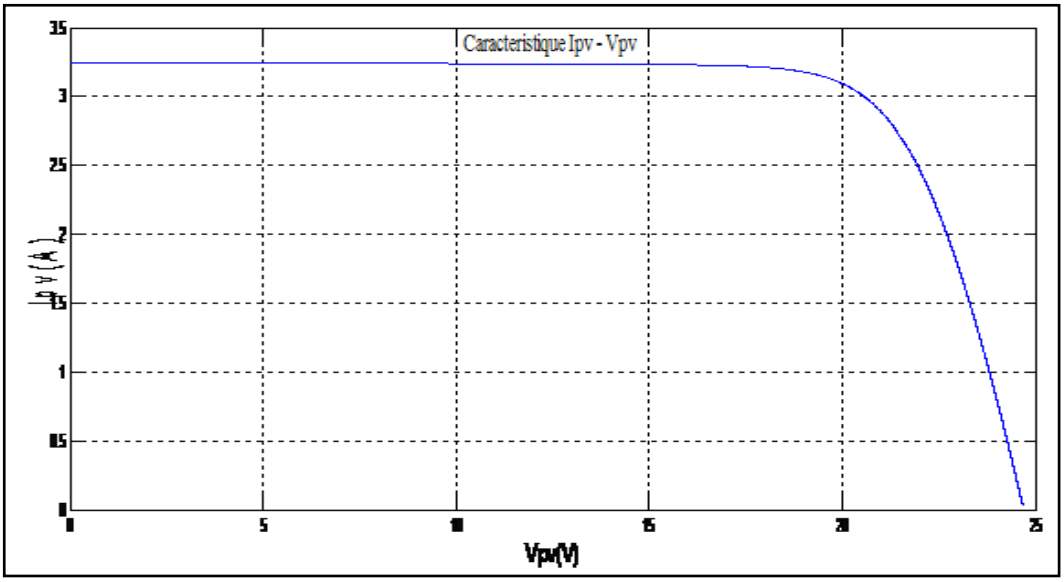


Figure IV.2. La courbe Ipv=f(Vpv).

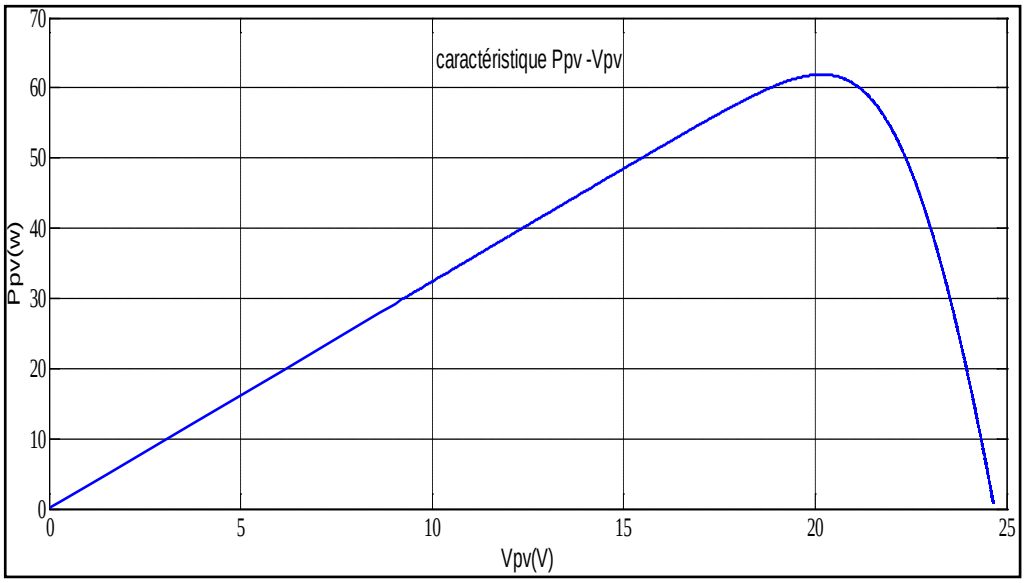


Figure IV.3 . La courbe Ppv=f(Vpv).

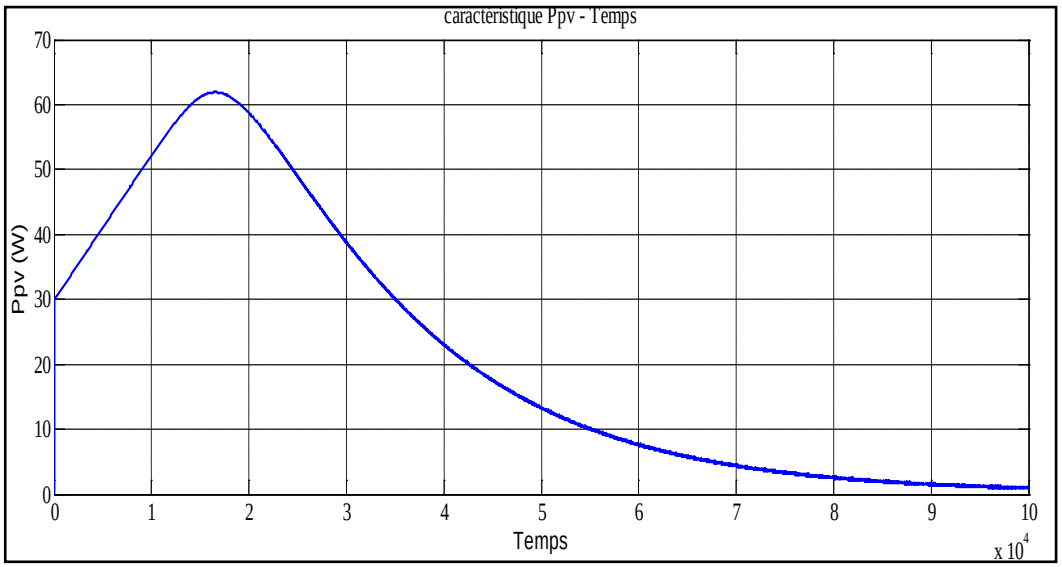


Figure IV.4. La courbe Ppv=f(t).

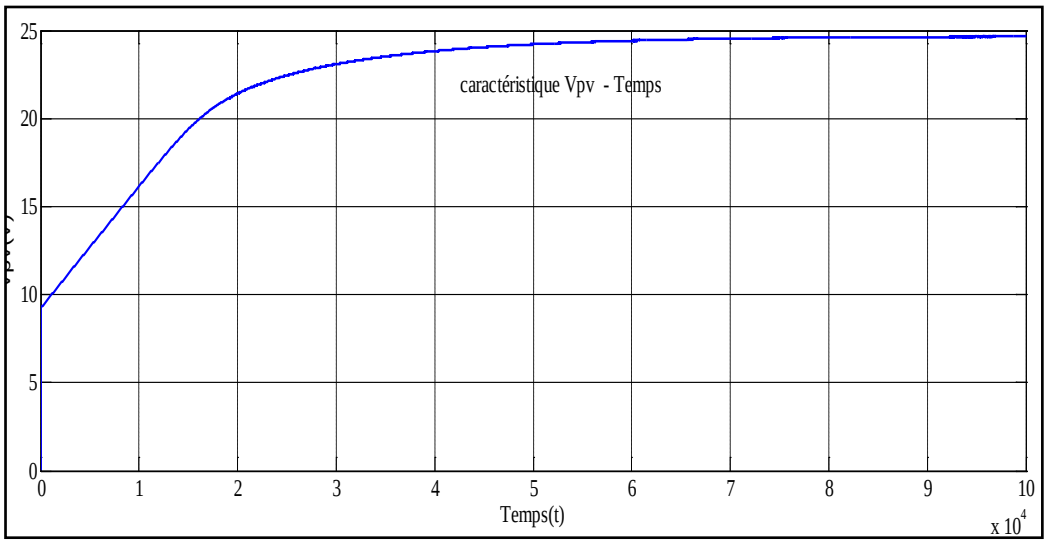


Figure IV.5. La courbe du Tension(Vpv)=f(t).

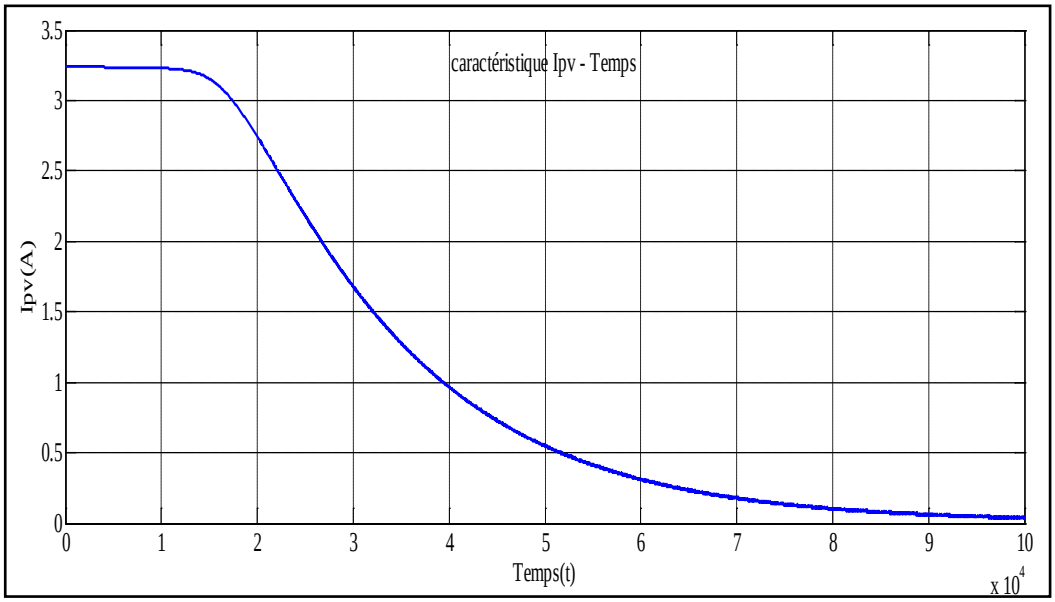


Figure IV.6. La courbe Ipv=f(t).

