

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A. MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique

# Mémoire de Fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en électrotechnique  
Option : Electrotechnique industrielle  
&  
Commandes électriques

Thème

---

**Amélioration de la qualité d'énergie d'un système  
photovoltaïque connecté au réseau**

---

**Préparé par :**

Melle ATTIA Farah, Option : CE

Melle BELOUI Asma, Option : EI

**Encadré par :**

Dr. BELAID Sofia

**Année Universitaire : 2018/2019**

## **REMERCIEMENTS**

*Nos remerciements vont tout premièrement à **Allah** tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a données pour réaliser ce travail.*

*Nos remerciements particuliers vont très chaleureusement à notre promotrice **Dr. S. BELAID**. Merci de nous avoir guidées durant ce travail ainsi que nous avoir données votre confiance et votre patience.*

*Nous remercions aussi La doctorante **Mlle A. AOUMER** pour son aide qui nous a été bénéfique.*

*Nous tenons également, à exprimer nos remerciements à l'ensemble des membres de jury pour avoir accepté de juger notre travail.*

*Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à toute notre famille ainsi que nos amis pour leurs soutiens.*

**ASMA, FARAH**

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mon père qui a tout sacrifié pour m'offrir des conditions  
d'études exemplaire.*

*A ma mère qui a veillé sur moi et m'a encouragé dans tout ce  
que j'ai entrepris.*

*A mes frères Lamine et Saïd.*

*A la mémoire mes deux grand-mères*

*A mes deux tantes Farida et Radia.*

*A mes neveux Islam et M. Kenzy*

*Au reste de ma famille*

*A ma binôme Farah qui a su me supporter*

*A mes chers amis plus particulièrement : Myassa, Yasmina,  
Islam, Mehdi, Yanis, Mélissa, Didine, Kiki, Bilal, Nabil,  
Hafid, Rafik, Sofiane, Bizza, Lilia, Yasmina...*

*Asma*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à ma source d'inspiration et de tendresse, à ma maman, qui m'a soutenu et encouragé dans mes détresses et qui a toujours cru en moi, merci mère pour tes encouragements, ton amour et ta considération.*

*À ma chère famille, citant particulièrement mes ravissantes cousines, et mon frère pour toute la joie et le bien-être, qu'ils m'inspirent, ainsi que le grand intérêt qu'ils portent à mon égard.*

*À ma chère binôme Asma*

*À mes chers amis « Bob, Kiki, Didine, Nabil, Mehdi, Bilel, Idir, Mellisa, Mina, Yasmina, Hafid, Rafik, Yanis... »*

*Farah*

# Liste des figures

<b>CHAPITRE I</b>	
Figure (I.1) : Les différents composants du rayonnement solaire	4
Figure (I.2) : Le nombre d'Air mass (AM).	5
Figure (I.3) : Structure basique de la cellule photovoltaïque.	6
Figure (I.4) : Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque.	7
Figure (I.5) : Les différents types de la cellule photovoltaïque.	8
Figure (I.6) : Courbe courant -tension d'une cellule photovoltaïque.	10
Figure (I.7) : Module photovoltaïque.	11
Figure (I.8) : Diodes de protection des modules.	11
Figure (I.9) : Système autonome.	12
Figure (I.10) : Système hybride.	13
Figure (I.11) : Système couplé au réseau	13
Figure (I.12) : Le diagramme de Fresnel des puissances.	19
<b>CHAPITRE II</b>	
Figure (II.1) : Schéma simplifié du système photovoltaïque.	23
Figure (II.2) : Modèle électrique idéal d'un module photovoltaïque.	24
Figure (II.3) : Modèle électrique à une diode avec résistance shunt.	25
Figure (II.4) : Modèle électrique à une diode sans résistance shunt.	26
Figure (II.5) : Effet de l'ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ .	28
Figure (II.6) : Effet de la température sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ .	29
Figure (II.7). Effet de l'ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ .	29
Figure (II.8). Effet de la température sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ .	30
Figure (II.9) : Schéma de base d'un convertisseur Boost.	30
Figure (II.10) : Schéma équivalent du hacheur K fermé.	31
Figure (II.11). Schéma équivalent du hacheur K ouvert.	31
Figure (II.12) : Filtre RL.	32
Figure (II.13) : Schéma du réseau relié au filtre RL.	33
Figure (II.14). Fonctionnement de l'algorithme P&O sur la caractéristique $P_{pv}(I_{pv})$	34
Figure (II.15) : Organigramme de la méthode Perturbation et Observation.	35
Figure (II.16) : Structure du contrôleur MPPT flou appliqué au système photovoltaïque.	36
Figure (II.17) : Allure comparative entre la P&O et FLC.	37

<b>CHAPITRE III</b>	
Figure (III.1) : Configuration générale de la commande DPC.	40
Figure (III.2) : Caractéristique des régulateurs à hystérésis à deux niveaux	41
Figure (III.3) : Représentation du vecteur de tension dans le plan $(\alpha, \beta)$ divisé en douze (12) secteurs.	43
Figure (III.4) : Variation de l'éclairement et de la température.	44
Figure (III.5) : Allure de la puissance photovoltaïque $P_{pv}$	44
Figure (III.6) : Allure de la tension photovoltaïque $V_{pv}$	45
Figure (III.7) : Allure du courant photovoltaïque $I_{pv}$	45
Figure (III.8) : Allure de la tension du bus continu $V_{dc}$ de la DPC à 12 secteurs	46
Figure (III.9) : Allure de la puissance active $P$ de la DPC à 12 secteurs	47
Figure (III.10) : Allure de la puissance réactive $Q$ de la DPC à 12 secteurs	47
Figure (III.11) : L'allure des courants $I_{a,b,c}$	48
Figure (III.12) : Zoom sur l'allure des courants $I_{a,b,c}$	48
Figure (III.13) : Allure de courant $I_a$ et tension $V_{ra}$	49
Figure (III.14) : Allure de la tension $V_{a,ond}$	49
Figure (III.15) : Allure de la puissance active $P$ de la DPC à 6 secteurs	51
Figure (III.16) : Allure de la puissance réactive $Q$ de la DPC à 6 secteurs	51
Figure (III.17) : Allure de la tension du bus continu $V_{dc}$ de la DPC à 6 secteurs	52
Figure (III.18) : Représentation du spectre d'harmonique de la DPC à 12 secteurs	53
Figure (III.19) : Représentation du spectre d'harmonique de la DPC à 6 secteurs	53
<b>CHAPITRE IV</b>	
Figure (IV.1) : Variables d'entrées et de sortie d'une table de commutation floue.	55
Figure (IV.2) : Fonctions d'appartenances pour les erreurs des puissances actives $\Delta p$ et réactives $\Delta q$	56
Figure (IV.3) : Fonctions d'appartenances pour la position du vecteur $\theta$ de tension et pour la variable de sortie $V_i$	56
Figure (IV.4) : Allure de la tension du bus continu $V_{dc}$ de la DPC flou	57
Figure (IV.5) : Allure de la puissance active $P$ de la DPC floue	58
Figure (IV.6) : Allure de la puissance réactive $Q$ de la DPC floue	58
Figure (IV.7) : Allure de courant $I_a$ et tension $V_{ra}$	59

## Liste des tableaux

Tableau (I.1) : Les différents types des cellules avec leurs rendements	8
Tableau (I.2) : Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux basse tension (Norme CEI 61000-2-2)	20
Tableau (II.1) : Paramètre du panneau photovoltaïque SIEMENS SM 110-24.	27
Tableau (II.2) : Tableau de règles d'inférence	37
Tableau (III.1). Variations de p et q en fonction de la position des vecteurs.	42
Tableau (III.2). Table de commutation de la DPC à 12 vecteurs.	43
Tableau (III.3). Table de commutation de la DPC à 6 vecteurs.	50
Tableau (IV.1) : Table de commutation floue.	57
Tableau (IV.2) : Synthèse des taux de distorsions obtenus	59

## Liste des symboles et abréviations

E	Ensoleillement (W/m <sup>2</sup> ).
ff	Facteur de forme.
GPV	Générateur photovoltaïque.
I <sub>cc</sub>	Courant de court-circuit du panneau photovoltaïque (A).
I <sub>CC1</sub>	Le courant de court-circuit de la cellule.
I <sub>pv</sub>	Courant photovoltaïque (A).
I <sub>pv-opt</sub>	Courant photovoltaïque optimal (A)
I <sub>s1</sub>	Le courant de saturation de la cellule
K	La constante de Boltzmann
P <sub>m</sub>	Puissance maximale (W).
P <sub>pv</sub>	Puissance photovoltaïque (W).
P <sub>pv-opt</sub>	Puissance photovoltaïque optimale (W).
R <sub>s</sub>	Résistance série (Ω).
R <sub>p</sub>	Résistance parallèle (Ω).
T	Température ambiante (°C).
V <sub>co</sub>	tension de circuit-ouvert (V).
V <sub>co1</sub>	tension de circuit-ouvert de la cellule (V).
V <sub>pv</sub>	Tension photovoltaïque(V).
V <sub>pv-opt</sub>	Tension photovoltaïque optimal (V).
i <sub>a</sub> , i <sub>b</sub> , i <sub>c</sub>	Courants de source (A).
V <sub>ra</sub> , V <sub>rb</sub> , V <sub>rc</sub>	Tensions de source (V).
S <sub>a</sub> , S <sub>b</sub> , S <sub>c</sub>	Signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur.
V <sub>dc</sub>	Tension du bus continu(V).
V <sub>dc-réf</sub>	Tension de référence du bus continu (V).
P <sub>réf</sub> , Q <sub>réf</sub>	Référence de la puissance active et réactive respectivement.
ΔP, ΔQ	Variation de la puissance active et réactive respectivement.
H <sub>p</sub> , H <sub>q</sub>	Largeurs de la bande d'hystérésis.
θ <sub>n</sub>	Numéro du secteur.
α, β	Repère stationnaire
MPPT	Poursuite du point de puissance maximal
FLC	Contrôle par logique floue
P&O	Perturbation et Observation



---

# Table des matières

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : GENERALITES.....	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 Rayonnement solaire.....	3
I.3. Air Mass.....	4
I.4. L'effet photovoltaïque.....	5
I.5. Générateur photovoltaïque.....	6
I.5.1. Cellule photovoltaïque.....	6
I.5.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	6
I.5.3. Les différents types de cellules.....	7
I.5.4. Rendement de la cellule.....	8
I.5.5. Les paramètres des cellules photovoltaïques.....	8
I.5.6. Association des cellules photovoltaïques.....	10
I.5.7. Le module photovoltaïque.....	10
I.5.8. Protection des modules photovoltaïques.....	11
I.5.9. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïques.....	12
I.6.Applications des systèmes photovoltaïques.....	12
I.6.1. Systèmes autonomes.....	12
I.6.2. Systèmes hybrides.....	13
I.6.3. Systèmes couplés au réseau.....	13
I.7. Optimisation de l'énergie photovoltaïque.....	15
I.8. Qualité de l'énergie électrique.....	15
I.9.Problématiques des harmoniques.....	16
I.9.1. Conséquences néfastes des harmoniques.....	17
I.9.2. Caractérisations des harmoniques.....	18
I.9.3. Normes et réglementations.....	19
I.9.4. Solutions possibles pour réduire les harmoniques et d'améliorer la qualité de l'énergie ...	20
I.10.Conclusion.....	21

---

CHAPITRE II : MODÉLISATION DU SYSTÈME ÉTUDIÉ .....	22
II.1. Introduction .....	22
II.2. Présentation du système proposé pour l'étude .....	22
II.3. Modélisation d'un générateur photovoltaïque .....	22
II.3.1. Modèle idéal .....	23
II.3.2. Modèle implicite à une diode .....	24
II.3.3. Modèle simplifié à une diode .....	24
II.3.4. Caractéristique courant-tension et puissance-tension du module photovoltaïque .....	27
II.4. Modélisation du hacheur survolteur .....	29
II.5. Modélisation de bus continu .....	30
II.6. Modélisation du convertisseur DC-AC (Onduleur).....	31
II.7. Filtre associé au convertisseur .....	31
II.8. Modélisation du réseau électrique .....	32
II.9. Poursuite du point de puissance maximal (PPM) .....	33
II.9.1. Algorithme de Perturbation et Observation (P&O).....	33
II.9.2. Contrôleur MPPT basées sur la logique floue .....	34
II.9.3. Résultat de simulation .....	36
II.10. Conclusion .....	37
CHAPITRE III : CONTRÔLE DIRECTE DE PUISSANCE (DPC CLASSIQUE) .....	38
III.1. Introduction .....	38
III.2. Etat de l'art du contrôle direct de puissance (DPC) .....	38
III.3. Principe de la commande DPC et ces avantages .....	38
III.3.1. Contrôle de la puissance active et réactive.....	39
III.3.2. Calcul de l'angle téta ( $\theta$ ) .....	40
III.3.3 Table de commutation .....	41
IV.4. Simulation numérique .....	41
III.4.1. Étude et analyse des performances d'une DPC avec table classique à douze (12) secteurs (DPC 12) .....	41

III.4.2. Étude et analyse des performances d'une DPC avec table classique à six (6) secteurs (DPC 6) .....	48
III.5. Etude comparative.....	51
III.6. Conclusion.....	52
CHAPITRE IV : CONTRÔLE DIRECTE DE PUISSANCE À BASE DE LA LOGIQUE FLOU (DPC FLOUE).....	53
IV.1. Introduction.....	53
IV.2. Principe de la commande DPC floue .....	55
IV.3. Synthèse des règles floues.....	57
IV.4. Résultats de la simulation .....	58
IV.5. Etude comparative.....	59
IV.6. Conclusion .....	59
Conclusion générale.....	60

# **Introduction générale**

# Introduction général

Pour assurer le développement durable et faire reculer la pauvreté tout en laissant en héritage aux générations futures un environnement viable, il est indispensable de faire la promotion des énergies renouvelables.

Avec les avancées technologiques, le besoin en énergie ne cesse d'augmenter. Ce problème d'énergie est encore plus sensible dans les sites isolés où l'utilisation des ressources classiques s'avère souvent très coûteuse. En effet, plusieurs contraintes, comme le transport du combustible et les entretiens périodiques des moteurs diesels rendent la recherche d'une source d'énergie alternative indispensable pour ce type de sites. Comme nous le savons, la plus grande partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. Les études et les prévisions récentes nous alertent que l'utilisation massive de ces ressources conduira certainement à l'épuisement total de ces réserves sans compter danger de ce processus sur l'environnement [LOU 08].

A partir de ce constat, il été nécessaire de chercher d'autres ressources d'énergie de remplacement. Les énergies renouvelables comme l'énergie photovoltaïque, éolienne ou hydraulique, représentent une solution de remplacement par excellence et sont de plus en plus utilisées dans nos jours. Ce type d'énergie n'est pas seulement gratuit et inépuisable, mais aussi très propre pour l'environnement. D'ailleurs, on parle souvent d'une énergie « verte », puisqu'elle permet d'éviter totalement la pollution produite par les sources traditionnelles.

La conversion photovoltaïque est l'un des modes les plus intéressants d'utilisation de l'énergie solaire. Elle permet d'obtenir de l'électricité de façon directe et autonome à l'aide d'un matériel fiable et de durée de vie relativement élevée permettant une maintenance réduite. Le but d'un système photovoltaïque (PV) est d'utiliser la conversion directe de l'énergie solaire par effet photovoltaïque pour subvenir aux besoins en énergie électrique de l'utilisateur [BEN07].

L'énergie produite par le photovoltaïque est de nature continue ce qui n'est pas adéquat dans le cas où on veut raccorder ce dernier avec le réseau de distribution. Pour cela il faut concevoir un système capable de transformer l'énergie continue en énergie alternatif, cette conversion se passe par le biais d'un onduleur commandé en modulation de largeur d'impulsion afin de contrôler l'amplitude, la fréquence et la phase du courant injecté dans le réseau [BEN 07].

Le but de notre travail dans ce mémoire est d'apporter une amélioration à la qualité d'énergie d'un système photovoltaïque connecté au réseau.

Nous allons rappeler dans le premier chapitre quelques notions de base sur le rayonnement solaire et les propriétés des semi-conducteurs, matériaux des cellules photovoltaïques ainsi que les

causes et conséquence des harmoniques. Des solutions seront proposées afin de réduire les perturbations et d'éliminer les effets de ces derniers sur réseau.

Le deuxième chapitre se portera sur la modélisation des différents composants de notre système à savoir : Un générateur photovoltaïque, un hacheur survolteur contrôlé avec un algorithme d'optimisation pour maximiser la puissance (MPPT) extraite des panneaux photovoltaïques en utilisant deux algorithmes (P&O) et (FLC), un onduleur est utilisé pour la conversion DC/AC et un filtre RL pour la connexion au réseau.

Le troisième chapitre se basera sur deux types de commande directe de puissance (DPC) classique : Une à douze (12) secteurs et une autre à six (6) secteurs sur lesquelles nous mènerons une étude comparative sur les performances.

Nous proposerons dans le dernier chapitre une commande directe de puissance (DPC) à base de la logique floue. Une comparaison sera effectuée par rapport aux DPC classique étudiées précédemment.

Ce travail sera conclu par une conclusion générale qui résumera les résultats obtenus.

## CHAPITRE I : Généralités.

### I.1 Introduction

L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité à grandes quantités en tout point du globe terrestre.

Actuellement, on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire, surtout pour les applications sur des sites isolés.

La conversion photovoltaïque est l'un des modes les plus intéressants d'utilisation de l'énergie solaire. Elle permet d'obtenir de l'électricité de façon directe et autonome à l'aide d'un matériel fiable et de durée de vie relativement élevée, permettant une maintenance réduite.

Le but d'un système photovoltaïque (PV) est d'utiliser la conversion directe de l'énergie solaire par effet photovoltaïque pour subvenir aux besoins en énergie électrique de l'utilisation.

Pour comprendre ce phénomène, nous allons rappeler dans ce chapitre quelques notions de base sur le rayonnement solaire et les propriétés des semi-conducteurs, matériaux des cellules photovoltaïques.

### I.2 Rayonnement solaire

Le rayonnement ou spectre solaire est comparable à celui d'un corps noir à une température de 5800 K, il est compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 $\mu\text{m}$  et se décompose approximativement sur 3 bandes :

- 9% dans la bande des Ultraviolets ( $< 0,4 \mu\text{m}$ )
- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8  $\mu\text{m}$ )
- 44% dans la bande des infrarouges ( $> 0,8 \mu\text{m}$ )

L'énergie solaire reçue sur terre en dehors de l'atmosphère est estimée à 1370 W/m<sup>2</sup> cependant elle s'atténue et perd son intensité en traversant l'atmosphère ne dépassant pas les 1000 W/m<sup>2</sup> à la surface de la terre en raison de l'absorption dans ce dernier, ce chiffre variera par la suite en fonction de la localisation géographique du site (latitude), la saison, l'heure, les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...), et l'altitude du lieu [BER04] [ROY98].

Etant absorbé et diffusé en traversant l'atmosphère seul une fraction modifiée du rayonnement solaire parvient à la surface de la terre se composant de 3 différents types de rayonnements [MUK 99] :

- Le rayonnement direct : Rayonnement provenant du soleil en ligne droite du seul disque solaire, il est nul lorsque le soleil est complètement couvert par les nuages.

- Le rayonnement diffus : Radiation solaire arrivant sur la surface de la terre après déviation de la lumière par les nuages et les molécules diverses, elle est donc nulle que la nuit.
- Le rayonnement réfléchi (albédo) : Radiation solaire incidente réfléchi par une surface.

Le rayonnement global est donc la somme des 3 rayonnements directs, diffus, et réfléchi comme illustré dans la figure (I.1) ci-dessous :

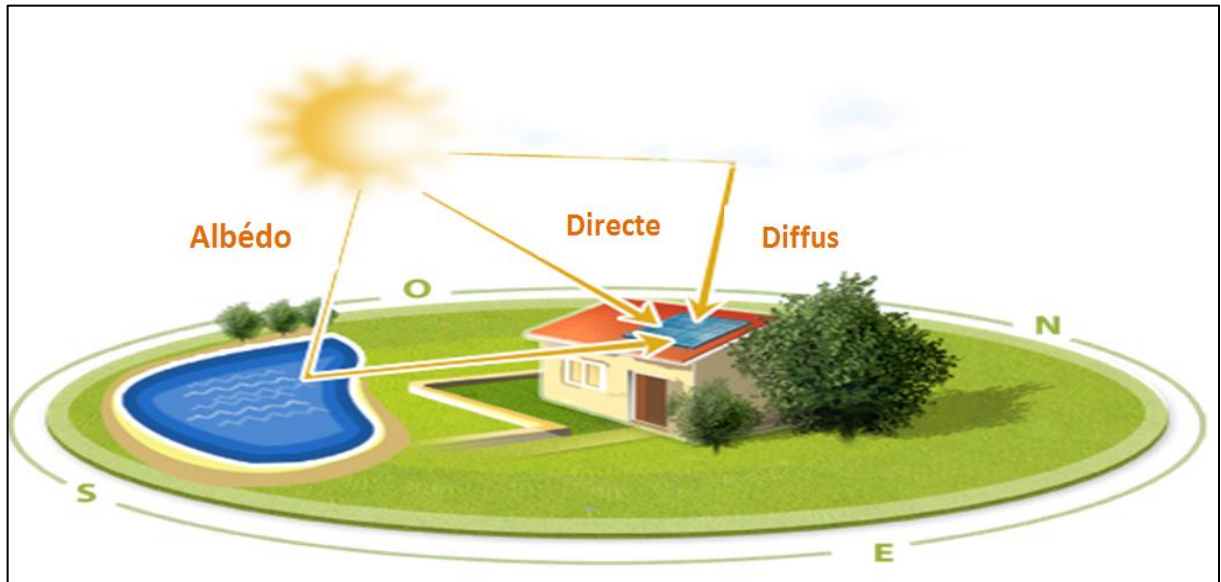


Figure (I.1) : Les différents composants du rayonnement solaire [LOU 08].

### I.3. Air Mass

La notion d'air mass (AM) sert à évaluer la masse atmosphérique traversée par le rayonnement solaire et dépend de l'épaisseur de l'atmosphère traversée, celle-ci définit le spectre de référence pour unifier les performances des cellules photovoltaïques.

AM0 représente le spectre à la limite de l'atmosphère, AM1 représente le spectre arrivant à la surface de la terre quand le soleil est au zénith, AM1.5G représente le spectre standard arrivant à  $48.2^\circ$  à la surface de la terre à une atmosphère et demi, en dernier AM2 représente le spectre arrivant à  $60.1^\circ$  à la surface de la terre [LAB 03].



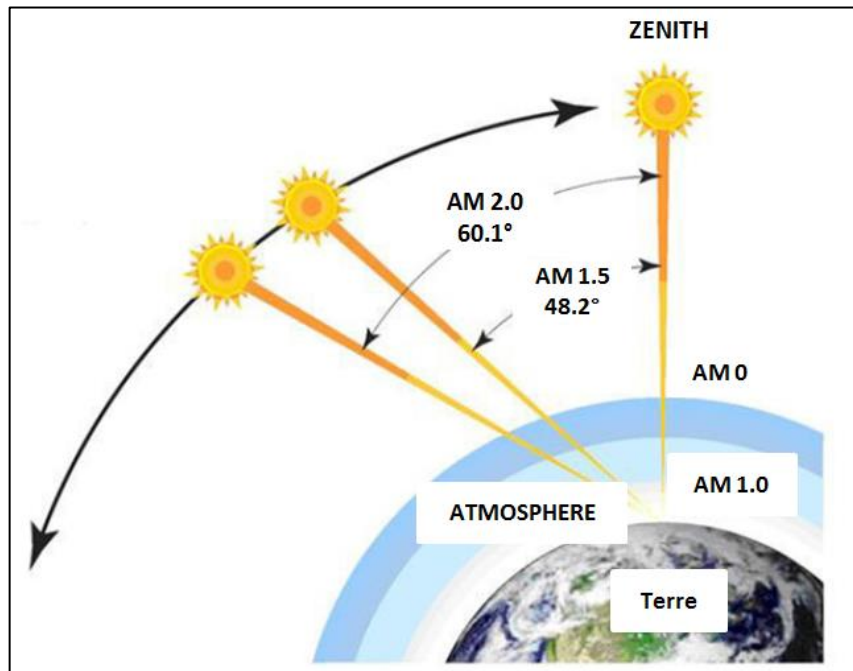


Figure (I.2) : Le nombre d'Air mass (AM) [BEN 07].

AM1.5G est le spectre standard le plus étudié car il regroupe le rayonnement direct et diffus contrairement à AM1.5D qui ne tient compte que du rayonnement direct [LAB 06].

#### I.4. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène optoélectronique fut découvert par le physicien Français EDMOND BECQUEREL en 1839. Mais, il faudra attendre jusqu'au 1954 pour que les trois chercheurs américains des laboratoires Bell, Chapin, Pearson et Prince développent la première cellule PV avec un rendement énergétique ne dépassant pas 4,5% au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites [ZID 12].

Cet effet permet de transférer directement la lumière solaire en énergie électrique. Il se manifeste par l'apparition d'une différence de potentiel à la jonction entre un métal et un semi-conducteur ou entre deux semi-conducteurs lorsque le dispositif reçoit un rayonnement lumineux de longueur d'onde adéquate. Aujourd'hui les matériaux les plus utilisés sont à base de silicium [HAT 08].

Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable, alors il passe vers un niveau d'énergie supérieure, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique [HAT 08].

## I.5. Générateur photovoltaïque

### I.5.1. Cellule photovoltaïque

La cellule PV est le plus petit élément dans l'installation photovoltaïque, elle est composée de matériaux semi-conducteur de type P-N qui produisent un courant électrique sous l'effet des photons lumineux. Les cellules sont raccordées entre elles pour former des modules photovoltaïques pouvant convertir en électricité environ 15% de l'énergie solaire reçue [BUY 03].

Les cellules PV les plus répandues sont constituées des semi-conducteurs, principalement à base de silicium (Si), c'est-à-dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. La figure (I.3) montre la structure basique de la cellule photovoltaïque.

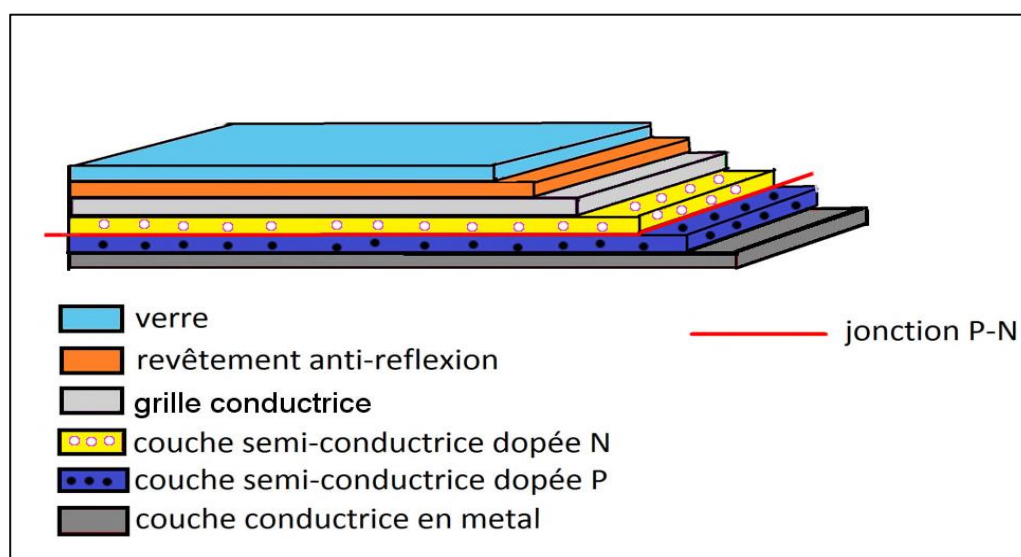


Figure (I.3) : Structure basique de la cellule photovoltaïque [BEN 06].

