

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie

Département Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

Présenté par

Manamani Mohamed

Siad Mohamed bourhane eldine

Filière : Electronique

Spécialité : Electronique des Systèmes Embarqués

Contrôleurs de charge solaires

Soutenu le 23 /12 /2020 devant le jury composé de:

Messaoudi	Nouredine	MCA	UMBB	Président
Belkacem	Samia	MCA	UMBB	Examinateur
Kaouane	Mohamed	MCB	UMBB	Encadreur

Année Universitaire : 2019/2020

SOMMAIRE

Introduction générale	02
Chapitre I : Systèmes de conversion photovoltaïque	
I.1.Introduction	04
I.2 Définition et Historique du photovoltaïque	04
I.3.L'effet photovoltaïque.....	05
I.4.Cellule photovoltaïque	06
I.4.1. Principe de fonctionnement.....	06
I.4.2.Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque).....	07
I.4.3.Comparatif des différentes technologies	07
I.4.4.Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	09
I.5.Modélisation d'une cellule photovoltaïque	10
I.5.1.Modèle idéal	10
I.5.2.Modèle avec pertes ohmiques	11
I.5.3.Modèle à une diode	12
I.5.4.Modèle à deux diodes	12
I.6.Associations des cellules photovoltaïques.....	14
I.6.1. Association en série	14
I.6.2. Association en parallèle.....	14
I.6.3. Association série-parallèle.....	14
I.7.Paramètres photovoltaïques	15
I.7.1. Courant de court-circuit ICC.....	15
I.7.2. Tension en circuit ouvert VCO.....	16
I.7.3. Rendement énergétique.....	16
I.8. La caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque.....	16

SOMMAIRE

I.9. Générateur photovoltaïque	18
I.10. Les principaux systèmes photovoltaïques	19
I.11. Le système photovoltaïque autonome.....	19
I.11.1. Les régulateurs de charge	20
I.11.2. Les régulateur série / shunt.....	21
I.11.3. Le régulateur « PWM » (Pulse Width Modulation)	21
I.11.4. Le régulateur « MPPT ».....	21
I.11.5. L'onduleur	22
I.11.6. La batterie	23
I.12. Avantages et inconvénients d'une installation PV.....	24
I.12.1. Avantages.....	24
I.12.2. Inconvénients.....	24
I.13. Conclusion.....	25
 Chapitre II : Les régulateurs de charge	
II.1. Introduction.....	27
II.2. Connexions GPV-charge.....	27
II.2.1. Connexion directe.....	27
L'inconvénient de la connexion directe.....	28
II.2.2. Connexion GPV- convertisseur DC/DC - charge	29
II.3. Types de régulateur de charge.....	31
II.4. Le régulateur tout ou rien (TOR).....	31
II.4.1. Avantages et inconvénients des régulateurs « tout ou rien ».....	31
II.5. Le régulateur MLI (PWM)	32
II.5.1. Avantages et inconvénients des régulateurs MLI.....	32

SOMMAIRE

II.6. Régulateur de charge MPPT.....	32
II.6.1. La méthode Perturb and Observe(P&O).....	33
II.7. Comparaison entre régulateurs PWM et MPPT.....	36
II.8. Conclusion	36

Chapitre III : Amélioration des commandes MPPT :Etude comparative

III.1. Introduction.....	38
III.2. Test et optimisation des Commandes MPPT	38
III.2.1. La commande P&O « classique ».....	38
III.2.2. Amélioration de la commande P&O classique : la P&O adaptative.....	41
III.2.3. La commande P&O à perturbation triangulaire.....	43
III.2.4. Amélioration de la P&O à perturbation triangulaire.....	45
III.2.4 .1 Le Correcteur PI.....	45
III.2.4.2 Perturbation triangulaire d'amplitude variable.....	45
III.2.5. Commande à fraction de V_{OC}	47
III.2.6. Commande à fraction de I_{CC}	49
III.3. Evaluation des performances des commandes.....	51
III.3.1. Le rendement européen.....	51
III.3.2.Comparative de rendements pour une irradiation fixe.....	51
III.4. Conclusion	52
Conclusion générale et perspectives	54
Références bibliographiques.....	56
Résumé.....	58

Liste des abréviations

ADC : Convertisseur analogique numérique

D : Rapport cyclique, également noté α

fem : Force électromotrice

GPV : Générateur photovoltaïque

I_{CC} : Courant de court-circuit (ISC en anglais)

I_{MPP} : Courant optimal d'une cellule ou GPV, aussi appelé IOPT

η_{MPPT} : Rendement MPPT

PPM : Point de puissance maximale, aussi appelé PMAX

PWM : Pulse Width Modulation (Modulation à largeur d'impulsion)

V_{CO} : Voltage en circuit ouvert (VOC en anglais)

V_{MPP} : Tension optimale d'une cellule ou GPV, aussi appelé VOPT

P δ O : perturbation et observation

Liste des figures

Chapitre I : Systèmes de conversion photovoltaïque

- Figure (I.1)** : principe de fonctionnement d'une cellule solaire.
- Figure (I.2)** : cellule monocristalline.
- Figure (I.3)** : cellule polycristalline.
- Figure (I.4)** : cellule amorphe.
- Figure (I.5)** : Fonctionnement d'une cellule PV.
- Figure (I.6)** : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle idéal.
- Figure (I.7)** : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle avec R_s .
- Figure (I.8)** : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à une diode.
- Figure (I.9)** : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à deux diodes.
- Figure (I.10)** : Association de N cellules solaires en série.
- Figure (I.11)** : Association des cellules solaires en parallèle.
- Figure (I.12)** : Association mixte des cellules solaires.
- Figure (I.13)** : Caractéristiques I-V d'un module pour différentes irradiances solaires G à 25°C .
- Figure (I.14)** : Caractéristiques I-V d'un module pour différentes températures ($G = 1 \text{ W/m}^2$).
- Figure (I.15)** : Influence de la résistance série ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $R_s = 20 \Omega$).
- Figure (I.16)** : Influence de la résistance parallèle ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $R_s = 5 \Omega$).
- Figure (I.17)** : Schéma simplifié d'un système photovoltaïque.
- Figure (I.18)** : plan simplifié d'un système autonome.
- Figure (I.19)** : Courbe de charge de la batterie.
- Figure (I.20)** : Onduleur.
- Figure (I.21)** : Batterie solaire.

Chapitre II : Les régulateurs de charge

- Figure (II.1)** : Connexion directe d'un GPV à sa charge.
- Figure (II.2)** : Connexion directe entre un GPV et sa charge - points de fonctionnement pour différentes charges.
- Figure (II.3)** : Ajout d'un étage d'adaptation entre le GPV et la charge.
- Figure (II.4)** : Schéma d'un convertisseur élévateur du type Boost.
- Figure (II.5)** : a) phase d'accumulation d'énergie - b) la fem de l'inductance s'ajoute à celle du générateur.
- Figure (II.6)** : Schéma de principe d'une connexion à travers un convertisseur DC/DC contrôlé par une commande MPPT.
- Figure (II.7)** : Principe de fonctionnement de la MPPT P&O.
- Figure (II.8)** : Définition du rendement MPPT.

Liste des figures

Figure (II.9) : Chaîne de conversion photovoltaïque avec acquisition et commande numérique.

Chapitre III : Amélioration des commandes MPPT

Figure (III.1) : Fonctionnement de la commande MPPT P&O suite à une variation d'ensoleillement.

Figure (III.2) : Algorithme de la commande P&O « classique ».

Figure (III.3) : Principe de fonctionnement de la P&O adaptative.

Figure (III.4) : Algorithme de la commande P&O adaptative.

Figure (III.5) : Principe de fonctionnement de la commande P&O à perturbation triangulaire.

Figure (III.6) : Algorithme de la commande P&O à perturbation triangulaire.

Figure (III.7) : Amplitude de la perturbation déterminée par le ΔP pour un ensoleillement donné.

Figure (III.8) : Algorithme de la commande à fraction de V_{OC} .

Figure (III.9) : Algorithme de la commande à fraction de I_{CC} .

Liste des tableaux

Chapitre I : Systèmes de conversion photovoltaïque

Tableau I.1 : Comparatif des différentes technologies de cellules photovoltaïques.

Chapitre II : Les régulateurs de charge

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients des régulateurs « tout ou rien ».

Tableau II.2 : Avantages et inconvénients des régulateurs MLI.

Tableau II.3 : Comparaison entre régulateur PWM et MPPT.

Chapitre III : Amélioration des commandes MPPT

Tableau III.1 : Rendement des différentes commandes.

*Introduction
générale*

Depuis la nuit des temps, l'être humain a utilisé sans cesse de l'énergie sous différentes formes dans toutes ces activités journalières, à savoir : le déplacement, l'éclairage ..., ou se nourrir. Dans notre monde actuel industrialisé, la principale énergie utilisée pour alimenter nos foyers et faire marcher et évoluer les différentes industries c'est bel et bien l'énergie électrique. Cette dernière est produite généralement à partir des combustibles de différentes natures, on parle ici des énergies fossiles, telles que le pétrole, le charbon, le gaz, et l'énergie nucléaire (uranium).[1]

Par contre la grande consommation de ces énergies les rend rares et plus coûteuses. L'énergie solaire est la source d'énergie la plus encourageante (gratuite) et la plus puissante parmi les énergies renouvelables.

L'électricité photovoltaïque est le résultat d'une transformation directe de la lumière du soleil en électricité au moyen des cellules photovoltaïques qui sont essentiellement constituées d'une jonction PN.

Les cellules peuvent être groupées pour former des modules. Les modules peuvent être regroupés pour former des champs photovoltaïques. Le terme module est habituellement utilisé pour décrire un système photovoltaïque (avec plusieurs cellules connectées en série et / ou parallèle).

L'objectif de ce travail est de décrire le principe de fonctionnement du module PV pour pouvoir optimiser son rendement

L'énergie photovoltaïque issue de la conversion de l'énergie solaire souffre d'un problème d'optimisation, dû aux caractéristiques électriques non linéaires (courant - tension) des cellules photovoltaïques, Ces caractéristiques dépendent essentiellement des conditions climatiques de rayonnement et de température.

L'extraction de la puissance maximale d'un ensemble de ces cellules dite Stratégie MPPT (Maximum Power Point Tracking) permet d'une manière efficace de résoudre ce problème d'optimisation.[2]

Nous nous intéressons dans ce mémoire à l'étude et la modélisation d'un panneau PV relié à un hacheur élévateur commandé par la technique MPPT « Maximum power point tracking » et plus précisément la commande « Perturb and Observe ».

Ce mémoire est divisé en trois chapitres, répartis comme suit :

Le premier chapitre sera dédié aux généralités sur les systèmes de conversion photovoltaïque.

Le deuxième chapitre est consacré aux différentes connexions entre le générateur photovoltaïque et la charge, les types de régulateurs de charge et leurs avantages et inconvénients.

Le troisième chapitre aborde la présentation de 6 commandes MPPT leur optimisation la commande.

Chapitre I
Systèmes de conversion
photovoltaïque

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons des notions fondamentales sur l'élément clé dans la conversion photovoltaïque (la cellule solaire).

I.2. Définition et Historique du photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien Italie Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800. Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, est appelée l'effet photovoltaïque.

Quelques dates de l'histoire du photovoltaïque :

1839 : Le physicien français Antoine Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

1887 : L'effet photoélectrique a été compris et présenté en 1887 par Heinrich Rudolf Hertz qui en publia les résultats dans la revue scientifique Annalen der Physik.

1905 : Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1905 et obtint le prix Nobel de physique sur ses travaux en 1921.

1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince des laboratoires BELL mirent au point la première cellule photovoltaïque au silicium avec un rendement de 4%, au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

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

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Wilmington dans l'Etat du Delaware, USA.

1983 : La première voiture alimentée par de l'énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

1995 : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

2000 : Entrée en application le 1er avril 2000 et modifiée en 2004 et en 2009, l'EEGRenewable Energy Sources Act (EEG) est le résultat de la transposition de la directive européenne relative à la promotion des énergies renouvelables dans le secteur de l'électricité.

2005 : En décembre 2005 mise en réseau de la première centrale solaire photovoltaïque du groupe Prime Energy à Weil amRhein (Baden-Württemberg), Hagenheimer Strasse 17, 79576 Weil amRhein.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé.

I.3. L'effet photovoltaïque

Bien que la terre reçoive environ 13 TW d'énergie de la part du soleil chaque année, la forme sous laquelle nous recevons cette énergie ne nous permet pas de l'utiliser de manière directe. Pour l'utiliser, nous devons la convertir en une forme d'énergie facile à domestiquer (énergie électrique ou thermique). Pour y parvenir, nous devons nous servir d'un dispositif qui convertit cette énergie lumineuse en électricité c'est-à-dire un système solaire photovoltaïque. Par contre, si nous voulons la transformer en chaleur, il nous faudra utiliser un système solaire thermique.

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

L'ensemble de panneaux photovoltaïques interconnectés forme le générateur. Celui-ci est caractérisé par sa puissance crête exprimée en kilowatt crête (KWc).

En résumé, nous pouvons retenir que l'effet photovoltaïque a été découvert par les physiciens français Antoine César Becquerel et son fils Alexandre Edmond Becquerel et que cet effet photovoltaïque est le procédé permettant de transformer l'énergie lumineuse issue du soleil en une énergie exploitable par l'homme en l'occurrence en électricité. [7]

I.4. Cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par l'effet photovoltaïque. 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.4.1. Principe de fonctionnement

La cellule solaire à semi-conducteur est un dispositif permettant de débiter un courant électrique dans une charge externe lorsque celui-ci est exposé à la lumière. Son principe de fonctionnement se résume comme suit :

Lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons d'énergie ($E_{ph} = h\nu$) pénétrant dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi des paires « électron- trou ».

Les électrons (charges N) et les trous (charges P), sont alors maintenus séparés par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel.

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique circule. Figure (I.1). [8]

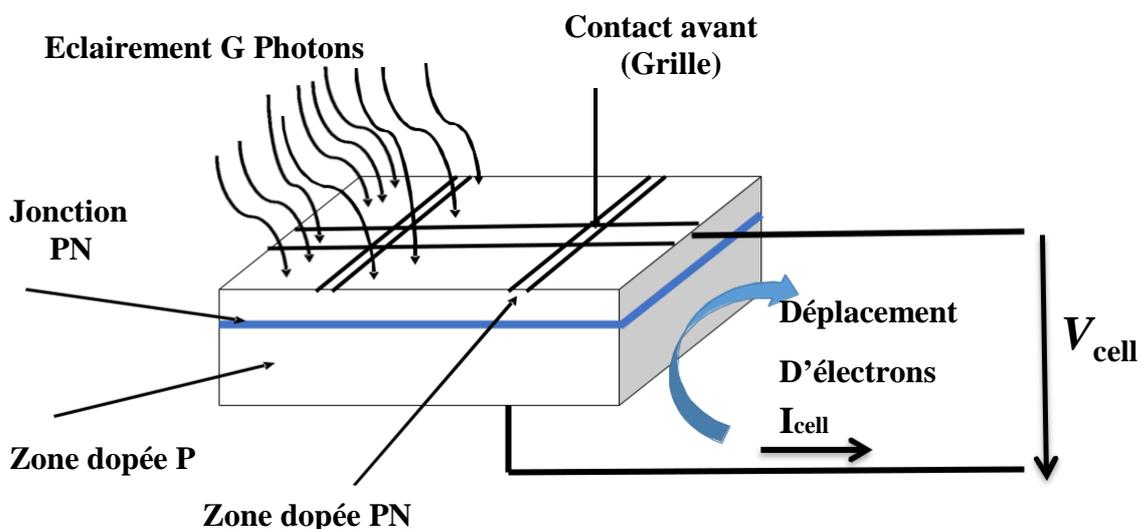


Figure (I.1) : principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

I.4.2. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque)

Silicium monocristallin



Figure (I.2) : cellule monocristalline.

Silicium poly cristallin



Figure (I.3) : cellule polycrystalline.