IV.4. Panneau photovoltaïque avec Hacheur survolteur

Le block de la simulation est représenté dans (la figure.VI.7)

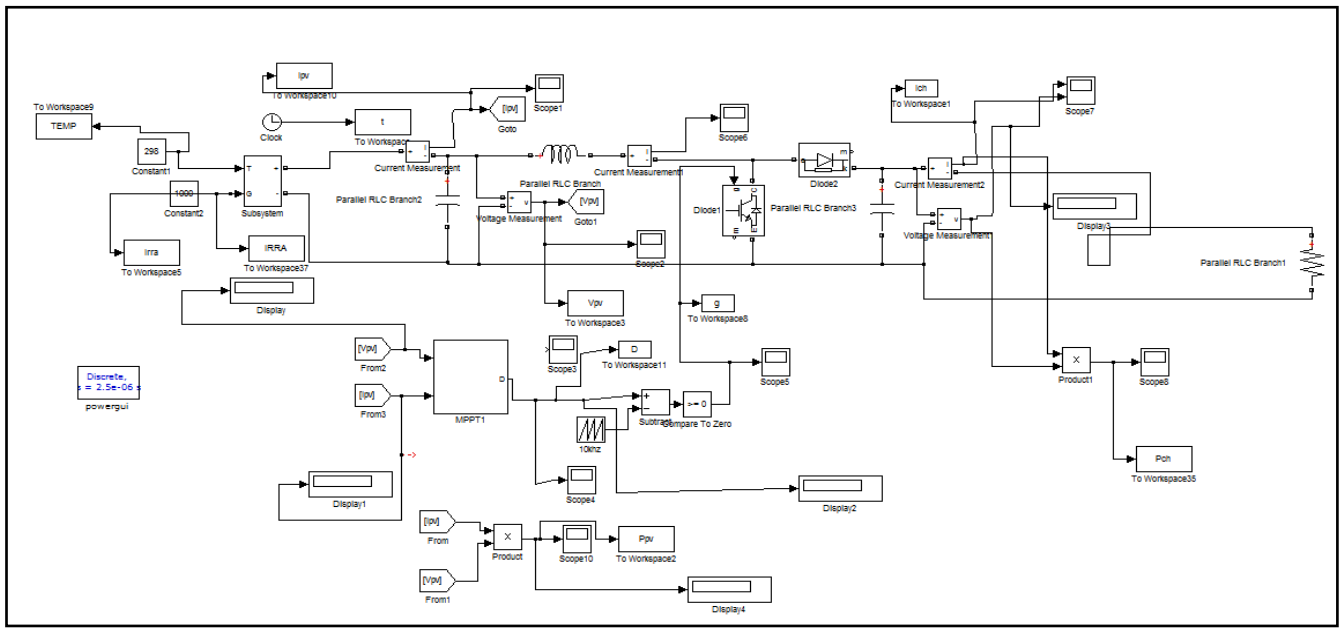


Figure.IV.7: simulation d'un panneau photovoltaïque avec hacheur survolteur

IV.5. Simulation du générateur (GPV) à éclairement et température variable :

Pour constater l'influence des conditions externes de l'éclairement et de la température (E,T) sur la caractéristique (I-V) (P-V), nous avons adopter la méthodes suivante :

1- Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on à fixé la température a (T=25°) et on fait varier l'éclairement dans une gamme suffisante.

On à varier l'éclairement (E) 200 ; 400 ; 600 ; 800 ; 1000 ; avec un pas de 200, la caractéristique (P=f(V)) et la caractéristique (I=f(V)) sont données par (la figure VI.5)

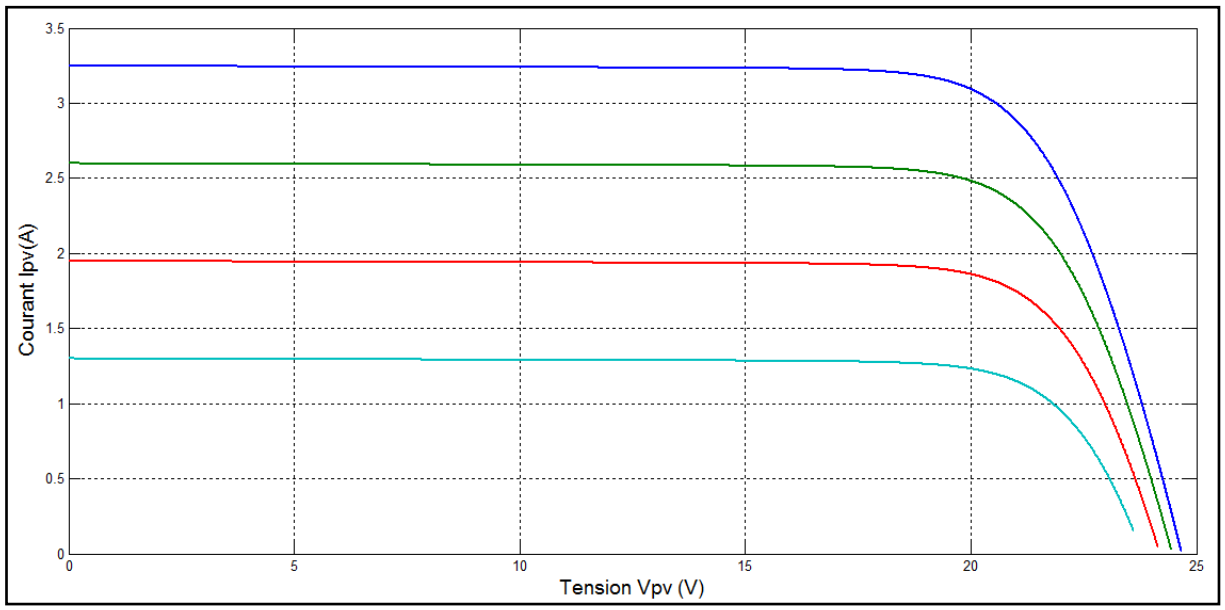


Figure.IV.8: Influence de variation de l'éclairement sur les caractéristiques(Ipv=f(Vpv) à 25°

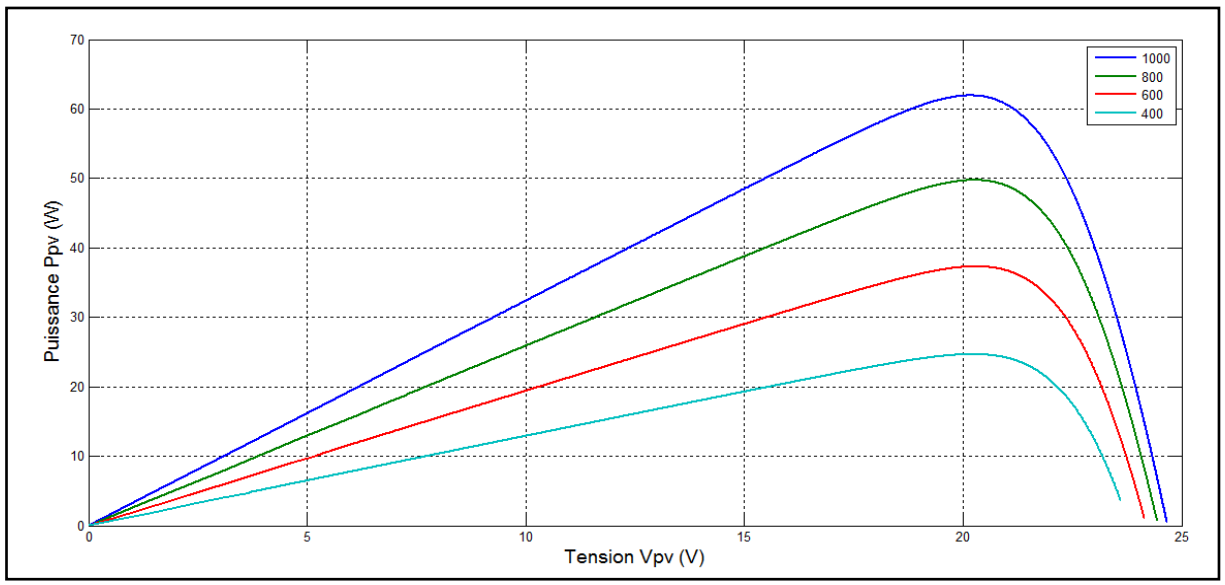


Figure.IV.9: Influence de variation de l'éclairement sur les caractéristiques(Ppv=f(Vpv) à 25°

D'après ces résultats On remarque une forte diminution du courant de court-circuit par rapport l'éclairement (E) et une faible diminution de tension de circuit ouvert.

On remarque aussi que l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension de circuit ouvert de GPV.

1- Pour un éclairement constant (E=1000 w/m²), on varie la température afin de voir l'influence de ce dernier par rapport aux caractéristique de générateur PV.