### I.5.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est un composant électronique capable de fournir de l'énergie si elle est éclairée convenablement, elle est composée de deux semi-conducteurs, une des faces est dopée N (par exemple du phosphore), l'autre dopée de type P (par exemple du bore). Des électrodes métalliques sont placées sur les 2 faces pour permettre de récolter les électrons et de réaliser un circuit électrique [SEM 13].

- **Dopage de type P :** On introduit des atomes trivalents, ces trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant. Si le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore [BEN11].
- **La jonction PN :** Une jonction PN est l'accolement d'une région dopé P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la

zone de transition. Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner. En polarisant électriquement une jonction PN et en la soumettant à un éclairage solaire, on obtient les caractéristiques semblables à celle représentées par la figure (I.4) [BEN 11].

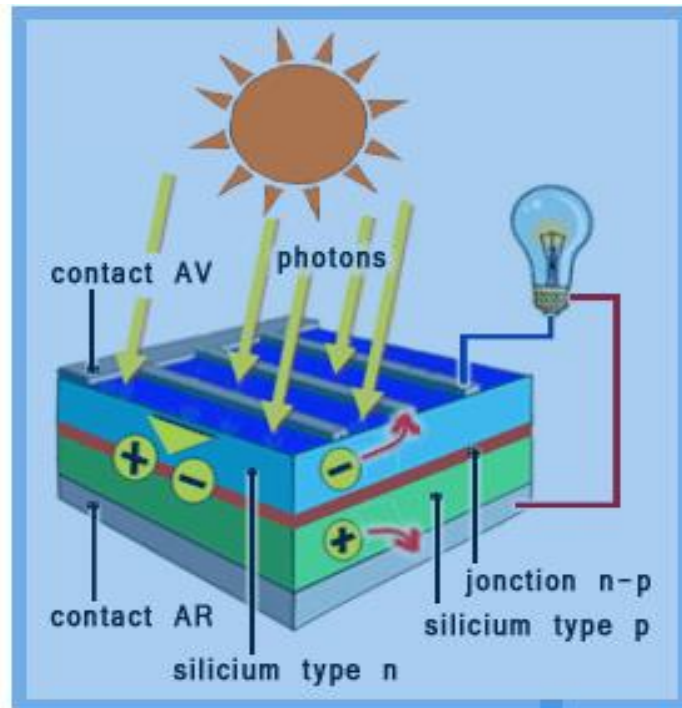


Figure (I.4) : Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque [BEN 06].

### I.5.3. Les différents types de cellules

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs : de sulfure de cadmium (CDs), de tellure de cadmium (CdTe), de Germanium (Ge), de sélénium (Se) ou d'arséniure de gallium (GaAs). Le silicium est actuellement le semi-conducteur le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature [AYA 14].

En effet, il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques dont les plus importants sont les suivantes :

#### a) Les cellules à silicium monocristallin

Les cellules photovoltaïques en silicium monocristallin sont formées d'un seul cristal. Elles sont en général d'un bleu uniforme [HAL 17].

#### b) Les cellules à silicium poly-cristallin

Elles sont constituées de plusieurs cristaux. La cellule a un aspect bleuté mosaïque (pas uniforme). Leur rendement est de 11 à 15% [HAL 17].

### c) Les cellules amorphes

Le silicium est utilisé en couche mince, il n'est pas cristallisé. Il est déposé sur une plaque de verre. Ce type de cellule on le trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation (montre, calculatrice) [HAL 17].

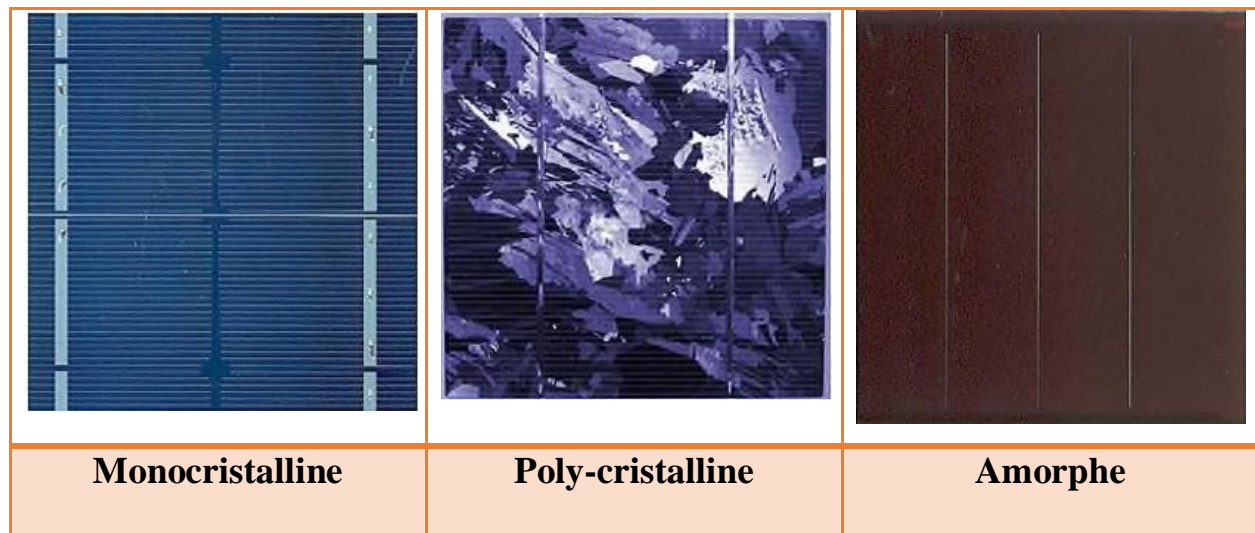


Figure (I.5) : Les différents types de la cellule photovoltaïque [BEN 06].

#### I.5.4 Rendement de la cellule

Le tableau suivant (I.1) représente les différents types des cellules PV avec leurs rendements

Tableau (I.1) : Les différents types des cellules avec leurs rendements [SAL 11].

Technologie de cellules	Rendement en laboratoire	Rendement Production
Silicium amorphe (a-Si)	13%	5 à 9%
Silicium poly-cristallin (p-Si)	19.8%	11 à 15%
Silicium monocristallin (m-Si)	24.7%	13 à 17%

#### I.5.5. Les paramètres des cellules photovoltaïques

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont définis comme suit [ROS 08] :

##### a) Courant de court-circuit $I_{cc1}$

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

### b) Tension à circuit ouvert $V_{oc1}$

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse

$$V_{oc1} = \frac{KT}{e} \ln\left(\frac{I_{cc1}}{I_{s1}} + 1\right) \quad (I.1)$$

$\frac{KT}{e}$ : Représente la potentielle thermodynamique

T : Représente la température absolue

e: Constante de charge d'électron  $1,602.10^{-19}C$

K: Constante de Boltzmann  $1,38.10^{-23}J/k$

$I_{cc1}$  : Courant de court-circuit.

$I_{s1}$ : Courant de saturation.

### c) Facteur de forme ff

Le facteur de forme détermine la qualité électrique de la cellule, il dépend d'un ensemble de paramètres, il est obtenu par l'équation suivant :

$$ff = \frac{P_{mpp}}{V_{oc1} \times I_{cc1}} = \frac{V_{mpp} \times I_{mpp}}{V_{oc1} \times I_{cc1}} \quad (I.2)$$

$V_{mpp}$ : Tension optimale.

$I_m$  : Courant optimal.

### d) Rendement

C'est le rapport de la puissance électrique maximale (optimale) à la puissance de radiation incidente

$$n = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{ff \times V_{oc1} \times I_{cc1}}{S \times E} \quad (I.3)$$

S : surface de la cellule en  $m^2$

E : l'ensoleillement  $W/m^2$

$P_{in}$  : Puissance incidente.

Les conditions normalisées de test des panneaux solaires sont caractérisées par un rayonnement instantané de  $1000W/m^2$  d'une température ambiante de  $25^\circ C$  et d'un spectre AM de **1.5. AM**. Ces conditions sont appelées **STC** (Standard Test Conditions) cela correspond à un ensoleillement assez fort [LAL15].

La figure (I.6) présente la courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque avec les points importants qui la caractérise [LAL 15].

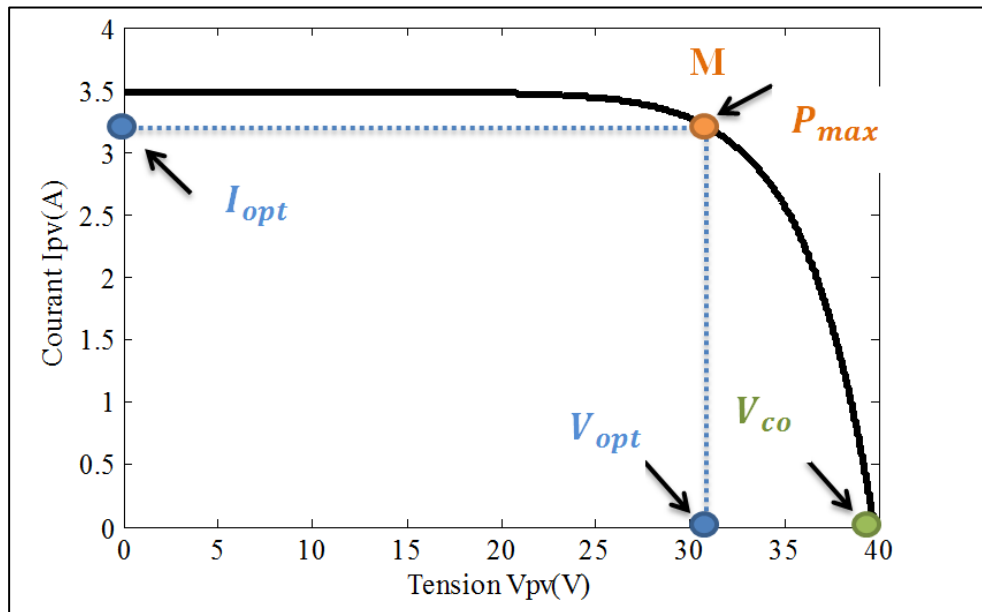


Figure (I.6) : Courbe courant -tension d'une cellule photovoltaïque.

### I.5.6. Association des cellules photovoltaïques [SAL 11].

#### a) Association en série

L'association des cellules photovoltaïques en série permet d'atteindre une tension désirée. Le courant de la branche reste le même, mais la tension augmente proportionnellement selon le nombre de cellules mises en série. Les fabricants trient les cellules de même courant pour les mettre en série par ce que si une d'elles était d'un faible courant elle imposerait son courant aux autres. Cette technique est appelée l'appairage en courant.

#### b) Association en parallèle

L'association des cellules photovoltaïques en parallèle permet d'avoir le courant voulu. La tension de la branche est égale à la tension de chaque cellule et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de cellules en parallèle. On trie aussi les cellules de même tension (l'appairage en tension) pour avoir un module robuste.

### I.5.7. Le module photovoltaïque

Le module photovoltaïque est par définition un ensemble de photopiles (cellules solaires) assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition au rayonnement utile (solaire ou autre) (Figure I.7). En effet, une photopile élémentaire ne produit qu'une très faible puissance électrique moins de 3 W avec une tension de l'ordre d'un volt (1V) : entre 0,5 et 1,5 V selon les technologies. Afin de produire plus de puissance, les cellules sont assemblées en série et en parallèle pour former un module photovoltaïque [LAB 06].



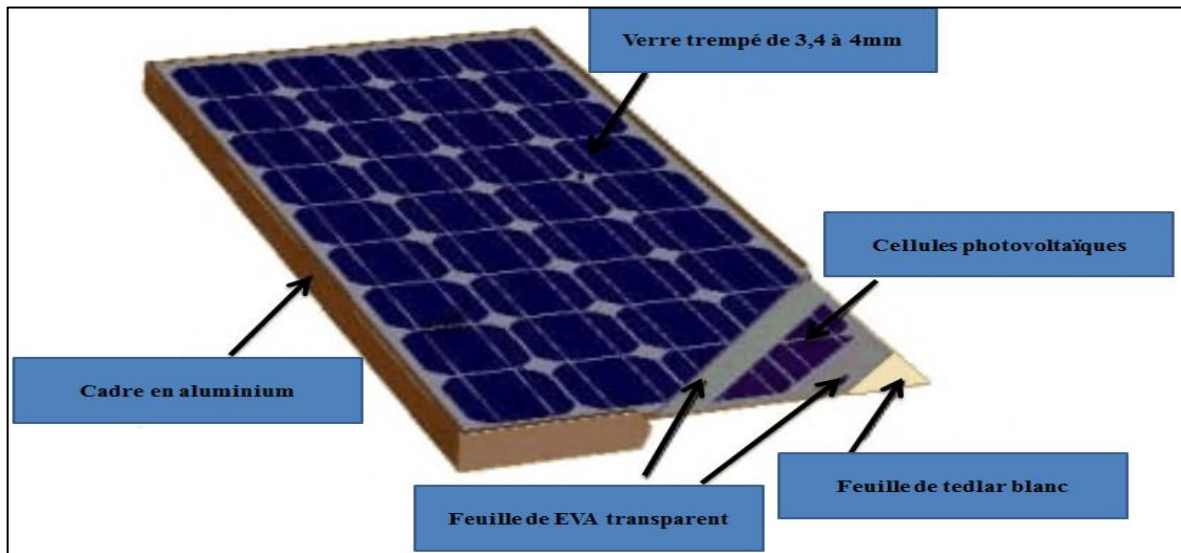


Figure (I.7) : Module photovoltaïque.

### I.5.8. Protection des modules photovoltaïques

Lors de la conception d'une installation photovoltaïque, il faut assurer sa protection électrique afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leurs fonctionnements. Pour cela, deux types de protection sont classiquement utilisés dans les installations photovoltaïques [LAL 15] :

- ✓ La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.
- ✓ Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant l'échauffement de la cellule, ce qui est susceptible de la détruire par claquage. Il convient donc de limiter la tension inverse maximale susceptible de se développer aux bornes d'une cellule en plaçant une diode parallèle (by-pass) au niveau de chaque module la diode parallèle limite la tension inverse par sa tension directe puisqu'elle devient passant.

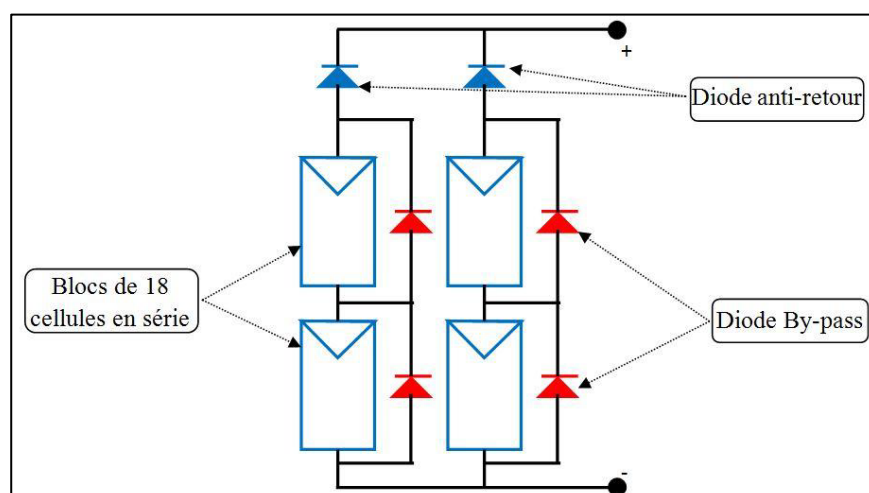


Figure (I.8) : Diodes de protection des modules.

### I.5.9. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïques [MIS 11] [HAL 17]

- **Avantages**

Les principaux avantages de l'énergie PV sont :

- ✓ L'énergie PV est renouvelable et fiable car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles
- ✓ Le caractère modulaire des panneaux PV permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers.
- ✓ 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 PV présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- ✓ Longue durée de vie des panneaux solaires et pas de risques électriques pour les usagers.

- **Inconvénients**

- ✓ La fabrication du module PV relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- ✓ Occupation d'un espace important pour les installations de grandes dimensions.

## I.6.Applications des systèmes photovoltaïques

### I.6.1. Systèmes autonomes

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau.

Dans la plupart des cas une adaptation d'impédance doit être réalisée en insérant entre le générateur et sa charge électrique un dispositif électronique qui permet de forcer le système à fonctionner à sa puissance maximale [OUC 17].

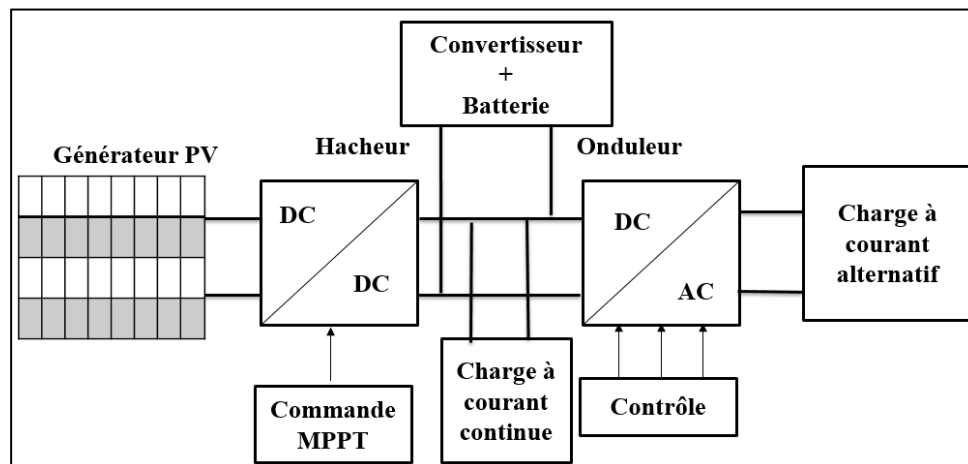


Figure (I.9) : Système autonome [OUC 17].



### I.6.2. Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides consistent l'association de deux ou plusieurs technologies complémentaires de manière à accroître la fourniture d'énergie. Les sources d'énergie comme le soleil et le vent ne délivrent pas une puissance constante, et leur combinaison peut permettre de parvenir à une production électrique plus continue dans le temps. Les systèmes hybrides fonctionnent tels que, les batteries sont chargées par les panneaux solaires (le jour) et par le générateur éolien (lorsqu'il y a du vent) [BEN 06] [SEM 13].

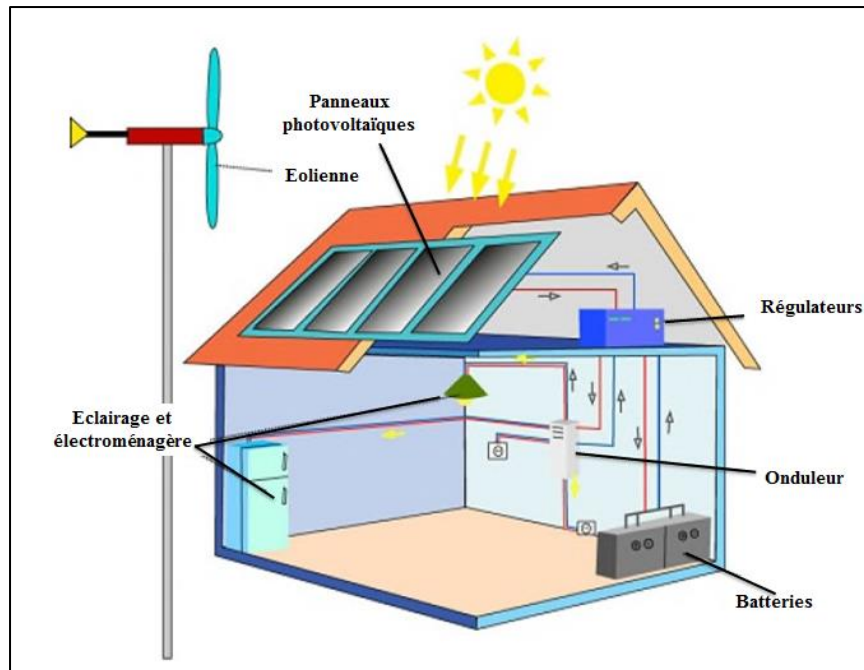


Figure (I.10) : Système hybride [SEM 13].

### I.6.3. Systèmes couplés au réseau

Les installations raccordées au réseau électrique (ou reliées à une centrale de distribution) constituent généralement une solution optimale pour la production de l'électricité solaire, tant en terme d'énergie que de coûts. Ces installations se composent de module photovoltaïques interconnectés, d'un (ou plusieurs) onduleur(s) raccordés au réseau électrique. L'onduleur convertit le courant continu généré par les modules photovoltaïques et produit un courant alternatif conforme au réseau électrique [AOU 10]. La figure (I.11) illustre le principe d'un système connecté au réseau :

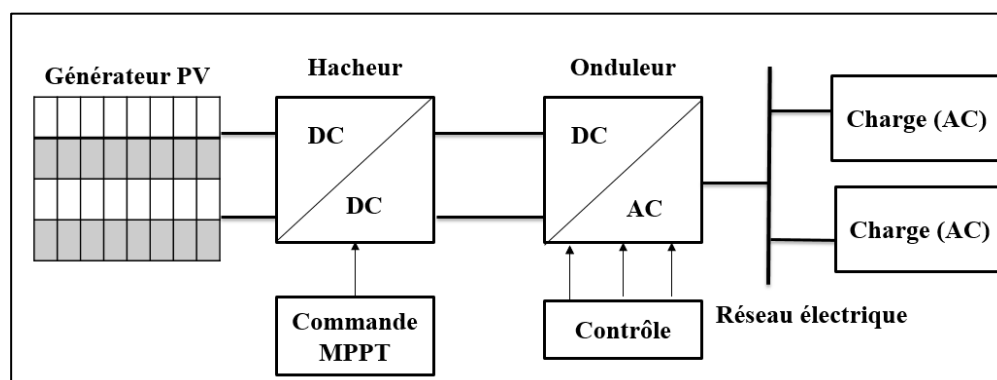


Figure (I.11) : Système couplé au réseau [AOU 10].

Dans notre travail nous nous sommes intéressés aux systèmes raccordés au réseau électrique pour les avantages cités ci-dessous [AOU 10] :

- ✓ N'a pas besoin de stockage d'énergie et élimine donc le maillon le plus problématique (et plus cher) d'une installation autonome. C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie.
- ✓ Pas de gaspillage, tout excédent est livré au réseau
- ✓ On n'est pas obligé de calculer méticuleusement ses besoins en électricité, et de prévoir des niveaux de demande exceptionnellement très élevés, même si très rares.
- ✓ On peut commencer petit et agrandir par la suite sans problèmes de dimensionnement compliqués.
- ✓ On peut satisfaire une partie ou la totalité de ses besoins électriques.

### **I.6.3.1 Topologie des systèmes photovoltaïques connecté au réseau**

Il existe deux architectures de connexion d'un système photovoltaïque au réseau électrique :

- **La connexion GPV- via un étage d'adaptation (DC/AC)**

Il existe différentes topologies de gestion de ces installations. Néanmoins, toutes ces approches reposent sur un GPV raccordé au réseau par le biais d'onduleurs qui transfèrent et mettent en forme l'énergie solaire électrique. Les progrès effectués ces dernières années dans le développement des onduleurs dédiés aux photovoltaïque ont permis de faire évoluer grandement ces systèmes de gestions.

Les onduleurs ne se limitent pas à transformer la puissance continue (DC) générée par les panneaux solaires en puissance alternative sous forme d'une tension sinusoïdale de fréquence souhaites (par ex : 230/240-50Hz), mais ils exploitent également la puissance délivrée par le GPV en le forçant à fonctionner à son point de puissance maximale.

De plus, ils assurent une surveillance fiable du réseau pour protéger ce dernier contre les pannes et interrompent l'alimentation en cas de problème survenant soit du réseau soit de l'installation. Actuellement, il existe principalement trois architectures d'onduleurs qui donnent de bonne solutions techniques : l'onduleurs central, les onduleurs strings et les onduleurs intégrés aux panneaux [PET 09].

- **La connexion via deux étages d'adaptation (DC/DC et DC/AC)**

La conversion peut également être réalisée en deux étapes, une première conversion DC/DC puis une conversion DC/AC. Dans cette configuration, le convertisseur DC/DC à généralement le rôle d'augmenter la tension pour que l'onduleur puisse fabriquer un courant sinusoïdale à la tension du réseau. Les convertisseurs sont reliés par un bus DC. Les fonctions

demandées par les applications photovoltaïques peuvent ici être réparties entre les deux convertisseurs.

Les convertisseurs de puissance hacheur et onduleur sont implantés pour ces raisons :

- Forcer le générateur photovoltaïque à fonctionner au point de puissance maximale.
- Produire le courant de sortie sinusoïdale et en phase avec la tension du réseau [PET 09].

### I.7. Optimisation de l'énergie photovoltaïque

Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, un suiveur de point de puissance maximum (MPPT : Maximum Power Point Tracker) est utilisé pour contrôler les variations de la caractéristique courant tension des cellules. [LAL 09].

Il s'agit, par un moyen (à trouver), de venir se placer sur le point maximum de la caractéristique en puissance et de pouvoir y rester quelles que soient les variations de température, ensoleillement ou autre.

Dans la littérature plusieurs méthodes d'optimisation MPPT ont été proposées [ABB 13], on cite :

- Algorithmes Perturbation et Observation (P&O).
- Algorithmes à base de la logique floue (FLC).

### I.8. Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie est une notion assez large qui recouvre à la fois la qualité de la fourniture électrique, la qualité de l'onde de tension et la qualité des courants. Lorsque la tension est présente, les principaux phénomènes pouvant l'affecter sont d'une part les variations lentes : creux de tension, surtensions, coupures, déséquilibres et d'autre part des variations rapides : surtensions transitoires, flicker ainsi que les harmoniques. La qualité des courants reflète par contre la possibilité des charges à fonctionner sans perturber ni réduire l'efficacité du système de puissance. C'est pourquoi certains considèrent que la qualité de l'électricité se réduit à la qualité de la tension [CHA 10].

La qualité de l'alimentation électrique ou qualité de l'onde fait référence à la mesure du degré de conformité d'une source d'alimentation électrique par rapport à un certain nombre de critères ou de normes à caractère quantitatif et absolu. L'énergie électrique est délivrée sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Les paramètres caractéristiques de ce système sont les suivants :

- La fréquence
- L'amplitude

- La forme d'onde qui doit être sinusoïdale
- La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leurs déphasages relatifs [CHA 10].

