

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université Ahmed Draïa Adrar**



**Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Département des Génie Electrique**

**Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master en :**

**Filière : Electrotechnique**

**Spécialité : Commandes électriques**

**Thème :**

**Amélioration de la qualité d'énergie électrique du réseau BT  
en utilisant un FAP-PV**

**Préparé par :**

Mr. BEKRAOUI Abdelaziz

Mr. BELLAOUI Mohammed Redha

**Membres de jury d'évaluation :**

Mr. LARIBI Slimane	Président	MCB	Univ. Adrar
Mr. HARROUZE abd Elkader	Examineur	Pr.	Univ. Adrar
Mr. BERBAOUI brahim	Encadreur	MCB	Univ. Adrar

**Année Universitaire : 2022/2023**

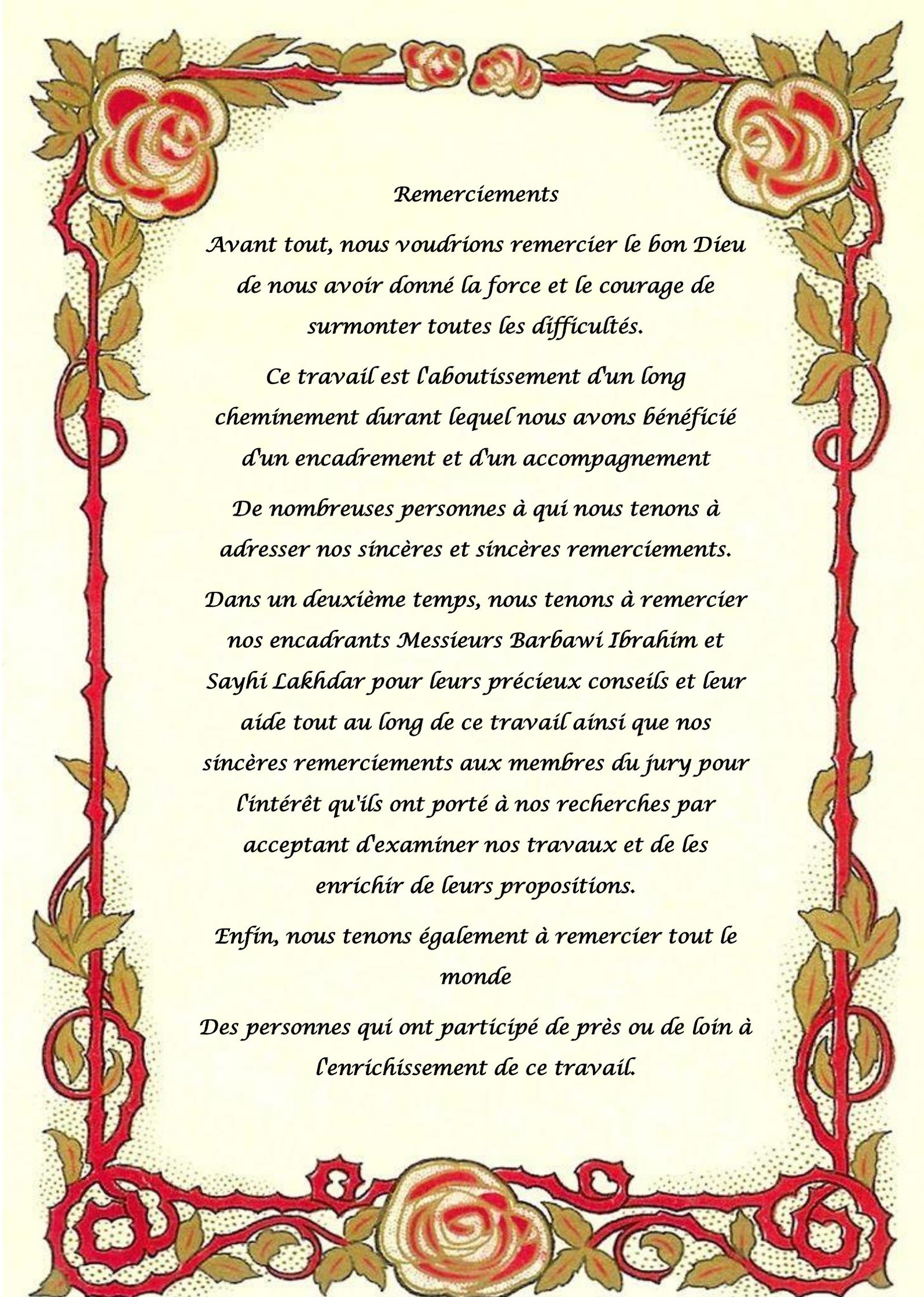
بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