En faisant varier la température de 25c° a 65c°) avec pas de 10c°

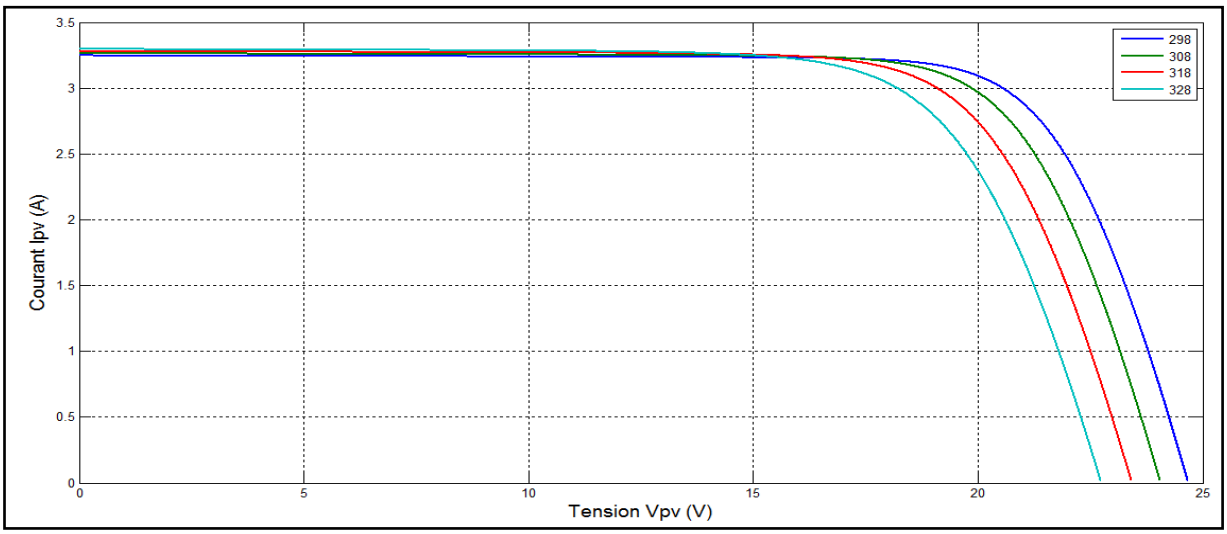


Figure.IV.10: Influence de variation de Température sur les caractéristiques (Ipv=f(Vpv) à 1000 W/m²

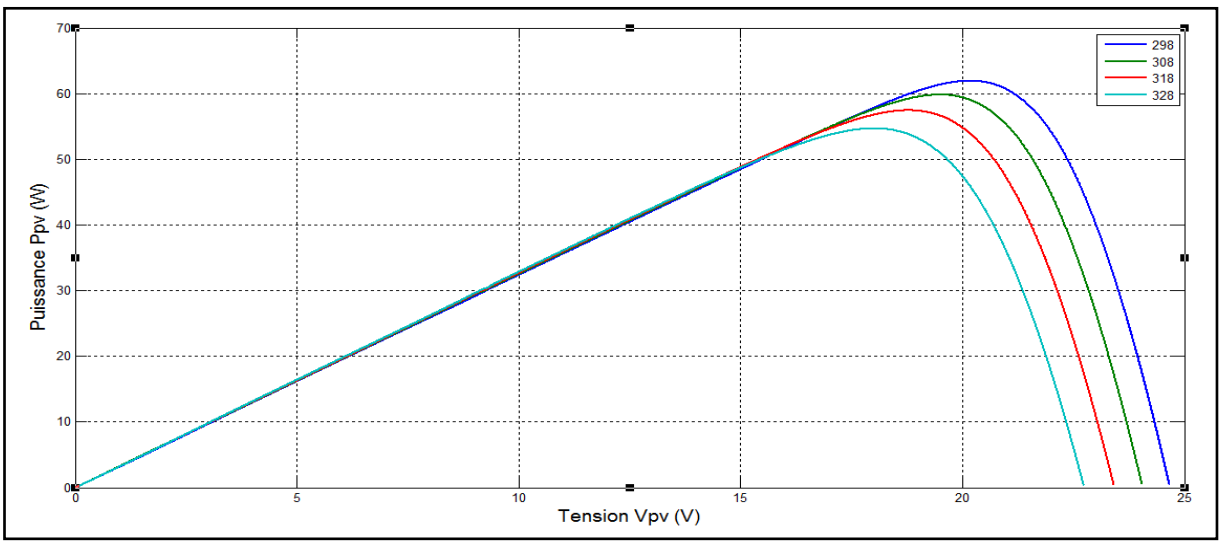


Figure.IV.11: Influence de variation de Température sur les caractéristiques (Ppv=f(Vpv) à 1000 W/m²

IV.6. Simulationdu système photovoltaïque adapté par les Trois commandes MPPT (P&O, FL, IncCond)

Dans cette simulation, nous proposons quatre tests différents (sous conditions standards, avec un changement d'irradiation, et un changement de température, on plus un changement de température et d'irradiation à la fois).

IV.6.1.Conditions standards (T=25°C & G=1000W/m2)

Les figures suivantes représentent la simulation sous logiciel (MATLAB/Simulink) des quatre commandes de fonctionnement du générateur photovoltaïque (P(V),I(V),P(t), I(t) V(t) D(t)) sous les conditions standards.

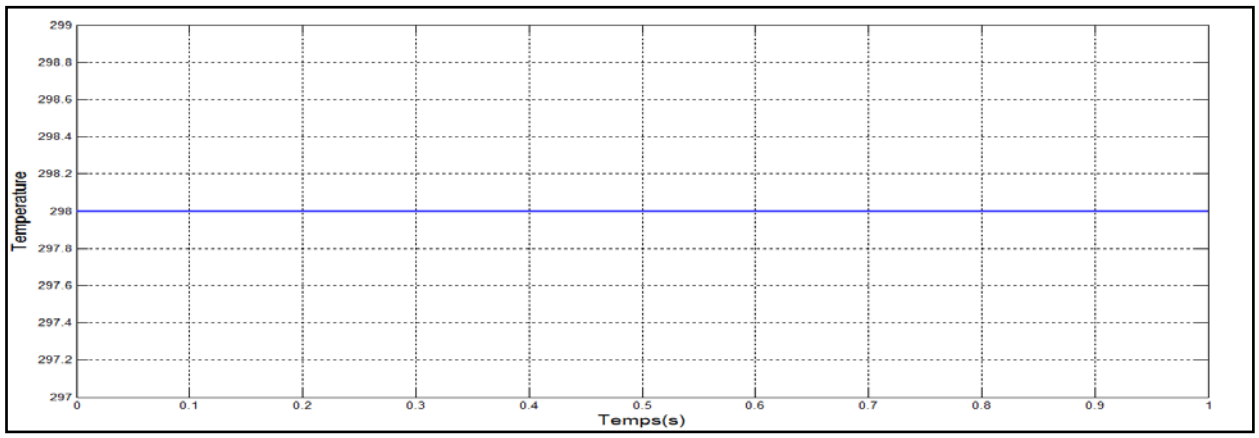


Figure IV.12 : Température Constantes.

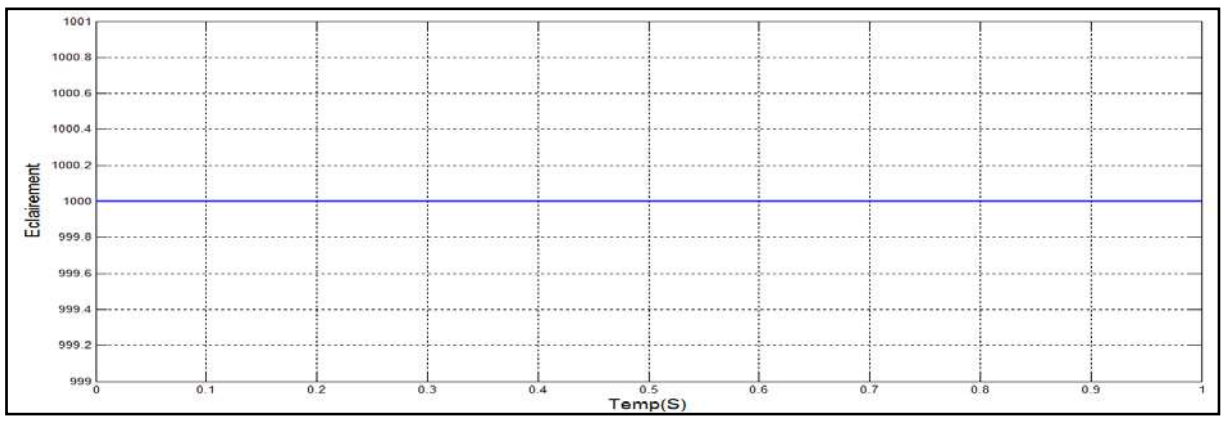


Figure IV.13: Irradiation Constantes.

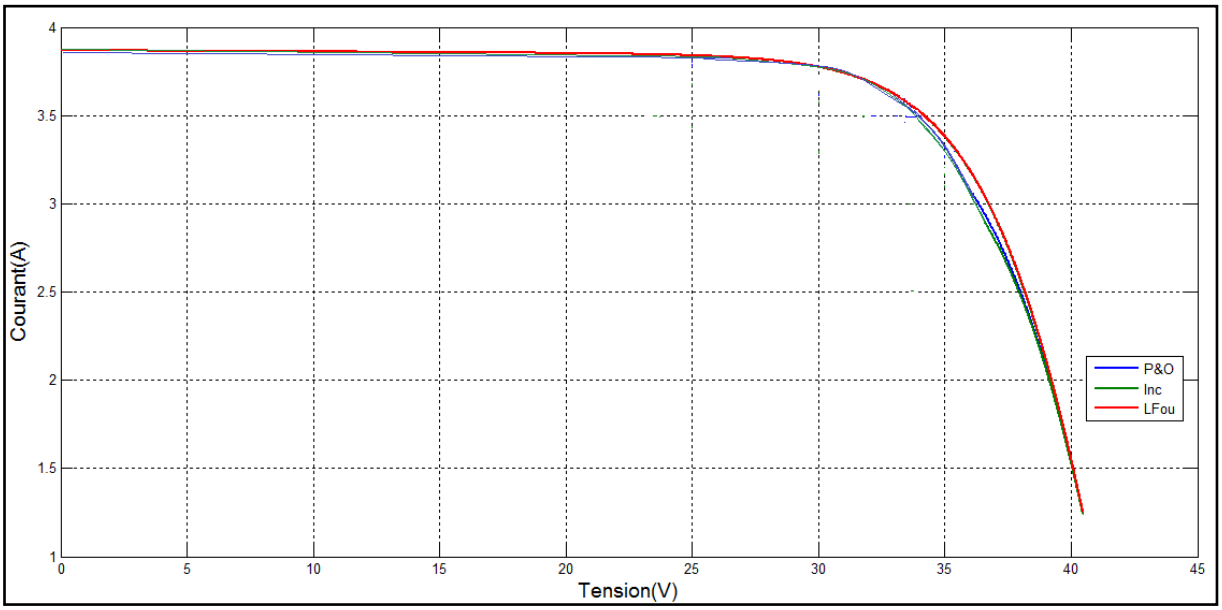


Figure IV.14. La courbe Ipv=f(Vpv).