Tout phénomène physique affectant une ou plusieurs de ces caractéristiques peut être considéré comme perturbation. En pratique, ces perturbations sont classées selon la durée du phénomène. Ainsi, il est possible de distinguer :

- ✓ Les altérations de l'onde de tension (harmoniques, déséquilibre, flicker). Ces phénomènes sont permanents ou durent au minimum plusieurs minutes,
- ✓ Les creux de tension et coupures brèves d'une durée de l'ordre d'une à quelques secondes,
- ✓ Les surtensions transitoires, de durée inférieure à une période.

Dans ce qui suit nous nous restreindrons à la présentation des perturbations provoquées par les harmoniques ainsi que leurs conséquences néfastes sur le réseau électrique [MES 14].

### I.9.Problématiques des harmoniques [OUC 17]

Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition sur l'onde fondamentale, d'ondes également sinusoïdales mais aussi sur fréquences multiples de celle du fondamental. En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impairs existent. Nous pouvons également observer des sous-harmoniques ou des inter-harmoniques à des fréquences non multiples de la fréquence fondamentale.

Les sources génératrices de courants harmoniques peuvent être classées en deux types :

- **Sources harmoniques identifiables**

Les équipements dotés de dispositifs à base d'électronique de puissance, notamment les redresseurs et les cyclo convertisseurs de puissances importantes, installés sur les réseaux haute et moyenne tension sont typiquement des sources harmoniques identifiables. Avec ce type de charge non linéaire, le distributeur d'énergie est capable d'identifier le point d'injection des harmoniques et de quantifier la perturbation provoquée. Dans ce cas, c'est l'utilisateur qui doit se procurer les moyens nécessaires afin de réduire cette perturbation au-dessous du seuil exigé par le distributeur de l'énergie sous peine d'être pénalisé.

- **Sources harmoniques non identifiables**

Ce type de générateur de courants harmoniques est principalement représenté par les appareils utilisés dans les domaines électrodomestiques ou tertiaires tels que les téléviseurs et les micro-ordinateurs. Vue leur très large diffusion, ces équipements comportant souvent un redresseur monophasé à diodes avec un condensateur de lissage, prélèvent des courants harmoniques non négligeables. Dans ce cas, il est de la responsabilité du distributeur de l'énergie électrique

d'empêcher la propagation de la perturbation harmonique sur le réseau puisqu'individuellement chaque utilisateur génère un faible taux d'harmonique.

### I.9.1. Conséquences néfastes des harmoniques [BOU 10]

Les courants et les tensions harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie des équipements électriques. Bien que les susceptibilités des différents équipements et appareils électriques, raccordés à un réseau pollué, soient très diversifiés, on distingue deux sortes d'effets possibles :

- **Les effets quasi-instantanés** : Concernent certains types d'appareillage, tels que l'électronique de puissance, calculateurs, relais, systèmes de contrôle et régulation, etc. La présence des harmoniques sur le réseau provoque le déplacement du passage par zéro et des modifications de la valeur crête de l'onde.
- **Les effets à termes** : Se rapportent essentiellement aux machines tournantes, aux transformateurs et aux condensateurs, ce qui se manifeste par des échauffements supplémentaires et l'augmentation du niveau sonore. Il en découle la destruction de matériel ou plus fréquemment une diminution de leur durée de vie par surcharge thermique.

La liste suivante donne une idée de l'impact des harmoniques sur certains équipements à usage fréquent qui font partie intégrante du réseau électrique, tels que les :

- ❖ **Alternateurs** : Pertes supplémentaires dans les enroulements statoriques et dans les amortisseurs liés à l'augmentation de la valeur efficace du courant absorbé. Ces pertes provoquent un échauffement supplémentaire et réduisent également le rendement de ces machines.
- ❖ **Câbles électriques** : Pertes Joule supplémentaires, surtout dans les câbles de retour du neutre où circulent les courants harmoniques homopolaires et corrosion des câbles en aluminium sous l'effet de la circulation de courants harmoniques pairs associés à une composante continue. La présence des harmoniques dans le réseau diminue aussi la capacité de transport en puissance active des lignes.
- ❖ **Transformateurs** : Ils sont les constituants les plus directement affectés par les courants harmoniques. Ces derniers produisent des pertes additionnelles dans les enroulements. Ces pertes ne sont pas seulement dues à l'effet Joule pelliculaire, mais aussi à des courants induits dans les bobinages, le noyau et les pièces métalliques par les composantes à hautes fréquences des champs de fuite.
- ❖ **Condensateurs** : Ils sont aussi très affectés par les courants harmoniques. Les condensateurs branchés en parallèle sur les réseaux pour la compensation de la puissance réactive (correction du facteur de puissance) ont des impédances d'autant plus faibles que la fréquence est élevée. Les courants harmoniques se superposent au

courant fondamental et causent des pertes supplémentaires qui peuvent excéder la capacité thermique des condensateurs et réduire considérablement leur durée de vie. De plus, des phénomènes de résonance peuvent subvenir et soumettre les condensateurs à des surtensions, lesquelles sont susceptibles de les dégrader, voire de perforer leur isolation.

- ❖ **Equipements à base d'électronique de puissance** : dysfonctionnement lié à la déformation de la tension qui peut créer des faux passages par zéro (perte de synchronisation).

## I.9.2. Caractérisations des harmoniques

### a) La distorsion harmonique totale (THD) [HAM 08]

L'impact harmonique est caractérisé par le taux de distorsion harmonique globale (THD). C'est un indice important largement utilisé pour quantifier le contenu harmonique d'un signal distordu. Il mesure le degré de déformation du signal apporté par les harmoniques par rapport à une onde sinusoïdale. Le THD est défini comme la valeur efficace des harmoniques au-dessus de la fondamentale, divisée par la valeur efficace de cette dernière. Le THD est défini pour les signaux de tension et de courant, respectivement, comme suit :

$$THD_v(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (I.4)$$

$$THD_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (I.5)$$

### b) Le facteur de distorsion

Le facteur de distorsion  $F_d$  est défini comme étant le rapport entre la fondamentale et le signal en valeurs efficaces. Il est donné par l'expression suivante :

$$F_d = \frac{I_1}{I_{eff}} \quad (I.6)$$

Il est alors égal à l'unité lorsque le courant est purement sinusoïdal et diminue lorsque la distorsion apparaît.

### c) Facteur de crête

Le facteur de crête  $F_c$  d'un signal est défini par ainsi :

$$F_c = \frac{\text{valeur crête}}{\text{valeur efficace}} \quad (I.7)$$

Pour les ondes sinusoïdales, le facteur de crête est 1,41. Il peut atteindre la valeur de 5 dans le cas d'ondes fortement déformées.

### d) Facteur de Puissance

Pour un signal sinusoïdal, le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active  $P$  et la puissance apparente  $S$  :

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (I.8)$$

$$\cos\varphi = \frac{p}{\sqrt{p^2+Q^2}} \quad (\text{I.9})$$

La puissance apparente  $S$  peut être définie par :

$$S = V_{eff} \times I_{eff} \quad (\text{I.10})$$

Les puissances active  $P$  et réactive  $Q$  peuvent être données par les relations suivantes :

$$P = 3VI_1\cos\varphi_1 \quad (\text{I.11})$$

$$Q = 3VI_1\sin\varphi_1 \quad (\text{I.12})$$

Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée puissance déformée  $D$  apparaît. Cette puissance peut être donnée par la relation :

$$D = V_{eff}\sqrt{\sum_{n=2}^{\alpha} I_n^2} \quad (\text{I.13})$$

La puissance apparente  $S$  peut alors s'exprimer comme suit :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{I.14})$$

Donc, Le facteur de puissance  $F_p$  est exprimé par l'expression suivante :

$$F_p = \frac{p}{\sqrt{P^2+Q^2+D^2}} \quad (\text{I.15})$$

D'après l'équation (I.15), on constate que le facteur de puissance est réduit en raison de la présence des harmoniques et de la consommation de puissance réactive.

Le diagramme de Fresnel des puissances est présenté sur la figure (I.12) :

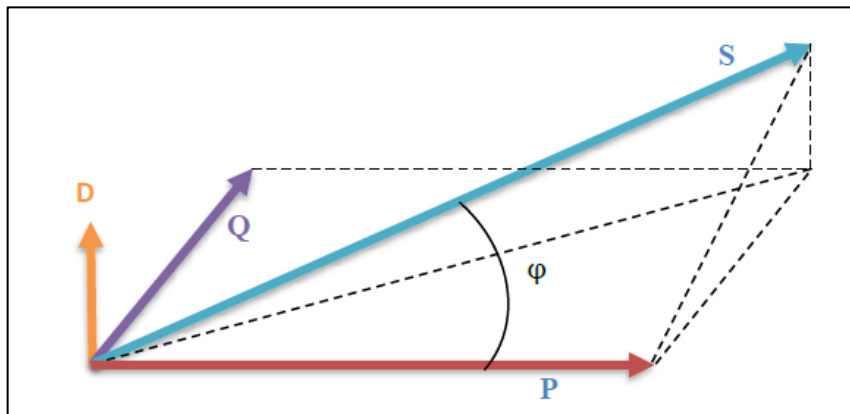


Figure (I.12) : Le diagramme de Fresnel des puissances [OUC 17]

### I.9.3. Normes et réglementations

Afin de limiter l'influence d'une charge polluante sur les autres charges connectées au réseau et en même temps éviter la modification des caractéristiques de ce dernier, les distributeurs d'énergie électrique ont été amenés à émettre des recommandations. Ces recommandations concernent les exigences au point de raccordement de l'utilisateur sur le réseau électrique dans le but :

- ✓ D'épargner à l'utilisateur de l'énergie électrique, les désagréments engendrés par la présence des harmoniques.

- ✓ D'assurer la longévité et la sécurité des différents équipements constituant le réseau et ceux qui sont branchés à ce dernier.

Des normes fixant un seuil d'injection harmonique maximale à ne pas dépasser, ces normes ont été élaborées par différents organismes, ils peuvent être soit nationaux, notamment UTE-CEF (Union Technique de l'Electricité- Comité Electrotechnique Français), régionaux, notamment le CENELEC (Comité de normalisation Electrotechnique (EN 50160)) en Europe ou internationaux, notamment CEI (Comité Electrotechnique International) [SAL 11].

Le tableau I.2, repris de la norme CEI 61000-2-2, présente les caractéristiques et le niveau de compatibilité pour les harmoniques au point de raccordement du client pour un réseau satisfaisant la norme CEI 1000-2-4.

**Tableau (I.2) : Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux basse tension (Norme CEI 61000-2-2) [SAL 11]**

Rangs impaires non Multiple de 3		Rangs impaires Multiple de 3		Rangs paire	
Rang	Tension Harmonique (%)	Rang	Tension Harmonique (%)	Rang	Tension Harmonique (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	0.2+1.3*25h				

#### **I.9.4. Solutions possibles pour réduire les harmoniques et d'améliorer la qualité de l'énergie [BOU 14]**

Afin de diminuer les perturbations en tension ou en courant, il est possible d'agir à deux niveaux :

1. Du côté de la source en filtrant la tension du réseau ou en améliorant le réseau de transport et celui de distribution ;
2. Du côté du client en rendant le courant de ligne le plus sinusoïdal possible.



Plusieurs solutions ont été envisagées pour limiter la propagation des harmoniques et améliorer la qualité et la gestion de l'énergie électrique. Elles peuvent être classées en deux catégories, traditionnelles et modernes (à base de l'électronique de puissance).

#### a) Solutions traditionnelles de dépollution

Les moyens de dépollution traditionnels sont nombreux et ne se résument dans points suivants :

- ✓ Inductance anti-harmonique de protection des condensateurs ;
- ✓ Inductance de lissage des courants ;
- ✓ L'utilisation de transformateurs à couplage approprié permettant de limiter la circulation des courants harmoniques ;
- ✓ Filtres passifs utilisant des éléments réactifs en l'occurrence des inductances et des condensateurs.

#### b) Solutions modernes à base d'électronique de puissance

Parmi ces moyens modernes, nous pouvons citer :

- ✓ Les filtres actifs : parallèles, séries, hybrides et combinaisons des structures ;
- ✓ Les alimentations sans interruption ;
- ✓ Les dispositifs FACTS (Système de transmission flexible en courant alternatif, plus connu sous l'acronyme anglais de FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) est un équipement d'électronique de puissance d'appoint utilisé pour contrôler la répartition des charges dans le réseau en améliorant ainsi la capacité de transit et en réduisant les pertes, pour contrôler la tension en un point ou assurer la stabilité dynamique des réseaux de transmission d'électricité et des groupes de productions qui y sont connectés. Il peut également filtrer certaines harmoniques et donc améliorer la qualité de l'électricité) ;
- ✓ Les convertisseurs à prélèvement sinusoïdal.

### I.10.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'énergie solaire photovoltaïque ainsi que ces avantages. Nous avons passé en revue la cellule photovoltaïque qui est à la base de la conversion de l'énergie rayonnée par le soleil en électricité. On a présenté également les principales applications des systèmes photovoltaïques à savoir : les systèmes autonomes, les systèmes hybrides, et les systèmes connectés au réseau avec ces différentes configurations. Le système retenu pour notre étude est le système photovoltaïque connecté au réseau électrique via un étage d'adaptation DC/DC, pour le fonctionnement du générateur photovoltaïque à sa puissance maximale quel que soit les conditions météorologique, et un convertisseur DC/AC contrôlé en puissance pour produire un courant de sortie sinusoïdale et en phase avec la tension du réseau. Nous avons vu aussi l'origine, les effets et les conséquences des harmoniques sur le réseau électrique. Afin de les réduire, il existe plusieurs

solutions (modernes et traditionnelles). Des normes ont été établies pour limiter les harmoniques sur les réseaux électriques.

Dans les prochains chapitres nous présenterons la modélisation des différentes parties constituant notre système et le contrôle de la puissance injectée au réseau.

## CHAPITRE II : Modélisation du système étudié

### II.1. Introduction

Après avoir étudié et cité les différents composants du système photovoltaïque, ainsi que l'influence des paramètres de ses composants sur ce dernier, nous procéderons à la modélisation de notre système.

La modélisation est une étape fondamentale qui permet d'introduire un certain nombre de modèles puis d'évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres la constituant. Celle-ci nécessite un ensemble d'équation caractérisant tous les éléments de notre système. Des modèles électrique d'un générateur photovoltaïque seront présentés, un modèle sera choisi afin d'être simulé pour divers température et divers ensoleillements.

Ce chapitre a pour but l'étude, la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau constitué d'un générateur photovoltaïque, un hacheur survolteur (boost), un onduleur et d'un filtres passifs.

### II.2. Présentation du système proposé pour l'étude

Le système photovoltaïque à modéliser est représenté sur la figure (II.1), il est composé d'un ensemble de panneaux photovoltaïque constituant un GPV, d'un hacheur survolteur contrôlé avec un algorithme d'optimisation pour maximiser la puissance extraite des panneaux photovoltaïques. Un onduleur est utilisé pour la conversion DC/AC et un filtre RL pour la connexion au réseau.

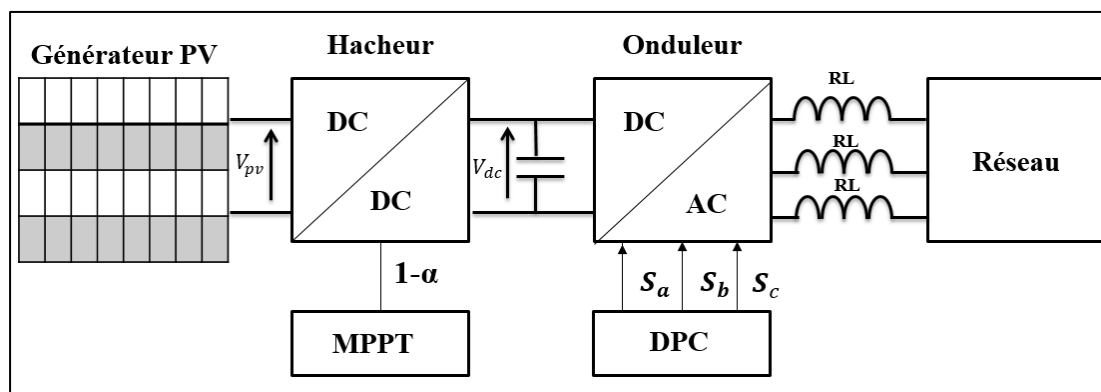


Figure (II.1) : Schéma simplifié du système photovoltaïque.

### II.3. Modélisation d'un générateur photovoltaïque

Il existe dans la littérature plusieurs modèles de générateurs photovoltaïques qui diffèrent entre eux par la procédure mathématique et le nombre de paramètre intervenant dans le calcul de la tension et du courant du GPV. La modélisation des modules photovoltaïques passe

nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. Le courant généré par le module photovoltaïque à une tension donnée dépend uniquement de l'éclairement et la température du panneau. Dans ce qui suit nous allons en présenter quelque uns.

### II.3.1. Modèle idéal

Dans le cas idéal, le module d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connecté à une charge peut être schématisée par un générateur de courant  $I_{ph}$  en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (II.2), qui représente le circuit équivalent d'un module solaire idéal [ZER 08].

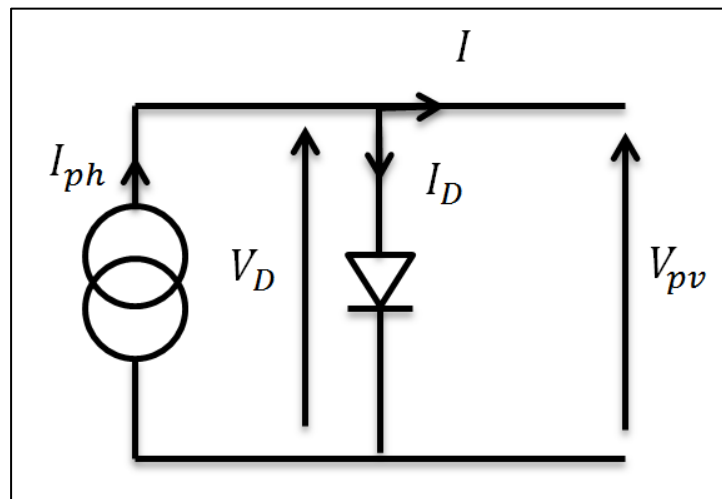


Figure (II.2) : Modèle électrique idéal d'un module photovoltaïque.

L'équation retenue à partir de la loi des nœuds est :

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

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la charge  $V_{pv}$  est égale à celle aux bornes de la diode.

$$V_{pv} = V_d \quad (II.2)$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_d = I_s [e^{\frac{qV_{pv}}{AKT}} - 1] \quad (II.3)$$

Avec :

$I_s$  : Courant de saturation de la diode.

$A$  : Facteur de qualité de la diode.

$K$  : constante de Boltzmann.

$T$  : Température en degré Kelvin.

$q$  : Charge de l'électron, qui est égale à  $1.6 \times 10^{-19}C$

Le courant débité est décrit par l'équation suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_s \left[ e^{\frac{q \cdot V_{pv}}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right] \quad (\text{II.4})$$

Ce modèle reste théorique et ne tient pas compte du comportement d'un panneau photovoltaïque dans les conditions réelles.

### II.3.2. Modèle implicite à une diode

C'est le modèle le plus cité dans la littérature, le module photovoltaïque est caractérisé par son schéma électrique équivalent de la figure (II.3) qui se compose d'une source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique, une diode en parallèle qui modélise la jonction PN, une résistance shunt  $R_{sh}$  est une conséquence de l'état de le long de la périphérie de la surface de la cellule, une résistance série  $R_s$  représentant les diverses résistances de contacte et de connexions [SAL 11].

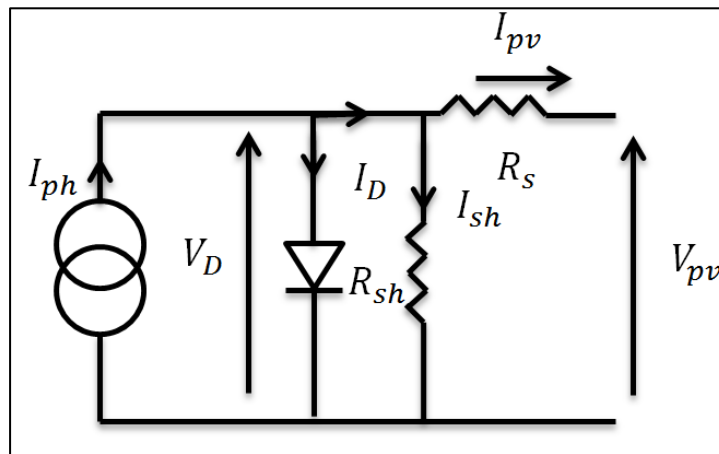


Figure (II.3) : Modèle électrique à une diode avec résistance shunt.

Le courant généré par le panneau photovoltaïque est donné par la loi des nœuds suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$I_{pv}$  : Le courant délivré par le module.

$I_{ph}$  : Photo courant

$I_d$  : courant de la diode

$I_{sh}$  : Courant de la résistance shunt

### II.3.3. Modèle simplifié à une diode

C'est un modèle électrique empirique simple qui est le plus proche du générateur photovoltaïque. Il est actuellement le plus utilisé en raison de la qualité des résultats obtenus. Ce dernier contient une diode sans résistance shunt et comporte cinq (5) paramètres ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $I_{ppm}$ ,  $R_s$ ) qui tient compte de la variation du courant et de la tension du panneau photovoltaïque en fonction des conditions climatiques [OUA 11].

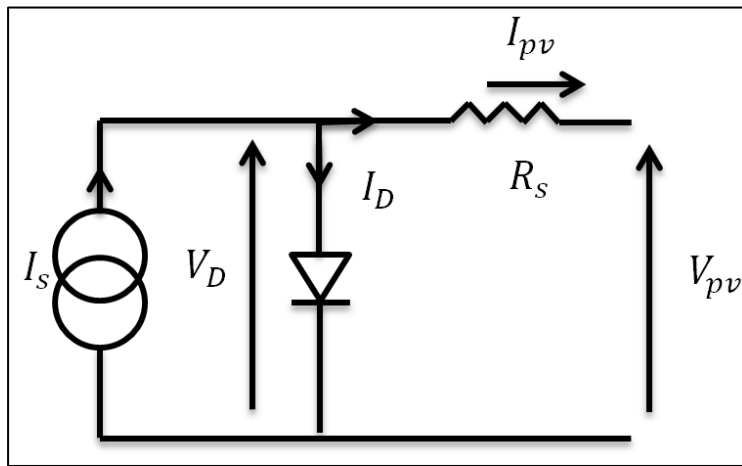


Figure (II.4) : Modèle électrique à une diode sans résistance shunt.

L'expression du courant du module photovoltaïque est donnée par :

$$I_{pv} = I_{cc} \{1 - K1 [e^{K2 V_{pv}^m} - 1]\} \quad (II.6)$$

Où les coefficients K1 et K2 et  $m$  sont donnés par :

$$K1 = 0.01175 \quad (II.7)$$

$$K2 = \frac{K4}{V_{co}^m} \quad (II.8)$$

$$K3 = \ln \left[ \frac{I_{cc}(1+K1) - I_{ppm}}{K1 I_{cc}} \right] \quad (II.9)$$

$$K4 = \ln \left[ \frac{1+K1}{K1} \right] \quad (II.10)$$

$$m = \frac{\ln \left[ \frac{K3}{K4} \right]}{\ln \left[ \frac{V_{ppm}}{V_{oc}} \right]} \quad (II.11)$$

Avec :

$I_{ppm}$  : Courant au point de puissance maximale, appelé aussi courant optimum ( $I_{opt}$ )

$V_{mpp}$  : Tension au point de puissance maximale, appelée aussi tension optimale ( $I_{opt}$ )

$I_{cc}$  : Courant en court-circuit

$V_{oc}$  : Tension en circuit ouvert

Il est à noter que l'équation (II.6) n'est applicable que pour un niveau d'ensoleillement  $G$  et de température particulière ( $G=1000$  W/m<sup>2</sup>,  $T=25$  °C), relatif aux conditions standards de fonctionnement. Quand l'ensoleillement et la température varient on aura les équations suivantes :

$$\Delta T_c = T_c - T_{stc} \quad (II.12)$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{cc} \left( \frac{G}{G_{stc}} \right) \Delta T_c + \left( \frac{G}{G_{stc}} - 1 \right) I_{cc, stc} \quad (II.13)$$

$$\Delta V_{pv} = -\beta \Delta T_c - R_s \Delta I_{pv} \quad (II.14)$$

Avec :

$G_{stc}$  et  $G$  : Représentent respectivement, le niveau d'ensoleillement dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques.

$T_{stc}$  et  $T_c$  : Représentent respectivement, la température dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques.

$\Delta T_c$  : Représente la variation de la température.

$\Delta I_{pv}$  : Représente la variation du courant par rapport à l'ensoleillement et à la température.

$\Delta V_{pv}$  : Représente la variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température.

$\alpha_{cc}$  : Représente un coefficient d'incrément de courant  $I_{sc}$  quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ( $A/^\circ C$ ) (sous les conditions standard de fonctionnement).

$\beta_{oc}$  : Représente un coefficient d'incrément de la tension  $V_{oc}$  quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ( $V/^\circ C$ ) (sous les conditions standard de fonctionnement).

Les nouvelles valeurs de la tension et du courant photovoltaïque sont données par :

$$V_{pv,nouv} = V_{stc} + \Delta V_{pv} \quad (II.15)$$

$$I_{pv,nouv} = I_{stc} + \Delta I_{pv} \quad (II.16)$$

Nous avons choisi pour notre système un modèle à cinq paramètres, ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $I_{mpp}$ ,  $V_{mpp}$  et  $R_s$ ). Les constructeurs des panneaux photovoltaïques fournissent les paramètres de ces derniers ( $I_{cc}$ ,  $I_{mpp}$ ,  $V_{co}$ ,  $V_{mpp}$ ) sous la condition standard de fonctionnement (un ensoleillement de  $1000W/m^2$  et une température de  $25^\circ C$ ). Le tableau (II.1) montre les paramètres du panneau photovoltaïque, de type SIEMENS SM 110-24, qui seront utilisés pour la simulation.