Silicium amorphe (a-si)

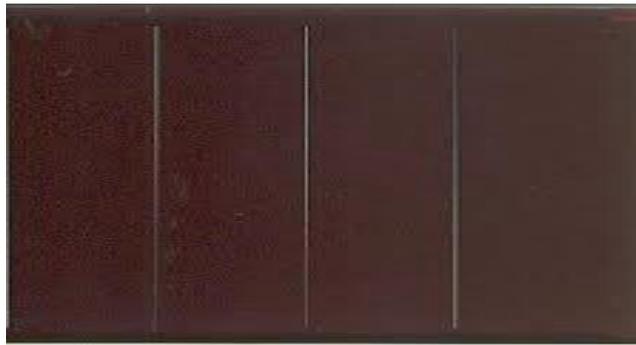


Figure (I.4) : cellule amorphe.

I.4.3. Comparatif des différentes technologies

Le tableau suivant présente les caractéristiques et la part de marché des technologies les plus utilisées dans la fabrication des cellules photovoltaïques :

<i>Technologie</i>	<i>Monocristallin</i>	<i>Poly cristallin</i>	<i>Amorphe</i>
<i>Cellule et module</i>			
<i>Caractéristiques</i>	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Très bon rendement: 14 à 20%. ❖ Durée de vie : importante (30ans) ❖ Coût de fabrication: élevé. ❖ Puissance : 100 à 150 Wc/m². 7 m²/kWc. ❖ Rendement faible sous un faible éclairement. ❖ perte de rendement avec l'élévation de la température. ❖ Fabrication: élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal ❖ Couleur bleue uniforme. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Bon rendement : 11 à 15 %. ❖ Durée de vie : importante (30 ans) ❖ Coût de fabrication: meilleur marché que les panneaux monocristallins ❖ Puissance: 100Wc/m². 8 m²/kWc. ❖ Rendement faible sous un faible éclairement. ❖ perte de rendement avec l'élévation de la température. ❖ Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Rendement faible : 5 à 9%. ❖ Durée de vie : assez importante (20ans) ❖ Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies ❖ Puissance : 50 WC/m². 16 m²/kWc. ❖ Fonctionnement correct avec un éclairement faible. ❖ Peu sensible aux températures élevées. ❖ Utilisables en panneaux souples. ❖ Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux en silicium.
<i>Part de marche</i>	43%	47%	10%

Tableau I.1 : Comparatif des différentes technologies de cellules photovoltaïques.

[9]

I.4.4. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée (l'énergie des photons doit être au moins égale à celle du gap énergétique du matériau), l'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur, générant ainsi des paires électron-trou qui peuvent contribuer au transport du courant (photoconductivité) par le matériau lorsqu'on le polarise.

Si on illumine maintenant une jonction PN, les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraîné dans les zones neutres de chaque côté de la jonction.

Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction (photo tension) ; s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe le passage d'un courant alors qu'on n'applique aucune tension au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque. [10]

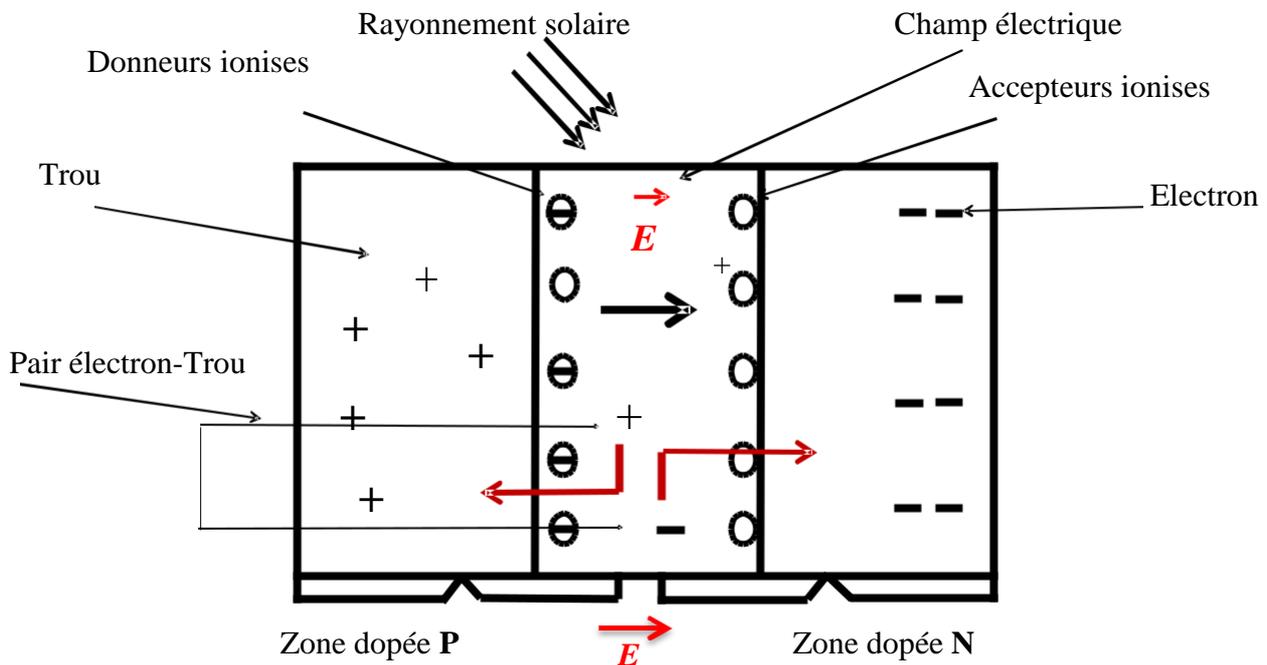


Figure (I.5) : Fonctionnement d'une cellule PV.

I.5. Modélisation d'une cellule photovoltaïque [15]

La modélisation d'un système physique conduit à des équations mathématiques régissant la dynamique de ce système, d'où un modèle est la représentation mathématique d'une entité réelle et de son fonctionnement : quand on dispose d'un modèle, on peut simuler le comportement de cette entité.

Une cellule solaire est représentée (dans la littérature) par plusieurs modèles, chacun d'eux est régi par une expression mathématique (analytique) en fonction des paramètres technologiques de la cellule tels que le courant et la tension. Ce qui nous ramène à écrire les algorithmes appropriés pour représenter initialement la caractéristique courant tension puis puissance tension ... etc. Parmi ces modèles on peut citer les suivants :

I.5.1. Modèle idéal

C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule solaire, car il ne tient compte que du phénomène de diffusion (Fig. I.6). Le circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire se compose d'une diode et d'une source de courant montés en parallèle. La source de courant produit le photocourant I_{ph} , qui est directement proportionnel à l'éclairement solaire G . L'équation courant tension $I-V$ du circuit équivalent simplifié est déduite à partir de la loi de Kirchhoff (première loi de Kirchhoff : la somme de tous les courants entrants et sortant d'un point est égale à zéro) :

A

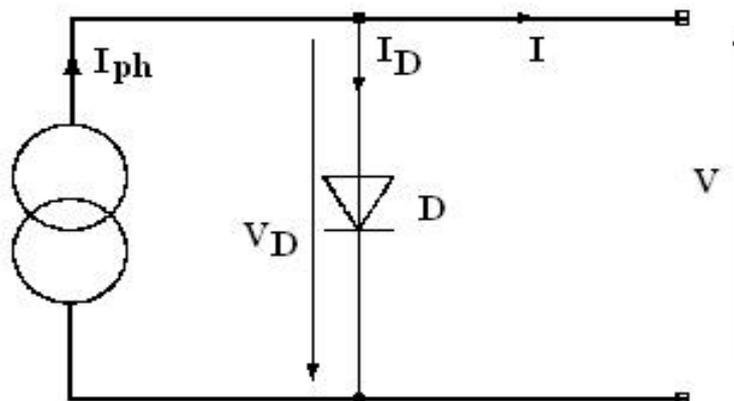


Figure (I.6) : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle idéal.

A partir du nœud A on a :

$$I = I_{ph} - I_d \dots (I.1)$$

Avec :

$$I_d = I_s \cdot (e^{(V/V_T)} - 1) \dots (I.2)$$

D'où :

$$I = I_{ph} - I_s \cdot (e^{(V/V_T)} - 1) \dots (I.3)$$

Avec :

I_{ph} : photo courant.

I_d : courant de diode.

I_s : courant inverse de saturation de la diode.

$V_T = (A \cdot K \cdot T) / q$: Tension thermique.

A : coefficient d'idéalité de la cellule.

$K = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/k}$: constante de Boltzmann.

T : température absolue, [T] = k (kelvin).

q : Charge élémentaire ($1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).

En circuit ouvert, le courant $I=0$ et $V \rightarrow V_{co}$, qui est la tension en circuit ouvert $I_{ph} - I_d = 0$.

$$I_{ph} - (e^{(V_{co}/V_T)} - 1) I_s = 0, \text{ donc : } V_{co} = V_T \cdot \log((I_{ph}/I_s) + 1) \dots (I.4)$$

I.5.2. Modèle avec pertes ohmiques

Le deuxième modèle, tient compte de la résistivité du matériau et des pertes ohmiques dues aux niveaux des contacts, ce qui permet une meilleure représentation du comportement électrique de la cellule par rapport au modèle idéal. Ces pertes sont représentées par une résistance série R_s dans le circuit équivalent représenté ci-dessous :

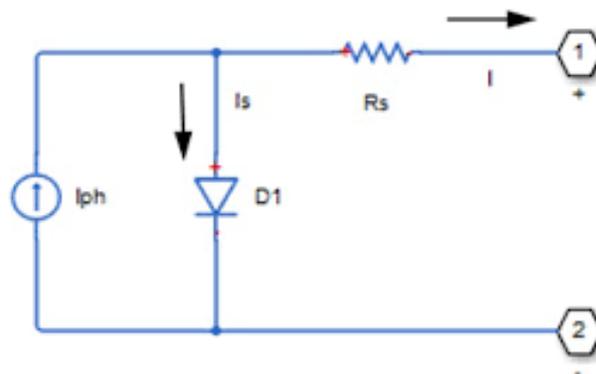


Figure (I.7) : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle avec R_s .

Après analyse du circuit, l'équation courant tension est donnée comme suit :

$$I = I_{ph} - I_s \cdot (e^{((V + I \cdot R_s)/V_T)} - 1) \dots (I.5)$$

Avec :

R_s : résistance série qui tient compte des pertes en tension dues aux contacts externes.

I.5.3. Modèle à une diode

C'est le modèle sur lequel s'appuient les constructeurs en donnant les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires. Il est aussi considéré satisfaisant et même une référence pour les constructeurs pour cataloguer typiquement les modules solaires. Il tient compte non seulement des pertes en tension exprimées par la résistance série R_s , mais aussi des fuites de courants exprimées par une résistance parallèle R_p (Fig. I.8).

- **Remarque** : La résistance parallèle R_p est en générale très élevée, et lorsqu'elle est trop faible, la cellule solaire ne donnera plus de tension sous faible éclairement.

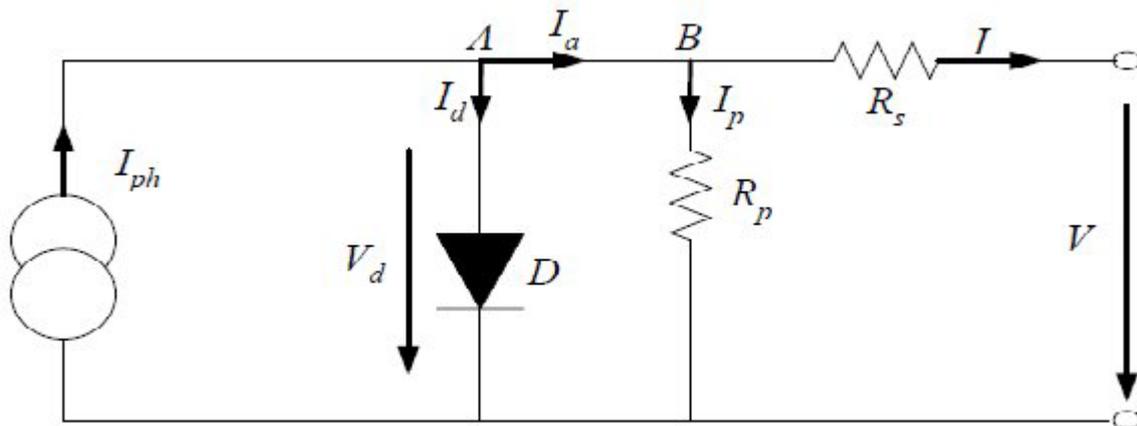


Figure (I.8) : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à une diode.

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \dots \text{(I.6)}$$

$$I = I_s \cdot (e^{((V + I \cdot R_s)/VT)} - 1) \dots \text{(I.7)}$$

$$I_p = V_d / R_p = (V + I \cdot R_s) / R_p \dots \text{(I.8)}$$

$$I = I_{ph} - I_s \cdot (e^{((V + I \cdot R_s)/VT)} - 1) - ((V + I \cdot R_s) / R_p) \dots \text{(I.9)}$$

Avec :

R_p : résistance parallèle simulant les pertes en courant de la cellule solaire.

L'équation (I.9) en termes de I et V n'est pas tellement facile à résoudre comparativement à l'équation du circuit équivalent simplifié.

I.5.4. Modèle à deux diodes

Le schéma du circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque qui est largement utilisé, est représenté sur la figure (I.9) :

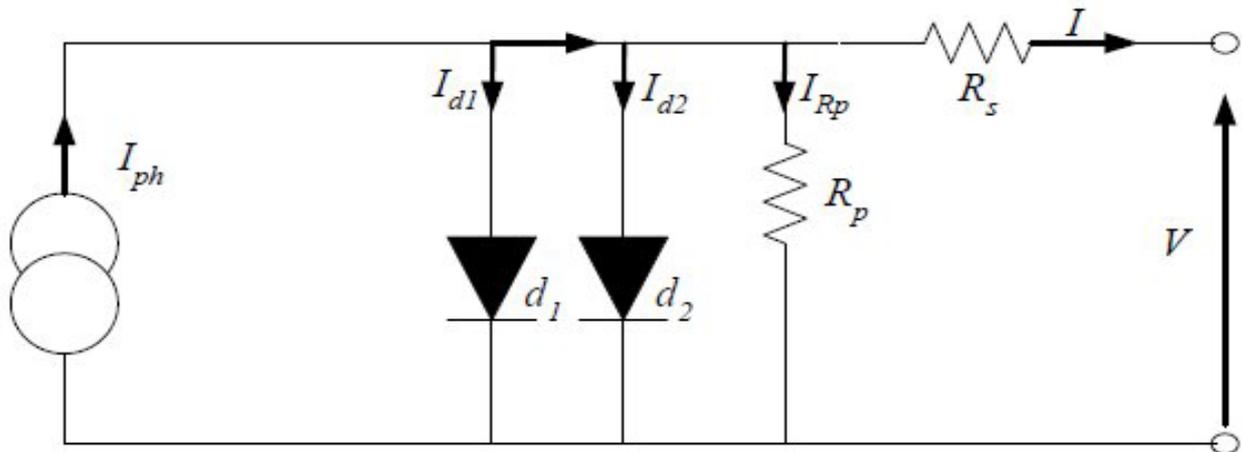


Figure (I.9) : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à deux diodes.

Comme la montre le schéma de la figure (I.9) une cellule photovoltaïque comporte une résistance série R_s et une résistance en dérivation ou shunt R_p . Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I - V de la cellule photovoltaïque :

- La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

D'après la figure (I.9) le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \cdot (e^{q(V + I \cdot R_s)/(n_1 \cdot K \cdot T)} - 1) - I_{s2} \cdot (e^{q(V + I \cdot R_s)/(n_2 \cdot K \cdot T)} - 1) - ((V + I \cdot R_s) / R_p) \dots \quad (\text{I.10})$$

Où :

- I et V : Courant et tension de sortie de la cellule photovoltaïque.
- I_{ph} : Photo-courant produit.
- I_{s1} et I_{s2} : Les courants de saturation des diodes.
- n_1 et n_2 : les facteurs de pureté de la diode.
- R_s et R_p : Respectivement la résistance série et la résistance parallèle.
- T : Température absolue en Kelvin.
- q : Charge élémentaire constante ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C).
- K : Constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

I.6. Associations des cellules photovoltaïques [15]

I.6.1. Association en série

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau).