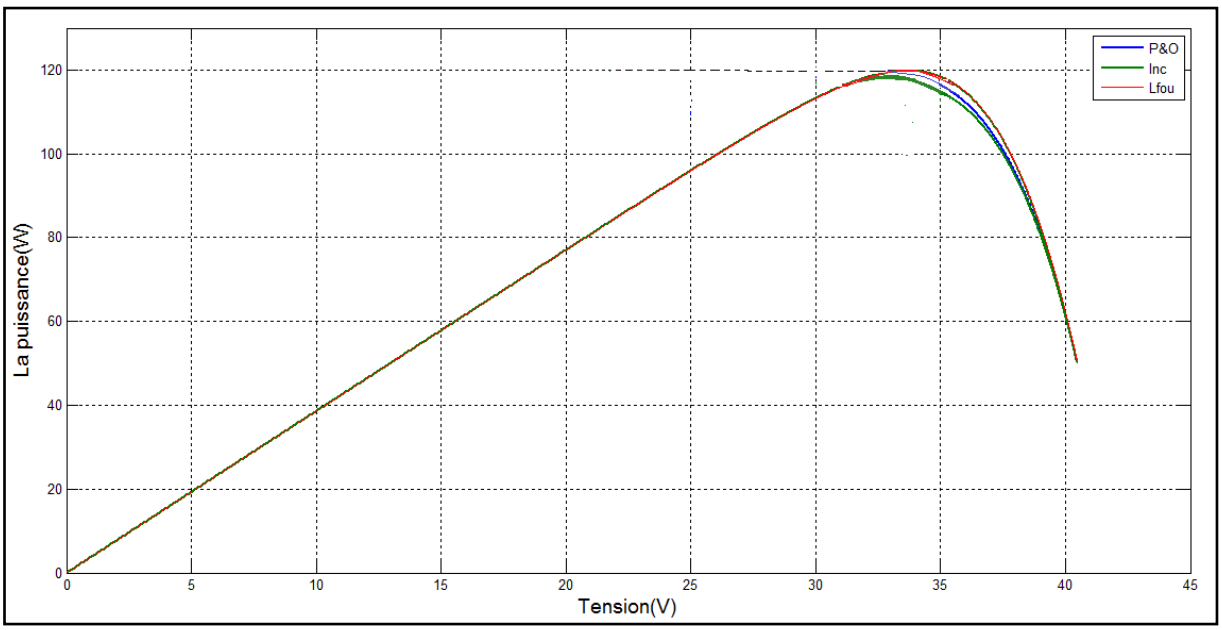


Figure.IV 15: La courbe Ppv=f(Vpv).

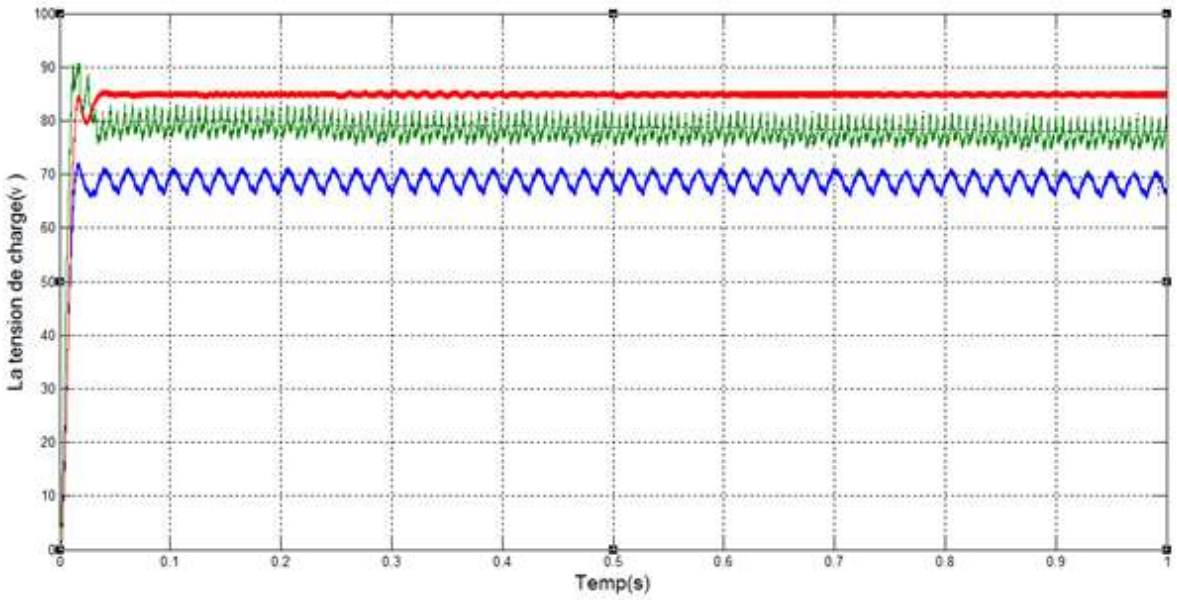


Figure.IV.16 : courbe de Puissance de charge Vch=f(t)

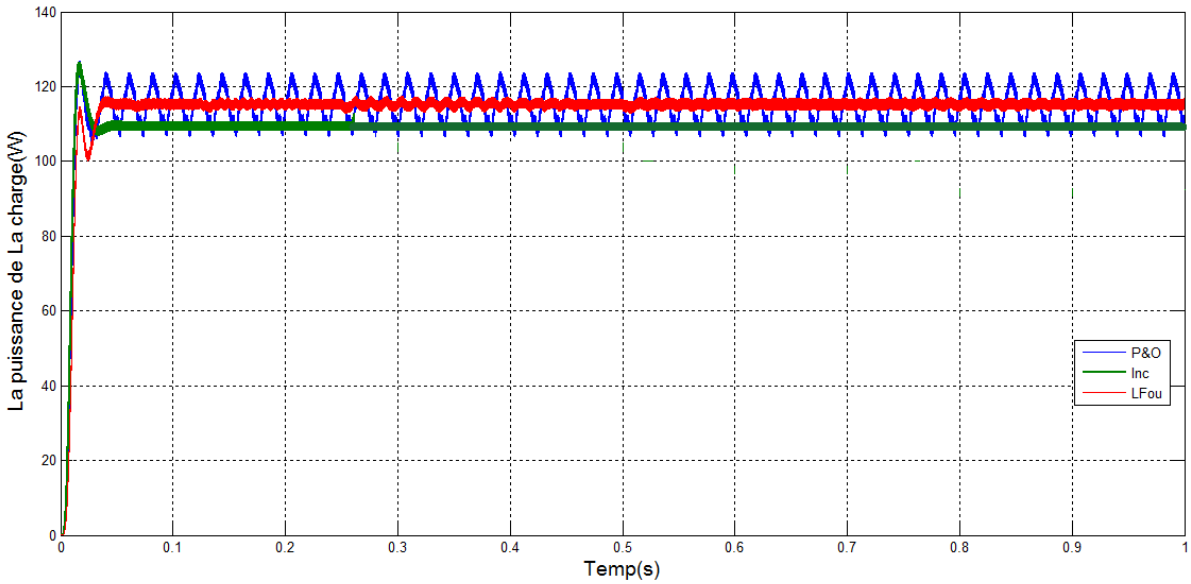


Figure.IV.17 : courbe de Puissance de charge

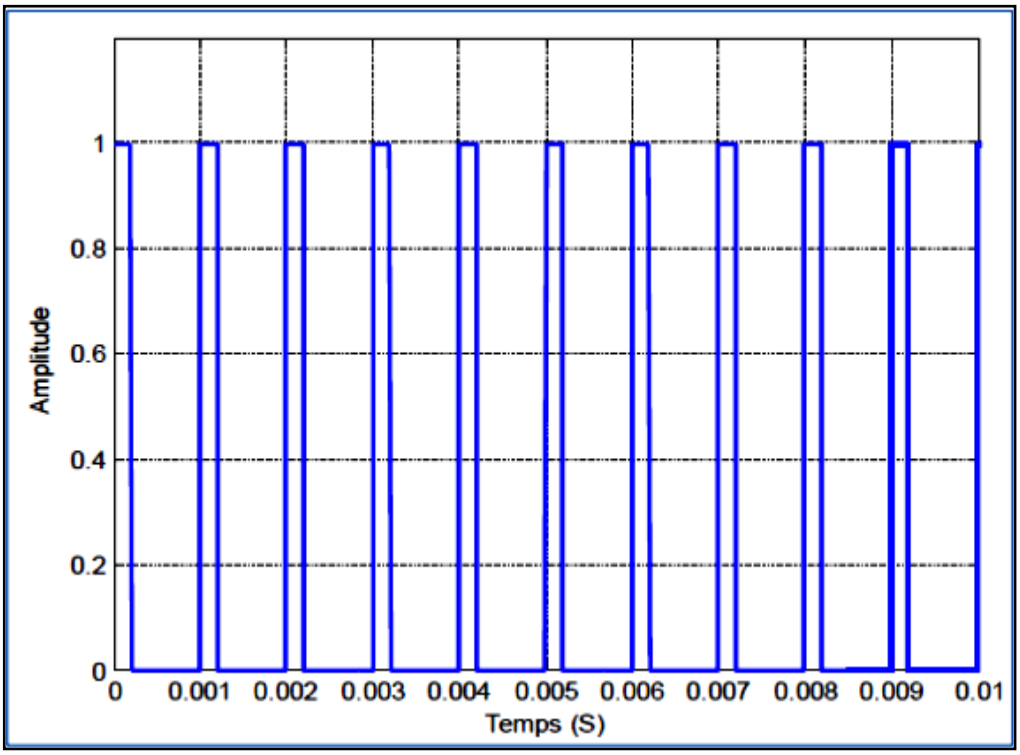


Figure IV.18 : Signal G.