**Tableau (II.1) : Paramètre du panneau photovoltaïque SIEMENS SM 110-24 [LAL 15]**

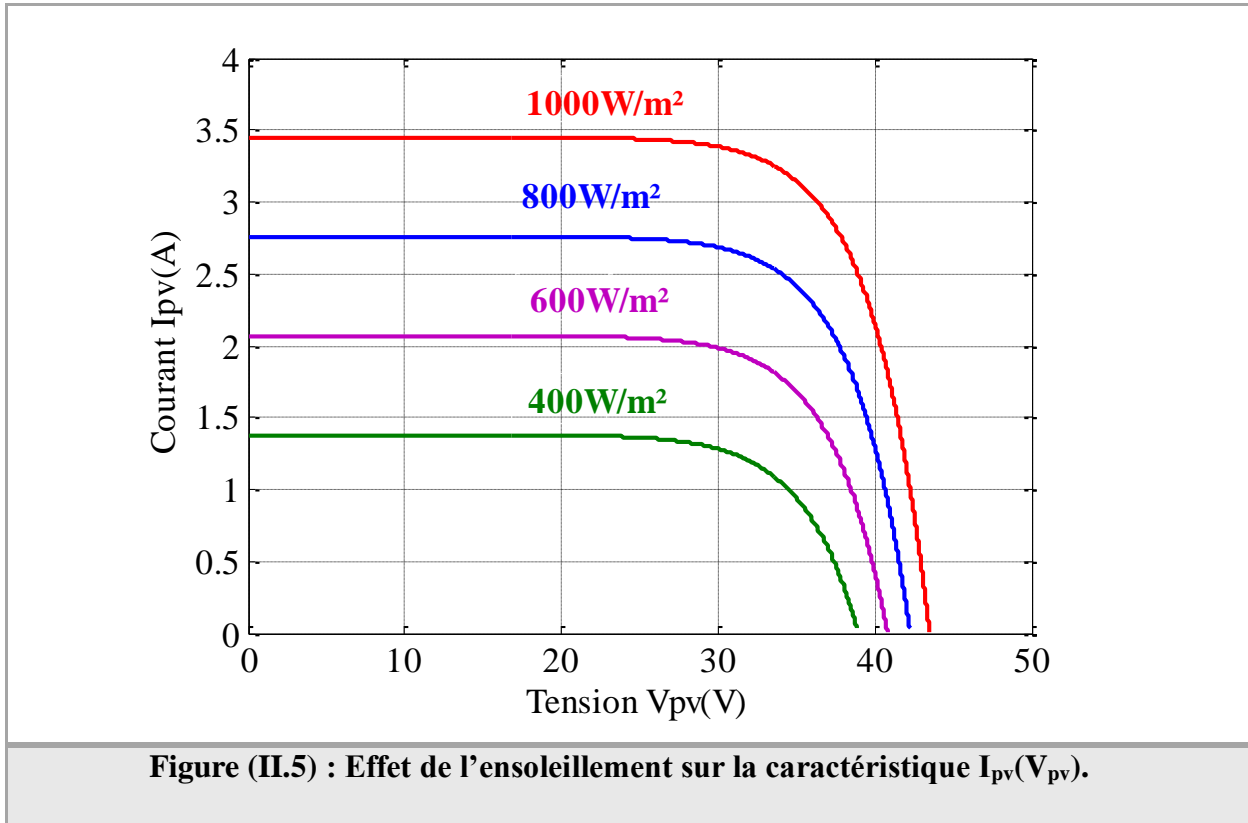
Paramètres	Valeurs
<b>Puissance maximal du panneau <math>P_{ppm}</math></b>	110 W
<b>Courant au point de puissance maximal <math>I_{ppm}</math></b>	3.15 A
<b>Tension au point de puissance maximal <math>V_{ppm}</math></b>	35 V
<b>Courant court-circuit <math>I_{cc}</math></b>	3.45 A
<b>Tension en circuit ouvert <math>V_{oc}</math></b>	43.5 V
<b>Coefficient d'incrément de courant <math>I_{cc}(\alpha_{cc})</math></b>	1.4 mA/ $^\circ C$
<b>Coefficient d'incrément de la tension <math>V_{oc}(\beta_{oc})</math></b>	-152 mV/ $^\circ C$

### II.3.4. Caractéristique courant-tension et puissance–tension du module photovoltaïque

#### II.3.4.1. Effet de l'ensoleillement et de la température sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$

❖ La figure (II.5) représente l'effet de l'ensoleillement sur la caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$ .

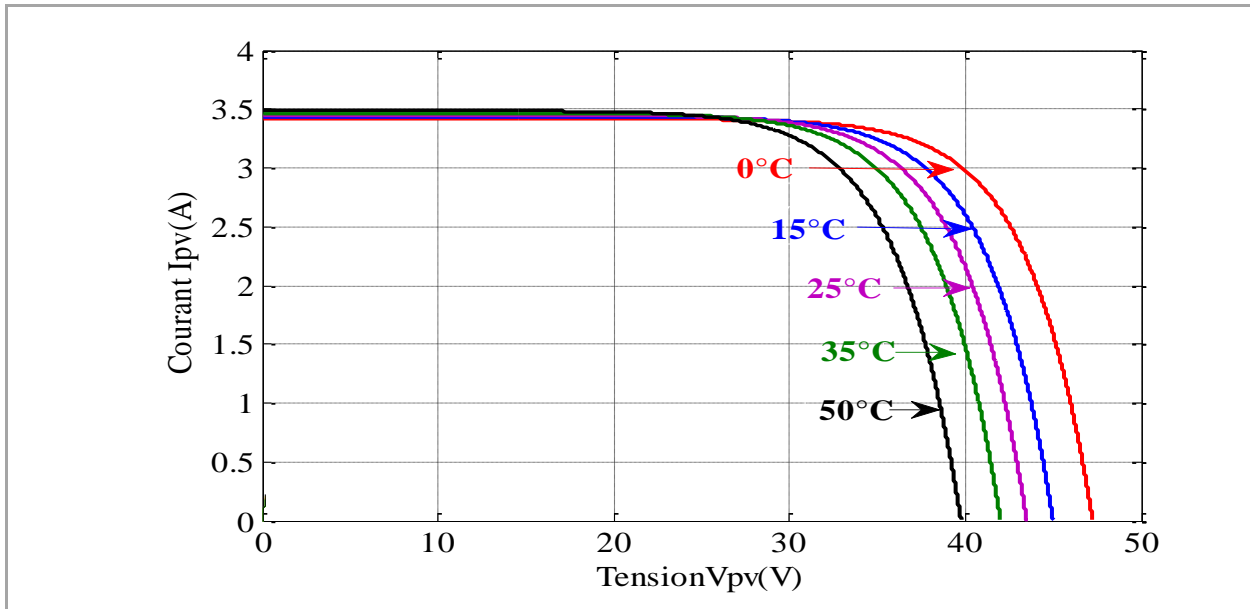
Lorsque la température est constante, on constate que le courant augmente à mesure que l'ensoleillement augmente et que ce dernier ne semble pas influencer la tension de circuit ouvert de la caractéristique.



❖ La figure (II.6) représente l'effet de la température sur la caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$

Lorsque l'ensoleillement est constant et la température varie, on constate que la tension de circuit ouvert varie légèrement en diminuant lorsque la température augmente.

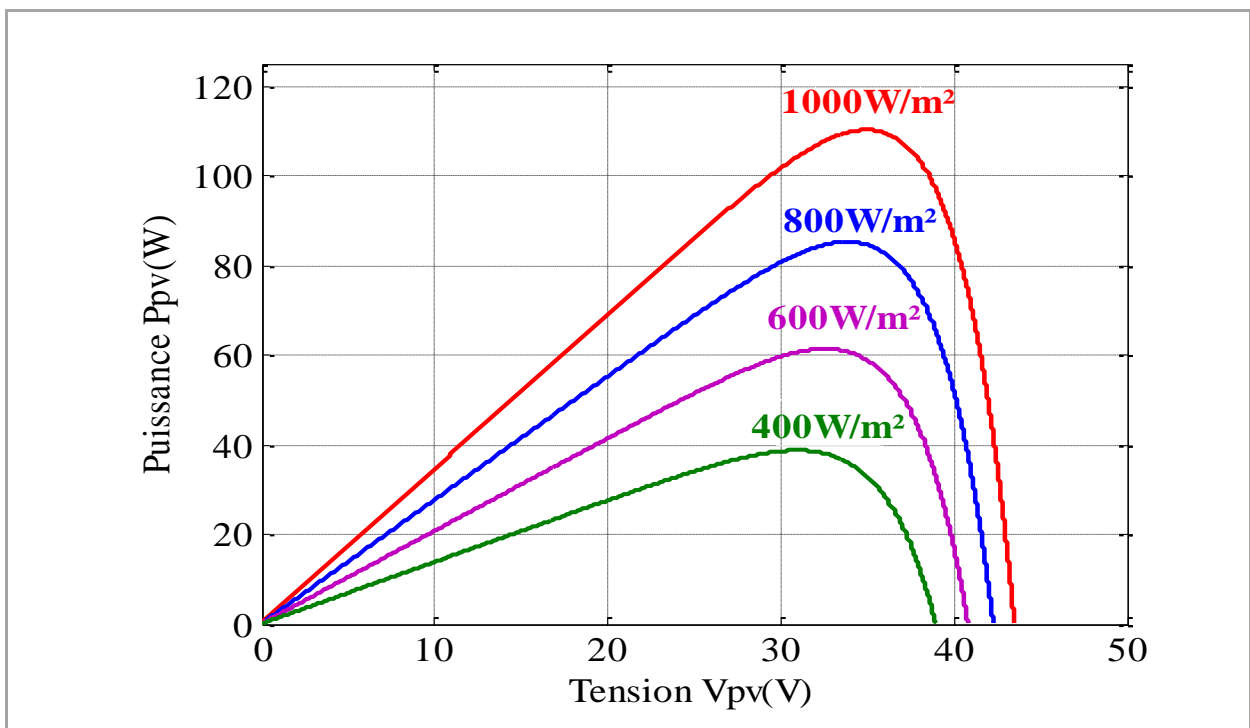




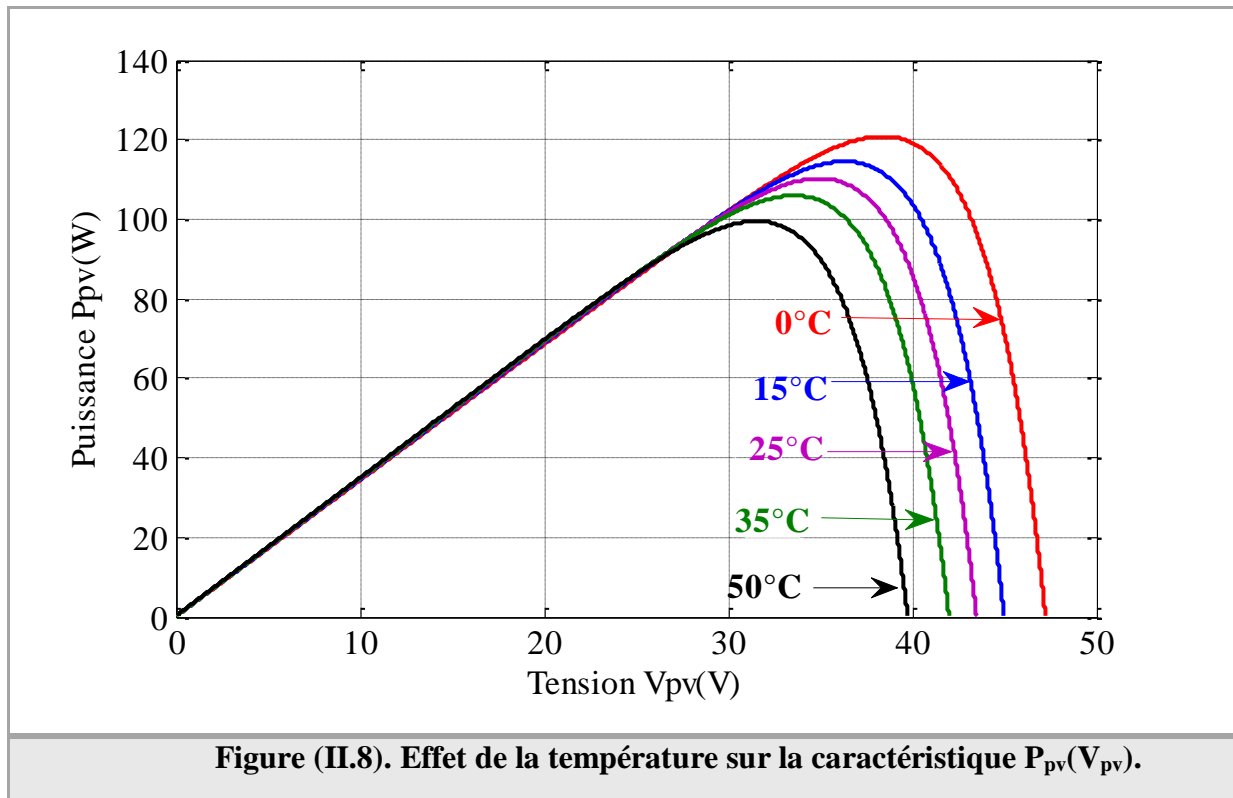
**Figure (II.6) : Effet de la température sur la caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$ .**

**II.3.4.2. Effet de l’ensoleillement et de la température sur la caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$**

Nous observons à partir des figure (II.7) et (II.8) que la caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$  change considérablement avec la variation du niveau d’ensoleillement alors que le changement demeure léger avec la variation de la température. Ceci s’explique par le fait que le courant photovoltaïque varie considérablement avec la variation de l’irradiation ; alors que la tension varie peu. Par contre, cette dernière varie beaucoup lorsque la température varie.



**Figure (II.7). Effet de l’ensoleillement sur la caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$ .**

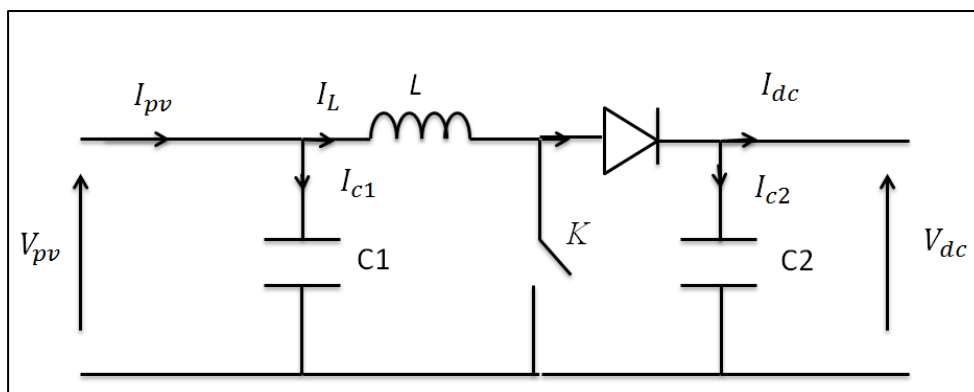


#### II.4. Modélisation du hacheur survolteur

Le hacheur, ou convertisseur continu - continu, est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs électroniques commandés, ce qui permet de modifier la valeur de la tension (moyenne) d'une source de tension continue avec un rendement élevé.

Il existe différents types de hacheurs, si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée le hacheur est dit abaisseur (Buck), dans le cas contraire il est dit survolteur (Boost).

Pour notre étude, nous allons utiliser un hacheur élévateur de tension (Boost) ou hacheur parallèle, celui-ci est une alimentation à découplage qui convertit une tension d'entrée continue en une autre tension plus forte. Son schéma de base est représenté dans la figure (II.9) [BEL 15].



**Figure (II.9) : Schéma de base d'un convertisseur Boost.**

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur des deux phases de fonctionnement donne :

- **Etape (1) :** Lorsque K est fermé

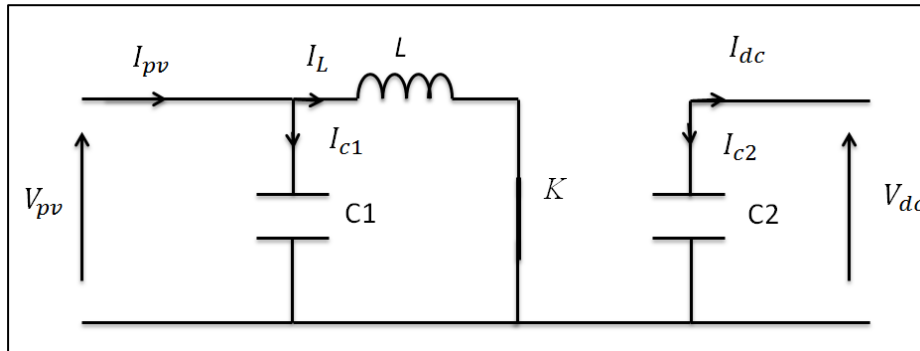


Figure (II.10) : Schéma équivalent du hacheur K fermé

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_{pv}(t)}{dt} = I_{pv}(t) - I_L(t) \quad (II.17)$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_s(t)}{dt} = -I_{dc}(t) \quad (II.18)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L}{dt} = -V_{pv}(t) \quad (II.19)$$

- **Etape (2) :** Lorsque K est ouvert

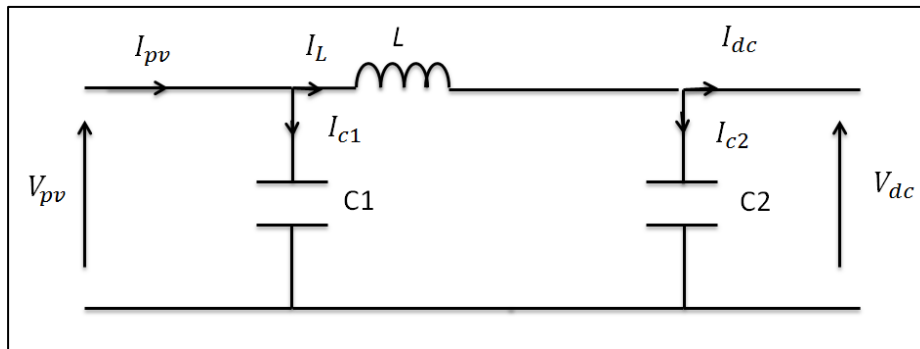


Figure (II.11) : Schéma équivalent du hacheur K ouvert.

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_{pv}(t)}{dt} = I_{pv}(t) - I_L(t) \quad (II.20)$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_s(t)}{dt} = I_L(t) - I_s(t) \quad (II.21)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L}{dt} = V_{pv}(t) - V_{dc}(t) \quad (II.22)$$

## II.5. Modélisation de bus continu [LAL 09]

Le bus continu est composé d'une capacité, qui a pour but le lissage de la tension.

L'évolution de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} i_c \quad (II.23)$$

Avec :

$i_c$  : le courant qui traverse le condensateur.

### II.6. Modélisation du convertisseur DC-AC (Onduleur)

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de générer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique de tension ou de fréquence différente. C'est la fonction inverse d'un redresseur.

$S_i$  est l'état de l'interrupteur  $K_i$  tel que :  $S_i=1$  si  $K_i$  fermé

$S_i=0$  si  $K_i$  ouvert

Les tensions simples s'expriment en fonction des fonctions logiques, elles sont données par :

$$V_a = \frac{V_{dc}}{3} (2S_a - S_b - S_c) \tag{II.24}$$

$$V_b = \frac{V_{dc}}{3} (2S_b - S_a - S_c) \tag{II.25}$$

$$V_c = \frac{V_{dc}}{3} (2S_c - S_a - S_b) \tag{II.26}$$

Et le courant à l'entrée de l'onduleur est donné par :

$$I_{ond} = S_a I_a + S_b I_b + S_c I_c \tag{II.27}$$

Tel que :

$I_{ond}$  : Courant de l'onduleur.

$S_a, S_b, S_c$  : Les fonctions logiques correspondant à l'état des interrupteurs de l'onduleur.

$V_{dc}$  : Tension du bus continu.

$I_a, I_b, I_c$  : Les courants de sortie de l'onduleur.

### II.7. Filtre associé au convertisseur

La figure (II. 12) montre le filtre (RL) associé au convertisseur et sa modélisation est comme suit :

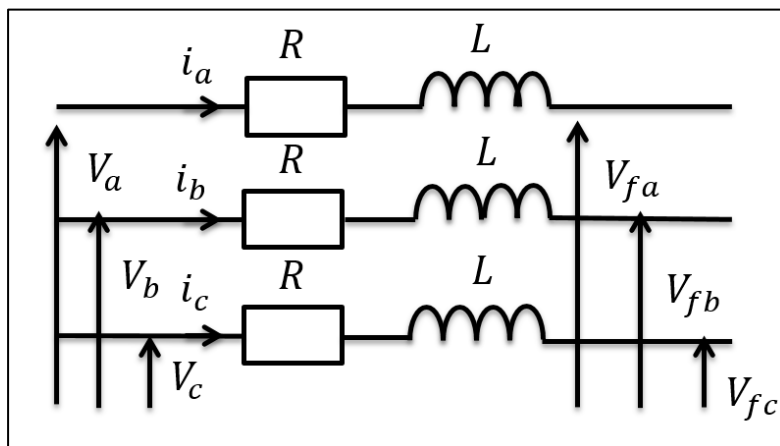


Figure (II.12) : Filtre RL.

$$V_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + V_{fa} \tag{II.28}$$

$$V_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + V_{fb} \tag{II.29}$$

$$V_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + V_{fc} \tag{II.30}$$

Avec :

$V_{fa}, V_{fb}, V_{fc}$  : Les tensions à la sortie du filtre RL.

### II.8. Modélisation du réseau électrique

La figure (II.13) montre le schéma d'un réseau électrique et sa modélisation est comme suit :

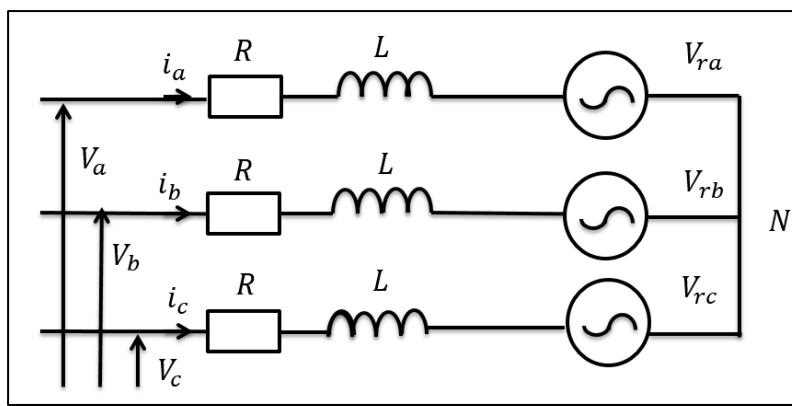


Figure (II.13) : Schéma du réseau relié au filtre RL.

On peut généralement considérer que  $(V_{ra}, V_{rb}, V_{rc})$  est un système de tensions triphasé équilibré direct. Il en est de même pour  $(U_{ab}, U_{bc}, U_{ca})$ . On a :

$$\begin{cases} V_{ra} = V_m \sin(\omega t) \\ V_{rb} = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{rc} = V_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \tag{II.31}$$

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{ra} - V_{rb} \\ U_{bc} = V_{rb} - V_{rc} \\ U_{ca} = V_{rc} + V_{ra} \end{cases} \tag{II.32}$$

Relations pour un système triphasé équilibré :

$$\begin{cases} V_m = \sqrt{2}U_{eff} \\ U_m = \sqrt{3}V_m \\ U_{eff} = \sqrt{3}V_{eff} \end{cases} \tag{II.33}$$

### II.9. Poursuite du point de puissance maximal (PPM) [GHA 17]

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est

basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $\alpha$  en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV.

Au cours de ces années plusieurs type d'algorithme de commande MPPT ont été développés afin de déterminer et le point de puissance maximum. Pour notre étude, Nous avons utilisé deux algorithmes :

- ✓ Algorithme de Perturbation et Observation (P&O).
- ✓ Algorithme à Base de la Logique Floue.

### II.9.1. Algorithme de Perturbation et Observation (P&O)

Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation sur la tension du panneau PV tout en agissant sur le rapport cyclique  $\alpha$ . En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant  $n$ , puis on la compare à la précédente de l'instant  $(n-1)$ . Si la puissance augmente, on s'approche du point à maximum de puissance (PMP) et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du PMP. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique [ABB 13].

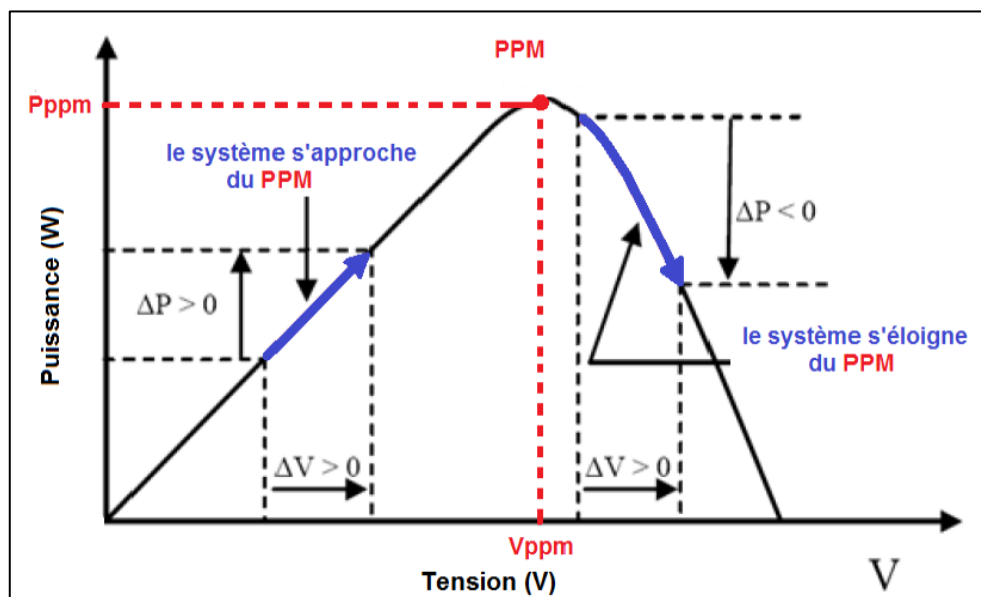


Figure (II.14). Fonctionnement de l'algorithme P&O sur la caractéristique  $P_{pv}(I_{pv})$ .