L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule.

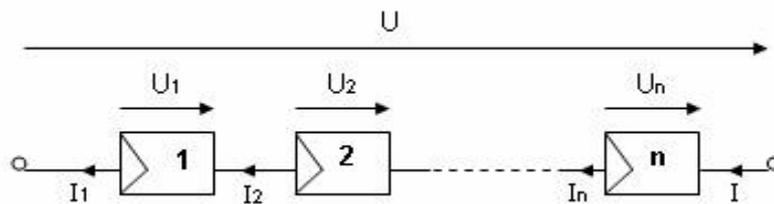


Figure (I.10) : Association de N cellules solaires en série.

I.6.2. Association en parallèle

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche.

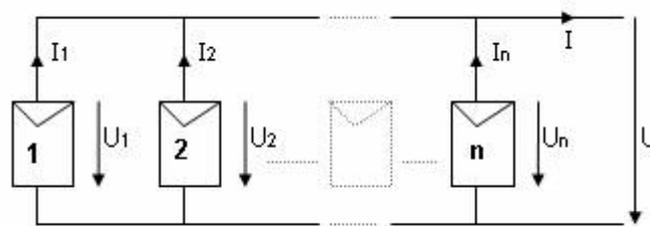


Figure (I.11) : Association des cellules solaires en parallèle.

I.6.3. Association série-parallèle

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle.

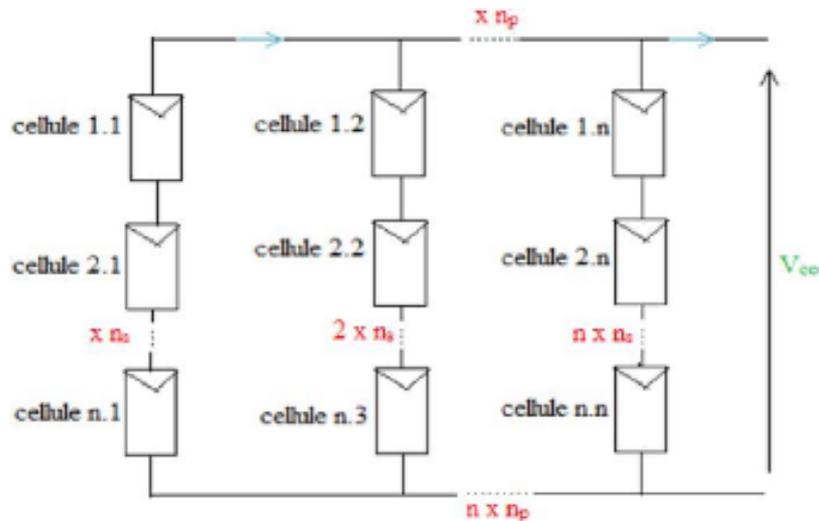


Figure (I.12) : Association mixte des cellules solaires.

I.7. Paramètres photovoltaïques

I.7.1. Courant de court-circuit I_{CC}

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{shu} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (I .11), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} [\exp(e^{(I_{cc} \cdot R_s) / nkT}) - 1]. (I_{cc} \cdot R_s) / R_{shu} \dots (I .11)$$

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

$$I_{sat} [\exp (e^{(I_{cc} \cdot R_s) / nkT} - 1]$$

Devant I_{ph} L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \cong I_{ph} / (1 + (R_s / R_{shu})) \dots (I .12)$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement $I_{cc}=I_{ph}$).

I.7.2. Tension en circuit ouvert V_{CO}

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul. (C'est la tension maximale d'une cellule photovoltaïque ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{cc} - I_{sat} [\exp(e(V_{pv}/nkT) - 1) - (V_{pv}/R_{shu})] \dots \text{(I.13)}$$

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

$$V_{oc} = n.V_T. \log[(I_{pv}/I_{sat}) + 1] \dots \text{(I.14)}$$

I.7.3. Rendement énergétique

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

$$\eta = P_{max}/P_{inc} = (I_{opt} \cdot V_{opt})/P_{inc} \dots \text{(I.15)}$$

Avec P_{inc} est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète

la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

I.8. La caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe $I = f(V)$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque.

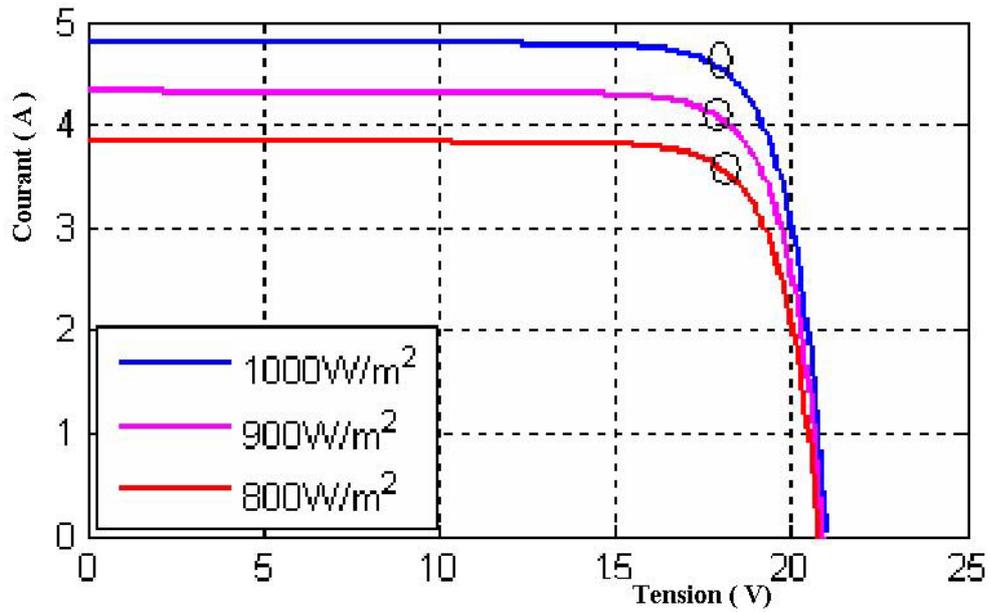


Figure (I.13) : Caractéristiques $I-V$ d'un module pour différentes irradiances solaires G à 25°C.

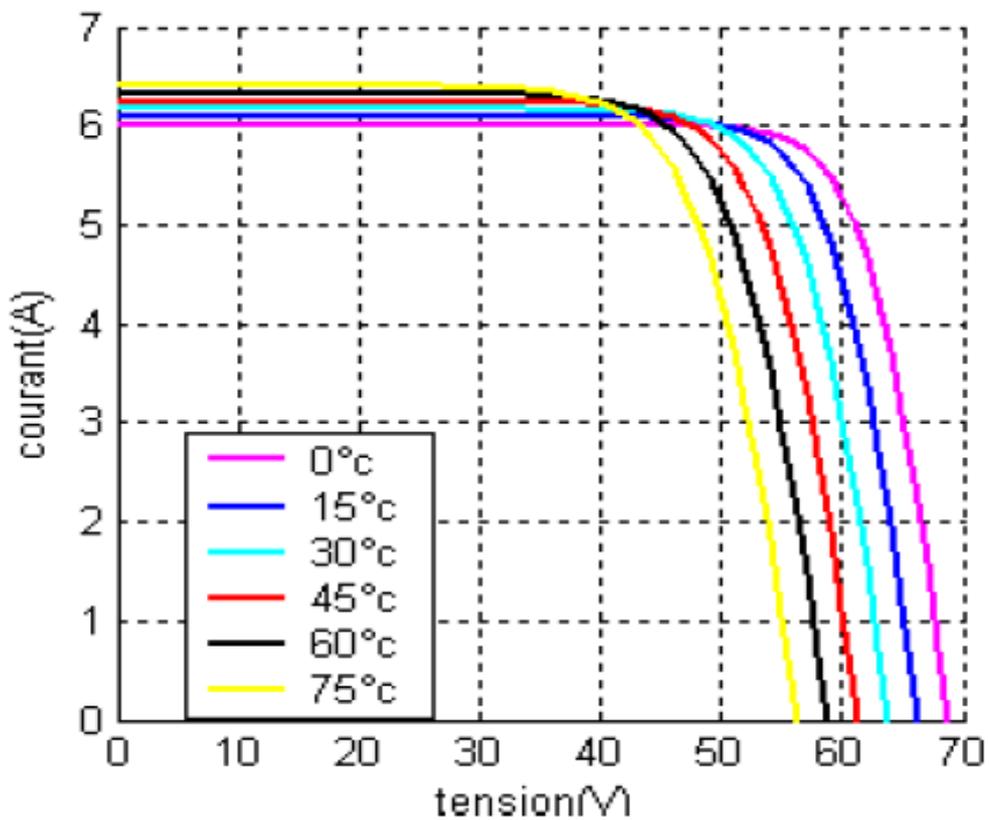


Figure (I.14) :Caractéristiques $I-V$ d'un module pour différentes températures ($G = 1 \text{ W/m}^2$)[30].

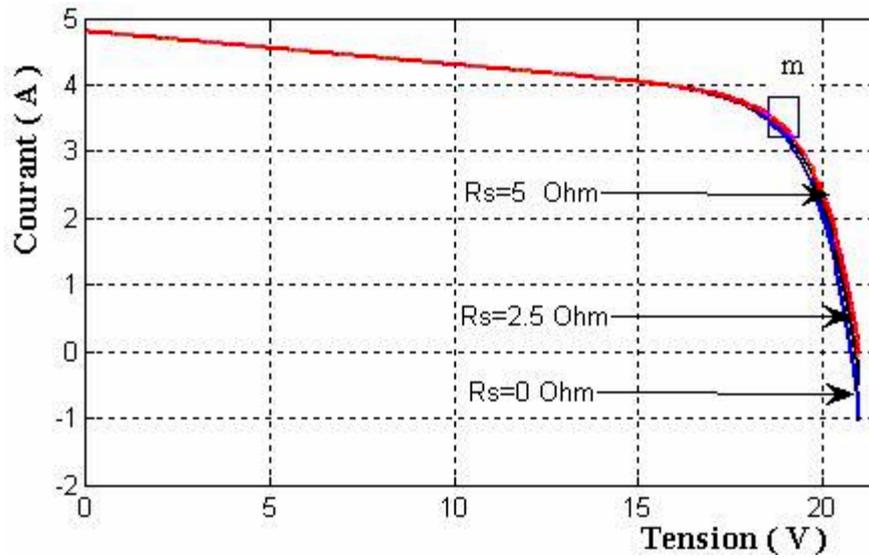


Figure (I.15) :Influence de la résistance série ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $R_s = 20 \Omega$).

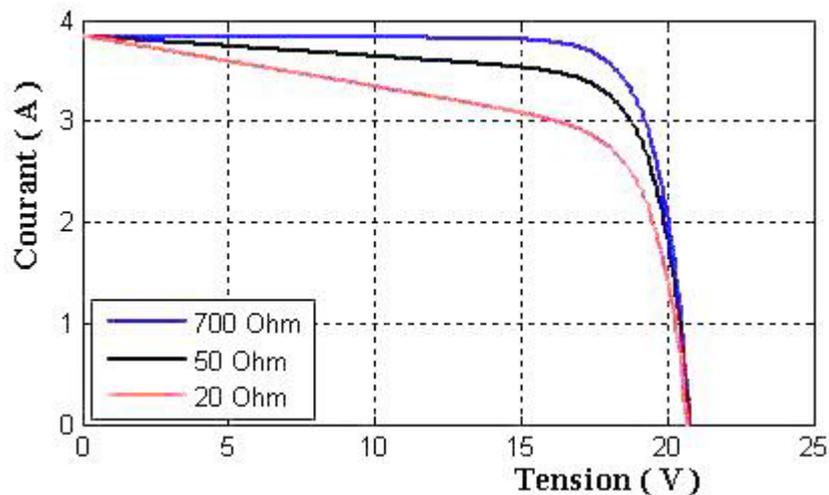


Figure (I.16) :Influence de la résistance parallèle ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $R_s = 5 \Omega$).

I.9. Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque" relié au récepteur sans autre élément.

Le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est en fonction de la puissance d'ensoleillement.

I.10. Les principaux systèmes photovoltaïques

Il y'a deux systèmes principaux :

- Les systèmes connectés au réseau ou « gridconnected » sont des systèmes reliés aux réseaux de distribution électrique, les consommateurs standards AC sont connectés au générateur via un onduleur (convertisseur DC/AC) parfois bidirectionnel (redresseur/onduleur). Le surplus d'énergie du générateur photovoltaïque est injecté au réseau public et les demandes de puissance sont connecté au réseau.
- Autonomes ou « stand-alone », ces installations isolées ne sont pas connectées au réseau, mais elles doivent assurer la couverture de la demande de la charge en tout temps.

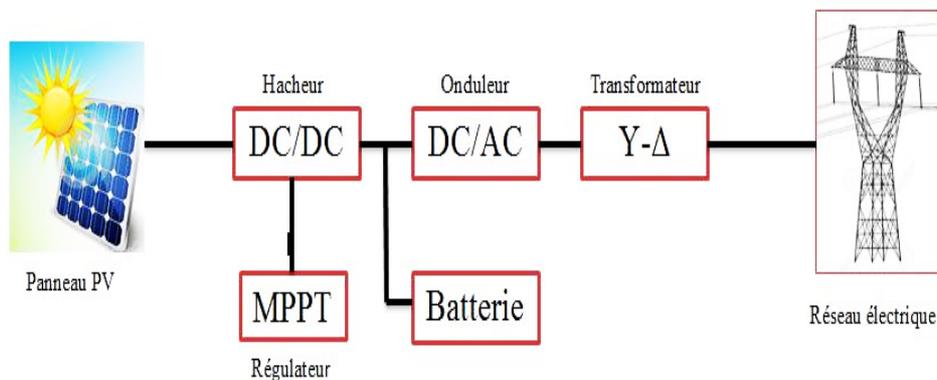


Figure (I.17) : Schéma simplifié d'un système photovoltaïque. [4]

I.11. Le système photovoltaïque autonome

C'est un système dont l'énergie produite est utilisée dans un site isolé et ayant une ou des batteries solaires pour stocker l'énergie. L'énergie produite par les modules est en courant continu et comme on touche à l'habitat où la plupart d'appareils fonctionnent en courant alternatif, il y a nécessité de la convertir.