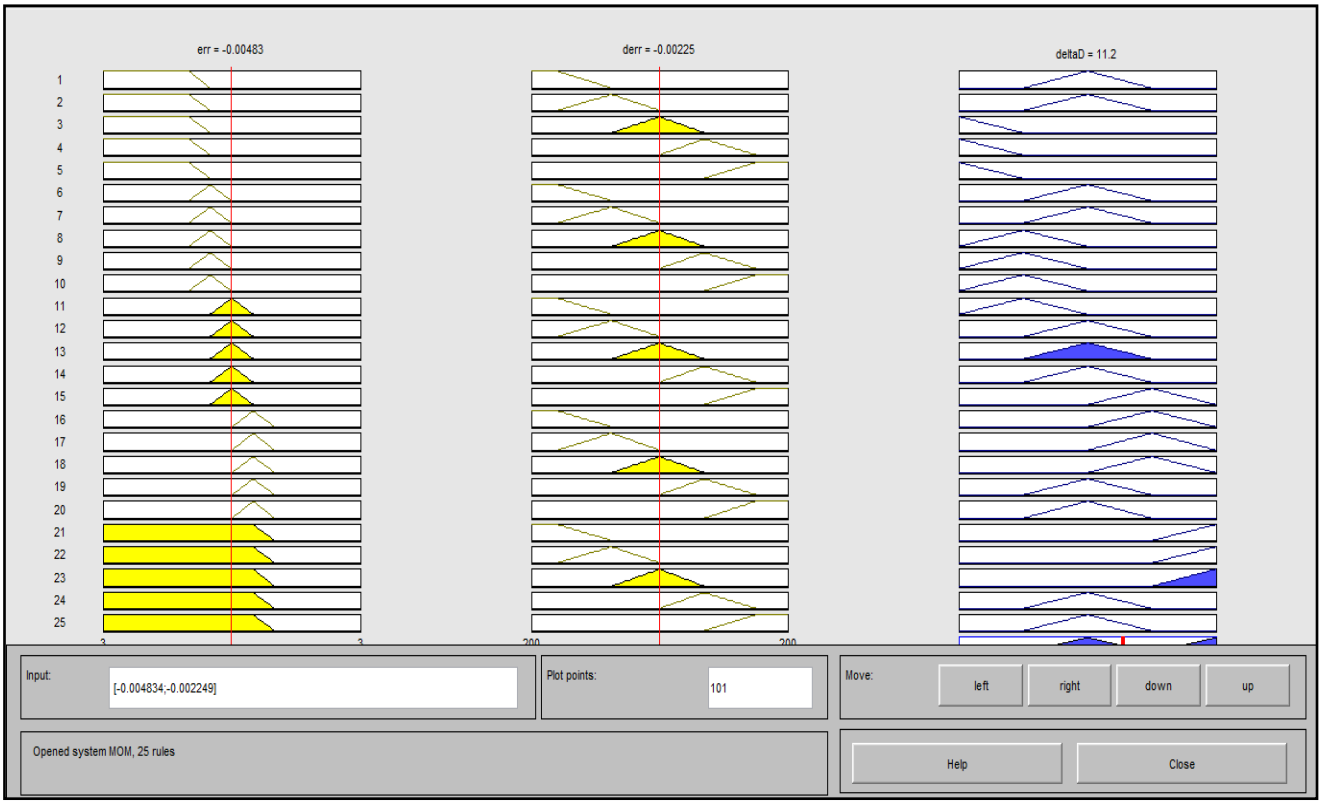


Figure IV.19 : Visualisateur des règles.

Les figures de simulation précédentes montrent que le système photovoltaïque converge vers les valeurs optimales.