La figure (II.15) donne l'organigramme de l'algorithme de la P&O où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation

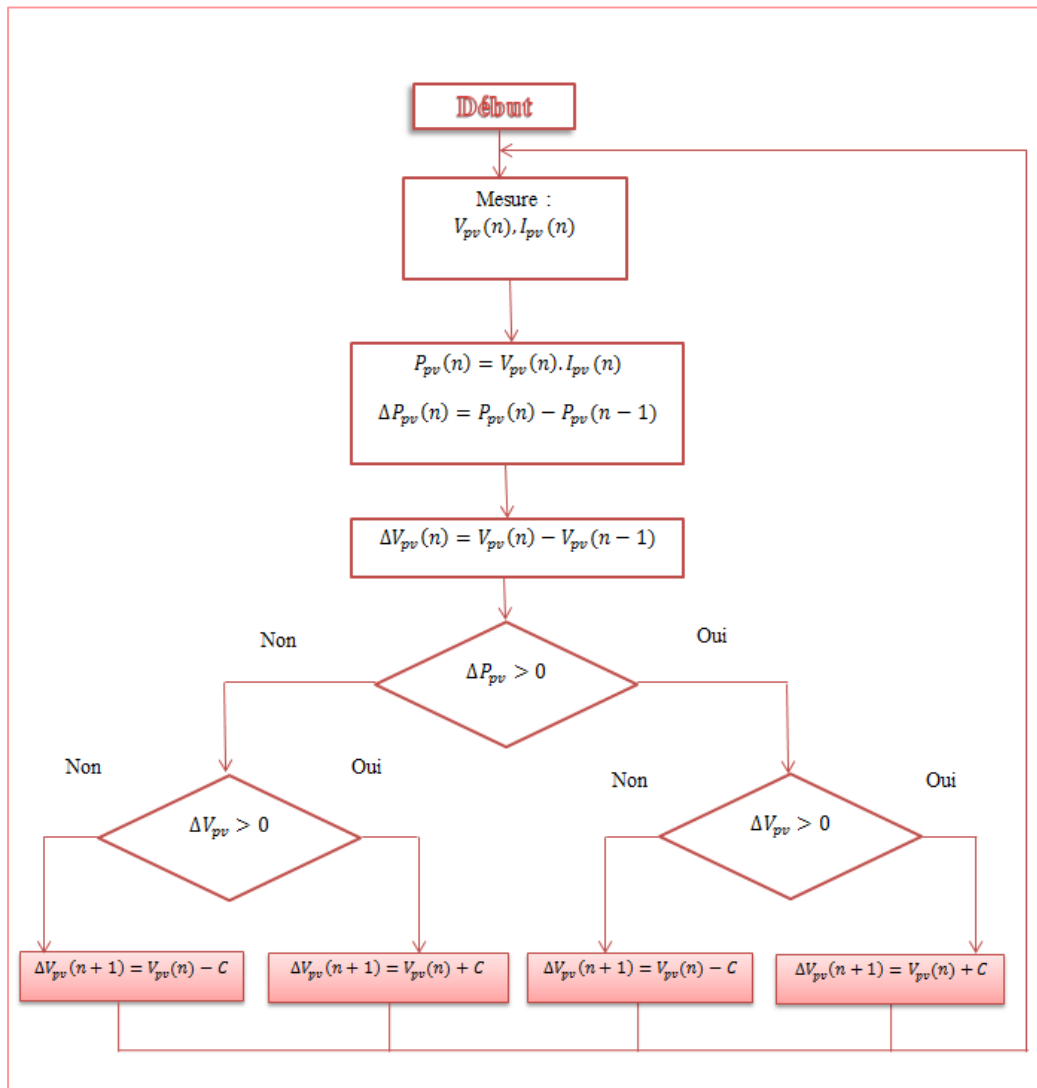


Figure (II.15) : Organigramme de la méthode Perturbation et Observation [ABB 13].

### II.9.2. Contrôleur MPPT basées sur la logique floue [LAL 09]

La commande à base de la logique floue est utilisée dans les systèmes de poursuite du point à maximum de puissance, celle-ci offre l’avantage d’être une commande robuste et qui ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mathématique du système.

Le dispositif MPPT floue à base de mesure de la variation de la puissance photovoltaïque ( $\Delta P_{pv}$ ) et de la tension photovoltaïque ( $\Delta V_{pv}$ ) détermine une variation ( $\Delta V_{pv,ref}$ ) de la consigne de la tension photovoltaïque ( $V_{pv,ref}$ ) selon les équations suivantes :

$$\Delta P_{pv} = P_{pv}[K] - P_{pv}[K - 1] \quad (II.34)$$

$$\Delta V_{pv} = V_{pv}[K] - V_{pv}[K - 1] \quad (II.35)$$

$$V_{pv,ref}[K] = V_{pv}[K - 1] + \Delta V_{pv,ref}[K] \quad (II.36)$$

La structure du contrôleur par logique floue appliqué au système photovoltaïque est montrée sur la figure (II.16) tension du générateur photovoltaïque  $V_{pv}$  est régulée de manière à ce

qu'elle suit la tension photovoltaïque de référence ( $V_{pv,ref}$ ) obtenue à la sortie du contrôleur flou (FLC) la sortie du régulateur de tension est utilisée pour calculer le rapport cyclique du convertisseur DC/DC. Le tableau (II.1) et les fonctions d'appartenance des variables d'entrées sont adaptées en remplaçant les entrées et les sorties du contrôleur MPPT flou respectivement par ( $\Delta P_{pv}$ ,  $\Delta V_{pv}$  et  $\Delta V_{pv,ref}$ ),  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  sont des gains adaptatifs .

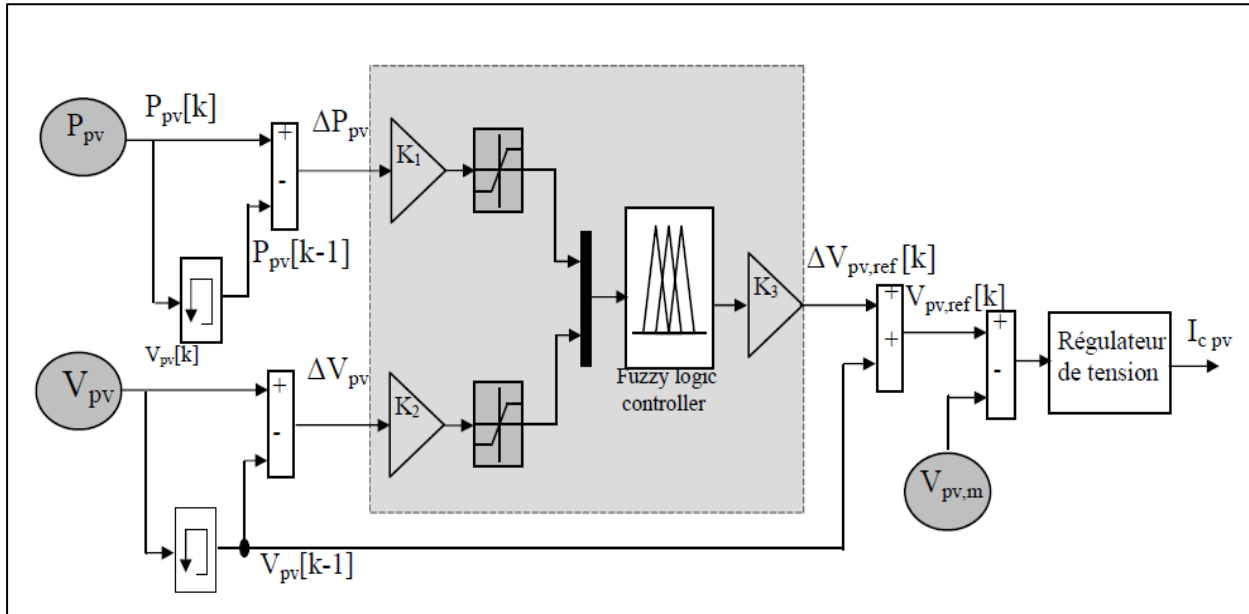


Figure (II.16) : Structure du contrôleur MPPT flou appliqué au système photovoltaïque.

Le fonctionnement de l’algorithme à base de logique flou se fait en trois blocs : la fuzzification, l’inférence et la défuzzification.

La fuzzification permet la conversion des variables physiques d’entrée en ensembles flous. On attribue à ces grandeurs des variables linguistiques : NG (Négative Grand), NM (Négative Moyen), NP (Négative Petit), Z (Zéro), PP (Positive Petit), PM (Positive Moyen) et PG (Positive Grand).

Dans l’étape d’inférence, on prend des décisions. En effet, on établit des relations logiques entre les entrées et la sortie tout en définissant les règles d’appartenance. Par la suite, on dresse le tableau de règles d’inférence (Tableau (II.2)). Finalement, en défuzzification, on convertit le sous-ensemble flou de sortie en une valeur numérique.



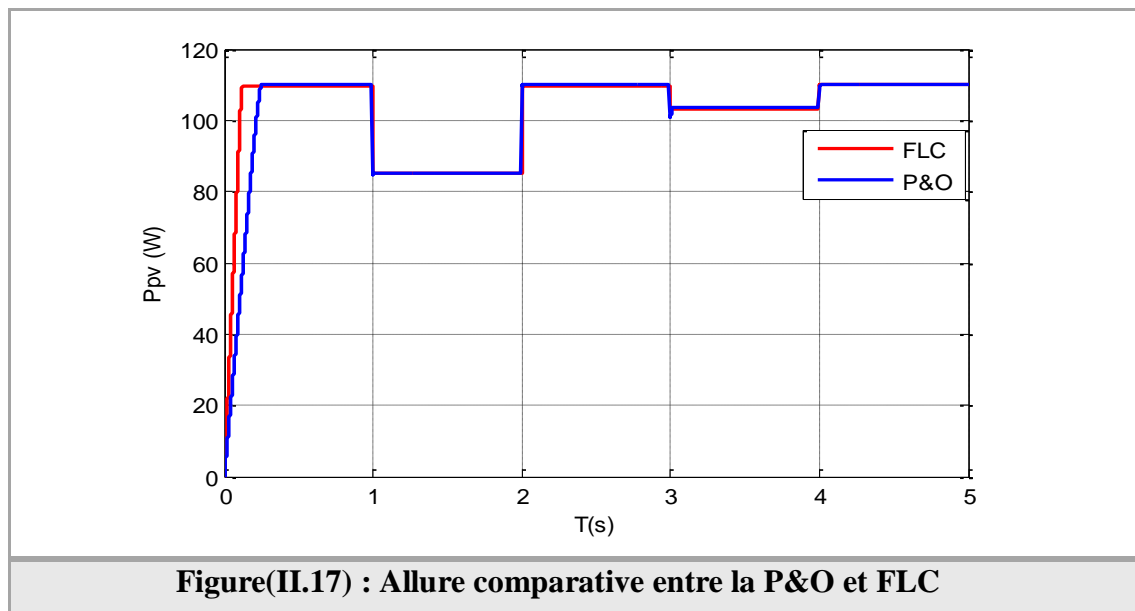
Tableau (II.2) : Tableau de règles d'inférence. [LAL 09]

$\Delta P_{pv}$	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
$\Delta V_{pv}$							
NG	PG	PG	PM	Z	NM	NG	NG
NM	PG	PM	PP	Z	NP	NM	NG
NP	PM	PP	PP	Z	NP	NP	NM
Z	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
PP	NM	NP	NP	Z	PP	PP	PM
PM	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
PG	NG	NG	NM	Z	PM	PG	PG

### II.9.3. Résultat de simulation

Dans le but de montrer la robustesse du contrôleur flou (FLC), Nous l'avons comparé à la méthode (P&O) appliqué au système photovoltaïque pour les mêmes conditions de fonctionnement.

La figure (II.17) présente la puissance du générateur photovoltaïque ( $P_{pv}$ ) pour les deux méthodes de control MPPT (perturbation et observation (P&O) et le contrôleur par logique flou (FLC)). On remarque que le (FLC) présente une réponse plus rapide, il atteint sa valeur optimale à 0.12s comparé à la méthode (P&O) qui nécessite plus de temps pour extraire le point de puissance maximale 0.25s qui présente aussi des oscillations autour du point de fonctionnement en régime permanent. Le contrôleur flou permet une réduction non seulement du temps de convergence pour extraire le PPM, mais aussi des fluctuations de puissance en régime établi, comme il est clairement présenté dans les figures (II.17).



La méthode (FLC) présente de très bons résultats, le système photovoltaïque fonctionne continuellement au point de puissance maximale avec une réponse rapide et sans oscillations comparé à la méthode (P&O). Ce système photovoltaïque étudié est capable de fournir le maximum de puissance disponible (fonctionnement MPPT) pour maintenir une alimentation permanente et réguler la tension à ses bornes même pour des variations des conditions environnementales.

## II.10. Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons proposé la modélisation chaque composant nécessaire pour notre étude à savoir : Un générateur photovoltaïque, un hacheur survolteur contrôlé avec un algorithme d'optimisation pour maximiser la puissance extraite des panneaux photovoltaïques, un onduleur est utilisé pour la conversion DC/AC et un filtre RL pour la connexion au réseau.

Une étude comparative entre l'algorithme P&O et FLC a été effectuée pour montrer l'efficacité et la performance de la commande à base de logique floue.

La commande directe de puissance (DPC) classique sera présentée dans le prochain chapitre.

## *CHAPITRE III : Contrôle directe de puissance (DPC Classique)*

### III.1. Introduction

Nous nous intéressons dans ce chapitre à la commande directe de puissance DPC (*Direct Power Control*) basée sur une table de commutation. Cette dernière est conclue à partir de l'étude des variations des puissances instantanées *active* et *réactive*, assurant un contrôle simultané et précis de ces dernières. Nous considérons deux tables de commutation : Une à douze (12) secteurs et l'autre à six (6) secteurs sur lesquelles nous mènerons une étude comparative des performances.

### III.2. Etat de l'art du contrôle direct de puissance (DPC)

Le principe du contrôle direct a été proposé à la référence [TAK 86] et il a été développé plus tard dans de nombreuses applications. Le but était d'éliminer le bloc de modulation et les boucles internes en les remplaçant par un tableau de commutation dont les entrées sont les erreurs entre les valeurs de références et les mesures.

La première application développée visait le contrôle d'une machine électrique et la structure de contrôle est connue sous la dénomination de Contrôle Direct de Couple (DTC). Par la suite, une technique similaire de commande en puissance (DPC) fut proposée par [MAN 95] [ATT 97] [NOG98] pour une application de contrôle des redresseurs connectés au réseau. Les grandeurs contrôlées dans ce cas sont les puissances active et réactive instantanées.

Grace à la DPC, la boucle de régulation en courant ainsi que l'élément de modulation sont éliminés car les états de commutation de l'onduleur pour chaque période d'échantillonnage sont sélectionnés à partir d'une table de commutations basée sur l'erreur instantanée entre les valeurs de références et celles mesurées ou estimées des puissances active et réactive, et la position angulaire du vecteur de tension de source. Généralement avec cette stratégie de commande, la tension du bus continu est régulée pour un contrôle de la puissance active et le fonctionnement avec un facteur de puissance unitaire est obtenu en imposant la puissance réactive à une valeur nulle [OUC 17].

### III.3. Principe de la commande DPC et ces avantages

Le but de la DPC est de contrôler directement les puissances actives et réactives dans un onduleur de tension. Les régulateurs utilisés sont des comparateurs à hystérésis pour les erreurs des puissances actives et réactives instantanées  $\Delta p$  et  $\Delta q$ . La sortie de ces régulateurs, en combinaison avec le secteur où se trouve la position du vecteur tension du réseau, constituent les entrées d'un tableau de commutation qui à son tour détermine l'état de commutation des interrupteurs, la référence de puissance active est obtenue à partir du régulateur de tension du bus

continu. Tandis que pour assurer un facteur de puissance unitaire, un contrôle de la puissance réactive à zéro est effectué. La figure (III.1) montre le principe du contrôle direct de puissance (DPC classique) [BOU 10].

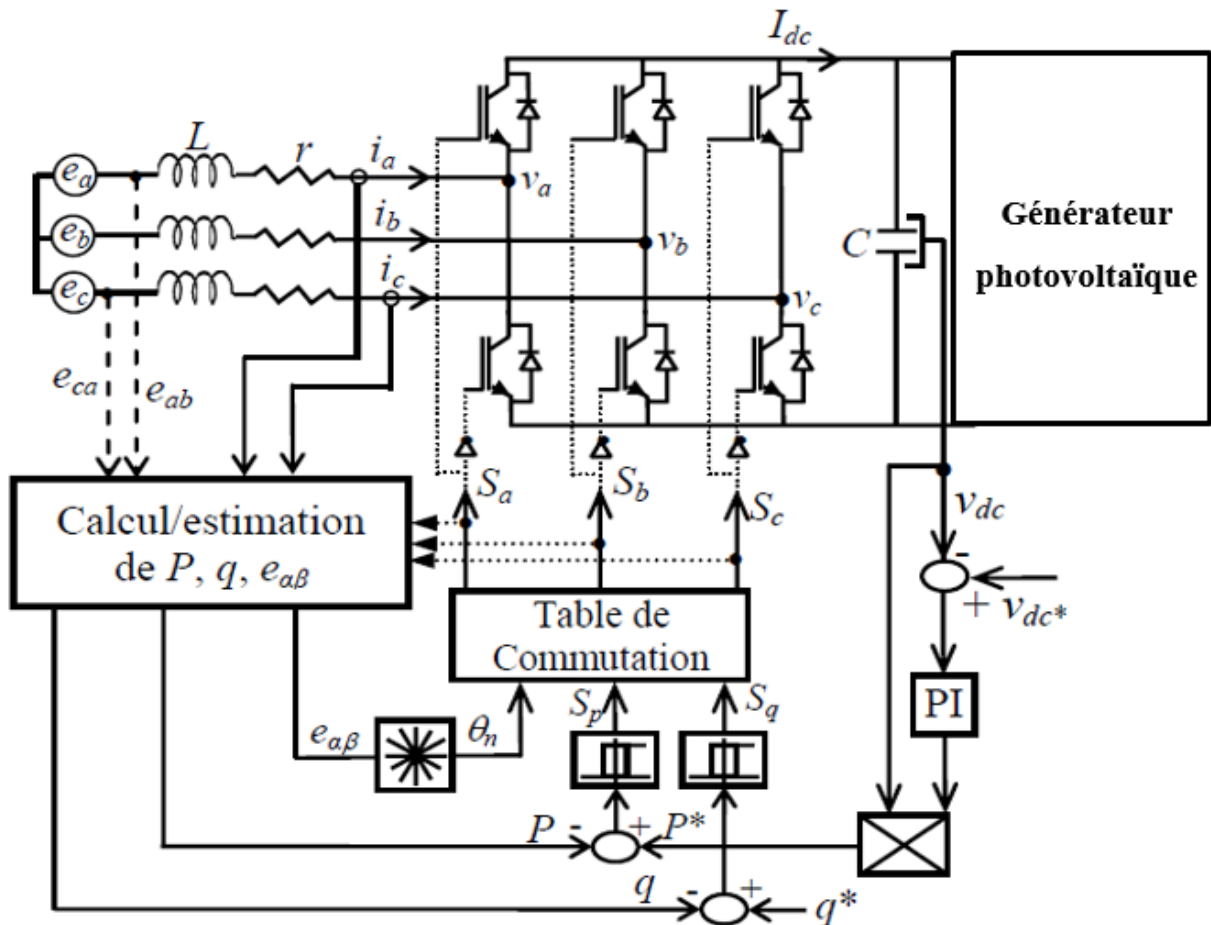


Figure (III.1). Configuration générale de la commande DPC [BOU 10].

Cette dernière est utilisée pour plusieurs avantages, on cite :

- Commande de puissance active et réactive découplée.
- Variables instantanées avec tous les composants d'harmoniques estimées.
- Bonne dynamique.

### III.3.1. Contrôle de la puissance active et réactive [CHA 10]

La figure (III.2) montre deux régulateurs à hystérésis à deux niveaux afin de réaliser le réglage des puissances active et réactive. L'un est influencé par l'erreur  $\Delta p = p_{ref} - p$  pour la puissance active et l'autre est influencé par l'erreur  $\Delta q = q_{ref} - q$  pour la puissance réactive. Les largeurs des bandes d'hystérésis influent sur les performances d'onduleur en particulier, sur la distorsion du courant harmonique, et sur la fréquence moyenne de commutation.

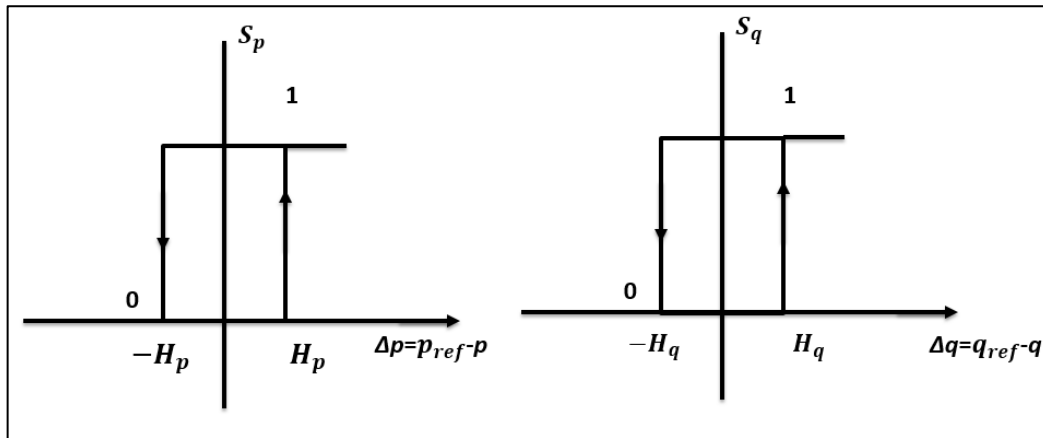


Figure (III.2) : Caractéristiques des régulateurs à hystérésis à deux niveaux.

Le régulateur à hystérésis pour la puissance instantanée active peut être décrit comme :

$$(\Delta p > H_p) \rightarrow S_p = 1$$

$$(-H_p \leq \Delta p \leq H_p \text{ et } \frac{d\Delta p}{dt} > 0) \rightarrow S_p = 0$$

$$(-H_p \leq \Delta p \leq H_p \text{ et } \frac{d\Delta p}{dt} < 0) \rightarrow S_p = 1$$

$$(\Delta p < -H_p) \rightarrow S_p = 0$$

De même pour le régulateur à hystérésis la puissance instantanée réactive peut être décrit comme :

$$(\Delta q > H_q) \rightarrow S_q = 1$$

$$(-H_q \leq \Delta q \leq H_q \text{ et } \frac{d\Delta q}{dt} > 0) \rightarrow S_q = 0$$

$$(-H_q \leq \Delta q \leq H_q \text{ et } \frac{d\Delta q}{dt} < 0) \rightarrow S_q = 1$$

$$(\Delta q < -H_q) \rightarrow S_q = 0$$

Les puissances instantanées actives et réactives sont données comme suit :

$$p = V_\alpha \times I_\alpha + V_\beta \times I_\beta \quad (\text{III.1})$$

$$q = V_\beta \times I_\alpha - V_\alpha \times I_\beta \quad (\text{III.2})$$

### III.3.2. Calcul de l'angle téta ( $\theta$ )

L'angle( $\theta$ ) représente le secteur dans lequel se trouve le vecteur tension dans le repère diphasé ( $\alpha, \beta$ ). Il est donné comme suit [24] :

$$\theta = \tan^{-1} \left[ \frac{V_\beta}{V_\alpha} \right] \quad (\text{III.3})$$

### III.3.3 Table de commutation

La table de commutation peut être considérée comme le cœur de la commande directe en puissance. Elle sélectionne un vecteur de tension de l'onduleur approprié pour permettre le déplacement des puissances active et réactive instantanées dans la direction désirée, en se basant aussi sur la position du vecteur de la tension de la source et des erreurs des puissances active et réactive. Ces variations sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau (III.1). Variations de p et q en fonction de la position des vecteurs [CHA 10].**

	$V_{(k-2)}$	$V_{(k-1)}$	$V_{(k)}$	$V_{(k+1)}$	$V_{(k+2)}$	$V_{(k+3)}$	$V_0 V_7$
q	- -	-	++	+	+	-	+ -
p	+	-	-	+	++	++	+

### III.4. Simulation numérique

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats obtenus par simulation avec le logiciel MATLAB/SIMULINK sur le système global qui est composé de 30 panneaux photovoltaïques de type SIEMENS SM 110 (3 branches en parallèles comportant chacune 10 panneaux en série), ce qui correspond à une puissance maximale de 3300Wc. Un convertisseur d'adaptation commandé avec l'algorithme MPPT pour l'extraction du maximum de puissance est utilisé suivi d'un onduleur de tension contrôlé en puissance par la technique DPC. L'onduleur est relié au réseau à travers un filtre RL.

Différentes simulations ont été effectuées pour évaluer les performances du système. Les différentes parties du système (panneaux photovoltaïque, hacheur, onduleur, filtres, réseau) sont modélisées par des blocs séparés puis reliés d'une manière cohérente.

Pour la simulation, nous avons utilisé un champ photovoltaïque de 3300Wc raccordé à un réseau de 220V, un hacheur survolteur (boost) commandé en MPPT de type (P&O) et un onduleur triphasé muni d'une commande DPC avec une table de commutation à douze (12) secteurs puis nous avons effectué une autre simulation à l'aide d'une table de commutation à six (6) secteurs. Ceci sera suivi d'une étude comparative.

#### III.4.1. Étude et analyse des performances d'une DPC avec table classique à douze (12) secteurs (DPC 12)

##### III.4.1.1. Description du système

Le système de commande est constitué de deux boucles : la boucle interne des puissances réglée par une table de commutation et la boucle externe de tension ou est implanté le régulateur PI fournissant à sa sortie la référence de la puissance active.

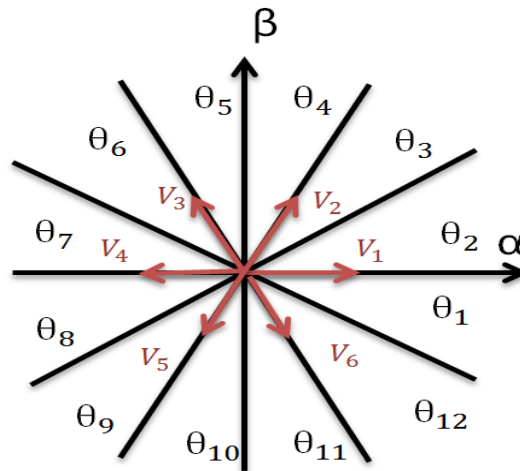
La référence de la puissance réactive est fixée à zéro pour obtenir un facteur de puissance unitaire.