La batterie servant de stockage, se charge le jour. L'alimentation des applications par la batterie se fait par l'intermédiaire d'un régulateur de charge pour éviter qu'elle souffre de surcharge et d'un onduleur (convertisseur du courant continu à celui alternatif). [11]

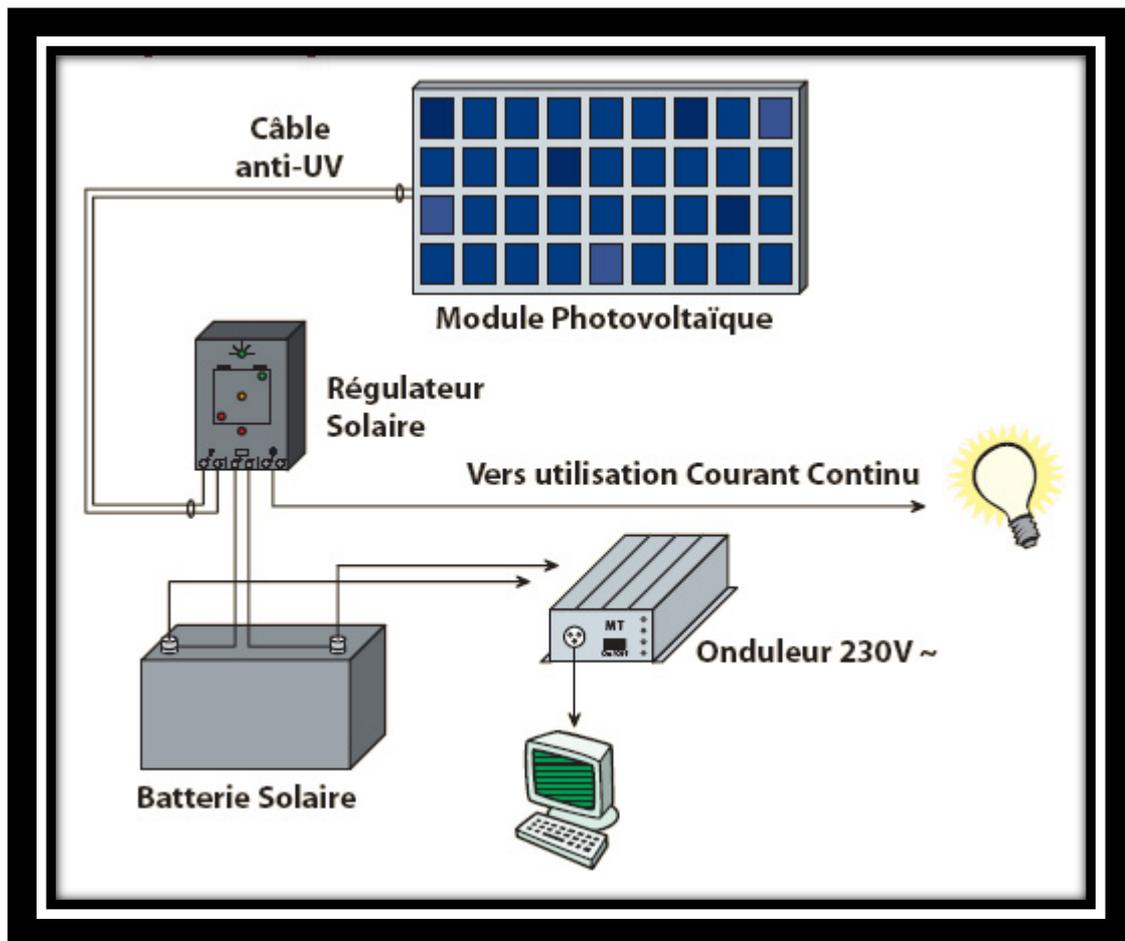


Figure (I.18) : plan simplifié d'un système autonome.

I.11.1. Les régulateurs de charge

Un régulateur de charge appelé aussi contrôleur de charge, est un système qui sert avant tout à contrôler l'état de la batterie. Il existe plusieurs valeurs limites correspondant chacune à un type de protection différent : surcharge, décharge profonde, température de fonctionnement, court-circuit, etc. On peut distinguer deux grandes familles de régulateurs si on s'intéresse particulièrement à leur structure, il y'a ceux qui ont une connexion directe entre le module photovoltaïque et la batterie, et ceux qui leur connexion comporte un étage intermédiaire d'adaptation d'impédance. Dans ces deux types de famille on peut citer [12] :

I.11.2 Les régulateur série / shunt

Ces régulateurs à connexion directe doivent intégrer les fonctionnalités de charge, décharge et sécurité citées précédemment. Deux types de régulateurs sont appropriés à ces exigences : le régulateur série et le régulateur shunt. La différence majeure entre les deux structures est le moyen de déconnecter l'énergie produite par le module photovoltaïque de la batterie. Dans la majorité des régulateurs, les interrupteurs sont des MOSFET.

Dans le marché des régulateurs on a deux régulateurs avec deux commandes différentes :

I.11.3 Le régulateur « PWM » (Pulse Width Modulation)

Certains régulateurs réalisent une commande PWM, le rapport cyclique varie selon l'énergie à fournir à la batterie afin de réaliser une charge à tension constante. Celui-ci est un peu plus subtil que le « tout ou rien » : Les régulateurs solaires traditionnels intégrant la technologie PWM relient les panneaux solaires au banc de batteries. Dans cette utilisation directe, la tension de sortie des panneaux est réduite à la tension nominale des batteries.

I.11.4 Le régulateur « MPPT »

Ce régulateur est actuellement la meilleure solution. Il contient un microcontrôleur et un convertisseur de tension qui permet de tirer toute l'énergie du module photovoltaïque malgré les variations de production de ces générateurs. L'idée est d'introduire un étage intermédiaire entre le module PV et la batterie qui sera constitué par le convertisseur DC-DC. Le fonctionnement est le suivant:

Les régulateurs MPPT (Maximum Power Point Tracker) traquent la tension V_{mp} (la tension requise pour une puissance maximale) des modules. Ils balayent une plage de tension en entrée pour déterminer constamment à quel point se trouve la puissance maximale délivrée par les modules. Le régulateur MPPT prélève la puissance à cette tension V_{mp} et la renvoie vers les batteries sous une tension plus basse, ce qui a pour effet d'augmenter le courant de charge. La puissance est égale au produit de la tension et du courant, ainsi, si la tension est réduite, le courant augmente nécessairement pour maintenir le ratio entrée/sortie égal. Pour un rendement de 100% : Puissance d'Entrée = Puissance de Sortie.

La charge idéale d'une batterie ne se fait pas à tension constante. Les batteries à décharge profonde demandent d'être rechargées en trois étapes distinctes (figure I.19). Elles ont besoin d'une charge rapide pulsée (bulk ou boost) suivie d'une charge lente (absorption). Ensuite le voltage est abaissé et maintenu à valeur fixe ; charge de maintien ou phase d'entretien (float). [13]

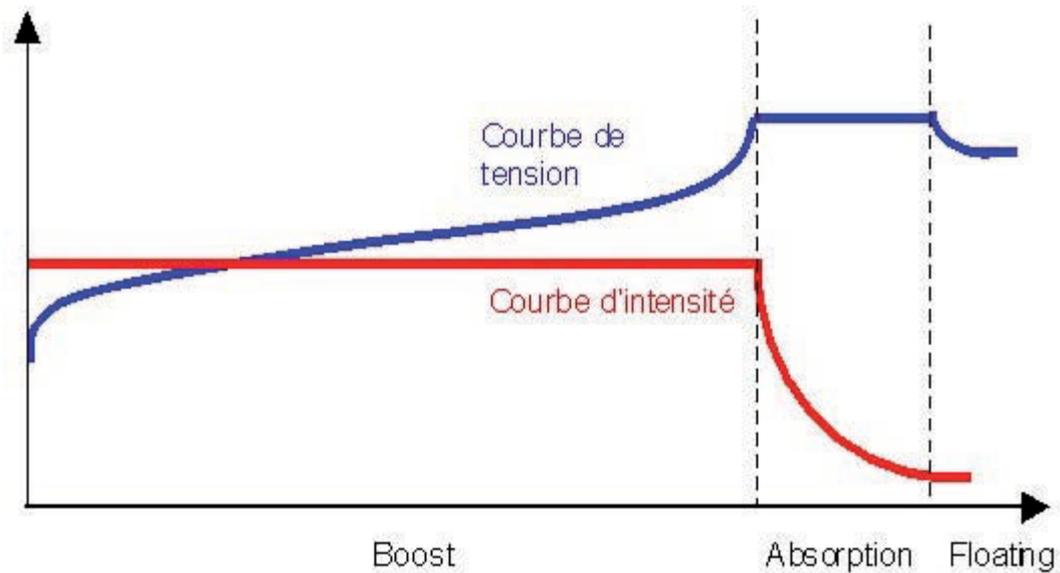


Figure (I.19) : Courbe de charge de la batterie.

I.11.5. L'onduleur

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques de l'électronique de puissance. Ils sont utilisés dans tout système électrique où la transformation de la tension continue en tension alternative est nécessaire. L'onduleur solaire permet de convertir le courant continu produit par les panneaux photovoltaïques en courant alternatif identique à celui du réseau électrique.

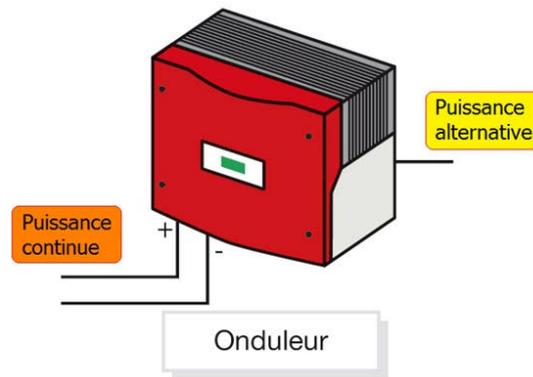


Figure (I.20) : Onduleur.

I.11.6. La batterie

La ressource en énergie solaire est abondante, cependant, la source, le soleil, n'est pas toujours disponible, ce qui implique obligatoirement un stockage. Il faut une batterie adéquate pour pouvoir profiter au maximum du solaire. En effet, une batterie classique ne peut pas convenir car elle ne sera pas adaptée aux cycles de charge et de décharge. Il faut utiliser une batterie semi-stationnaire à décharge lente car elle peut supporter une décharge jusqu'à 80% de sa capacité. Plus la décharge sera lente, plus la capacité énergétique sera grande. La décharge maximale d'une batterie solaire est en moyenne de 65% contre 30% pour une batterie classique. [14]



Figure (I.21) : Batterie solaire.

I.12. Avantages et inconvénients d'une installation PV [16]

I.12.1. Avantages

- ❖ D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- ❖ Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Méga Watt.
- ❖ Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- ❖ La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

I.12.2. Inconvénients

- ❖ La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- ❖ Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique de 28% pour une cellule. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- ❖ Tributaire des conditions météorologiques.
- ❖ Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- ❖ Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

I.13. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé l'origine du mot photovoltaïque ainsi que son historique, la définition des deux systèmes photovoltaïques principaux particulièrement le système autonome, qui est le fondement de notre mémoire, en plus de la construction des cellules photovoltaïques et leur effet ainsi que leur principe de fonctionnement. Ensuite nous avons abordés la modélisation d'une cellule photovoltaïque (PV) et nous avons étudié plusieurs modèles mathématiques, qui après résolution permettent chacun d'obtenir la caractéristique électrique $I=f(V)$. Enfin nous avons cité quelques avantages et inconvénients des installations photovoltaïques.

Chapitre II
Les régulateurs
de charge

II.1. Introduction

Les panneaux solaires ne sont que des convertisseurs d'énergie et non des réservoirs d'énergie, ils transforment l'énergie mais ne la stockent pas. Si l'application demande de l'énergie en dehors des périodes de production, c'est-à-dire dans l'obscurité, il faudra nécessairement récupérer cette énergie dans un stockage (batterie, accumulateur) et elle sera employée pour fournir de l'électricité dans l'obscurité et également lorsque le courant demandé est supérieur au courant fourni par les panneaux (démarrage d'un moteur par exemple). L'utilisation des batteries est très importante dans une installation PV autonome. Étant donné que les panneaux solaires ont encore l'efficacité de conversion relativement faible, le coût de l'ensemble du système peut être réduit en utilisant un régulateur de charge solaire qui peut extraire la puissance maximale possible du panneau.

Dans ce chapitre nous allons aborder les différentes connexions entre le générateur photovoltaïque et la charge, les types de régulateurs de charge, leurs avantages et inconvénients pour choisir la stratégie que nous allons optimiser dans le dernier chapitre.

II.2. Connexions GPV-charge

Il y'a plusieurs types de connexions (GPV-charge) possibles, de la plus simple avec une seule diode anti-retour à la plus complexe avec un convertisseur statique et des commandes.

II.2.1. Connexion directe

Pour ce type de connexion, une diode est insérée entre le GPV et la charge, Figure (II.1). Ce type de connexion permet d'éviter le courant retournant au GPV lorsqu'il n'est plus éclairé et soit détruit s'il atteint ses limites de fonctionnement en récepteur (emballement thermique, phénomènes d'avalanche).

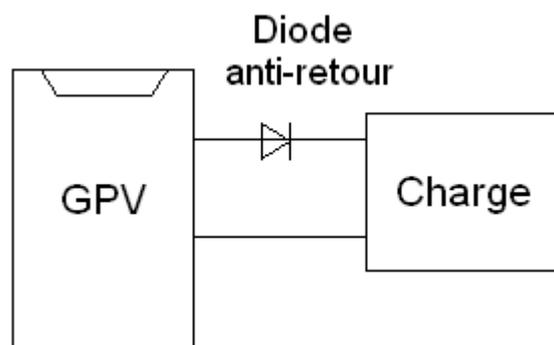


Figure (II.1) : Connexion directe d'un GPV à sa charge.

L'inconvénient de la connexion directe :

L'inconvénient majeure de cette connexion est qu'on ne peut pas régler la tension ou le courant pour avoir un maximum de puissance depuis le GPV. Dans notre cas la charge est une batterie et dans ce genre de connexion directe (GPV-batterie) on est obligé à avoir une puissance limitée par la tension de la batterie et à cause de ça cette dernière ne peut pas se situer sur le PPM du GPV.

La Figure(II.2) montre les points de fonctionnement de différentes charge possibles (charge résistive, source de courant, source de tension) sur la courbe de puissance (point A, B, C). Ces points peuvent se retrouver éloignés du PPM, le GPV est alors mal exploité et une partie de la puissance maximale potentielle n'est pas transférée à la charge.

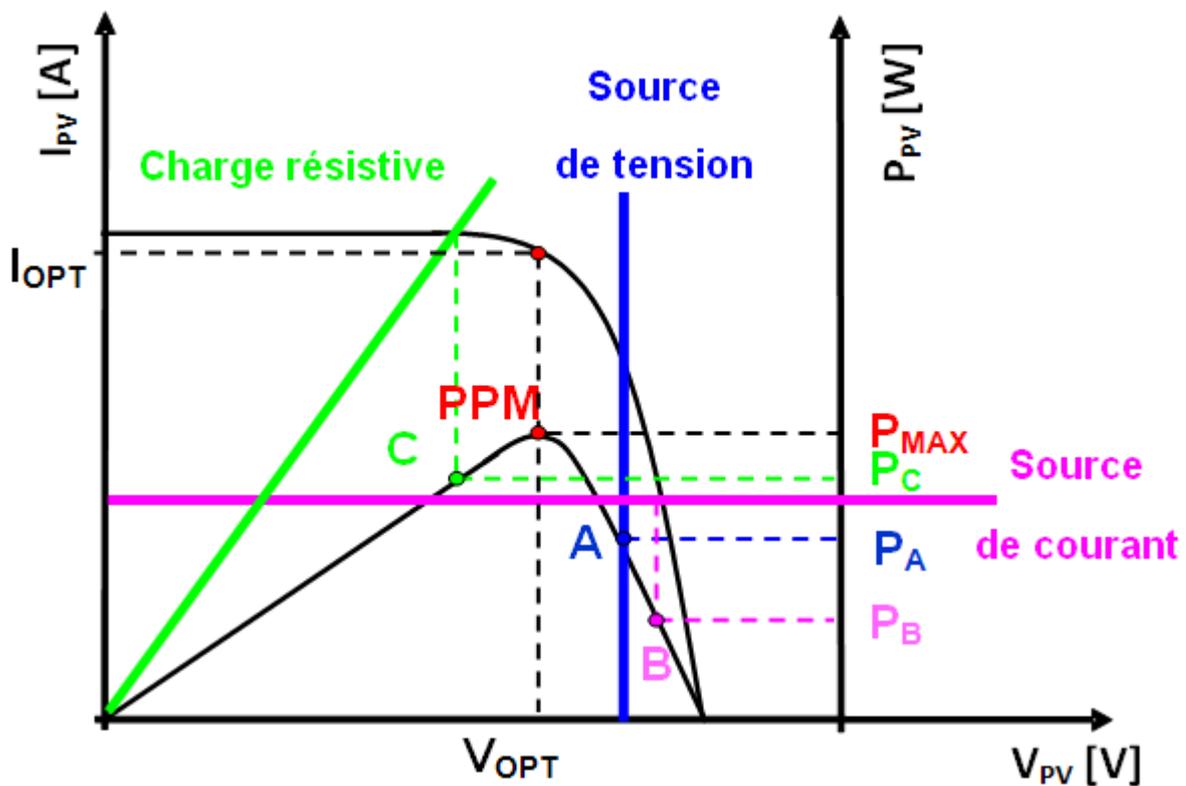


Figure (II.2) : Connexion directe entre un GPV et sa charge - points de fonctionnement pour différentes charges [17].