IV.7 Resultas de simulation de Vabc et THD

IV.7.1 Resultas de cmmande P&O

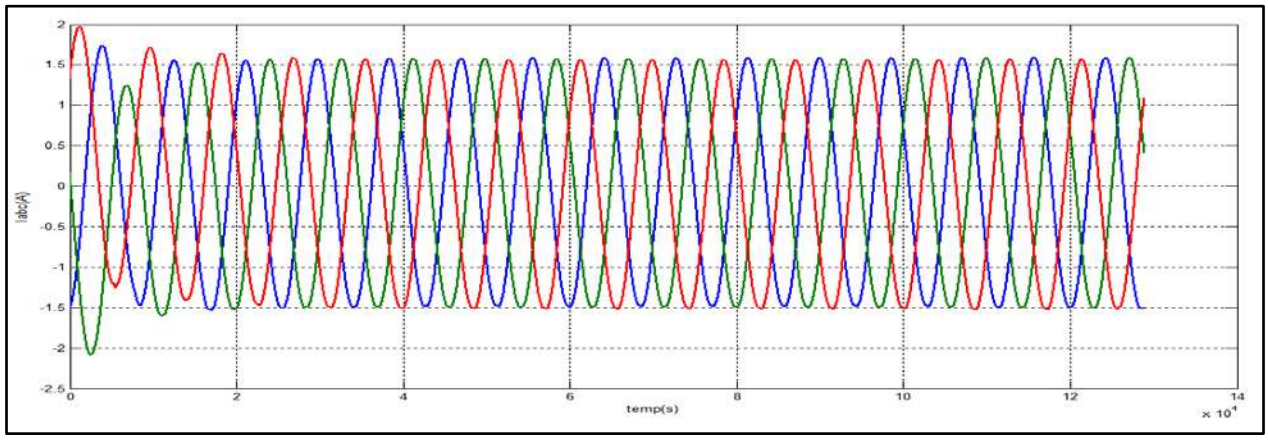


Figure.IV.20 : courbe de tension Vabc de réseau

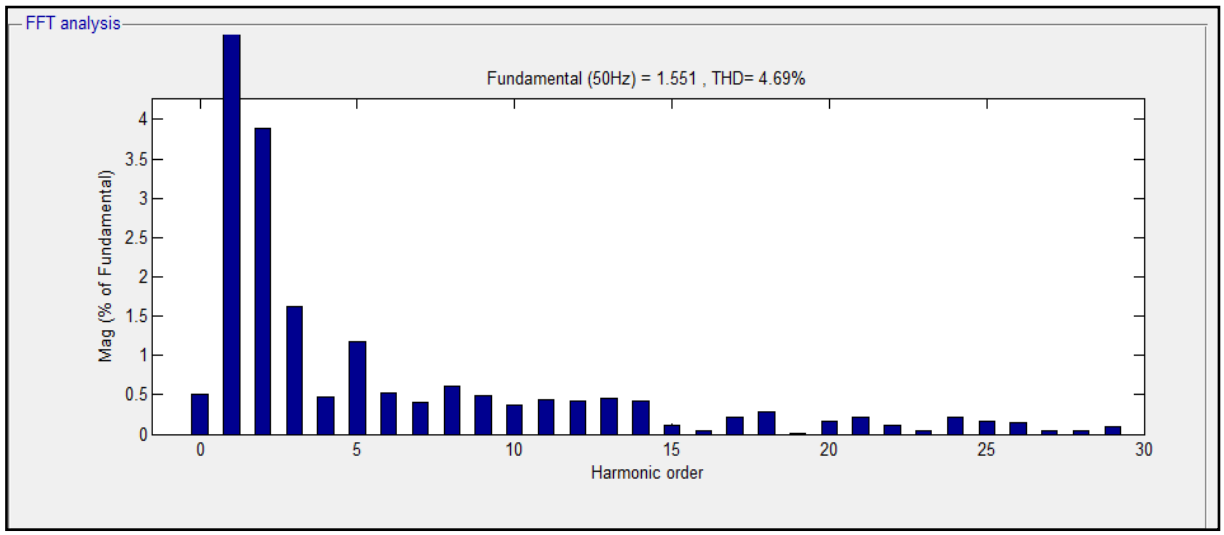


Figure.IV.21: THD de la tension

IV.7.2 Resultas de cmmande INC

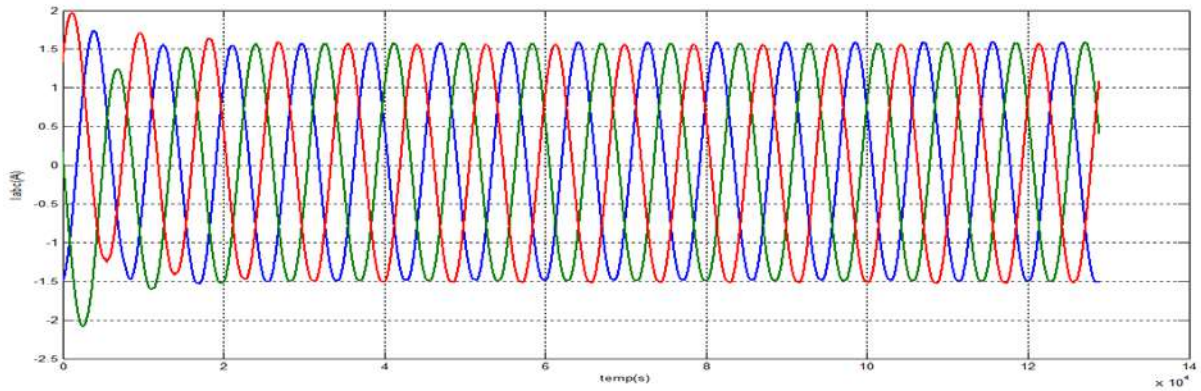


Figure.IV.22 courbe de tension Vabc de réseau

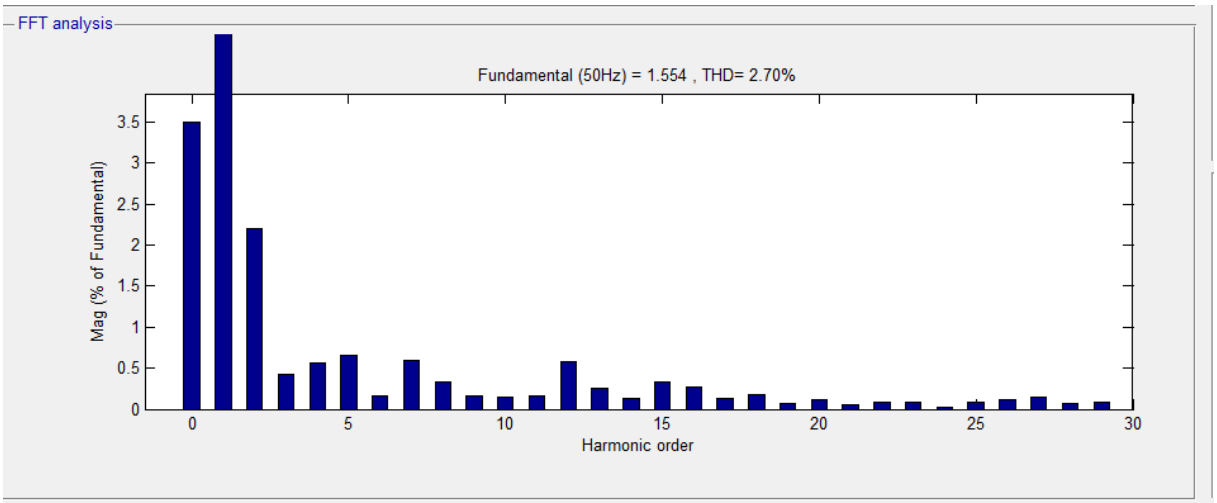


Figure.IV.23: THD de la tension

IV.7.3Resultas de commande logique floue

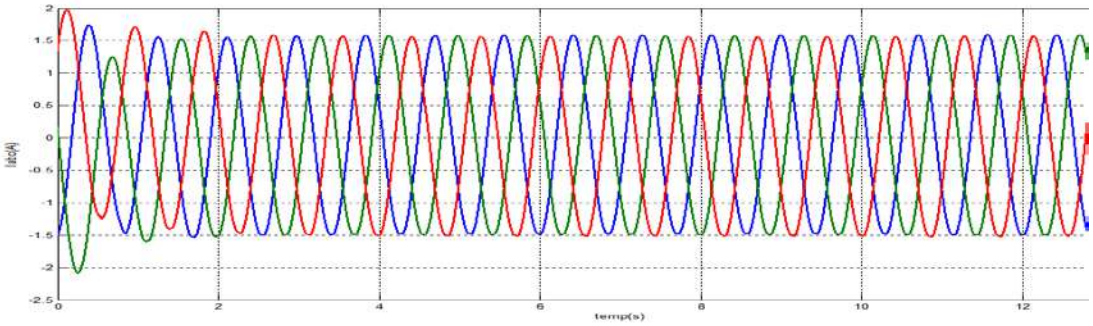


Figure.IV.24: courbe de tension Vabc de réseau

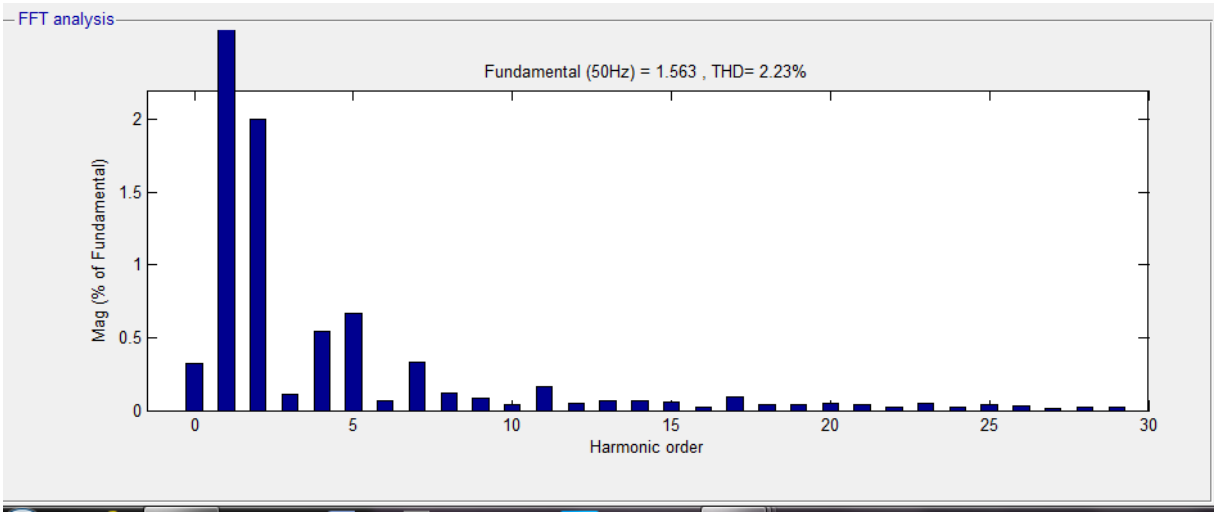


Figure.IV.25: THD de la tension

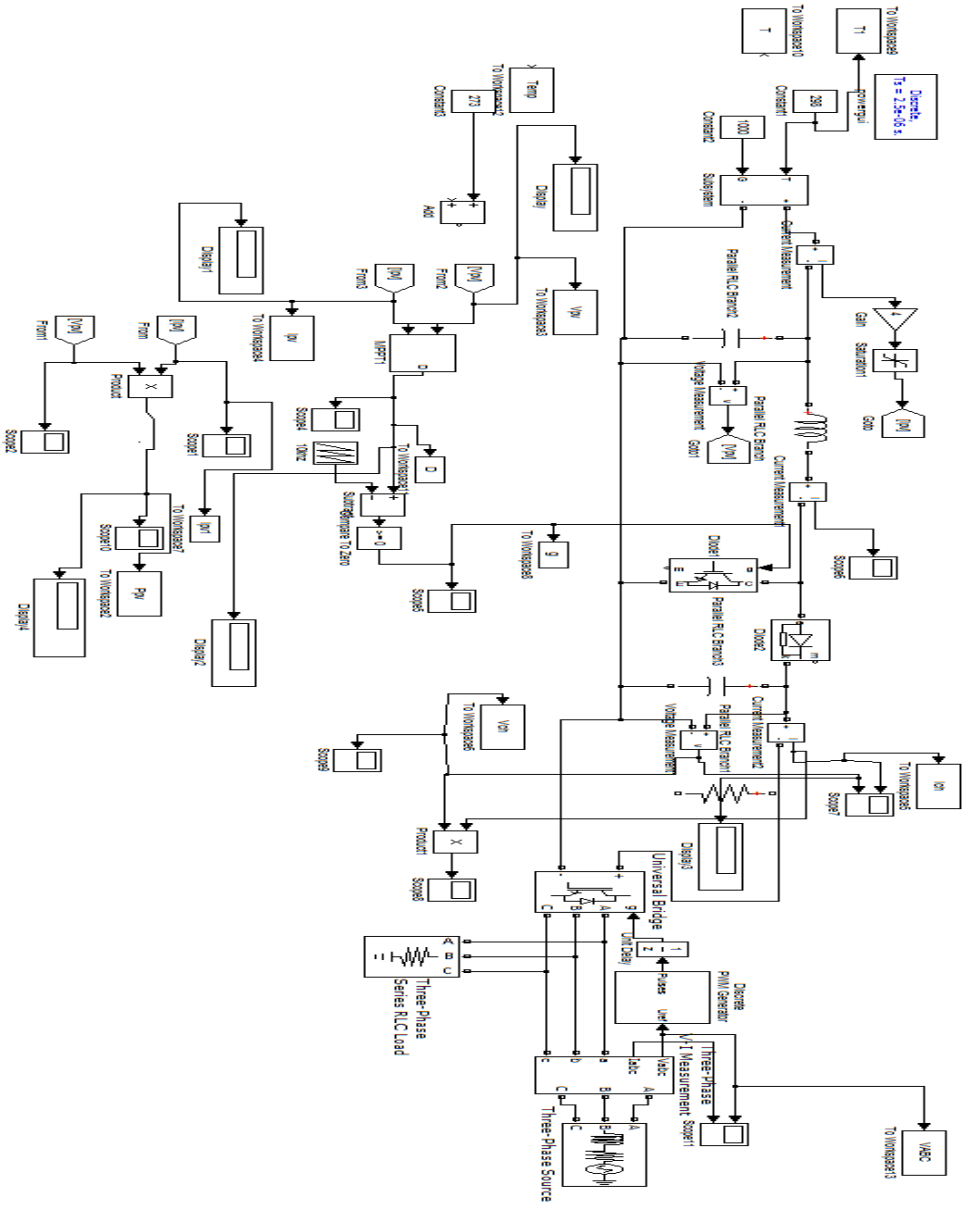


Figure.IV.26: Schéma bloc du systeme

VI.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait la simulation de chaque 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 (mppt) et l'onduleur commandé par MLI et en fin le réseau électrique. Les résultats obtenus de courant et tension et la courbe de point fonctionnement maximal par la simulation sont très suffisants et satisfaisante, et se rapprochent à ceux présentés dans la théorie.