Les variations de la puissance active et réactive en fonction du vecteur de commande appliqué sont résumées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau (III.2). Table de commutation de la DPC à 12 secteurs. [CHA 10]**

$S_p$	$S_q$	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
1	0	V6 (101)	V7 (111)	V1 (100)	V0 (000)	V2 (110)	V7 (111)	V3 (010)	V0 (000)	V4 (011)	V7 (111)	V5 (001)	V0 (000)
1	1	V7 (111)	V7 (111)	V0 (000)	V0 (000)	V7 (111)	V7 (111)	V0 (000)	V0 (000)	V7 (111)	V7 (111)	V0 (000)	V0 (000)
0	0	V6 (101)	V1 (100)	V1 (100)	V2 (110)	V2 (110)	V3 (010)	V3 (010)	V4 (011)	V4 (011)	V5 (001)	V5 (001)	V6 (101)
0	1	V1 (100)	V2 (110)	V2 (110)	V3 (010)	V3 (010)	V4 (011)	V4 (011)	V5 (001)	V5 (001)	V6 (101)	V6 (101)	V1 (100)

La disposition des 12 secteurs ainsi que des vecteurs de commande du redresseur dans le plan ( $\alpha, \beta$ ) sont montrés sur la figure (III.3) ci-dessous :



**Figure (III.3) : Représentation du vecteur de la tension dans le plan ( $\alpha, \beta$ ) divisé en douze (12) secteurs.**

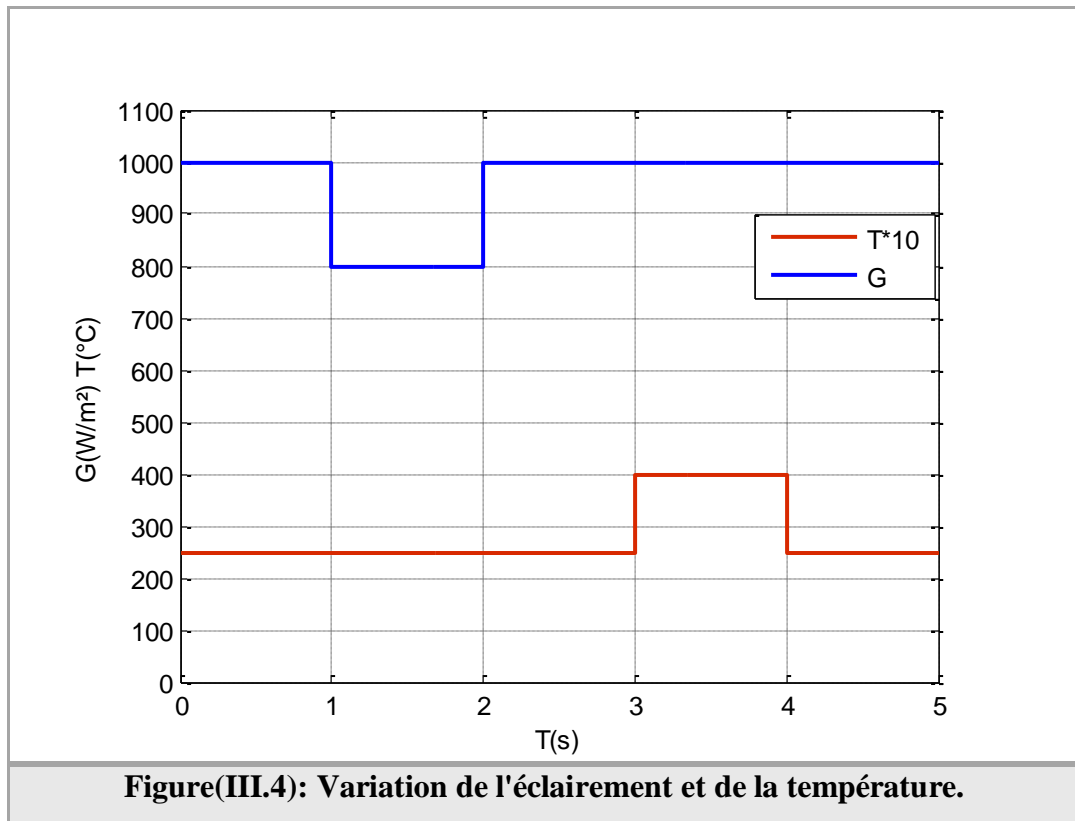
Le numéro du secteur peut être retrouvé à partir de l'équation suivante :

$$\frac{(n-2)}{6}\pi \leq \theta_n < \frac{(n-1)}{6}\pi \quad n = 1, \dots, 12 \quad (III.4)$$

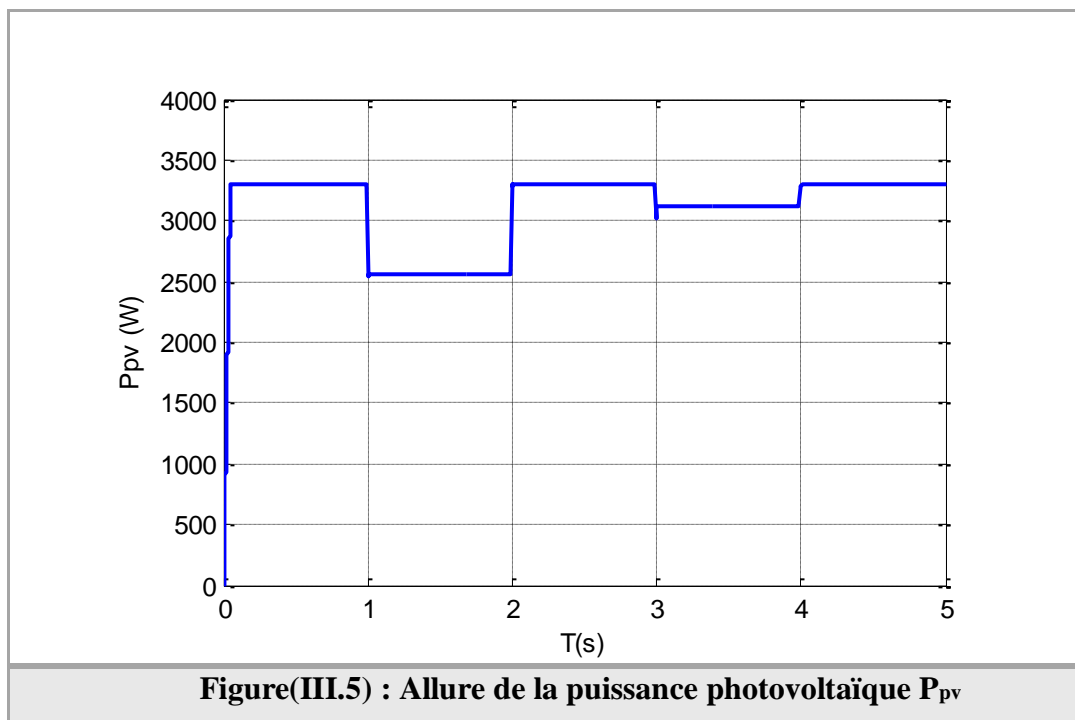
### III.4.1.2. Résultat de simulation pour un ensoleillement et température variables en échelon

Afin d'étudier les performances du système en fonctionnement à puissance maximale avec la méthode P&O et la robustesse de la commande DPC appliquée (12 secteurs), on applique un échelon d'ensoleillement de 1000W/m<sup>2</sup> qui passe à 800W/m<sup>2</sup> à l'instant (t=1s) puis revient à

1000W/m<sup>2</sup> à l'instant ( $t=2s$ ), et un échelon de température de 25°C qui passe à 40°C à l'instant ( $t=3s$ ) puis revient à 25°C à l'instant ( $t=4s$ ) tel qu'il est donné sur la figure (III.4).



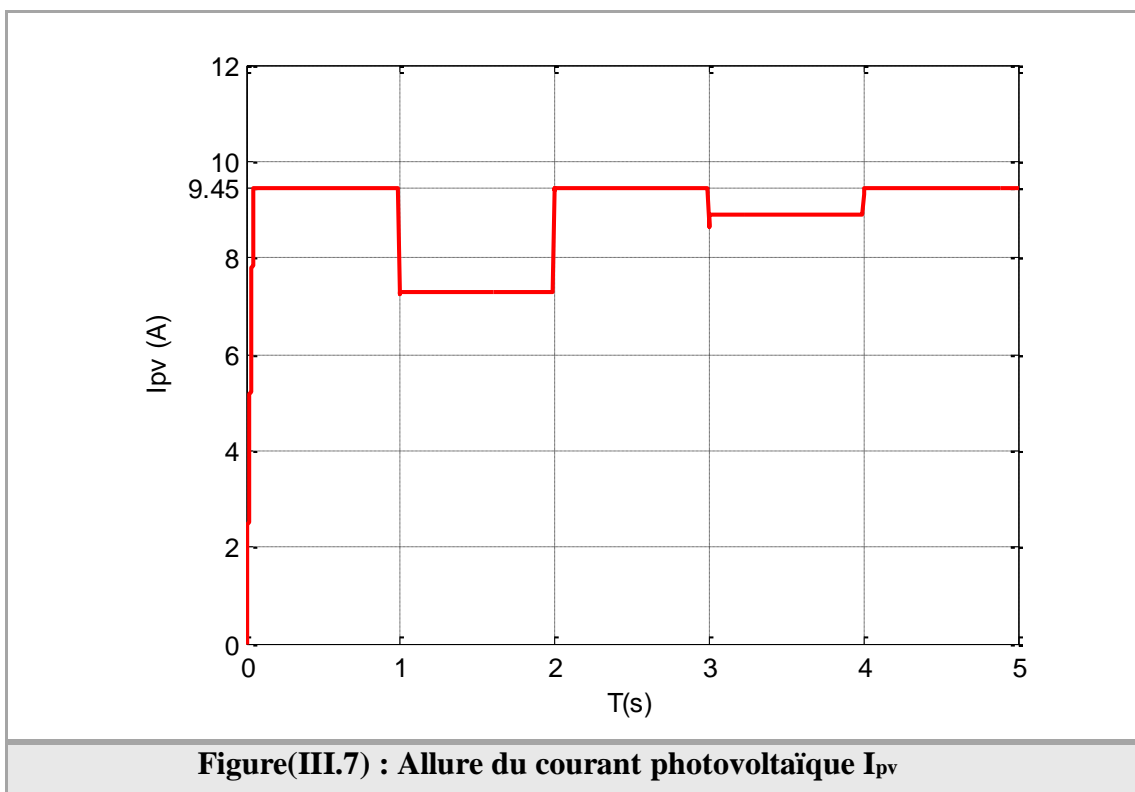
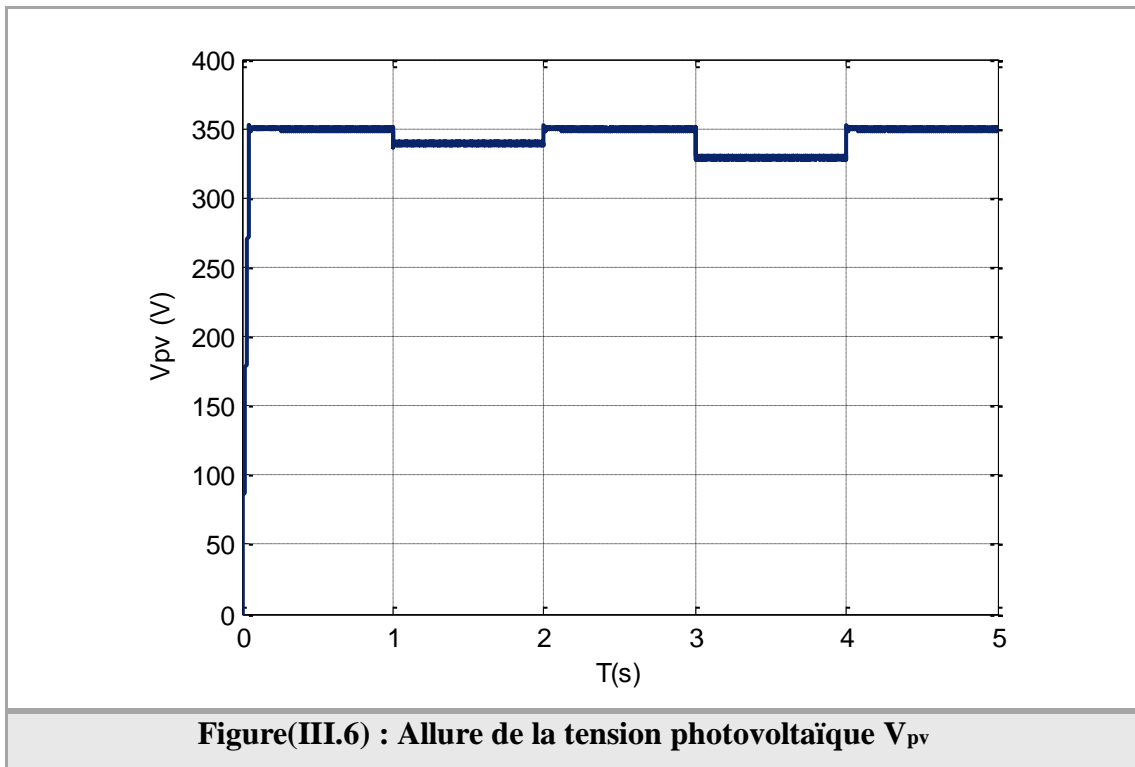
L'allure de la puissance maximale extraite du générateur photovoltaïque est illustrée sur la figure (III.5) suivante :



On remarque que cette dernière suit la variation de l'ensoleillement et de la température.



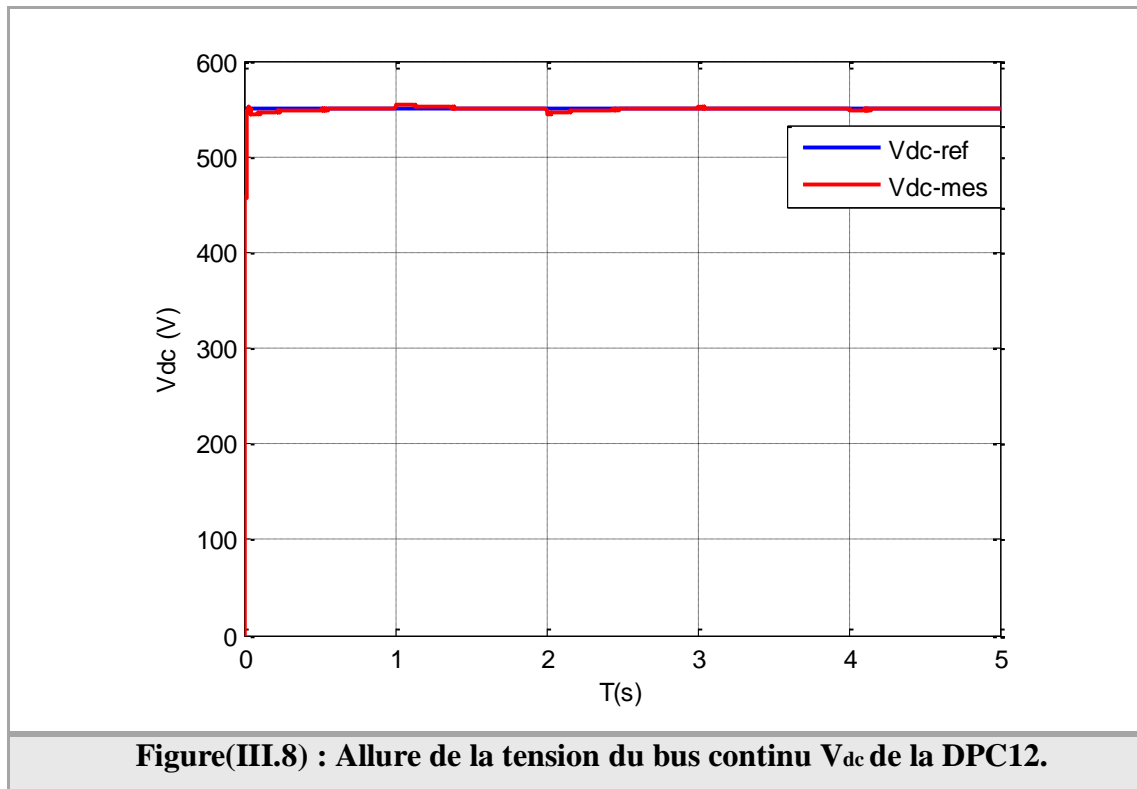
La tension optimale correspondante et le courant photovoltaïque obtenu à partir de l'algorithme P&O sont représentés sur les figures (III.6) et (III.7) respectivement :



A partir des résultats obtenus, nous constatons que la tension varie légèrement contrairement au courant photovoltaïque qui se développe suivant la variation de l'ensoleillement et varie peu lors de la variation de la température.

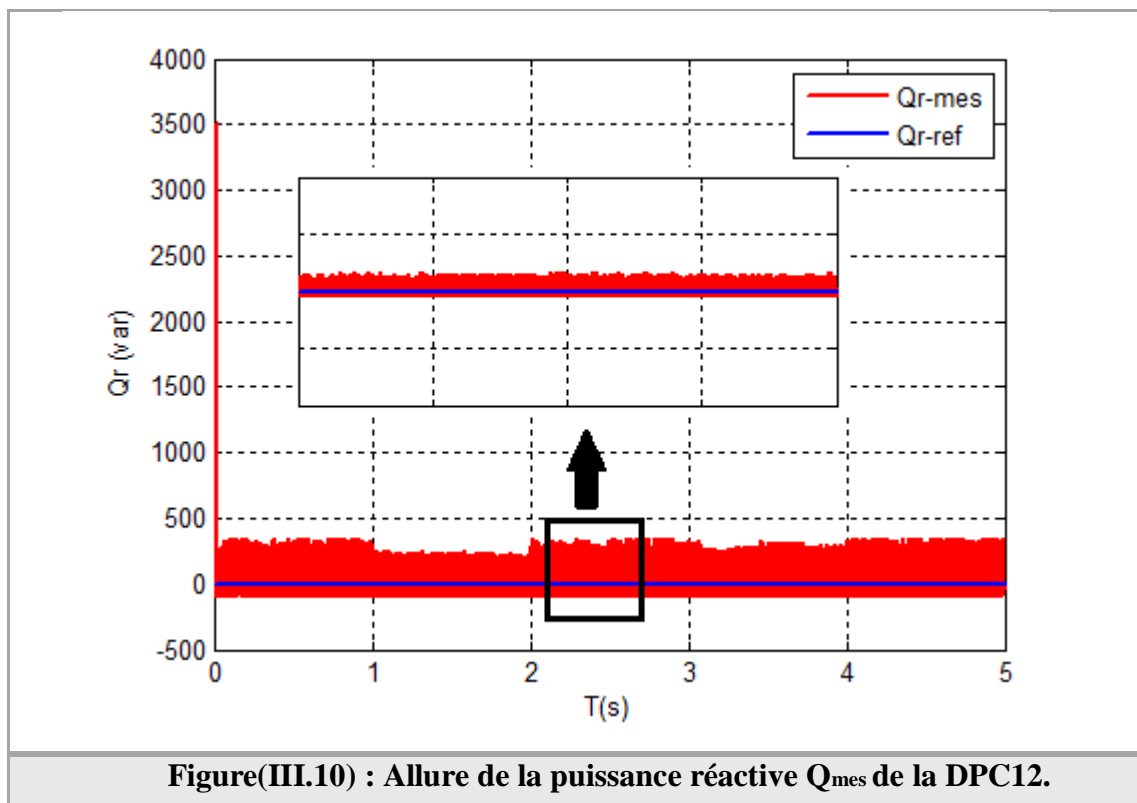
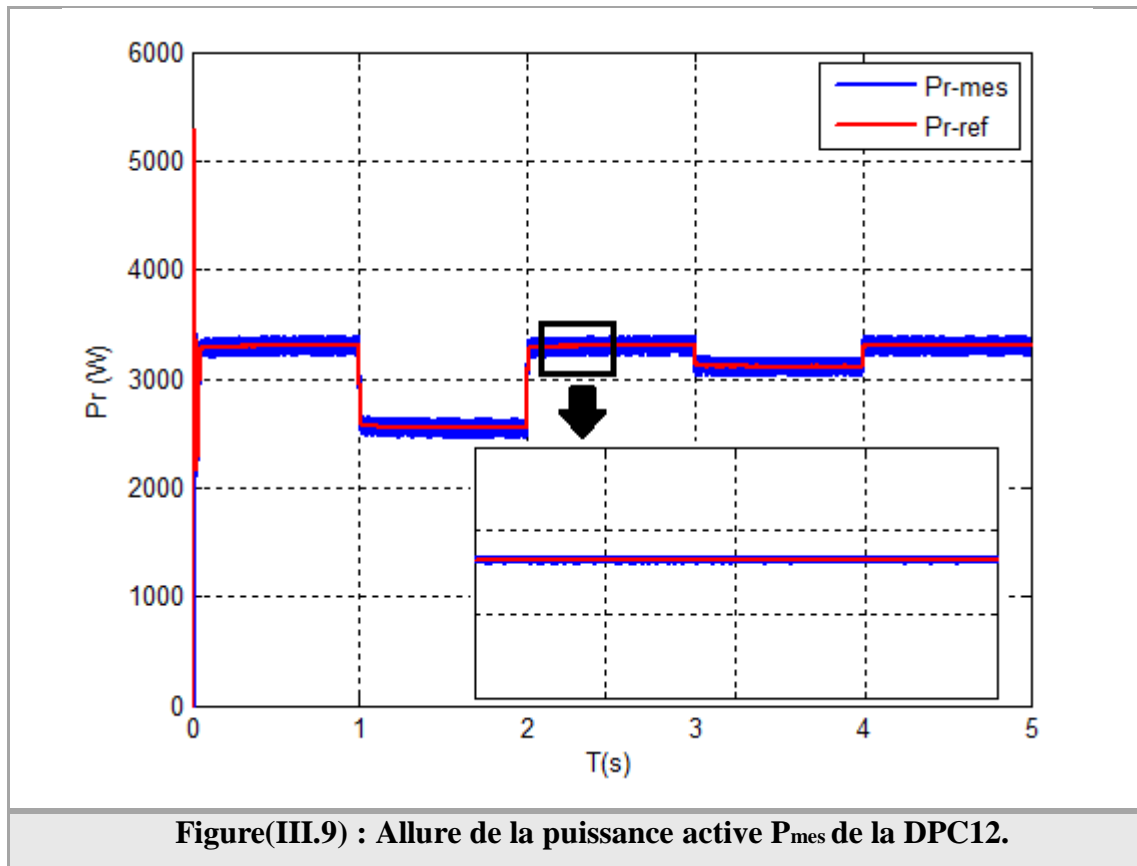
On conclue que la diminution de l'irradiation implique une diminution de la puissance photovoltaïque produite. Donc le point de puissance maximale se déplace pour rejoindre le nouveau point maximum correspondant à cette irradiation grâce à l'algorithme P&O qui détermine continuellement la tension optimale pour donner la puissance maximale.

La figure (III.8) ci-dessous représente l'allure de la tension mesurée du bus continu  $V_{dc}$



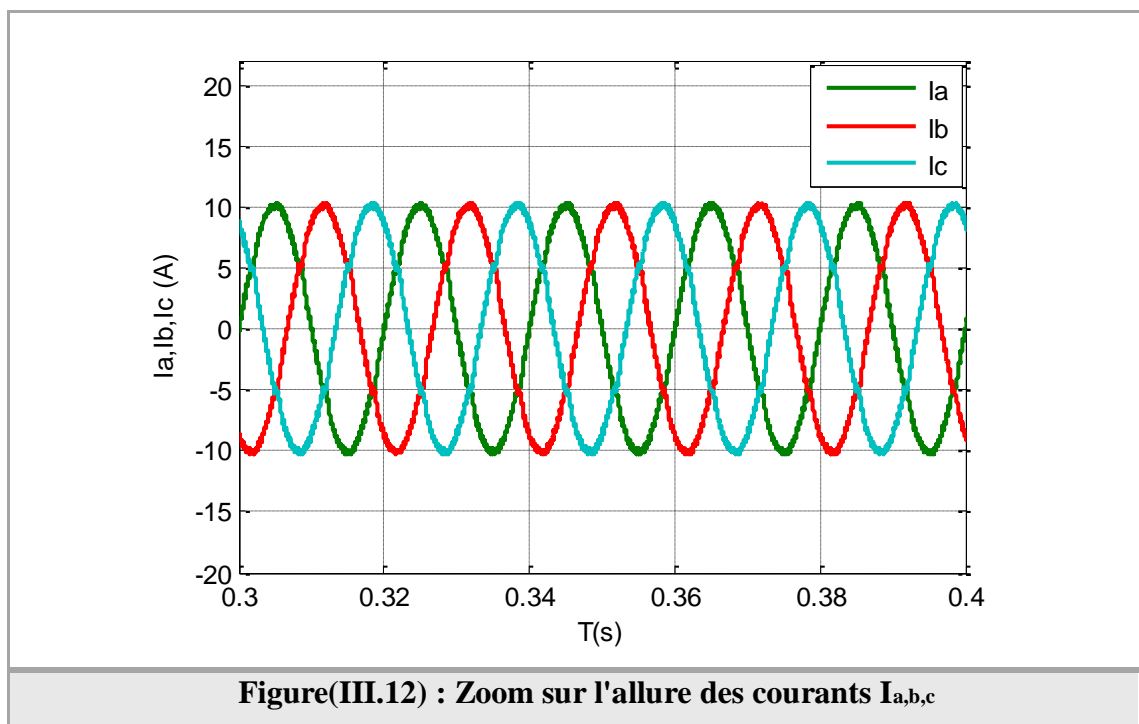
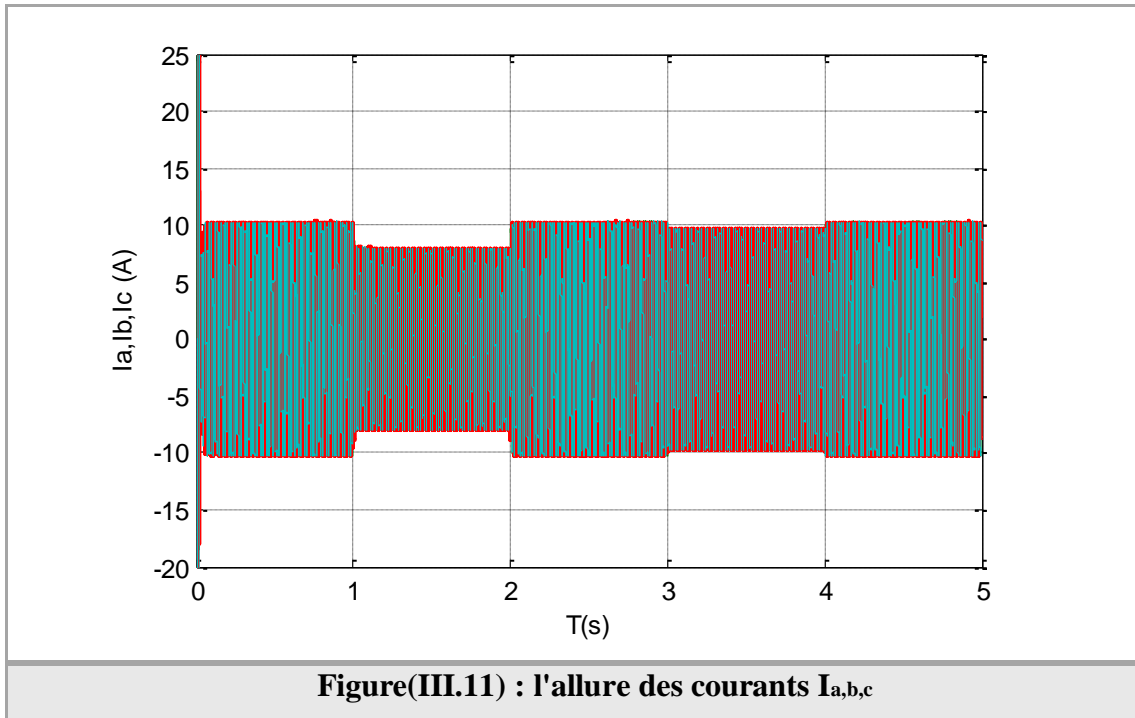
On remarque que la tension du bus continu  $V_{dc}$  est bien régulée à sa valeur de référence qui est de 550V, même lors de variation d'ensoleillement.

Les figures (III.9) et (III.10) représentent respectivement la puissance active fournie au réseau et la puissance réactive.