II.2.2. Connexion GPV- convertisseur DC/DC - charge :

Pour résoudre les problèmes de la connexion directe on peut introduire un convertisseur statique entre le GPV et la charge pour avoir le maximum de potentiel du GPV (Figure II.3). Suivant les niveaux de tensions, la structure du convertisseur sera différente (convertisseur abaisseur « Buck », élévateur « Boost », ...).

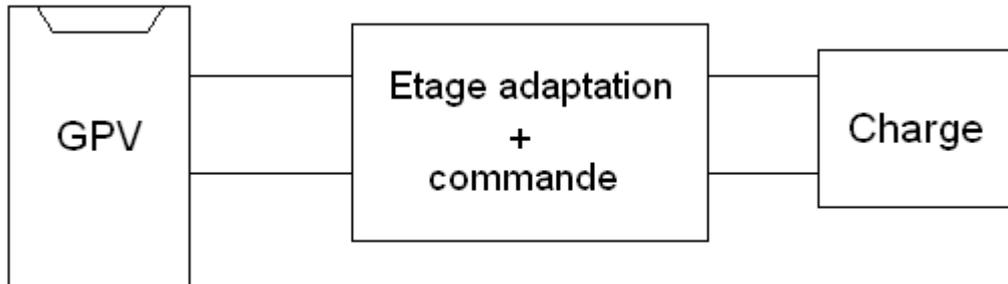


Figure (II.3) : Ajout d'un étage d'adaptation entre le GPV et la charge.

Le convertisseur ne peut pas être utile sans qu'on lui associe une commande lui permettant d'extraire la puissance maximale du GPV à tout instant. La commande MPPT recherche le PPM en permanence (point de puissance maximale) en modifiant l'impédance d'entrée du convertisseur. Les caractéristiques qu'on va utiliser pour notre mémoire sont comme suit :

Tension de batterie : 24V.

$V_{CO} = 22.1V$ (la tension fournie par le GPV).

Type de convertisseur : boost (V_{CO} inférieure à la tension de la batterie).

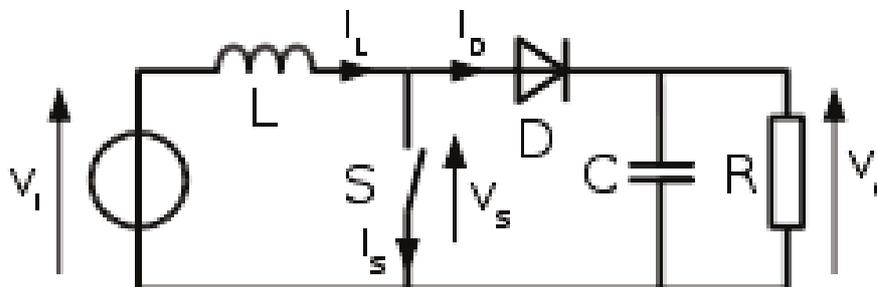


Figure (II.4) : Schéma d'un convertisseur élévateur du type Boost [18].

Un convertisseur Boost est une alimentation à découpage qui permet d'élever la tension de sortie. Son fonctionnement peut être divisé en deux phases, suivant l'état de l'interrupteur Figure(II.5) :

- Une phase d'accumulation d'énergie : l'interrupteur est fermé (état passant), le courant dans l'inductance augmente, une quantité d'énergie est alors stockée sous forme d'énergie magnétique.
- Une phase où l'interrupteur est ouvert : l'inductance se trouve en série avec le générateur. La fem de l'inductance s'ajoute à celle du générateur, ce qui donne un effet survolteur. Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode, le condensateur et la charge. L'énergie accumulée dans l'inductance est transférée vers la charge.

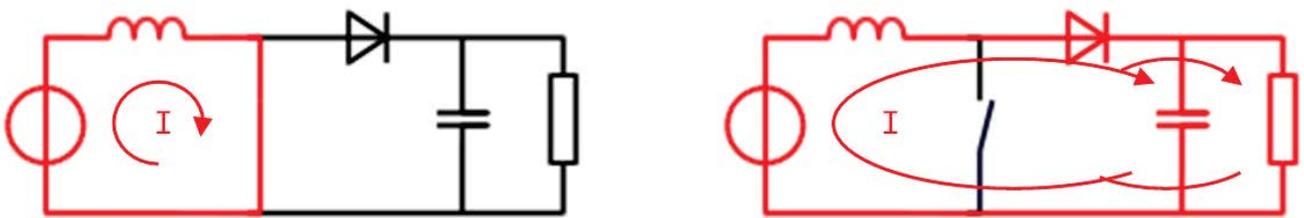


Figure (II.5) : a) phase d'accumulation d'énergie - b) la fem de l'inductance s'ajoute à celle du générateur [18].

La valeur du rapport cyclique notée α ou D selon la littérature dépend de T_{ON} : durée de l'état passant du composant actif, et de $T_{PERIODE}$: durée de la période de découpage.

Soit $\alpha = T_{ON} / T_{PERIODE}$ selon le temps de fermeture appliqué sur l'interrupteur, l'amplification de la tension en sortie du convertisseur par rapport à sa tension d'entrée varie.

$$V_{out}/V_{in} = 1 / 1 - \alpha \quad \dots \quad (II.1)$$

La fréquence de découpage peut aller de la dizaine de kHz jusqu'à quelques MHz suivant les contraintes imposées par le cahier des charges. D'une manière générale, en augmentant la fréquence de découpage, les pertes par commutation augmentent alors que la taille des éléments passifs diminue.

II.3 Types de régulateur de charge [21]

Les deux types de contrôleurs (régulateurs) de charge les plus couramment utilisés dans les systèmes d'énergie solaire actuels sont basés sur la modulation de largeur d'impulsion (MLI ou Pulse Width Modulation : PWM) et la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) mais on a décidé aussi d'inclure dans notre étude le type de contrôleur de charge le plus ancien et qui est considéré comme la base de tous les contrôleurs de charge qui existe aujourd'hui, c'est le contrôleur TOR ou « tout ou rien ».

II.4. Le régulateur tout ou rien (TOR)

Le régulateur en série avec le panneau interrompt la charge de la batterie par coupure électromécanique lorsque celle-ci atteint un seuil maximum. La remise en charge est automatique à partir d'un seuil de tension inférieur.

II.4.1. Avantages et inconvénients des régulateurs « tout ou rien »

- Les avantages des régulateurs « tout ou rien » sont la simplicité, la robustesse et le faible coût.
- Par contre, le principal inconvénient (et non des moindres) est que l'état de charge des batteries ne dépasse jamais 75%. Cela s'observe facilement en constatant que le point ② sur le schéma correspond à un état de charge de l'ordre de 75%, et qu'il n'est

Pas possible de charger davantage sous peine de dépasser la tension maximale admissible.

Avantages	Inconvénients
=> Simplicité, robustesse => Réparable => Faible coût	=> L'état de charge des batteries ne dépasse jamais 75%. => Le régulateur ne permet pas d'exploiter la totalité de la puissance photovoltaïque disponible. => La tension du champ photovoltaïque doit être compatible avec celle du parc de batteries.

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients des régulateurs « tout ou rien ».

II.5. Le régulateur MLI (PWM)

Le régulateur de charge MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) a été conçu, vers la fin des années 1990, afin de lever l'inconvénient majeur des régulateurs « tout ou rien » vis-à-vis de la fin de charge. Sa valeur ajoutée est donc une fin de charge optimale avec un état de charge de 100% (au lieu de 75% pour le régulateur « tout ou rien »).

Le régulateur de charge MLI (PWM) est le moyen le plus efficace pour obtenir une charge de batterie à tension constante en ajustant le rapport cyclique (α) des commutateurs (MOSFET). Dans le régulateur de charge PWM, le courant du panneau solaire diminue en fonction de l'état de la batterie et des besoins de recharge. Lorsque la tension de la batterie atteint le point de consigne de régulation, l'algorithme PWM réduit lentement le courant de charge pour éviter le réchauffement et le dégazage de la batterie ; cependant la charge continue à transférer le maximum d'énergie à la batterie dans les délais les plus brefs. La tension délivrée par le générateur PV sera abaissée par le régulateur PWM à une valeur proche de celle de la batterie [19].

II.5.1. Avantages et inconvénients des régulateurs MLI

Avantages	Inconvénients
=> L'état de charge maximale (100 %) est atteignable.	=> Le coût du régulateur est plus élevé. => Le régulateur ne permet pas d'exploiter la totalité de la puissance photovoltaïque disponible. => La tension du champ photovoltaïque doit être compatible avec celle du parc de batteries.

Tableau II.2 : Avantages et inconvénients des régulateurs MLI.

II.6. Régulateur de charge MPPT [17]

Actuellement, le régulateur de charge solaire le plus utilisé est celui basé sur l'algorithme MPPT. Il est plus développé, plus cher et présente de nombreux avantages par rapport au contrôleur de charge PWM. Il a une efficacité de 30 à 40% à basse température. Il ajustera sa tension d'entrée pour obtenir le maximum de puissance des panneaux solaires, puis convertir cette énergie pour répondre aux différentes exigences de tension de la batterie et de la charge.

La puissance maximale que peut fournir un GPV ainsi que sa tension optimale V_{OPT} n'est pas connue à l'avance. Pour extraire le maximum de puissance du GPV, des lois de commandes permettant de trouver le point maximum existant. Appelées MPPT pour Maximum Power Point Tracking, elles permettent de contrôler le convertisseur de puissance afin qu'il assure la meilleure adaptation possible entre le GPV et sa charge Figure(II.6).

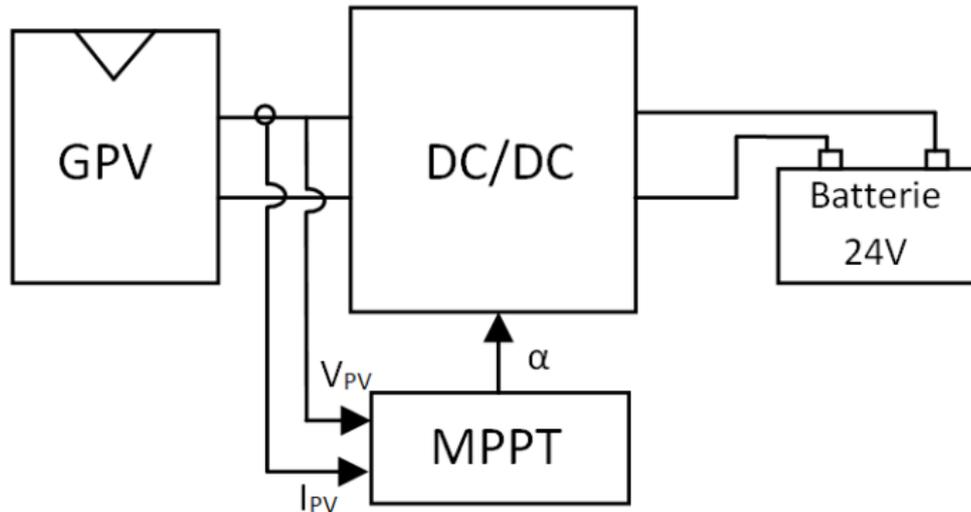


Figure (II.6) : Schéma de principe d'une connexion à travers un convertisseur DC/DC contrôlé par une commande MPPT.

II.6.1. La méthode Perturb and Observe (P&O)

La méthode « Perturbe and Observe » ou (P&O), est une commande est de type extrémal, c'est-à-dire qu'il est possible de connaître l'évolution d'un paramètre ou d'une variable physique à l'aide d'une perturbation du paramètre d'entrée

La méthode P&O consiste à ajouter un signal de faible amplitude positif ou négatif a la tension V_{PV} du GPV pour la perturber, puis analyser la variation de puissance (noté dP) pour savoir où se situe le PPM par rapport au point de fonctionnement actuel.

Si la perturbation consiste à augmenter la tension V_{PV} , et on voit que la puissance augmente également, c'est que le PPM se situe à droite du point de fonctionnement actuel. Cette information permet de déplacer le point de fonctionnement jusqu'au PPM, en contrôlant le rapport cyclique du convertisseur DC/DC. Une fois le PPM atteint, le point de fonctionnement oscille autour de celui-ci Figure(II.7).

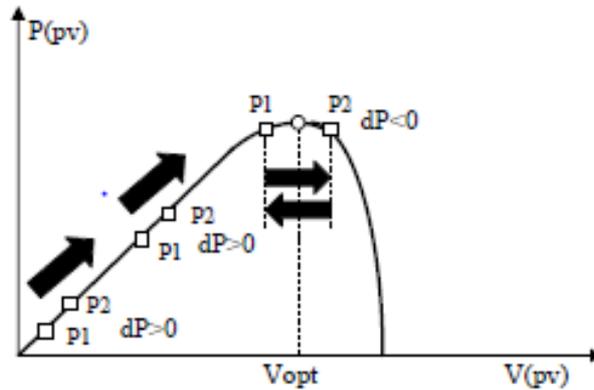


Figure (II.7) : Principe de fonctionnement de la MPPT P&O.

Le rendement MPPT, noté η_{MPPT} , correspond à la puissance moyenne délivrée par le module photovoltaïque, qui dépend de la commande utilisée, par rapport au PPM disponible au cours de la même période Figure(II.8) et peut être défini par la relation suivante :

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{MOY}}{P_{MAX}} \quad \dots (II.2)$$

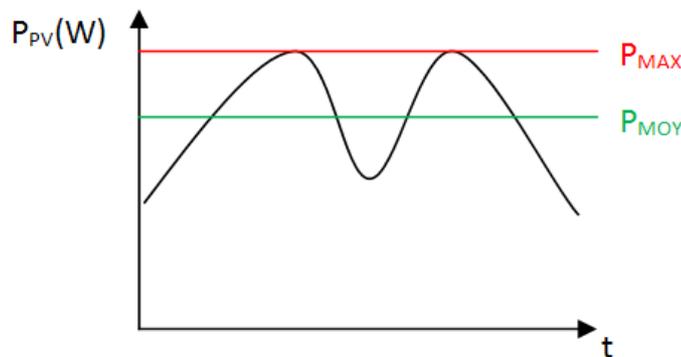


Figure (II.8) : Définition du rendement MPPT

La commande doit également assurer un bon fonctionnement en dynamique. Lors d'un changement d'un/des paramètres météo (ensoleillement, température), le nouveau PPM doit être retrouvé le plus rapidement possible.

Les commandes réalisées pendant ce mémoire sont de type numérique car elle nécessite moins de composants, une dimension de carte réduite ainsi qu'une plus grande flexibilité par rapport à une commande analogique (FigureII.9).