L'annexe 1 : paramètres du convertisseur boost :

Les paramètres du convertisseur boost est :

- Vpv : 33 .68 V
- V cha : 89.24 V
- Puissance maximale PV : 120 W
- Fs : 10 kHz
- Maximum inductor current ripple: 10 %

L'équation de Calcul de l inducteur L

$$L \geq \frac{V_{cha} . D_m . (1 - D_m)}{f_s \left| \Delta I_{Lripple} \right|} \qquad (v.1)$$

L'équation de Calcul de raport de cyclique

$$\frac{V_0}{V_{pv}} = \frac{T}{t_{off}} = \frac{1}{1 - D} \qquad (v.2)$$

$$D = 1 - \frac{V_{pv}}{V_{cha}} \qquad (v.3)$$

$$D = 0.622$$

L'équation de calcul de le courant de sortie de l'hacheur

$$I_{cha} = \frac{P_{cha}}{Vcha} \qquad (v.4)$$

Le courant de sortie de l'hacheur

$$I_{cha} = \frac{120}{89.24} = 1.334 \text{ A}$$

La résistance charge est

$$R_{cha} = \frac{89.24}{1.344} = 66.398 \text{ ohm}$$

L'inducteur L est

$$L \geq \frac{89.24 \times 0.622 \times (1 - 0.622)}{10000 \times 3.56 \times 0.1}$$

$$L \geq 5.90 \ \mu H$$

La capacitie d'entrée C_{in} utilisée la relation

$$C_{in} \geq \frac{I_{om} .D_m{}^2}{0.02(1-D_m)f_s V_{mp}}' \qquad (v.5)$$

$$C_{in} \geq \frac{1.344\times 0.622^2}{0.02\times(1-0.622)\times 10000\times 33.68}$$

$$C_{in} \geq 20.42\ \mu F$$

La capacité de sortie C_{out} utilisée la relation

$$C_{out} \geq \frac{V_{cha} .D}{f_s \Delta V_{cha}\ R_{cha}} \qquad (v.6)$$

$$C_{out} \geq \frac{89.24\times 0.622}{10000\times 0.8924\times 66.398}$$

$$C_{out} \geq 93.67\ \mu F$$

L’annexe 2 : Datasheet BP MSX120

bp solar

BP MSX 120

120-Watt Multicrystalline
Photovoltaic Module

BP Solar's MSX series is a premium line of PV modules with a 25-year performance warranty, tightly controlled electrical parameters, and labeling showing each module's tested electrical characteristics. Providing 120 watts of nominal maximum power, the MSX 120 is used primarily in large battery-equipped PV systems or—through an inverter—to provide AC power directly to a load. Typical applications include grid-supplemental residential and commercial systems, telecommunications, remote villages and clinics, pumping, and land-based navigation aids. Its attractive bronze-anodized frame also suits it well for architectural applications.

This product is available as a framed module or an unframed laminate, in 12V or 24V nominal configurations, with either:

- Dual high-volume junction boxes which allow on-site 12V/24V selection by rewiring (MSX 120);
- Installation-speeding DC-rated polarized connectors (MSX 120MC).

Proven Materials and Construction

BP Solar's quarter-century of field experience shows in every aspect of these module's construction and materials:

- 72 multicrystalline silicon solar cells configured as one series string or two 36-cell series strings (bypass diodes are included);
- Cells are laminated between sheets of ethylene vinyl acetate (EVA) and high-transmissivity low-iron 3mm tempered glass;
- Frame strength exceeds requirements of certifying agencies.



Weatherproof Connectors

MSX 120MC output is via heavy-duty (4mm²/AWG #12) output cables with polarized weatherproof DC-rated connectors which provide reliable low-resistance connections, eliminate wiring errors, and speed installation. Asymmetrical cables enable side-by-side or end-to-end module placement in arrays.

High-Capacity Versatile Junction Box

The junction boxes of the MSX 120 are raintight (IP54 rated) and accept PG13.5 or 1/2" nominal conduit or cable fittings. Their volume (411cc, 25 cubic inches) and 6-terminal



Bronze Anodized Universal Frame

connection blocks enable most system array connections (putting modules in series or parallel) to be made right in the boxes. Options include:

- an oversize terminal block which accepts conductors up to 25mm² (AWG #4); standard terminals accept up to 6mm² (AWG #10);
- a Solarstate™ charge regulator.

Products with junction boxes may be rewired to provide 12V or 24V output.

Limited Warranties

- Power output for 25 years;
- Freedom from defects in materials and workmanship for 5 years.

See our website or your local representative for full terms of these warranties.

Individually Tested and Labeled

Each module tested and labeled with its actual output—voltage, current, and power at maximum power point (P_{max})—at Standard Test Conditions and Standard Operating Conditions.



BP MSX 120

MSX 120 laminates also qualify for the above listings and certifications; MSX 120MC laminates are UL-recognized. MSX 120 modules and laminates with junction boxes are also certified by PowerMark Corporation and approved by Factory Mutual Research for application in NEC Class 1, Division 2, Groups C & D hazardous locations.

TÜV

©2002 BP Solar Global Marketing

01-4003-2 2/02

Quality and Safety

MSX 120 and MSX 120MC modules are manufactured in our ISO 9001-certified factories, listed by Underwriter's Laboratories for electrical and fire safety (Class C fire rating), certified by TÜV Rheinland as Class II equipment, and comply with the requirements of IEC 61215 including:

- repetitive cycling between -40°C and 85°C at 85% relative humidity;
- simulated impact of 25mm (one-inch) hail at terminal velocity;
- a "damp heat" test, consisting of 1000 hours of exposure to 85°C and 85% relative humidity;
- a "hot-spot" test, which determines a module's ability to tolerate localized shadowing (which can cause reverse-biased operation and localized heating);
- static loading, front and back, of 2400 pascals (50 psf); front loading (e.g. snow) of 5400 pascals (113 psf).

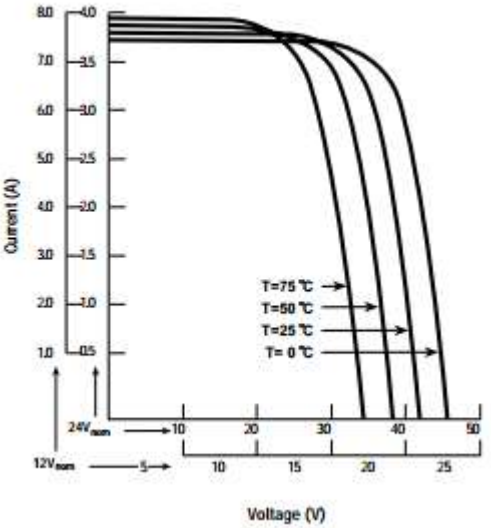
Electrical Characteristics[1]

	MSX 120	MSX 110[4]
Maximum power (P_{max})[2]	120W	110W
Voltage at P_{max} (V_{mp})	33.7V	33.6V
Current at P_{max} (I_{mp})	3.56A	3.3A
Minimum P_{max}	114W	105W
Short-circuit current (I_{sc})	3.87A	3.6A
Open-circuit voltage (V_{oc})	42.1V	41.6V
Temperature coefficient of I_{sc}	(0.065±0.015)%/°C	
Temperature coefficient of V_{oc}	-(80±10)mV/°C	
Temperature coefficient of power	-(0.5±0.05)%/°C	
NOCT[3]	47±2°C	
Maximum system voltage	600V (U.S. NEC rating) 1000V (TÜV Rheinland rating)	
Maximum series fuse rating	20A	