«فَتَعَالَى اللَّهُ الْمَلِكِ الْحَقُّ ۖ وَلَا تَعْجَلْ بِالْقُرْآنِ مِنْ قَبْلِ أَنْ يُقْضَىٰ إِلَيْكَ وَحْيُهُ ۗ وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا»

صدق الله العظيم

طه الاية (114)

# **Remerciements**

A decorative border surrounds the text, featuring a red vine with green leaves and several large, stylized roses in shades of red, pink, and white. The roses are positioned at the corners and along the bottom edge of the page.

## *Remerciements*

*Avant tout, nous voudrions remercier le bon Dieu  
de nous avoir donné la force et le courage de  
surmonter toutes les difficultés.*

*Ce travail est l'aboutissement d'un long  
cheminement durant lequel nous avons bénéficié  
d'un encadrement et d'un accompagnement*

*De nombreuses personnes à qui nous tenons à  
adresser nos sincères et sincères remerciements.*

*Dans un deuxième temps, nous tenons à remercier  
nos encadrants Messieurs Barbawi Ibrahim et  
Sayhi Lakhdar pour leurs précieux conseils et leur  
aide tout au long de ce travail ainsi que nos  
sincères remerciements aux membres du jury pour  
l'intérêt qu'ils ont porté à nos recherches par  
acceptant d'examiner nos travaux et de les  
enrichir de leurs propositions.*

*Enfin, nous tenons également à remercier tout le  
monde*

*Des personnes qui ont participé de près ou de loin à  
l'enrichissement de ce travail.*

## **Dédicaces**

A decorative border of pearls and roses surrounds the text. The border consists of a top row of large pearls, a middle row of small pearls, a right-side vertical column of large pearls, a bottom row of large pearls, and a left-side vertical column of large pearls. On the left side, there are several roses: a red one at the top, a white one in the middle, and a white one at the bottom. On the bottom right, there is a large white rose with green leaves.

*Dédicace*

*Tout d'abord, je remercie Dieu et le remercie  
d'avoir atteint ce poste. J'adresse également mes  
sincères remerciements aux honorables parents,  
en particulier ma mère, car ils sont la raison de  
ma présence dans la vie. Je remercie également  
mes frères pour leur soutien, et je remercie nos  
professeurs pour ce qu'ils nous ont donné tout  
au long de ces années.*

*Vous avez tous ma plus grande estime et  
mon respect.*

*abdelaziz*

A decorative border of pearls and roses surrounds the text. The border consists of a top row of large pearls, a middle row of small pearls, a right-side column of large pearls, a bottom row of large pearls, and a left-side column of small pearls. On the left side, there is a bouquet of white and red roses with green leaves and buds. On the bottom right, there is a single large white rose with green leaves.

## *Dédicaces*

*Nous rendons grâce à Dieu pour l'achèvement de cet humble travail. Je remercie également les parents généreux, les enseignants tout au long du processus scolaire et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin. Merci.*

Mohammed Redha

## Sommaire

<b>Remerciements</b> -----	<b>I</b>
<b>Dédicaces</b> -----	<b>II</b>
<b>Sommaire</b> -----	<b>III</b>
<b>Liste des figures</b> -----	<b>IV</b>
<b>Liste des Tableau</b> -----	<b>V</b>
<b>Liste des abréviations et symboles</b> -----	<b>VI</b>
<b>Résumé</b> -----	<b>VII</b>
Introduction général-----	1
Chapitre 1: Perturbations électriques et énergies renouvelables -----	3
1.1 Introduction-----	4
1.2 Les perturbations électriques-----	4
1.2.1 Creux et coupures de tension-----	5
1.2.2 Fluctuations des tensions -----	6
1.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension-----	6
1.2.4 Variation de fréquence -----	7
1.2.5 Définition de l'harmonique -----	7
1.2.6 Harmonique de courant et de tension-----	8
1.3 Les énergies renouvelables-----	9
1.3.1 L'énergie du soleil-----	9
1.3.1.1 L'énergie solaire photovoltaïque pour produire de l'électricité-----	10
1.3.2 L'énergie éolienne-----	10
1.3.2.1 L'énergie éolienne terrestre-----	11
1.3.2.2 L'énergie éolienne marine-----	11
1.3.3 L'énergie de l'eau-----	12
1.3.3.1 Avantages de l'énergie hydroélectrique-----	12