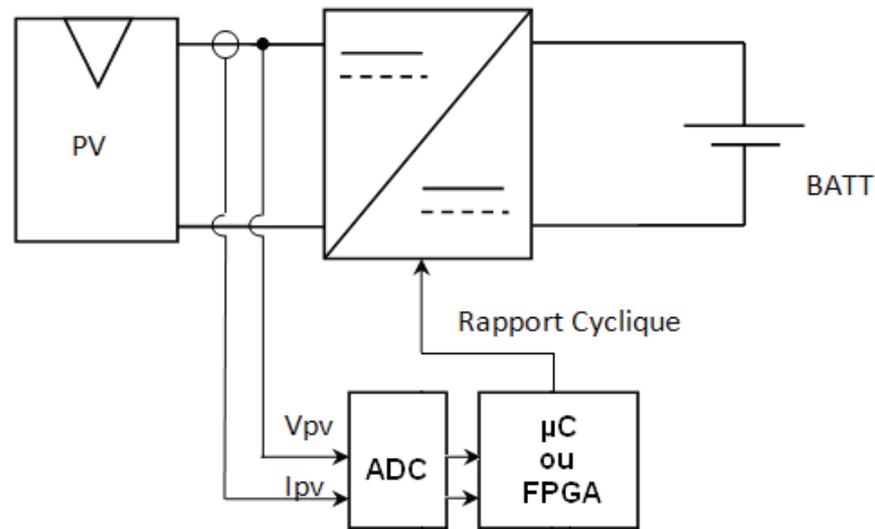


Figure (II.9) : Chaîne de conversion photovoltaïque avec acquisition et commande numérique

La première possibilité est d'utiliser un microcontrôleur. De plus en plus performants, ils peuvent travailler avec des registres 8 bits, 16 bits et même 32 bits. Des convertisseurs analogiques numériques (ADC) sont intégrés dans la puce, ainsi que des sorties pouvant générer des signaux de type PWM à des fréquences suffisamment élevées pour les convertisseurs de puissance. Les progrès réalisés sur ces circuits permettent une faible consommation électrique pour réaliser la commande.

Pour notre travail on s'est servi d'un FPGA. Programmé en VHDL, le FPGA qui permet de décrire le comportement du composant souhaité. Il est possible de réaliser plusieurs actions en parallèle, d'optimiser la largeur des bus pour une application spécifique, de contrôler chaque bit un à un. Bien que certains intègrent des ADC, la majorité des FPGA n'en sont pas dotées, ce qui oblige à rajouter un ou des composants externes supplémentaires pour réaliser l'acquisition des signaux analogiques.

II.7. Comparaison entre régulateurs PWM et MPPT

Le choix du régulateur reste dépendant de plusieurs facteurs qu'on a résumés dans le tableau ci-dessous :

	Régulateur de charge solaire PWM	Régulateur de charge solaire MPPT
Tension du panneau solaire	Les tensions des panneaux photovoltaïques et de la batterie doivent correspondre à celles des panneaux solaires.	La tension du générateur PV peut être supérieure à la tension de la batterie.
Tension de la batterie	Fonctionne à la tension de la batterie, ce qui lui permet de bien fonctionner à des températures chaudes et lorsque la batterie est presque pleine.	Fonctionne au-dessus de la tension de la batterie, ce qui lui permet de fournir un "boost" par temps froid et lorsque la batterie est faible.
Taille du système	Généralement recommandé pour l'utilisation dans les petits systèmes où les avantages de la technologie MPPT sont minimes.	≈ 150W - 200W ou plus pour profiter des avantages du MPPT.
Module PV	Doit utiliser des modules PV hors réseau typiquement avec $V_{mp} \approx 17$ à 18 Volts pour chaque tension nominale de batterie de 12V.	Permet l'utilisation de modules PV à faible coût et reliés au réseau, ce qui aide à réduire le coût global du système PV.
Dimensionnement des réseaux	Matrice PV de taille en Ampères (basé sur le courant produit lorsque la matrice PV fonctionne à la tension de la batterie)	Puissance du générateur PV en Watts (basé sur le contrôleur Courant de charge maxi. x Tension de la batterie)

Tableau II.3 : comparaison entre régulateur PWM et MPPT[28].

II.8. Conclusion

Après tout ce qu'on a cité dans ce chapitre on peut voir la supériorité du régulateur MPPT par rapport au régulateur PWM si on veut exploiter le maximum de la puissance disponible. Bien qu'ayant toutes le même objectif qui est d'optimiser le transfert de puissance, les différentes commandes MPPT utilisent des moyens différents pour y parvenir. Le prochain et dernier chapitre sera consacré à présenter et optimiser ces commandes proprement dites.

Chapitre III
Amélioration des commandes
MPPT : Etude comparative

III.1. Introduction

L'avantage le plus bénéfique des régulateurs MPPT se consiste essentiellement dans leurs commandes. Dans ce chapitre on va présenter 6 commandes et les améliorations présentées par chaque type de commande.

III.2. Test et optimisation des Commandes MPPT

Comme définit dans le chapitre précédent la commande MPPT « Perturb and Observe », nécessite de savoir le courant et la tension du module PV pour calculer sa puissance, et ainsi savoir si on se rapproche ou s'éloigne du PPM.

Dans cette partie on va présenter 6 commandes MPPT dont 4 sont de type « Perturb and Observe » qu'on peut citer comme suit :

- 1- La « P&O » de Cédric Cabal [18].
- 2- La version améliorée « P&O adaptative » [18].
- 3- La « new P&O » de Youssef El-basri [24] dont les informations se trouvent dans les thèses et publications.
- 4- L'optimisation de la « New P&O » de Cyril LAHORE [17].
- 5- Commande à fraction de V_{OC} .
- 6- Commande à fraction de I_{cc} .

III.2.1. La commande P&O « classique »

Chaque milliseconde les blocs ADC font l'acquisition des variables correspondant à la tension V_{PV} et au courant I_{PV} pour obtenir la valeur de puissance en multipliant les deux variables précédentes (Figure III.2), puis, comparer cette puissance avec la puissance précédemment calculée (P_{N-1}) pour avoir après une dérivée qui détermine si la puissance est dans le sens positive ou négative.

Une dérivée positive signifie que le point de fonctionnement se rapproche du PPM, dans ce cas, le sens de la recherche (contenu dans la variable « piste ») est maintenu. Lorsque le PPM est dépassé, la dérivée de puissance devient négative, le sens de la recherche doit alors être inversé pour se diriger vers le PPM. Le sens de la recherche détermine si la commande est dans une phase d'augmentation ou de diminution du rapport cyclique D .

L'ajout d'une fonction qui bloque le changement de sens de la recherche est nécessaire pour éviter le cas où le transitoire du convertisseur perturbe le suivi du PPM [25] et pour aussi se prémunir des changements de sens de recherche non souhaité dus par exemple à une variation rapide d'ensoleillement [18].

Cette fonction bloque le sens de la recherche durant le temps choisi grâce à un délai de 10ms dès qu'il a subi une inversion (le délai doit être supérieur à quatre fois la plus grande constante de temps du convertisseur [25]).

Le système parcourt la courbe de puissance (Figure III.1) en passant par les points P1, P2 et P3. Le calcul de la dérivée en P3 donne une valeur négative, d'où une inversion du sens de recherche (la variable « piste » passe de '0' à '1'). Si au moment où le point de fonctionnement se trouve sur P4, l'ensoleillement diminue, le point de fonctionnement se retrouve sur P5. A ce moment-là, s'il n'y a pas de délai, la dérivée de puissance serait négative et le sens de recherche à nouveau inversé, entraînant le point de fonctionnement vers le circuit ouvert (à droite de la courbe). Le délai permet de bloquer le sens de recherche. Le point de fonctionnement se rapproche de P6, qui représente le PPM, et oscille autour de celui-ci [17].

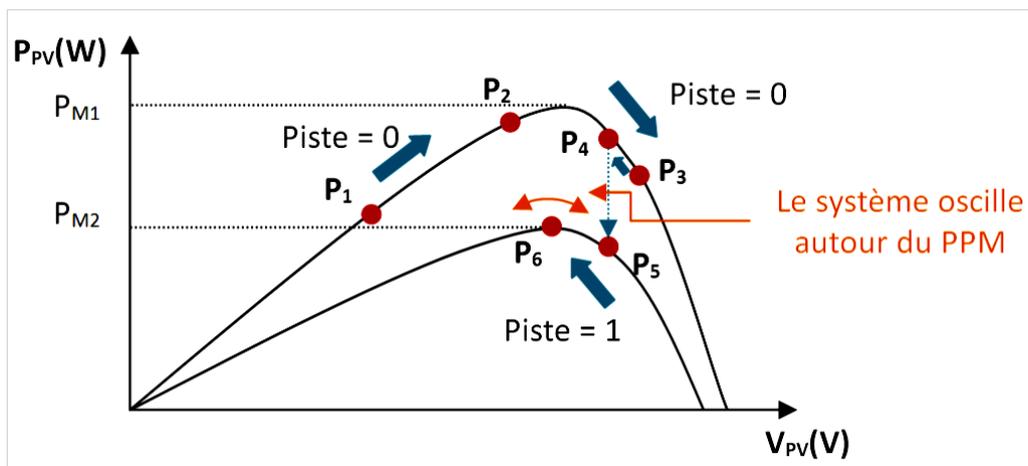


Figure (III.1) : Fonctionnement de la commande MPPT P&O suite à une variation d'ensoleillement [17].

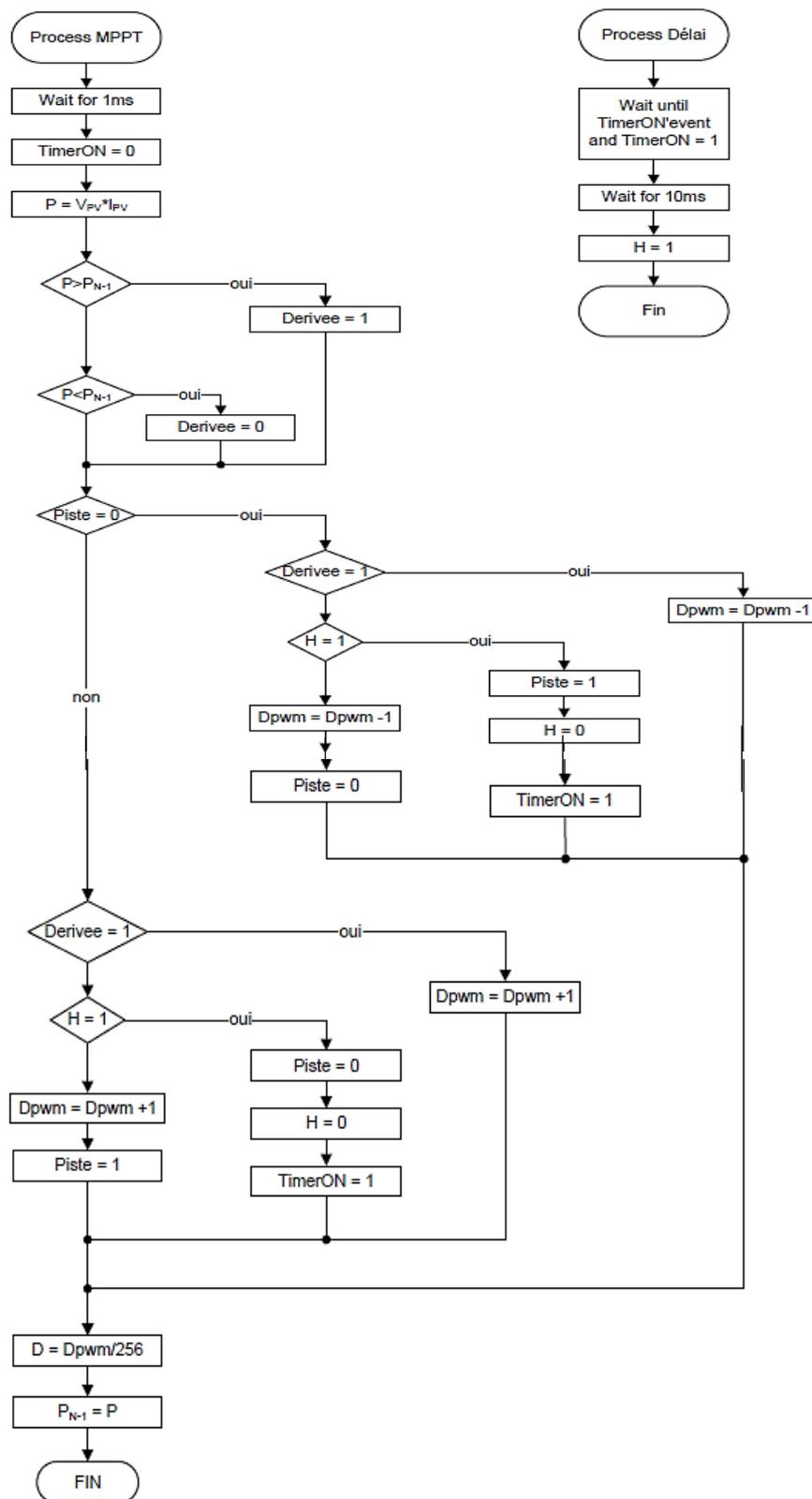


Figure (III.2) : Algorithme de la commande P&O « classique ».

III.2.2. Amélioration de la commande P&O classique : la P&O adaptative

L'amélioration de consiste sur :

- L'augmentation du rendement MPPT en régime statique.
- Une meilleure recherche du PPM lors de très faible puissance.

Pour y parvenir, il faut :

- Minimiser l'oscillation autour du PPM :

Lorsque le GPV fonctionne à moyenne ou forte puissance, la caractéristique du module est suffisamment prononcée pour obtenir une bonne dérivée de puissance et trouver le PPM. Le délai, qui oblige à parcourir la caractéristique du GPV dans un sens donné durant son laps de temps, peut alors être réduit pour diminuer l'oscillation autour du PPM (Figure III.3). Les pertes seront diminuées et le rendement plus élevé.

- Allonger la durée du délai :

Lorsque la puissance disponible sur le module est faible, le signe de la dérivée devient difficile à déterminer et des erreurs peuvent se produire emmenant à osciller autour d'un faux PPM. Pour ça l'allongement du délai permet de parcourir la caractéristique du module plus longtemps, garantissant de passer par le PPM.

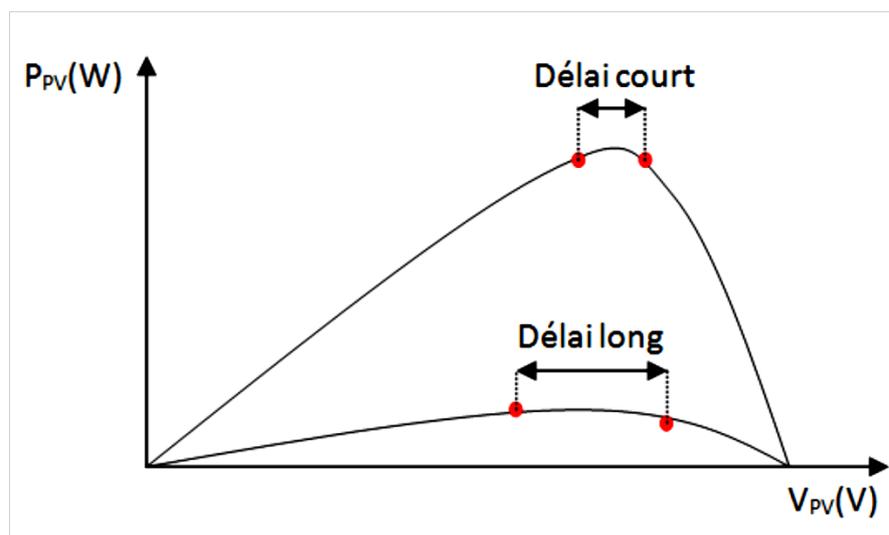


Figure (III.3) : Principe de fonctionnement de la P&O adaptative [17].