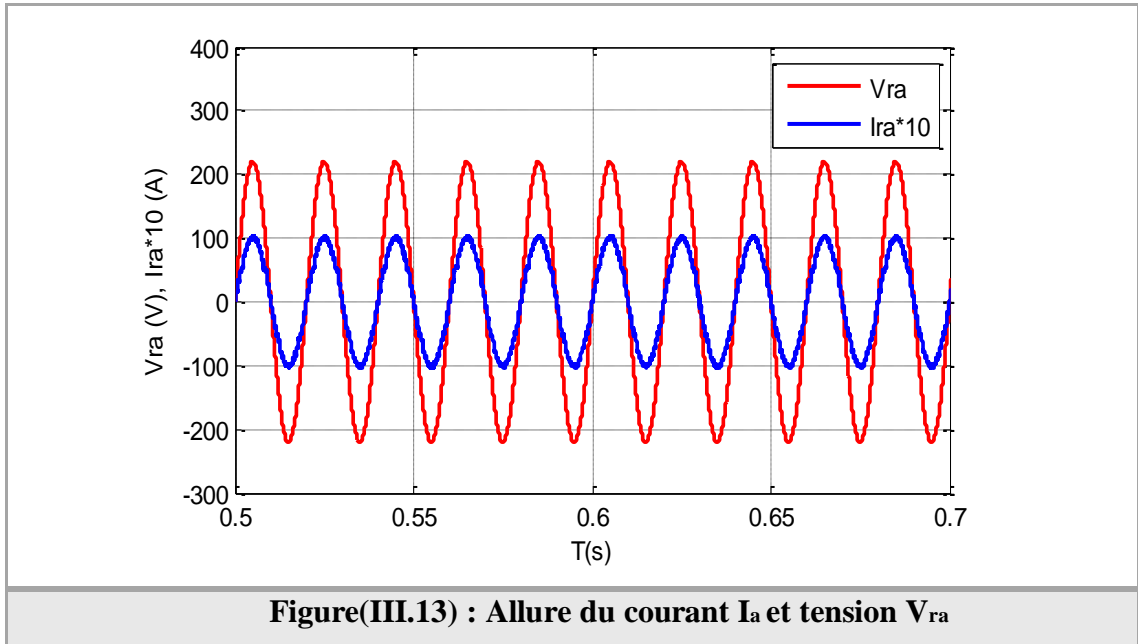


On constate que la puissance active se met à hauteur de sa référence tandis que la bande de la puissance réactive est presque nulle ce qui correspond à un fonctionnement à facteur de puissance unitaire ( $\cos \varnothing \approx 1$ ).

La figure (III.11), (III.12) représentent respectivement les allures des courants de lignes  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ . Ainsi que leurs zooms. Les courants ont une forme sinusoïdale de fréquence 50Hz.

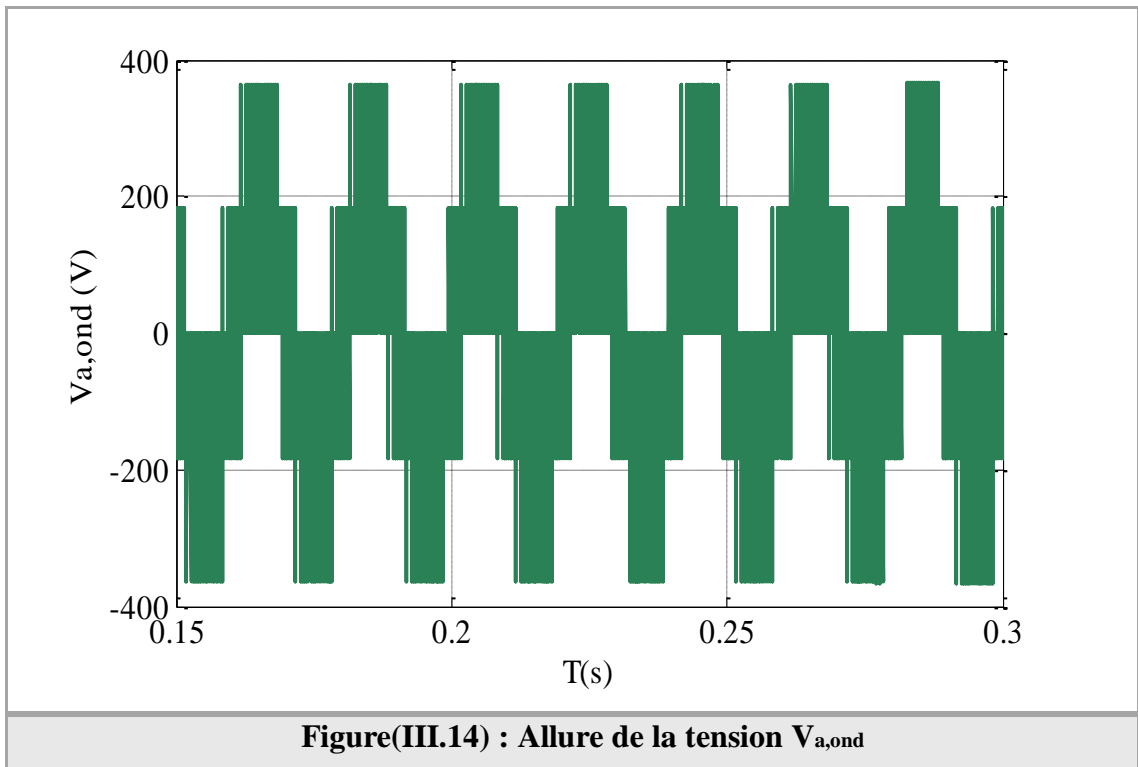


La figure (III.13) représente le courant d'une phase  $I_a$  et la tension correspondante du réseau  $V_{ra}$ .



On peut voir que le déphasage entre eux est nul ( $\varnothing \approx 0^\circ$ ) donc le fonctionnement à facteur de puissance unitaire ( $\cos\varnothing \approx 1$ ) est presque réalisé.

La tension à la sortie de l'onduleur est montrée sur la figure (III.14) ci-dessous :



### III.4.2. Étude et analyse des performances d'une DPC avec table classique à six (6) secteurs (DPC 6)

#### III.4.2.1. Description du système

Dans ce qui suit nous allons présenter une étude sur une DPC basée sur une table de commutation à six (6) secteurs. Les variations de la puissance active et réactive en fonction du vecteur de commande appliqué sont résumées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau (III.3). Table de commutation de la DPC à 6 vecteurs [ARR 15]**

$S_p$	$S_q$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$
1	1	$V_0$ (000)	$V_7$ (111)	$V_0$ (000)	$V_7$ (111)	$V_0$ (000)	$V_7$ (111)
1	0	$V_5$ (001)	$V_6$ (101)	$V_1$ (100)	$V_2$ (110)	$V_3$ (010)	$V_4$ (011)
0	1	$V_2$ (110)	$V_3$ (010)	$V_4$ (011)	$V_5$ (001)	$V_6$ (101)	$V_1$ (100)
0	0	$V_1$ (100)	$V_2$ (110)	$V_3$ (010)	$V_4$ (011)	$V_5$ (001)	$V_6$ (101)

Le numéro du secteur peut être retrouver à partir de l'équation suivante :

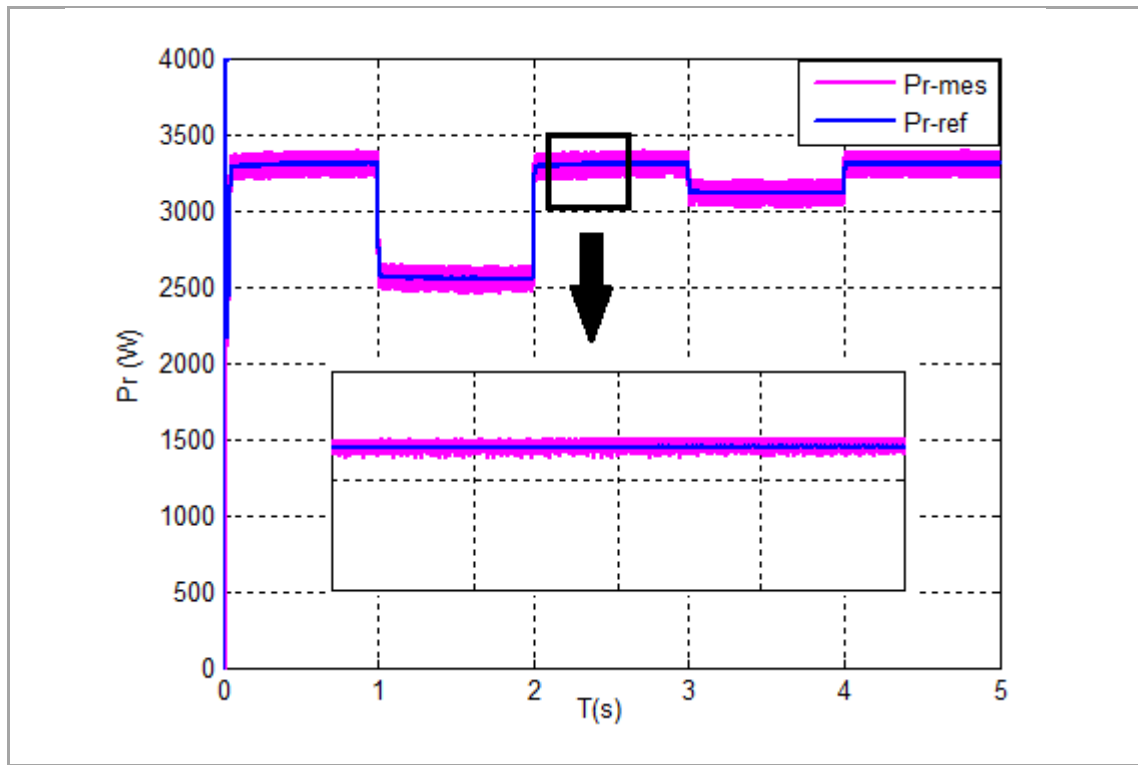
$$\frac{(n-2)}{3}\pi \leq \theta_n < \frac{(n-1)}{3}\pi \quad n = 1, \dots, 6 \quad (\text{III.4})$$

#### III.4.2.2. Résultats de simulation pour un ensoleillement et température variables en échelon

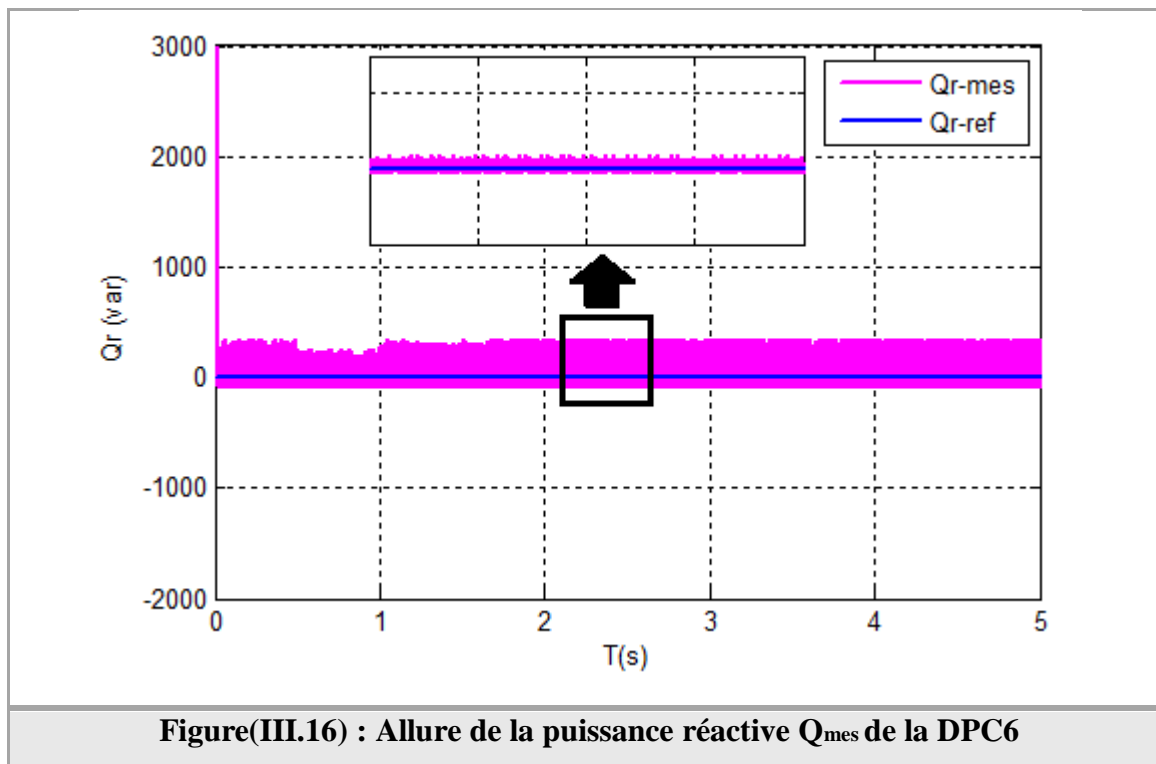
Dans cette partie, nous allons appliquer les mêmes caractéristiques pour l'étude des performances de la DPC à six (6) secteurs.

En ce qui concerne la variation de la puissance ( $P_{pv}$ ), la tension ( $V_{pv}$ ) et le courant ( $I_{pv}$ ), les résultats obtenus demeurent les mêmes car les paramètres du panneau et la variation de l'échelon sont réglés de la même façon que ceux de la DPC à douze (12) secteurs. Idem pour les valeur du courant du réseau ( $I_a, I_b, I_c$ ), la tension de l'onduleur  $V_{a,ond}$  ainsi que la tension du réseau ( $V_{ra}$ ), les résultats restent similaire que ceux obtenus dans la simulation précédente.

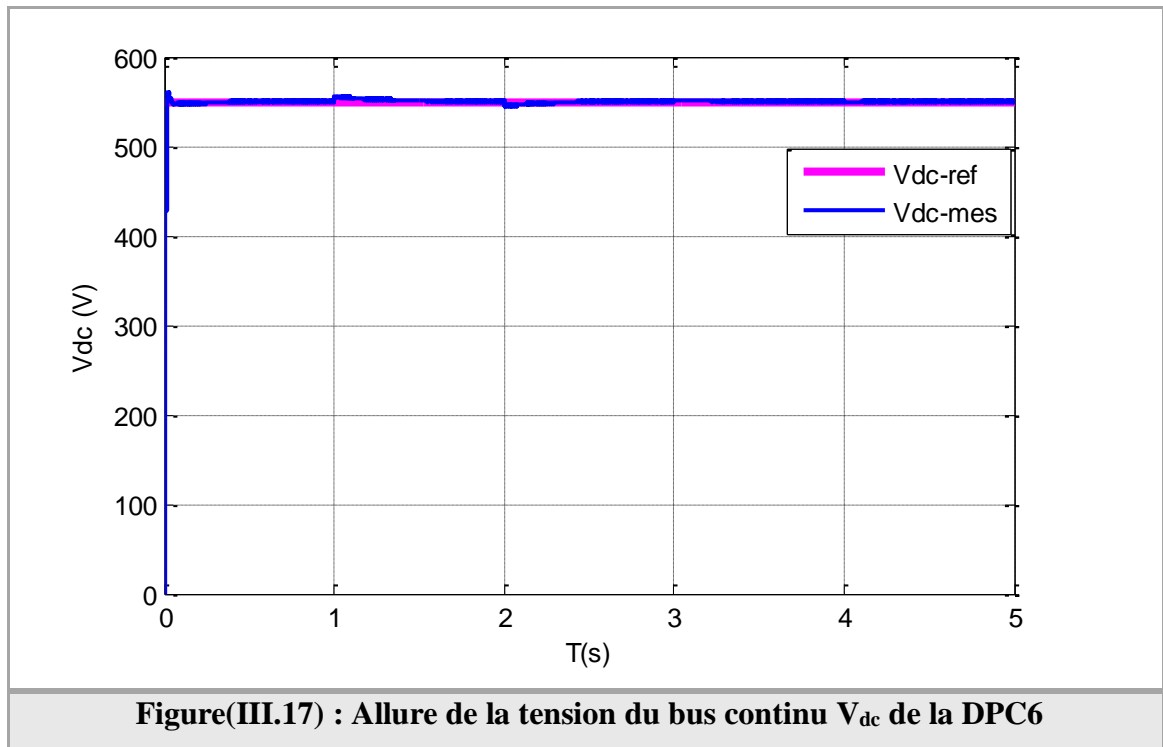
Les figures (III.15), (III.16), (III.17) représentent respectivement les valeurs mesurées de la puissance active fournie au réseau ( $P_{mes}$ ), la puissance réactive ( $Q_{mes}$ ) ainsi que la tension du bus continu ( $V_{dc}$ ).



Figure(III.15) : Allure de la puissance active  $P_{mes}$  de la DPC6



Figure(III.16) : Allure de la puissance réactive  $Q_{mes}$  de la DPC6



On remarque que la bande de la puissance active se met à hauteur de sa référence tandis que la bande de la puissance réactive est presque nulle ce qui correspond à un fonctionnement à facteur de puissance unitaire.

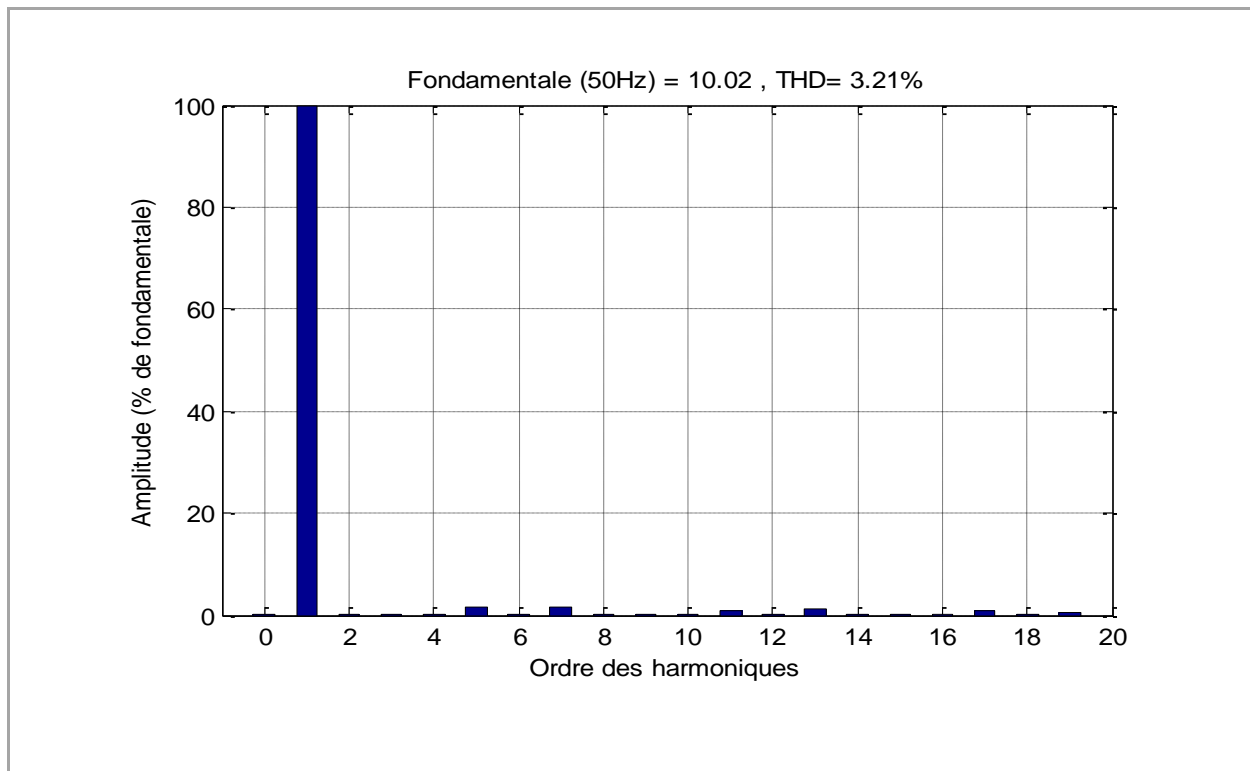
La tension du bus  $V_{dc}$  bien régulée à sa valeur de référence de 550V.

### III.5. Etude comparative

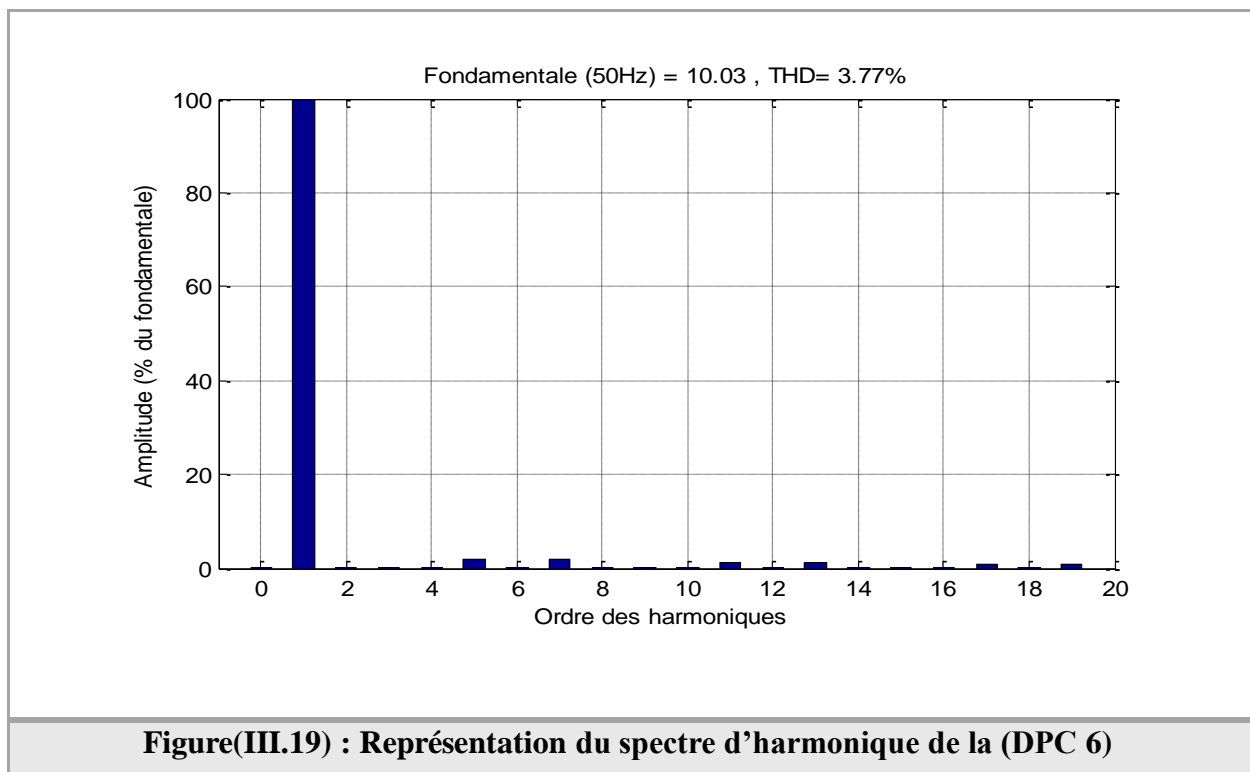
En comparant les résultats obtenus à partir des deux études effectuées, on déduit que ceux réalisées avec la table à douze (12) secteurs présentent des performances meilleures que la table six (6) secteurs.

Les figures (III.18) et (III.19) ci-dessous représentent respectivement le taux de distorsion de la (DPC12) et la (DPC6) :





**Figure(III.18) : Représentation du spectre d'harmonique de la (DPC 12)**



**Figure(III.19) : Représentation du spectre d'harmonique de la (DPC 6)**

### III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté en premier le principe et les avantages de la commande directe de puissance DPC, puis nous avons proposé deux types de DPC appliqués à notre système : une à douze (12) secteurs et une autre à six (6) secteurs sur lesquelles nous avons mené une étude comparative.

En comparant les résultats obtenus à partir des deux études effectuées, on déduit que ceux obtenus avec la table à douze (DPC12) secteurs présente de performances meilleures que la table à six (DPC6) secteurs avec des taux de disposition harmonique d'un écart minime soit 3.21%, 3.77% respectivement. Cela veut dire qu'une légère amélioration a été obtenue.

Dans le prochain chapitre, une DPC floue sera proposée et appliquée à notre système à fin d'atteindre de meilleures performances.

## CHAPITRE IV : Contrôle directe de puissance à base de logique floue (DPC floue).

### IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons une configuration de la DPC en utilisant une nouvelle structure de table de commutation. La sélection des vecteurs de commande à partir de cette table n'est plus basée sur les sorties numériques des comparateurs à hystérésis, mais plutôt sur des règles floues. Ce chapitre sera conclu par une étude comparative entre les (DPC) classiques et la floue.

### IV.2. Principe de la commande DPC floue

Dans la technique DPC classique, les états sélectionnés pour un bon contrôle en régime de fonctionnement normale sont les mêmes que ceux choisis pour une grande perturbation intervenant durant la variation de la commande de la puissance active et réactive. Il est donc difficile en utilisant un régulateur à hystérésis de prendre en considération tous les dynamiques des puissances instantanées actives et réactives pendant la phase de la génération des instants de commutation et ceci peut affecter les performances de la réponse du système en termes de stabilité et de la rapidité. Pour y remédier, la génération des instants de commutation doivent être basées sur les différents niveaux d'erreurs et ceci peut être réalisé en utilisant un contrôleur flou et une table de commutation qui sera remplacée par le système à inférence floue montré sur figure (IV.1) [BOU 10].

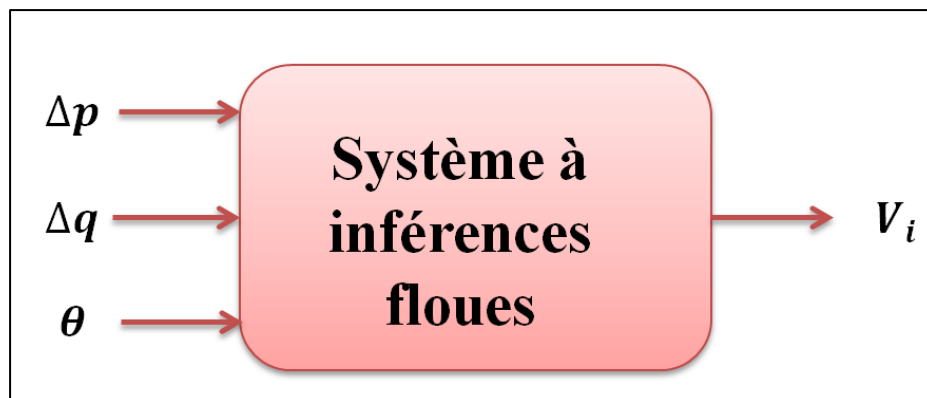
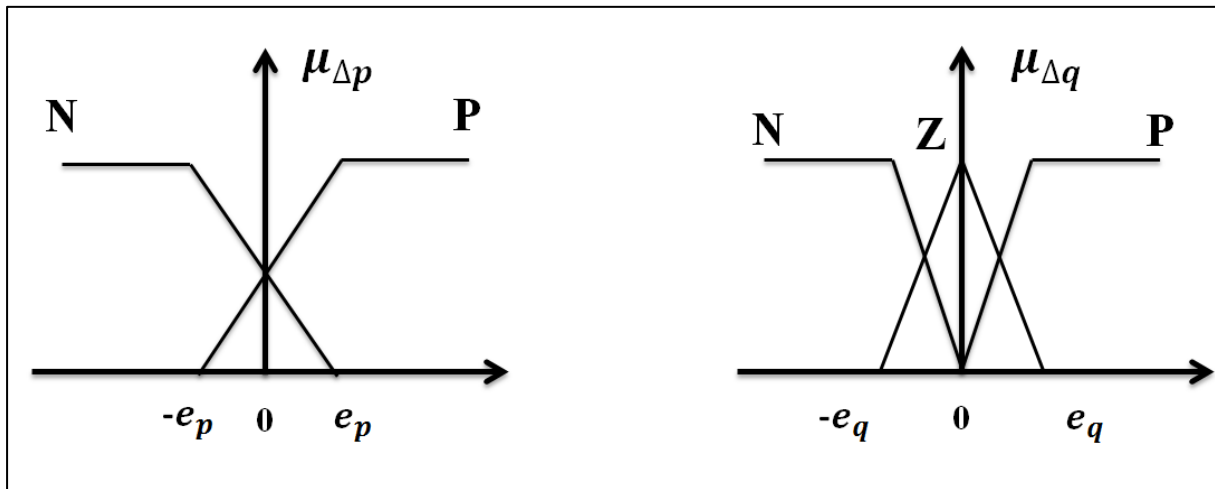


Figure (IV.1) : Variables d'entrées et de sortie d'une table de commutation floue.