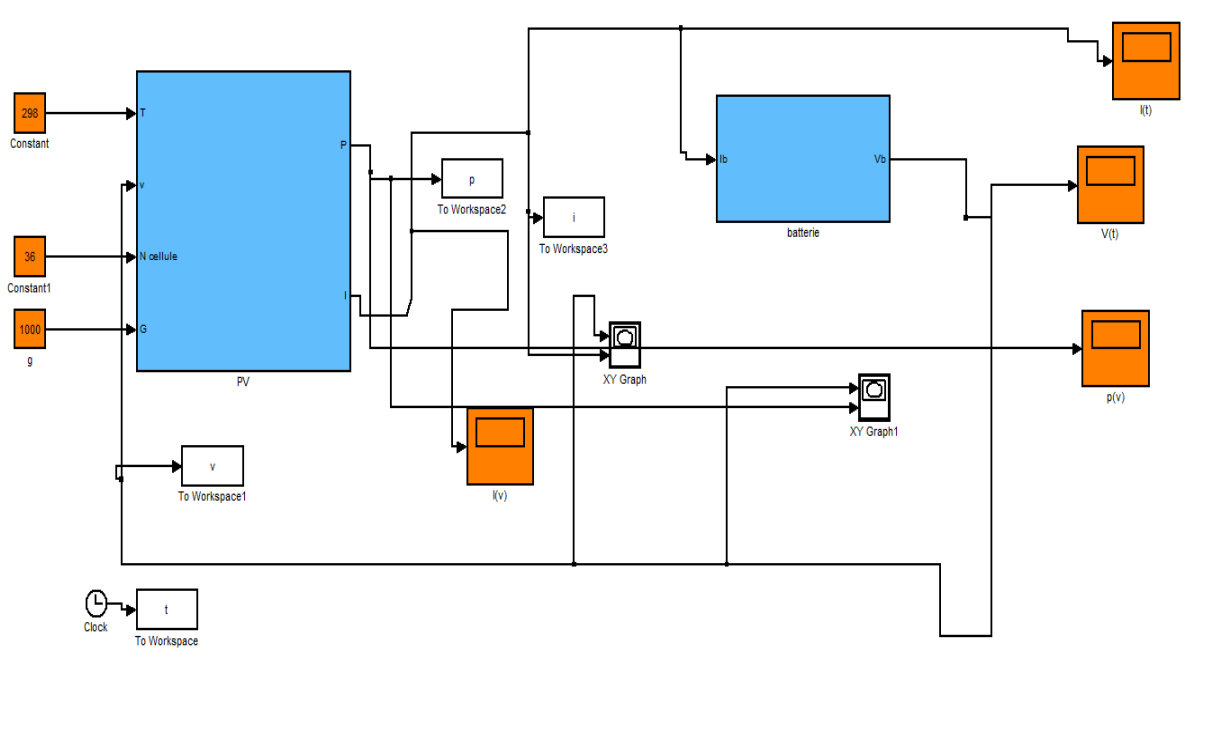
Notes

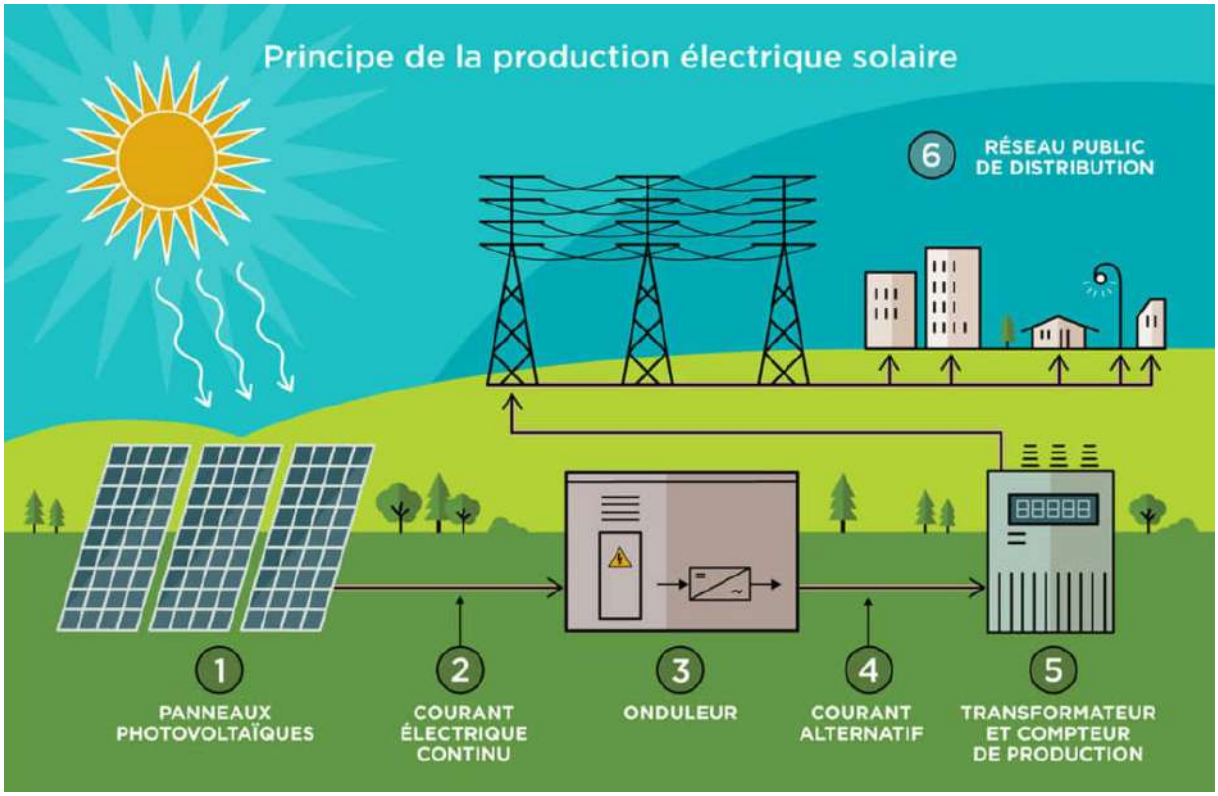
1. These data represent the performance of typical MSX 110 and MSX 120 products in 24V configuration. The data are based on measurements made in accordance with ASTM E1036 corrected to SRC (Standard Reporting Conditions, also known as STC or Standard Test Conditions), which are:
   - illumination of 1 kW/m² (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5 (ASTM E892 global spectral irradiance);
   - cell temperature of 25°C.
2. During the stabilization process which occurs during the first few months of deployment, module power may decrease approximately 3% from typical P_{max}.
3. The cells in an illuminated module operate hotter than the ambient temperature. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) is an indicator of this temperature differential, and is the cell temperature under Standard Operating Conditions: ambient temperature of 20°C, solar irradiation of 0.8 kW/m², and wind speed of 1 m/s.
4. The power of solar cells varies in the normal course of production; the MSX 110 is assembled using cells of slightly lower power than the MSX 120.

MSX 120 I-V Curves



Annexe


298
Constant
36
Constant1
1000
g
T
V
N cellule
G
P
I
PV
p
To Workspace2
i
To Workspace3
Ib
Vb
batterie
I(t)
V(t)
p(v)
XY Graph
XY Graph1
v
To Workspace1
I(v)
Clock
t
To Workspace


Principe de la production électrique solaire
6
RÉSEAU PUBLIC DE DISTRIBUTION
1
PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES
2
COURANT ÉLECTRIQUE CONTINU
3
ONDULEUR
4
COURANT ALTERNATIF
5
TRANSFORMATEUR ET COMPTEUR DE PRODUCTION

Bibliographie

[1] S. M. Ait-Cheikh, *«Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques»*, Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.

[2] S. Issaadi, *« Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones »*, Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2006.

[3] M. Adouane, *«Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique»*, Mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.

[4] F . Chekider ,«étude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA », mémoire magister en électronique, université de Jijel, 2008.

[5] D.Morales, «Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications», memoire master en électronique, Technology, Université de Aalto Finlande, 2010.

[6] B. Flèche, D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque », STI ELT, juin 2007, www.itismajo.it/fff/.../Energie_solaire_photovoltaique.pdf,consulté janv. *2014*

[7] F. Kandouli, « Modélisation et commande des machines électriques », Juillet 2007,

[8] S. Bellakehal, «Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables», thèse de Doctorat, Université de Constantine, Algérie, 2010

[9] S. M. Ait-Cheikh, «Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.

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

[11] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, «Etude et réalisation d'un système de

poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné a une installation photovoltaïque », Mémoire d'ingéniorat, université de Ouargla, Algérie, 2005.

[12] K. Kassmi, M. Hamdaoui et F. Olivié, « Conception et modélisation d"un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique », Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°4 (2007) 451 –462.

[13] M .Tiar, «Commande Optimale d'un Système de Génération Photovoltaïque Hybride », Mémoire de Magister En Electrotechnique, Université de Biskra, 2011.

[14] S. Belakehal , « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », Thèse de Doctorat en sciences, Université de Constantine, 2010.

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

[16] M.Angel, Cid Pastor. « Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques Electroniques ». Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.

[17] M .Touaref , « Etude et simulation d'un convertisseur AC/DC type BUCK (Abaisseur de tension) », *thèse master en génie électrique université de Biskra, juin 2014.*

[18] Abdelkader Gourbi Imen Souhila Bousmaha, Mostefa Brahami, Amar Tilmatine Numerical Study of a Hybrid Photovoltaic Power Supply System. Journal of Power Technologies, volume 96 N° (2) (2016) pp 137–144 ISSN 2083-4187 http://papers.itc.pw.edu.pl/index.php/JPT/article/view/841/715

[19] AOUF, Anouar Essadate. Modélisation et simulation du Nano-transistor de puissance. Thèse de doctorat. Université de Batna 2, 2009.

[20] FORGEZ, Christophe. "Contribution à la modélisation et à l'identification temps réel pour les systèmes à énergie électrique embarquée." Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université de Technologie de Compiègne (2009).

[21] Zerhouni, F. Z., et al. "Recherche du maximum de puissance d'un générateur photovoltaïque." ACTA ELECTROTEHNICA 53.12 (2012): 130-133.

[22] M.Angel, Cid Pastor. « Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques Electroniques ». Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.

[23] Bencherif Mohammed. « Modélisation de système énergétique photovoltaïque et éoliens intégration dans système hybride base tension ».Thèse de Doctorat en

physique, Université de Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, 2014.

[24] O.Benseddik et F.Djaloud. « Etude et optimation du fonctionnement d'un système photovoltaïque ». Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah-Ouargla, 27/06/2012.

[25] N.Abouchabana. « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT ». Mémoire de Magister, Ecole Nationale polytechnique, Alger, 2009.

[26] N.Mchalikh et C.Hmada. « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau ». Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2013.

[27] Bouzid Allal El Moubarek. «Onduleur triphasé commandé par la Stratégie d'élimination d'Harmonique SHE ». Thème de Magister, Université d'Oran, 2010.
[28] Minh Huynh Quang. « Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour site isolé ».Thèse de Doctorat en Automatique, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2013.

[28] Touil Nacer Eddine et Ghenbazi Slimane. « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque ». Master, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 2015.

[29] Houari Toufik. « Simulation d'un MPP photovoltaïque a base de réseau de neurrons artificiels ». Mémoire de master, Université Mascara, 2015-2016.

[30] Z.Ayache „"Commande MPPT et Contrôle d"un système Photovoltaïque par la logique floue „" ,université Djilali Liabès sidi Bel Abbès 22000, Algeria

[31] BENHADDOUCHE NESRINE FATIMA „" La Commande D'un Système Photovoltaïque D'un Satellite„", Mémoire de Master Université de Tlemcen, 8 Octobre 2013.

[32] S.ABADA ' Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic', Mémoire Maître es Sciences , Université laval, 2011.

[33] C. CABAL 'Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ', Thèse de doctorat université de Toulouse III ,2008.

[34] Y. PANKOW 'Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. application au générateur photovoltaïque', thèse de doctorats de l'école nationale,2004.

[35] V.Boitier , P. Maussion , C. CABAL 'Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques', université de Toulouse, revue 3E.I, N°54, pp 90-96, septembre 2008.

[36] Antoni luque and Steven Hegedus, „"Handbook of photovoltaic science and Engineering"", John Wiley & Sons Ltd, 2003.

[37] Huan Liang Tsai,C.S.T, and Yi_Jie Su, „"développement of generalized photovoltaic model using MATLAB/SIMULINK

[38] S.Lhlah, „"Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and observation (P&O), Incrémental Conductance (Inc.Con) et Hill climbing (H.C) „" Mémoire MAGISTER université El hadj Lakder Batna 2007.

[39] M.Angel Cid Pastor, „"Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïque Electroniques"" ,Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse,2006.

[40] Aoufi Saliha „"modélisation et commande d"un système de pompage photovoltaïque„", Mémoire de Magister Université Farhat Abbas, Setif, 28/09/2014

[41] Yassine Lasmi „"Optimisation de la poursuit du piont de puissance maximale (MPPT) d"un système photovoltaïque par techniques intelligentes„", Mémoire de Magister Université Setif ,09/12/2013.

[42] Céline Bernard, Carolina Sebrao- Olivera, Bernard Laval, Clément Vaudouer, „"panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue„", Automne 2009.

[43] Hamal Chikh „"Commande MPPT par logique floue d"un générateur photovoltaïque„" ,Univ Saida –Dr.Tahar Moulay, 2014.