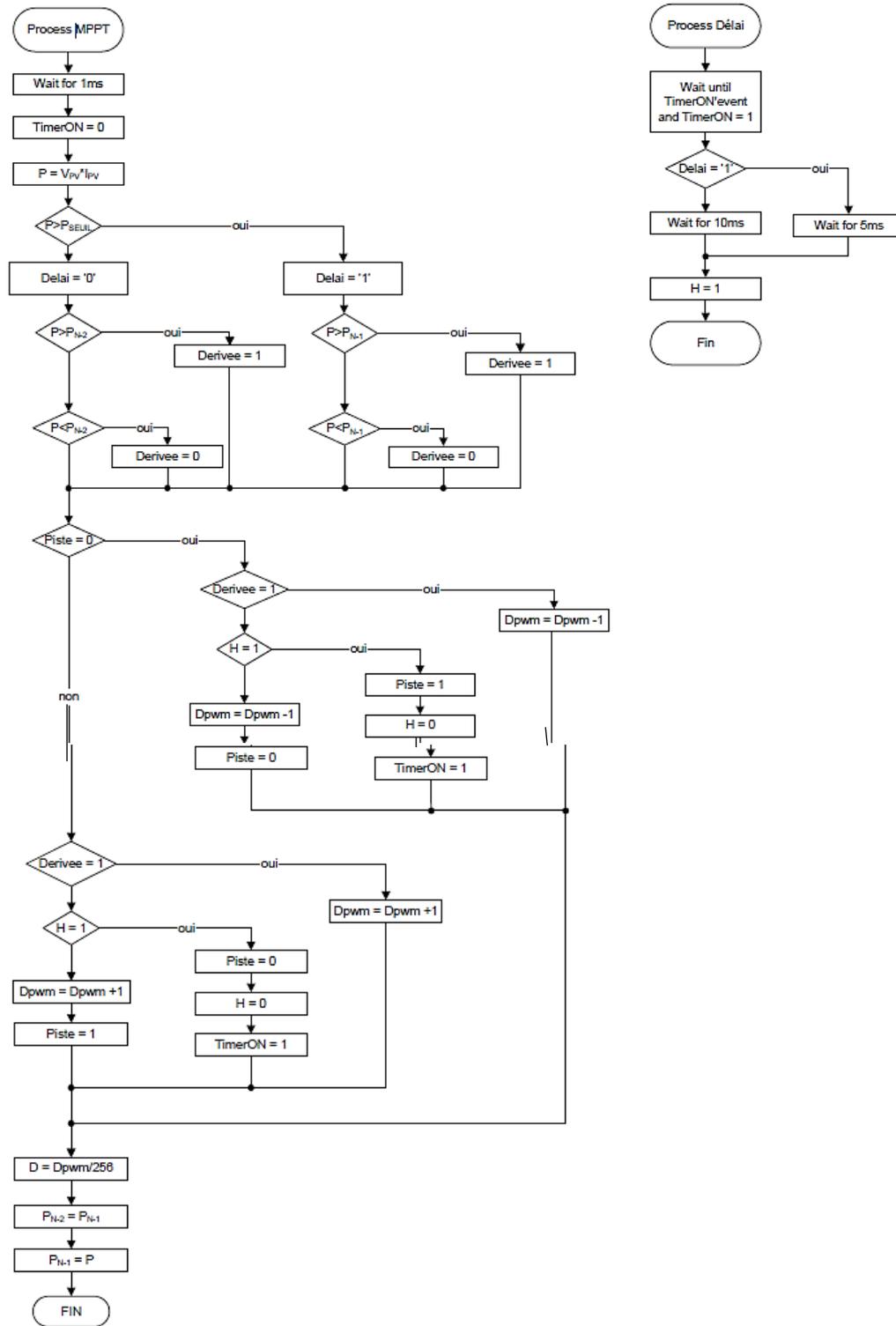


Figure (III.4) : Algorithme de la commande P&O adaptative.

III.2.3. La commande P&O à perturbation triangulaire

Le but de cette commande est de réaliser une perturbation triangulaire d'amplitude et de période constante pour trouver le PPM (Figure III.5). La variation de tension du GPV due à la perturbation va provoquer également une variation de sa puissance. La puissance est mesurée en deux points P1 et P2 correspondant aux maximum et minimum de la perturbation triangulaire. Une comparaison de ces deux puissances permet de déterminer où se situe le PPM par rapport au point de fonctionnement actuel. Dans le cas où $P2 > P1$, le PPM se trouve à gauche du point actuel, il faut donc diminuer la tension V_{PV} pour s'en rapprocher. Pour y parvenir, le rapport cyclique du convertisseur doit être augmenté (représenté par la variable « offset » dans l'algorithme).

Le contraire est valable si $P1 > P2$, où, dans ce cas le PPM se trouve à droite, la tension V_{PV} doit être augmentée, en diminuant le rapport cyclique. Lorsque les deux puissances sont identiques, cela signifie que le point de fonctionnement oscille autour du PPM[17].

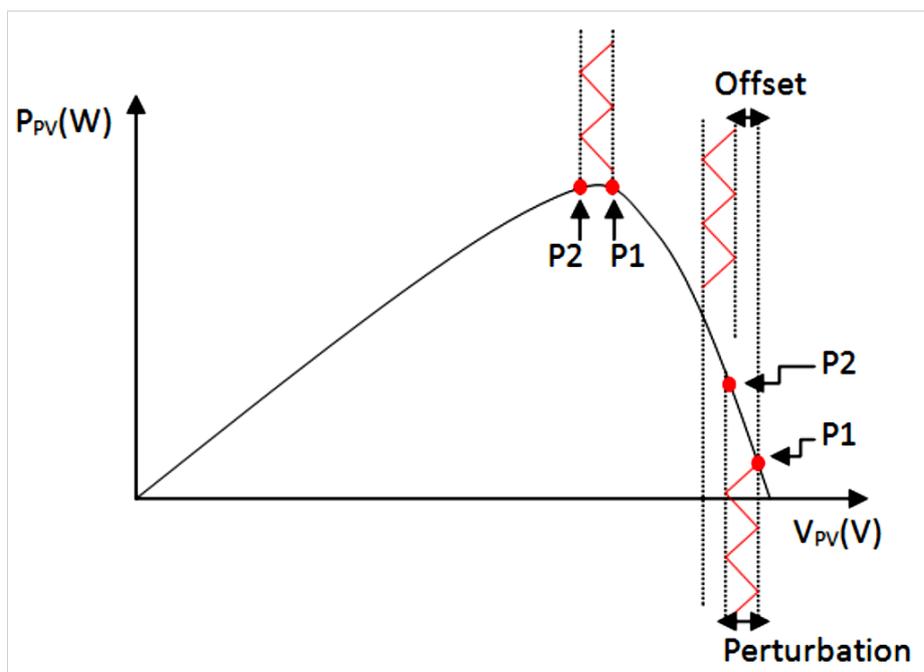


Figure (III.5) : Principe de fonctionnement de la commande P&O à perturbation triangulaire.

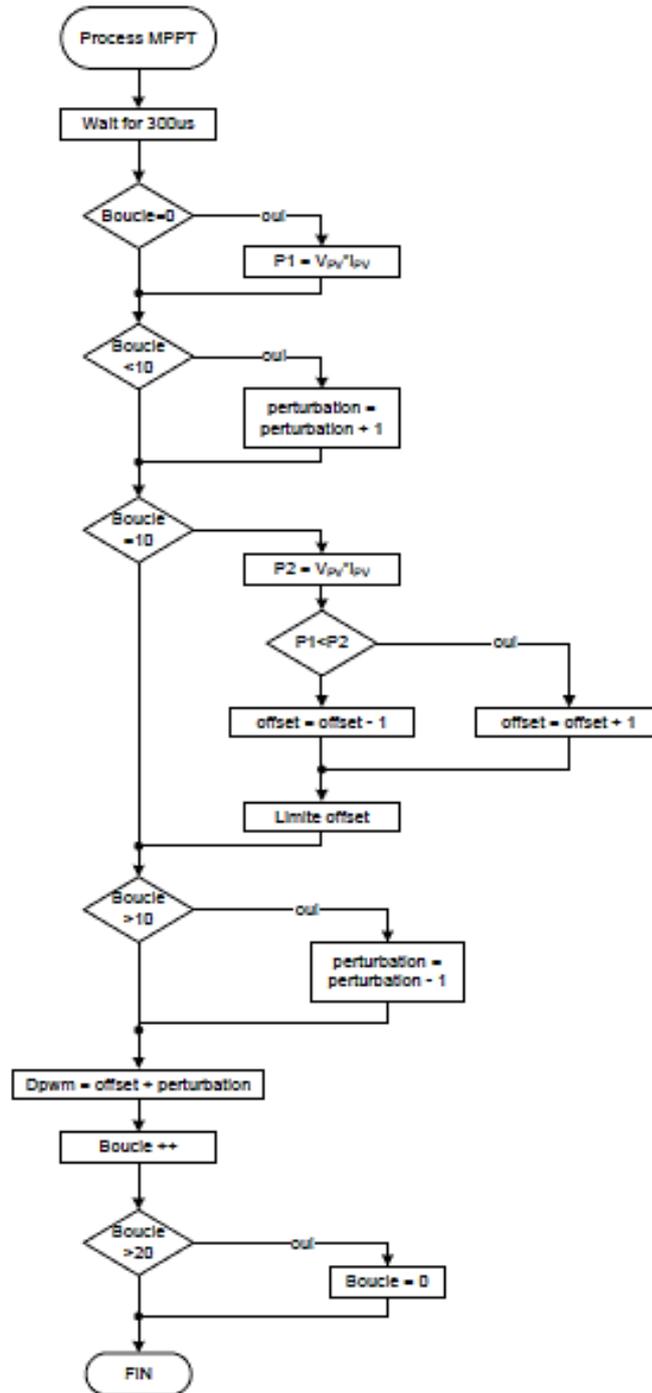


Figure (III.6) : Algorithme de la commande P&O à perturbation triangulaire.

III.2.4. Amélioration de la P&O à perturbation triangulaire

On peut améliorer cette commande avec :

- L'ajout d'un correcteur PI.
- Rendre la perturbation appliquée variable en fonction de la puissance du GPV.

III.2.4.1. Le Correcteur PI :

L'ajout d'un correcteur PI (proportionnel intégral) a pour but, remplacer l'offset qui incrémente ou décrémente la variable « offset » après la comparaison de P1 et P2 pour réduire le temps de réponse de la commande.

Le calcul de l'erreur est obtenu par la différence entre P2 et P1, cette valeur est ensuite normalisée pour avoir la même réponse quel que soit le niveau de puissance. Chaque élément du correcteur (proportionnel et intégral) est ensuite calculé, puis additionné en pondérant suivant leurs coefficients :

$$PI = K_p * erreur + K_i \sum erreurs \quad \dots \quad (III.1)$$

La valeur de la perturbation est ajoutée à celle présente en sortie du correcteur et donne la valeur représentant le temps de fermeture de l'interrupteur du convertisseur DC/DC [17].

III.2.4.2 Perturbation triangulaire d'amplitude variable :

Le remplacement de la perturbation d'amplitude constante par une perturbation avec une amplitude qui varie en fonction de la puissance fournie par le module photovoltaïque a un bénéfice très conséquent sur la puissance extraite du module. Pour obtenir un bon rendement MPPT lors de moyenne et forte puissance il faut appliquer une perturbation de faible amplitude, par contre la perturbation de forte amplitude garantira un bon fonctionnement même en cas de faible ensoleillement.

Une des solutions possibles consisterait à attribuer le pas de la perturbation en définissant différents seuils de puissance. Dans le cas présent, pour réaliser cette amélioration de façon optimale, une fonction permettant de trouver l'amplitude du pas de la perturbation en fonction de la puissance doit être déterminée. Pour cela, il faut commencer par calculer l'écart de puissance minimal dû à la commande (et non à l'ondulation causé par le découpage du convertisseur) que le système peut mesurer, puis déterminer la valeur de la perturbation sur la tension du GPV à appliquer pour obtenir cet écart de puissance (Figure III.7) et enfin trouver la relation qui les lie.

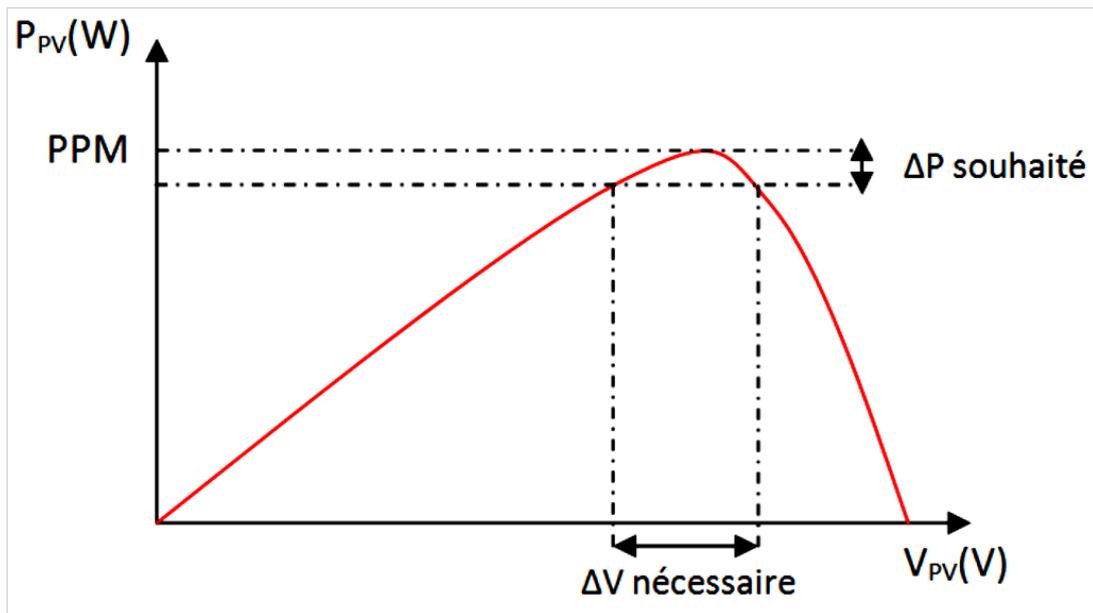


Figure (III.7) : Amplitude de la perturbation déterminée par le ΔP pour un ensoleillement donné.

III.2.5. Commande à fraction de V_{OC}

Le principe de cette commande est la comparaison entre la tension du module PV et une tension de référence, et avoir après une valeur qu'on peut utiliser pour déterminer le rapport cyclique nécessaire pour arriver à la tension de référence.

La tension de référence correspond à la tension optimale du GPV, là où se situe le PPM. Elle dépend d'un coefficient ainsi que de la tension en circuit ouvert du module :

$$V_{OPT} = V_{OC} * k \quad \dots \text{(III.2)}$$

Malgré qu'elle soit simple mais la commande à fraction de V_{OC} à plusieurs avantages et on peut citer quelques uns :

- Puissance nécessaire pour le calcul relativement faible.
- L'inutilité d'un capteur de courant pour cette commande car on n'a pas besoin d'une mesure de courant et par conséquent limiter les pertes.

Avec ces deux avantages on peut réduire la taille, la puissance consommée, et le coût de la commande.

Par contre :

- Puisque le coefficient « k » est lié essentiellement à la température du matériau utilisé pour la fabrication du GPV on ne peut pas utiliser la même commande sur tous les modules [18].
- La mesure du V_{OC} implique de devoir déconnecter la charge du module, d'où un manque de transfert de puissance au moment de la mesure [17].

Le rendement maximum de cette commande va dépendre du temps d'ouverture nécessaire pour obtenir le V_{OC} et de la période où a lieu cette ouverture. Le temps d'ouverture pour arriver au V_{OC} dépend des condensateurs d'entrée du convertisseur et de ses courants de charge et de décharge. La période d'actualisation de la tension V_{OC} doit être inférieure à la vitesse de variation des conditions d'ensoleillement, qui est inconnu. Si l'on souhaite un rendement maximal de 99%, cette période doit être 100 fois supérieure au temps d'ouverture [17].

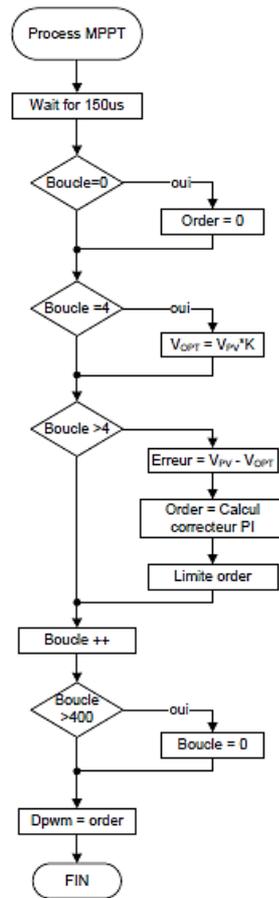


Figure (III.8) : Algorithme de la commande à fraction de V_{OC} .