1.4	Production d'électricité dans le monde-----	13
1.5	Les énergies renouvelables en Algérie-----	14
1.5.1	Potentiel algérien en énergies renouvelables-----	14
1.5.1.1	L'énergie du soleil-----	14
1.5.1.2	Énergie éolienne-----	15
1.5.2	Exploitation de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne en Algérie-----	15
1.5.2.1	L'énergie solaire-----	15
1.5.2.2	L'énergie éolienne-----	17
1.5.3	Stratégies et perspectives pour le solaire et l'éolien-----	17
1.6	Les avantages et les inconvénients des énergies renouvelables-----	18
1.6.1	Avantages-----	18
1.6.2	Inconvénients des énergies renouvelables-----	18
1.7	Conclusion-----	19
<b>Chapitre 2 : Description du système photovoltaïque fournissant le FAP (FAP-PV)</b>		
2.1	Introduction-----	21
2.2	Les cellule photovoltaïque-----	21
2.2.1	Description de la cellule-----	21
2.3	Le principe de fonctionnement de la photocellule-----	22
2.4	Caractéristiques de la cellule photovoltaïque -----	23
2.4.1	Paramètres d'une cellule PV-----	25
2.4.2	Le courant de court-circuit ( $I_{CC}$ )-----	25
2.4.3	Tension de circuit-ouvert ( $V_{CO}$ )-----	25
2.4.4	La puissance maximale-----	26
2.4.5	Facteur de forme $F_f$ -----	26
2.4.6	L'efficacité (rendement) de la conversion-----	26
2.5	Facteurs affectant la cellule photovoltaïque-----	26
2.5.1	Influence de l'éclairement-----	26

---

2.5.2 Influence de la température-----	28
2.6 Les différentes technologies des cellules PV-----	29
2.6.1 Cellule en silicium poly cristallin-----	29
2.6.2 Cellule en silicium monocristallin-----	30
2.6.3 Cellule silicium amorphe en couche mince-----	30
2.6.4 Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS-----	31
2.6.5 Cellule multi jonction-----	31
2.7 Classification d'un système solaire photovoltaïque-----	32
2.7.1 Autonome-----	32
2.7.2 Les systèmes solaires hybrides-----	33
2.7.3 Système PV connecté au réseau-----	34
2.8 Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution.-----	34
2.9 Influence sur la qualité de l'énergie-----	35
2.9.1 Injection d'harmoniques de courant-----	35
2.9.2 Injection de courant continu au réseau-----	35
2.9.3 Déséquilibre entre Phases-----	35
2.9.4 Influence sur le plan de tension-----	35
2.10 Filtrage du système électrique-----	36
2.10.1 Filtre actif-----	36
2.10.1.1 Filtre actif parallèle-----	36
2.10.1.2 Filtre actif série-----	37
2.10.2 Filtrage passif-----	38
2.10.3 Filtre actif hybride-----	38
2.11 Conclusion-----	39
<b>Chapitre 3: Modélisation et commande du système (FAP-PV)-----</b>	<b>40</b>
3.1 Introduction-----	41

---

3.2 Principe de fonctionnement d'un filtre actif parallèle	41
3.3 Structure du filtre actif parallèle	41
3.4 Onduleur	42
3.5 Description de la partie de commande	44
3.6 Identification des courants harmoniques	44
3.7 Méthode des puissances actives et réactives instantanées (P-Q)	45
3.8 Théorie de la méthode des puissances instantanées	46
3.9 Commande MLI	48
3.10 Taux de distorsion harmonique THD	49
3.11 Spectre d'harmonique	49
3.12 Charges linéaires et non linéaires	50
2.13 Conclusion	50
<b>Chapitre 4: Résultats de simulation et discussions</b>	<b>51</b>
4.1 Introduction	52
4.2 Simulation de l'ensemble du système sans filtre	52
4.2.1 Interprétation des résultats	55
4.3 Simuler l'ensemble du système avec des filtres	56
4.3.1 Interprétation des résultats	59
4.4 Conclusion	59
<b>Conclusion général</b>	<b>62</b>
<b>Références bibliographiques</b>	<b>64</b>
<b>Annexe</b>	<b>67</b>