### IV.3. Synthèse des règles floues

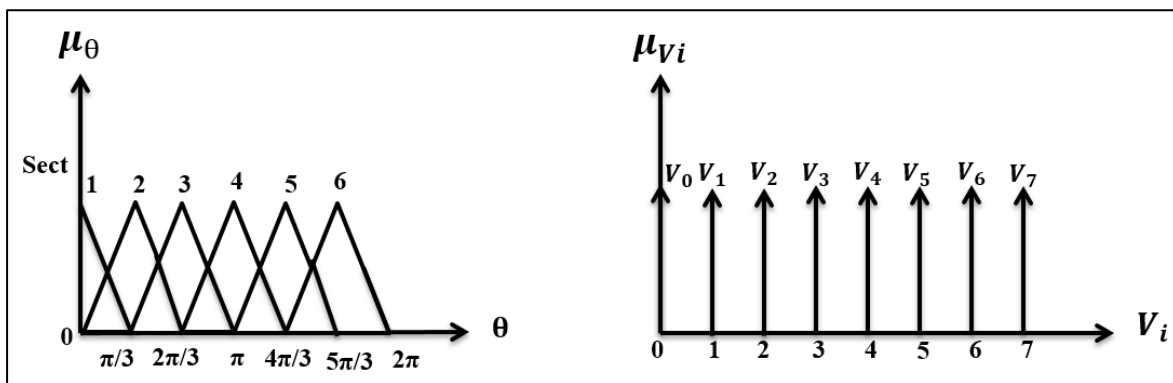
L'univers de discours de l'erreur de puissance active est divisé en deux variables linguistiques avec des fonctions d'appartenances triangulaires et trapézoïdales ou N et P désignent respectivement les valeurs négatives et positives de l'erreur de la puissance active (figure (IV.2)) [HAM 13].

L'univers de discours de l'erreur de puissance réactive est divisé en trois variables linguistique avec des fonctions d'appartenances triangulaire et trapézoïdales ou Z désigne l'environ de zéro de l'erreur de la puissance réactive (Figure (IV.2)) [HAM 13].



**Figure (IV.2) : Fonctions d'appartenances pour les erreurs des puissances actives  $\Delta p$  et réactives  $\Delta q$**

L'univers de discours de la position du vecteur de tension  $\theta$  est divisé en six (6) ensembles flous de  $\theta_1$  à  $\theta_2$  comme l'illustre la figure(IV.3). Pour les vecteurs de tension  $V_i$  la distribution en fonctions d'appartenances qui est aussi donnée par la figure (IV.3).



**Figure(IV.3) : Fonctions d'appartenances pour la position du vecteur  $\theta$  de tension et pour la variable de sortie  $V_i$**

Chaque règle d'inférence peut être décrite en utilisant les variables  $\Delta p, \Delta q$  et  $\theta$  ainsi que la variable de commande  $\bar{V}$  qui caractérise l'état de commutation de l'onduleur. La  $i^{ème}$  règle peut être exprimé par :

Si  $\Delta p$  est  $A_i$  ET  $\Delta q$  est  $B_i$  ET  $\theta$  est  $C_i$  Alors  $\bar{V}$  est  $V_i$

L'ensemble des règles floues synthétisées pour tous les secteurs de la tension du réseau est indiqué dans le tableau (IV.1) ci-dessous :

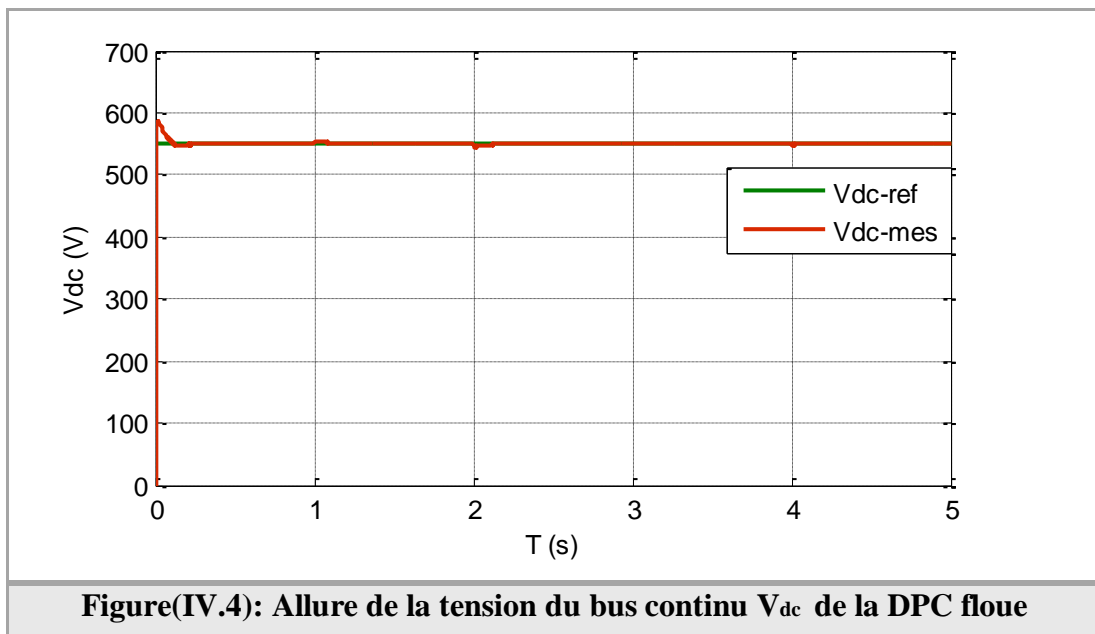
Tableau (IV.1) : Table de commutation floue [HAM 13].

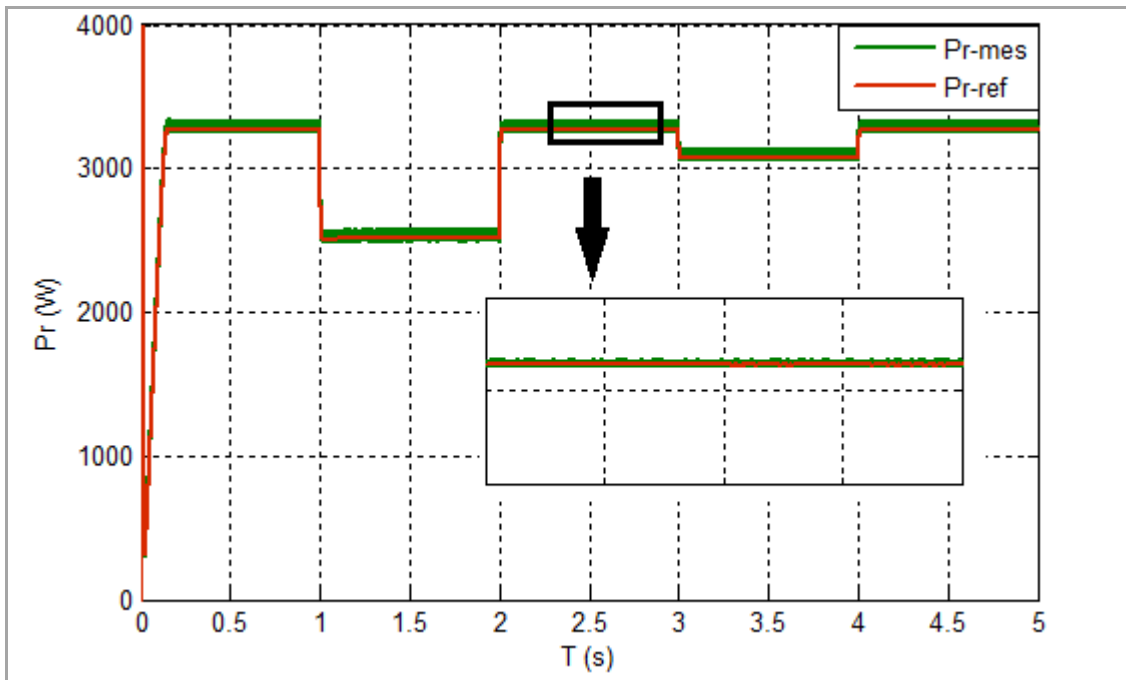
$\Delta_p$	$\Delta_q$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$
P	P	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_1$	$V_2$
	Z	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$
	N	$V_5$	$V_6$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$
N	P	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$
	Z	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$
	N	$V_6$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$

Le contrôleur flou a été conçu en utilisant la méthode d'inférence de Mamdani basé sur la décision min-max. Le critère du maximum est utilisé pour la défuzzification.

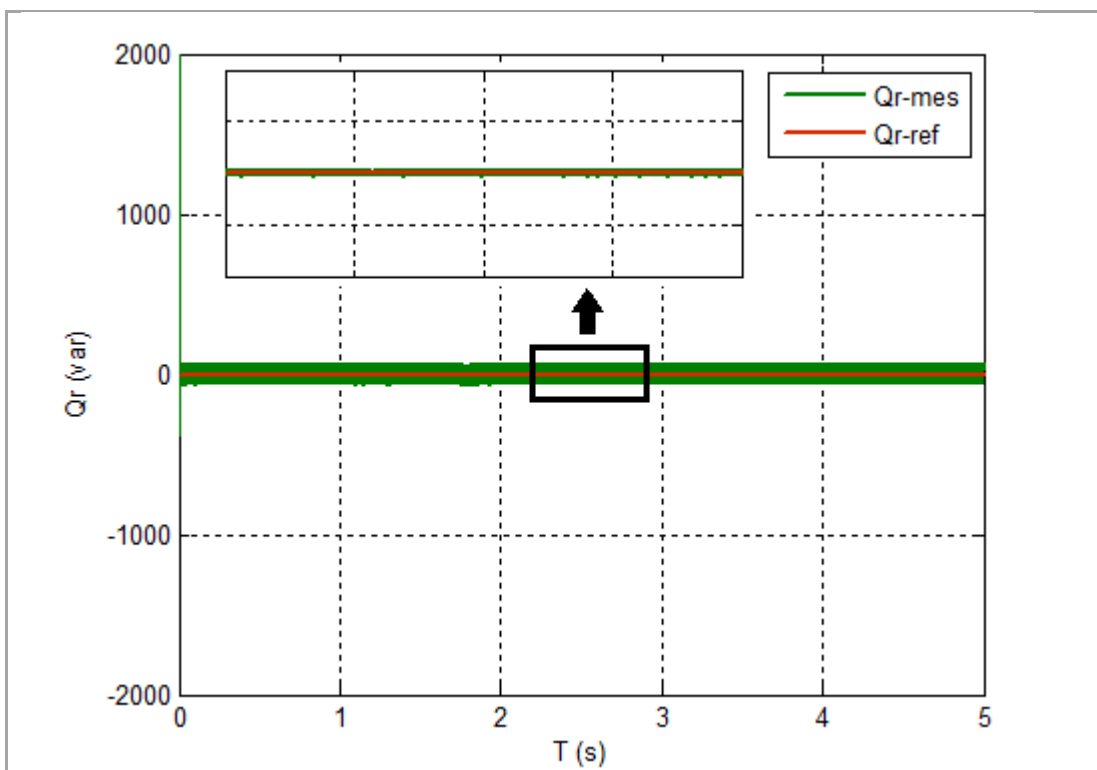
#### IV.4. Résultats de la simulation

Les figures ci-dessous montrent les résultats de simulation du DPC avec sélection floue. Les puissances instantanées active et réactive sont correctement contrôlées durant tous les secteurs. Les courants absorbés sont quasi-sinusoïdaux et en phase avec les tensions de ligne. La tension du bus continu  $V_{dc}$  est très bien régulée.

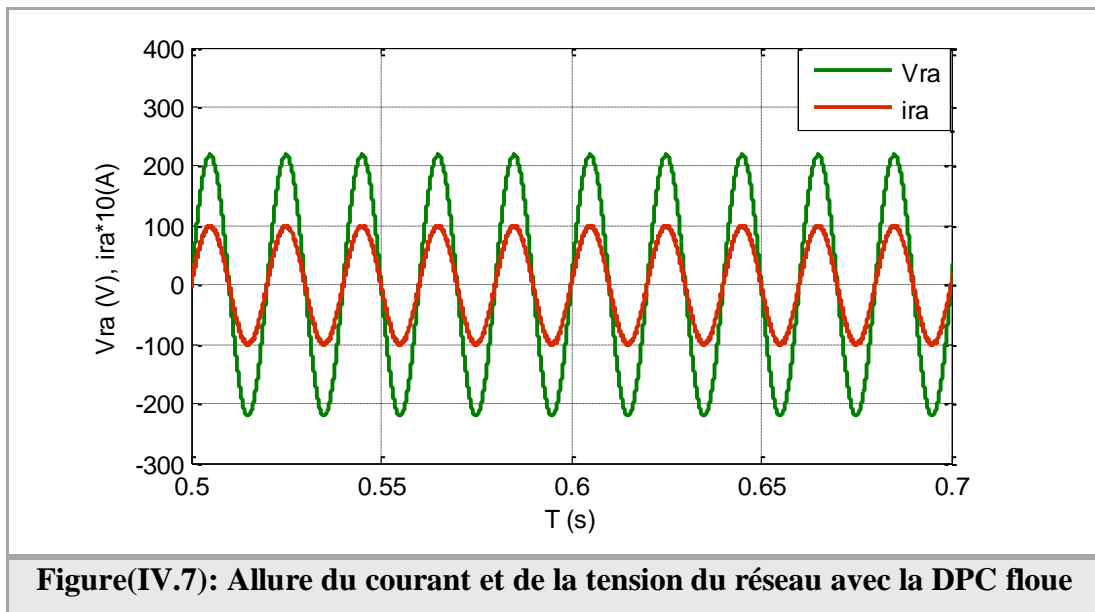




Figure(IV.5): Allure de la puissance active  $P_{mes}$  de la DPC floue



Figure(IV.6): Allure de la puissance réactive  $Q_{mes}$  de la DPC floue.



**Figure(IV.7): Allure du courant et de la tension du réseau avec la DPC floue**

#### IV.5. Etude comparative

Les résultats montrent clairement que la DPC floue apporte de meilleures performances. La puissance réactive est nulle. Le taux de distorsion harmonique est de **0.93%**

Le tableau (IV.2) ci-dessous regroupe les taux de distorsions harmoniques obtenues de nos trois (3) études effectuées :

**Tableau (IV.2) : Synthèse des taux de distorsions harmoniques obtenus**

DPC classique à six secteurs (DPC6)	classique à douze secteurs (DPC12)	DPC à base de la logique floue
<b>3.77%</b>	<b>3.21%</b>	<b>0.93%</b>

#### IV.6. Conclusion

Dans ce dernier chapitre nous avons présenté la DPC floue ainsi que son principe de fonctionnement. On déduit que cette dernière offre de meilleures performances en comparant les résultats obtenus à partir des deux études effectuées dans le chapitre précédent. En effet, les résultats de simulations ont montré l'efficacité des actions des commandes appliquées au système photovoltaïque connecté au réseau. La puissance produite correspond à celle injectée au réseau avec un facteur de puissance unitaire et un taux de distorsion harmonique de 0.93%. Cette dernière implique une qualité d'énergie très satisfaisante.

---

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire Propose une amélioration de la qualité de l'énergie électrique injectée par un générateur photovoltaïque au réseau.

Nous avons donné dans le premier chapitre, un bref aperçu sur l'énergie solaire photovoltaïque ainsi que ces avantages. Nous avons passé en revue la cellule photovoltaïque qui est à la base de la conversion de l'énergie rayonnée par le soleil en électricité. Nous avons également présenté les principales applications des systèmes photovoltaïques. Nous avons vu aussi l'origine, les effets et les conséquences des harmoniques sur le réseau électrique. Enfin nous avons proposé quelques solutions afin de les réduire.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la modélisation du système globale constitué des panneaux photovoltaïques, un hacheur parallèle, un bus continu, un onduleur de tension, un filtre RL et un réseau électrique. Le modèle d'un panneau a été validé par simulation numérique afin de déterminer les caractéristiques courant-tension et puissance-tension pour des variations de température et d'ensoleillement. Nous avons fait l'étude du mécanisme de la poursuite pour l'extraction de la puissance maximale (PPM) sous différentes conditions de fonctionnement. Nous avons présenté l'algorithme de perturbation et observation (P&O) ainsi que l'algorithme à base de la logique floue (FLC). Nous avons déduit que la méthode (FLC) présente de très bons résultats : le système photovoltaïque fonctionne continuellement au point de puissance maximale avec une réponse rapide et sans oscillations comparé à la méthode (P&O).

Le chapitre trois est dédié au contrôle des puissances actives et réactives à l'aide de la commande DPC (direct power control). Nous avons réalisé deux type de DPC classiques : Une à douze (12) secteurs et une autre à six (6) secteurs sur lesquelles nous avons mené une étude comparative. Nous avons pu remarquer que la DPC à douze (12) secteurs offre un meilleur résultat que ceux à six (6) secteurs. En effets les taux de distorsions harmoniques sont respectivement 3.21%, 3.77%. C'est pour cela que nous avons proposé dans le dernier chapitre une commande directe de puissance à base de la logique floue (DPC floue) qui a apporté de meilleur performance :

- ✓ L'injection du maximum de puissance produite par le générateur photovoltaïque au réseau.
- ✓ Compensation de puissance réactive ( $\cos\phi=1$ ).
- ✓ La réduction du taux de distorsion harmonique à 0.93% du courant du réseau.

Néanmoins, il serait intéressant de reprendre ce travail en vue de son amélioration en proposant de refaire l'étude de la DPC floue avec d'autres l'algorithmes MPPT.



## Références bibliographiques

- [ABB 13] **ABBES. H, HAFEDH. A, LOUKIL. K, TOUMI. A, ABID. M** ; « Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque » ; Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER'13) Sousse, p 1-6 ; Tunisie – 2013.
- [AOU 10] **ANOUN. N** ; « Etude et modélisation des différents modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales » ; Mémoire de Magistère ; Université de Sétif ; 2010.
- [ARR 15] **ARROUR. S, AZROU. A** ; « Étude et analyse des performances d'une commande directe en puissance basée table de commutation d'un redresseur à MLI triphasé » ; Mémoire de Master, Université de Bejaia ; 2015.
- [ATT 97] **ATTAIANESE. C, TOMASSO. G, DAMIANO. A, MARONGIU. A, PERFETTO. A**; "Direct torque and flux control of induction motor drives"; International Conference on Power Electronics & Drives Systems (PEDS'97); Singapore;1997.
- [AYA 14] **AYACHE.K** ; « Modélisation et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Couplé à un Réseau Électrique » ; Mémoire de Magister ; Université de Souk-Ahras ; 2014.
- [BEL 15] **BELKAID. A** ;« Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome » ; Thèse de doctorat ; Université de Sétif ; 2015.
- [BEN 06] **BENAHMED BENABDALLAH. N** ; « Propriétés physique des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et simulation des cellules à base de Si » ; Thèse de Magister ; Université de Tlemcen ;2006
- [BEN 08] **BENCHERIF. M** ; « Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension » ; Thèse de doctorat ; Université Tlemcen ; 2008.

- [BEN 11] **BENSALEM. S** ; « Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires » ; Mémoire de Magistère ; Université de Sétif ; 2011.
- [BER 80] **BERNARD. R, MENGUY.G, SCHWARTZ.M** ; « Le rayonnement solaire conversion thermique et applications » ; Technique et documentation Lavoisier, 2ème édition ; 1980.
- [BER 04] **BERNARD. J** ; « Energie solaire : calculs et optimisation ». Edition Ellipses ;2004.
- [BOU 10] **BOUAFIA. A** ; « Techniques De Commande Prédictive Et Floue Pour Les Systèmes D'électronique De Puissance : Application Aux Redresseurs A MLI » ; Thèse de doctorat université de Sétif ;2010.
- [BOU 09] **BOULAHIA. A** ;« Etude des convertisseurs statiques destinés à la qualité de l'énergie électrique » ; Mémoire de magister ; Université de Constantine ; 2009.
- [BOU 14] **BOUZEGAG. I, SALHI. F**, « Contrôle Direct de puissance applique au Filtre Actif Parallèle » ; Mémoire de Master ; Université d'EL-Oued ; 2014.
- [BUY 03] **BUYERS. A** ; « Les systèmes photovoltaïques : guide de l'acheteur » ; Programme d'encouragement aux systèmes d'énergie renouvelables Ressources naturelles Canada ; 2003
- [CHA 10] **CHAOUI. A** ; « Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires » ; Thèse de doctorat ; Université de Sétif, ; 2010.
- [DIE 05] **DIETSCHY. M** ; « Les cellules photovoltaïques » ; Cours Institution des Chartreux Lyon,2005.
- [GHA 17] **GHABARA. CH, JOUINI. H, LAHBIB. M, MAMIA** ; « Stratégie d'optimisation floue du point d'extraction de la puissance maximale (MPPT) pour les petites éoliennes connectées à des sites isolés » ; International Journal of Scientific Research & Engineering Technology ; N°.5, p.48-54 ;2017.

- [HAL 17] **HALOUANE. A** ; « Modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d'un module photovoltaïque » ; mémoire de Master ; Université de Boumerdes ;2017.
- [HAM 08] **HAMOUDI. F** ; « Commande robuste d'un filtre active shunt à quatre fils » ; Mémoire de Magistère ; Université de Batna ; 2008.
- [HAM 13] **HAMDAOUL.H, SEMMAH.H, MASSOUM.A, WIRA.P, AYAD.A, MEROUFEL.A**, « Elaboration d'une table de commutation floue pour la commande d'un filtre actif de puissance », Université Sidi Bel abbes Algérie et Université de Mulhouse, France, Rev.Roum.Sci.Techn-Electrotech. Et Energ, Vol 58, N°4, p 405-414, Bucarest,2013.
- [HAT 08] **HATTLIM** ; « Contrôle flou pour la poursuite du point puissance maximum d'un système photovoltaïque » ; JCGE08, Lyon ; 16,17 décembre2008.
- [LAB 03] **LABOURET, A. & VILLOZ M.P** ; « Energie solaire photovoltaïque : le manuel du professionnel (Série électrotechnique) » ; Edition Dunod ;2003.
- [LAB 06] **LABOURET. A &VILLOZ. M.P** « Energie solaire photovoltaïque » Edition Dunod, 2006.
- [LAL 09] **LALOUNI. S** ; « Etude, commande et simulation d'une chaine Hybride (photovoltaïque-éolienne) De production d'énergie électrique », Thèse de doctorat de l'université de Bejaïa, 2009.
- [LAL 15] **LALOUNI. S** ; « Cours Energie Solaire Photovoltaïque » Destinée au étudiant master deux énergie renouvelable ; Université de Bejaia ; <http://elearning.univ-bejaia.dz/;2015>.
- [LOU 08] **LOUAZENE. M.L** ; « étude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site d'Ouargla » ; Mémoire de magister université Batna ; 2008.

- [MAL 01] **MALINOWSKI. M, KAZMIERKOWSKI. M.P, HANSEN. S, BLAABJERG. F, AND MAEQUES. G.D**; "Virtual flux based direct power control of three phase PWM rectifiers"; IEEE Trans. On Industry Applications; vol. 37, no. 4, pp. 1019-1027;2001.
- [MAN 95] **MANNINEN. V**; "Application of direct torque control modulation technology to a line converter", 6th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'95), Sevilla, Spain, pp. 1292-1296 ;1995.
- [MES 14] **MESBAHI. N** ; « Contribution à l'Etude des Performances des Onduleurs Multiniveaux sur les Réseaux de Distribution » ; Thèse de Doctorat ; Université de Annaba ; 2014.
- [MIS 11] **MISSOUM. M** ; « Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie » ; Mémoire de Master ; Université de Chlef ; 2011.
- [MOH 08] **Mohamed Muftah Abdusalam** ; « Structure et stratégie de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validation expérimentales » ; Thèse de Doctorat, Université de Nancy-I ; 2008.
- [MUK 99] **MUKUN. R.P**; « Wind and solar power system »; Edition CRC Press. New York ;(1999).
- [NOG 98] **NOGUCHI. T, TOMIKI. H, KONDO. S, AND TAKAHASHI. I**; "Direct power control of PWM converter without power-source voltage sensors", IEEE Trans. on Industry Applications, vol.34, no. 3, pp. 473-479;1998.
- [OUA 11] **OUADFEL. Y & LAMARA.L** ;« Etude et optimisation d'un système photovoltaïque » ; Mémoire d'ingénieur d'état en électronique ; Université de Bejaia ;2011.
- [OUC 17] **OUCHEN. S** ;« Contribution à la commande directe de puissance dédiée au filtrage actif, associé à une source photovoltaïque » ; Thèse de Doctorat ; Université ; 2017.

- [PET 09] **PETIBON. S** ; « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïque » ; Thèse de Doctorat de l'université Toulouse ;2009
- [ROS 08] **ROSHANAK. R** ; « Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones » . Thèse de Doctorat, Université de Limoges,2008.
- [ROY 98] **Royer. R, Djako. T, Schiller. E** ; « Le pompage photovoltaïque » ; Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens ; IEPF/ université d'Ottawa/ EIER/ CREPA ; 1998
- [SAA 10] **SAADLS** ; « Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan, Mémoire de Magister en physique » ; Université de Chlef ; (2010).
- [SAH 12] **SAHLIA** ; « Filtrage Actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïque interconnecté au réseau ». Mémoire de Magister université de Sétif, 2012.
- [SAL 11] **SALAMA. F** ;« Modélisation d'un système multi générateur photovoltaïque inter connecté au réseau électrique » Mémoire magister, Université de Sétif, 2011.
- [SEM 13] **SEMAOUI. S.** ; « L'électrification d'un village avec de l'énergie solaire photovoltaïque » ; Mémoire de Magister ; 2013.
- [TAK 95] **TAKAHASHI. T, NOGUCHI. T**; "A new quick-response and high-efficiency control strategy of induction motor"; IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 15-22, no.5, pp. 820-827;1986.
- [ZER 08] **ZERHOUNI. M.F.Z** ; « Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique » ; Revue des Energies Renouvelables. N°11, P.41-44 ; 2008.

- [ZID 12]      **ZIDANE.A** ; « Etude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque au niveau d'un puits de gaz » ; Mémoire de Master université de Bejaia ; 2012.