III.2.6. Commande à fraction de I_{CC}

Comme la commande de fraction de V_{OC} , cette commande est basée sur la connaissance de la relation linéaire en première approche entre I_{OPT} et I_{CC} [18] :

$$I_{OPT} = I_{CC} * k_1 \dots \text{(III.3)}$$

Avec k_1 comme facteur de courant généralement compris entre 0.78 et 0.92 qui dépend lui aussi du GPV utilisé. Pour avoir le courant I_{OPT} et atteindre le PPMil faut mesurer I_{CC} et appliquer un courant de référence égal à I_{OPT} à la régulation en courant du convertisseur.

Les points positifs de cette commande sont comme suit :

- Puissance nécessaire pour le calcul relativement faible.
- L'utilisation d'un seul capteur de courant au lieu de deux (courant, tension).
- Plus précise par rapport à la commande à fraction de V_{OC} car la température n'a pas trop d'influence sur la mesure.
- Taille, puissance consommée, et coûts réduits.

En revanche :

- La mesure de I_{CC} implique une perte de transfert de puissance dû à la mise en court-circuit du GPV.
- L'échelle temporelle de réaction est en effet de la minute.
- Pertes énergétiques à cause de l'arrêt de transfert de puissance à chaque fois qu'une mesure de courant est faite et qui ne sont pas négligeables au cours d'une journée.

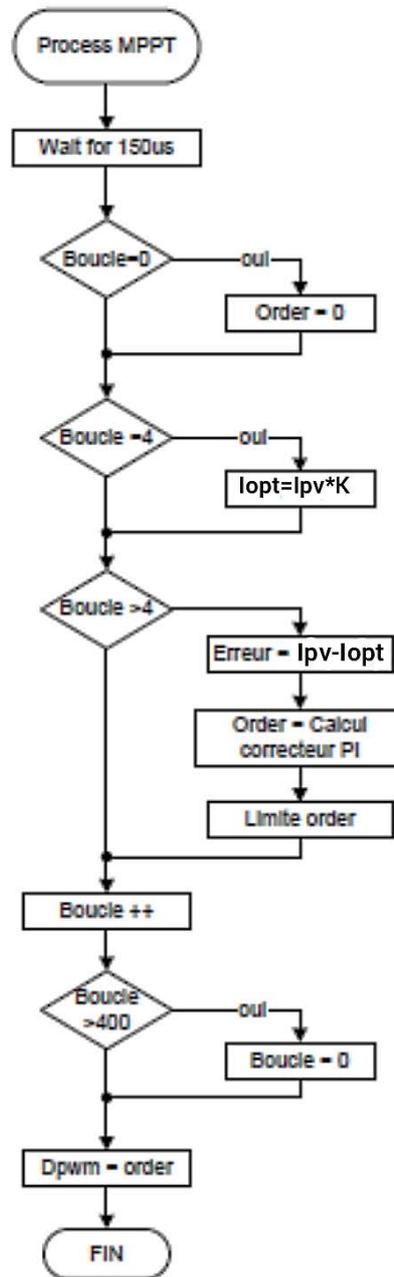


Figure (III.9) : Algorithme de la commande à fraction de I_{CC} .

III.3. Evaluation des performances des commandes

Après la présentation de Tous les algorithmes et leur principe de fonctionnement, on va évaluer puis comparer les performances de chaque commande que ce soit en condition météorologique constante ou lors de conditions changeantes.

III.3.1. Le rendement européen

Pour déterminer la qualité d'un onduleur dans le domaine des onduleurs à application photovoltaïque on utilise la notion de rendement européen.

Le rendement européen a donc été introduit pour pouvoir calculer un rendement global de l'onduleur, sur toute sa plage (puissance de sortie) de fonctionnement.

La méthode de calcul du rendement européen considère que :

L'onduleur fonctionne à 5 % de sa puissance nominale, pendant 3 % du temps.

L'onduleur fonctionne à 10 % de sa puissance nominale, pendant 6 % du temps.

L'onduleur fonctionne à 20 % de sa puissance nominale, pendant 13 % du temps.

L'onduleur fonctionne à 30 % de sa puissance nominale, pendant 10 % du temps.

L'onduleur fonctionne à 50 % de sa puissance nominale, pendant 48 % du temps.

L'onduleur fonctionne à 100 % de sa puissance nominale, pendant 20 % du temps.

On calcule alors le rendement européen de l'onduleur, noté η_{euro} , par la formule suivante :

$$\eta_{\text{euro}} = 0.03 \times \eta_{5\%} + 0.06 \times \eta_{10\%} + 0.13 \times \eta_{20\%} + 0.10 \times \eta_{30\%} + 0.48 \times \eta_{50\%} + 0.20 \times \eta_{100\%} \dots \quad (\text{III.4})$$

III.3.2. Comparaison de rendements pour une irradiation fixe

Les différentes valeurs de rendement des commandes citées dans le tableau ci-dessous sont calculées pour une irradiation de 1000W/m².

G(W/m ²)	n_classique(%)	n_new(%)	n_Voc(%)	n_adaptative(%)	n_new_optim(%)
1000	99,58	99,84	93,68	99,91	99,88
500	99,55	99,81	97,84	99,83	99,82
300	98,95	99,79	98,36	99,16	99,58
200	99,81	99,80	98,39	99,81	99,42
100	94,76	99,55	98,21	94,76	98,60
50	45,26	99,71	96,01	45,26	98,24
n_euro(%)	97,62	99,79	97,10	97,83	99,64

Tableau III.1: Rendement des différentes commandes[17].

On voit bien depuis le tableau que la commande qui a le meilleur rendement est la commande à perturbation triangulaire et plus précisément pour les hautes et basses irradiations.

D'un autre côté la commande de la fraction de V_{OC} est celle qui a le rendement le moins bon, spécialement pour les hautes irradiations, Mais même avec ce défaut, elle reste intéressante pour les applications de faible puissance et faible coût.

Concernant la commande P&O classique et sa version optimisée (alternative), on remarque un faible rendement pour des irradiations très faibles (dans le tableau III.1: 50W/m²).Ce problème est dû au calcul de la dérivée de puissance, qui lors des basses puissances a des problèmes pour détecter si la puissance est en hausse ou en baisse. Ceci pourrait être amélioré en rajoutant un délai plus long pour les très faibles puissances

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, quatre commandes MPPT de type « Perturbe and Observe » et deux autres basées sur des relations de proportionnalité(Fraction de V_{OC} et Fraction de I_{CC}) ont été étudiées.

À la fin, on a discuté les résultats pris pour une irradiation fixe et on a comparé leurs rendements pour choisir la commande la plus performante.

*Conclusion
Générale
Et
perspectives*

Conclusion générale et perspectives

Dans le premier chapitre on a introduit les systèmes photovoltaïques. Le premier point était l'historique des systèmes photovoltaïques, après on a expliqué ce que c'est que l'effet photovoltaïque, qui est la base de toute transformation d'énergie solaire en énergie électrique, le comportement de la cellule photovoltaïque a été étudié, ainsi que l'association des cellules constituant le GPV. Enfin, on a donné quelques avantages et inconvénients des installations PV.

Au deuxième chapitre, on a cité les différentes connexions entre le GPV dans le but de clarifier la limite de la connexion directe (GPV-charge) et l'importance du convertisseur DC/DC pour avoir un maximum de puissance du GPV. Pour le dernier point de ce chapitre on a donné les points positifs et négatifs des régulateurs solaires et on a fait une comparaison entre les deux régulateurs MPPT et PWM pour enfin choisir le régulateur de charge MPPT et sa méthode P&O.

Ce chapitre était consacré essentiellement pour qu'on peut faire le choix de régulateur qu'on va optimiser dans le dernier chapitre.

A notre perspective l'amélioration de la commande MPPT est plus favorable que l'amélioration des autres commandes et tout était justifié précédemment en donnant les avantages et les inconvénients de chacune des commandes. Dans Ce mémoire nos études étaient focalisées sur l'amélioration des lois de commande MPPT précisément leur rendement et leur temps de réponse.

Dans le troisième et dernier chapitre, quatre commandes MPPT de type « Perturbe and Observe » et deux autres basées sur des relations de proportionnalité (Fraction de V_{OC} et Fraction de I_{CC}) ont été étudiées.

À la fin, on a discuté les résultats pris pour une irradiation fixe et un comparatif de performance clos ce dernier chapitre.

*Références
Bibliographiques*

Références bibliographiques

- [1] Meghellethanine, Hocine Lynda, « Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Colonel Akli Mohand-Oulhadj Bouira.
- [2] web EDF.com
- [3] : R. Badreddine et O. Souhila, « modélisation et commande du système photovoltaïque Par les réseaux de neurones » Mémoire de Master Académique2017.
- [4] : Dossier technique « Eolienne et photovoltaïque ».
- [5] : K.Touafek, "Etude d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique", mémoire de Magister, école nationale polytechnique, Alger, 2005.
- [6] : <https://www.prime-energy-technics.ch/actualites/histoire-du-photovoltaique>.
- [7] : LAURENT ADONIS BEKALE,« ÉLABORATION DE CELLULES SOLAIRES ORGANIQUES À BASE DE TÉTRA-TERT-BUTYL-PHTHALOCYANINE DE ZINC (TTB-ZnPc) »,MÉMOIRE,L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES,MAI 2012.
- [8] :M.L.Louazane ‘‘Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla ‘‘Mémoire de Magister Université El Hadj Lakhdar-Batna 2008.
- [9] : http://ww2.ac-poitiers.fr/electrotechnique/IMG/pdf/energie_solaire_photovoltaique.pdf
- [10] :C.Lerouge, Recherche & Industrie Photovoltaïque (PV) aux Etats-Unis, Science physique, 2006.
- [11] :
<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/techniques/1358/1358-175-p32.pdf>
- [12] :ASSEM Houria,« Le régulateur de charge et de contrôle dans Un système Photovoltaïque Autonome »,N° 31 2014
- [13] :S. Zaaamta, et A. Dib,« Réalisation d'un régulateur solaire à base de microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des accumulateurs »,Institut des Sciences Technologiques, Université Larbi Ben M'Hidi, Oum El Bouaghi,Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°1 (2009) 137 – 147
- [14] :Thomas Mambrini,« Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies »,Université Paris Sud - Paris XI, 2014.
- [15] :AISSOU Said, ZINET Maci, «Identification et Caractérisation D'un Système Photovoltaïque »,Master en Génie Electrique,18 juin 2012.
- [16] :Halouane Assia, «Modélisation du transfert radiatif dans les Strates supérieures d'un module Photovoltaïque »,UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES, Master en génie mécanique 2016/2017.
- [17] :Cyril Lahore,Optimisation de commandes MPPT. Automatique/Robotique.2012.
- [18] : Cédric CABAL, Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque, université Toulouse III – Paul Sabatier, 2008
- [19] : http://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_Boost.

Références bibliographiques

- [20] : C.A. Osaretin and F.O. Edeko, “Design and implementation of a solar charge controller with variable output,” Journal of Electrical and Electronic Engineering, vol. 12, no 2, pp. 41-43, January 2016.
- [21] : <http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours-photovoltaique-autonome-1/regulation-photovoltaique-mli.php>
- [22] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, Ernesto Ruppert Filho, Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.24, mai 2009
- [23] : Datasheet du module BP585, consulté le 03/04/2012
http://www.oksolar.com/pdffiles/Solar%20Panels%20bp_585.pdf
- [24] : Y. El Basri, S. Petibon, B. Estibals, C. Alonso, New P&O MPPT algorithm for FPGA implementation, IECON 2010
- [25] : R. Leyva, I. Queinnec, C. Alonso, A. Cid Pastor, D. Lagrange et L. Martinez Salamero, MPPT of photovoltaic system using extremum seeking control, IEEE transactions On Aerospace Systems, Vol.42, No.1 pp.249-258, jan. 2006
- [26] : [http://www.iai.heig-vd.ch/fr-ch/Enseignement/Supports/O_Syst%C3%A8mes%20%C3%A9lectroniques%20\(SEL\)/Syst%C3%A8mes%20%C3%A9lectroniques%20I%20-%20Cours/Chapitre%204%20-%20Alimentations%20%C3%A0%20d%C3%A9coupage%20%C3%A0%20inductance%20simple.pdf](http://www.iai.heig-vd.ch/fr-ch/Enseignement/Supports/O_Syst%C3%A8mes%20%C3%A9lectroniques%20(SEL)/Syst%C3%A8mes%20%C3%A9lectroniques%20I%20-%20Cours/Chapitre%204%20-%20Alimentations%20%C3%A0%20d%C3%A9coupage%20%C3%A0%20inductance%20simple.pdf)
- [27] : <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/51459b.pdf>, consulté le 22/05/2012.
- [28] : <https://greensolaire.com/blogs/news/difference-regulateur-charge-solaire-pwm-mppt>
- [29] : D. P. Hohm, M. E. Ropp, “Comparative study of maximum power point tracking algorithms using an experimental programmable, maximum power point tracking test bed”, IEEE Photovoltaic Specialists Conference, PVSC 2000 pp. 1699-1702, Sept. 2000.
- [30] : Assia ZERDOUDI, Rachid “CHENNIETUDE DE L’INFLUENCE DES DIFFERENTS PARAMETRES SUR UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE”, Sciences & Technologie A – N°41, Juin 2015, 19-24.

Résumé

L'énergie photovoltaïque occupe une part importante dans l'industrie et se considère comme le moyen le plus productif pour l'avenir, mais comme la présence du soleil n'est pas permanente nous sommes obligés d'extraire le maximum d'énergie solaire possible. Pour cela il faut améliorer et optimiser le transfert d'énergie entre le module photovoltaïque et sa charge, en ajoutant un étage d'adaptation. Dans ce mémoire, on a étudié un convertisseur DC/DC de type élévateur, et sa loi de commande MPPT (Maximum Power Point Tracker), qui permet d'extraire le maximum de puissance que peut délivrer le module en chaque instant, afin d'optimiser le fonctionnement et améliorer le rendement. Une optimisation de commande existante a été développée dans le but d'améliorer le rendement et le temps de réponse. La présentation de six commandes MPPT a été faite et un comparatif a également été réalisé pour déterminer leurs performances.

MOTS CLES : Commande MPPT, photovoltaïque, convertisseur statique, DC/DC, énergie renouvelable, perturbe et observe, électronique de puissance.

Summary

Photovoltaic energy occupies an important part in the industry and is considered as the most promising energy for the future, but as the presence of the sun is not permanent, we are obliged to extract the maximum possible solar energy. For this, it is necessary to improve and optimize the transfer of energy between the photovoltaic module and its battery, by adding an adaptation stage. In this memory, we studied a step-up DC / DC converter, and its MPPT (Maximum Power Point Tracker) control law, which makes it possible to extract the maximum power that the module can deliver at any time, in order to optimize the operation and improve efficiency. An existing control optimization was developed to improve efficiency and response time. Six control laws were presented and a comparison was made to determine their performance.

KEYWORDS : MPPT control, photovoltaic, static converter, DC/DC, renewable energy, perturb and observe, power electronic.

ملخص

تحتل الطاقة الكهروضوئية دورًا مهمًا في الصناعة وتعتبر أكثر طاقة واعدة، لكن نظرًا لوجود الشمس الغير الدائم، نحن مضطرون لاستخراج أقصى قدر ممكن من الطاقة الشمسية. لهذا، من الضروري تحسين طرق نقل الطاقة بين الوحدة الكهروضوئية وبطارياتها، عن طريق إضافة مرحلة تكيف. في هذه المذكرة، درسنا محول DC / DC التصاعدي، وقانون التحكم MPPT (Maximum Power Point Tracker)، مما يجعل من استخراج أقصى طاقة يمكن أن توفرها الوحدة ممكنًا في أي وقت، من أجل تحسين التشغيل والكفاءة. تم أيضا تطوير التحكم الحالي لتحسين الكفاءة ووقت الاستجابة. أخيرا، تم عرض ستة قوانين تحكم بالإضافة إلى إجراء مقارنة بينها لتحديد أدائها.