## Liste des figures

### Chapitre 01 :Perturbations électriques et énergies renouvelables

<b>Figure 1.1:</b> creux et coupures de tension-----	5
<b>Figure 1.2:</b> déséquilibre du système triphasé-----	6
<b>Figure 1.3:</b> variation de la fréquence.-----	7
<b>Figure I.4:</b> La représentation de la forme de l'onde d'un courant déformé avec les différents courants harmoniques le constituant-----	8
<b>Figure 1.5:</b> représentation spectrale des harmoniques-----	9
<b>Figure 1.6:</b> Système de production d'électricité dépendant de l'énergie solaire photovoltaïque-----	10
<b>Figure 1.7:</b> Les ventilateurs de production d'énergie éolienne sont installés en hauteur --	11
<b>Figure 1.8:</b> Des ventilateurs de production d'énergie éolienne sont installés sur la mer---	11
<b>Figure 1.9:</b> Produire de l'énergie hydraulique grâce à des barrages-----	12

### Chapitre 2 : Description système photovoltaïque alimentant un FAP (FAP-PV)

<b>Figure 2.1:</b> Description d'une cellule.-----	22
<b>Figure 2.2:</b> Le Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque-----	23
<b>Figure 2.3:</b> Composants de cellule photoélectrique-----	23
<b>Figure 2.4:</b> Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque-----	23
<b>Figure 2.5:</b> Caractéristique I-V-----	25
<b>Figure 2.6:</b> L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ -----	27
<b>Figure 2.7:</b> L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P= f(v)$ -----	27
<b>Figure 2.8:</b> L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ -----	28
<b>Figure 2.9:</b> L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ -----	29
<b>Figure 2.10:</b> Cellule en silicium poly cristallin-----	30
<b>Figure 2.11:</b> Cellule en silicium monocristallin-----	30

<b>Figure 2.12:</b> Cellule silicium amorphe en couche mince-----	31
<b>Figure 2.13:</b> Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS-----	31
<b>Figure 2.14:</b> Cellule multi jonction-----	32
<b>Figure 2.15:</b> Exemple de la structure d'un système PV autonome-----	33
<b>Figure 2.16:</b> Exemple de la structure d'un système PV hybride-----	33
<b>Figure 2.17:</b> Exemple de la structure d'un système PV raccordée au réseau-----	34
<b>Figure 2.18:</b> Exemple de variations de tension sur un réseau BT en fonction de la présence de production PV-----	36
<b>Figure 2.19:</b> Montage du filtre actif parallèle-----	37
<b>Figure 2.20:</b> Montage du filtre actif série.-----	38
<b>Figure 2.21:</b> raccordement d'un filtre passif.-----	38

### **Chapitre 3: Modélisation et commande du système (FAP-PV)**

<b>Figure 3.1:</b> Structure d'un filtre parallèle.-----	42
<b>Figure 3.2 :</b> Onduleur.-----	42
<b>Figure 3.3 :</b> Schéma de principe de la méthode d'identification instantanée.-----	46
<b>Figure 3.4 :</b> Schéma algorithme PQ.-----	46
<b>Figure 3.5 :</b> Signal Commande MLI.-----	49
<b>Figure 3.6 :</b> Le spectre des harmoniques du courant de charge polluante.-----	50

### **Chapitre 4 : Résultats de simulation et discussions**

<b>Figure 4.1:</b> Schéma globale système photovoltaïque connecté avec un filtre active parallèle -----	52
<b>Figure 4.2:</b> Réseau électrique avant de connecter le filtre actif en parallèle-----	53
<b>Figure 4.3:</b> Système de mesure de tension et de courant à la source-----	53
<b>Figure 4.4:</b> Tension de source-----	53
<b>Figure 4.5:</b> Courant de sources-----	54

<b>Figures 4.6:</b> Formes d'ondes et spectre d'harmonique du courant de source-----	54
<b>Figures 4.7:</b> Courant de charge -----	55
<b>Figure 4.8:</b> Formes d'ondes et spectre d'harmonique du courant de Charge -----	55
<b>Figure 4.9:</b> Schéma globale système photovoltaïque connecté avec un filtre active parallèle-----	56
<b>Figure 4.10:</b> Tension Vdc-----	56
<b>Figure 4.11:</b> Tension de source. -----	57
<b>Figure 4.12:</b> Courant de source -----	57
<b>Figure 4.13:</b> Formes d'ondes et spectre d'harmonique du courant de charge-----	58
<b>Figure 4.14:</b> Courant de charge -----	58
<b>Figure 4.15:</b> Formes d'ondes et spectre d'harmonique du courant de source-----	59

---

## Liste des Tableau

<b>Tableau 1.1</b> : Les plus grands pays producteurs d'électricité-----	13
<b>Tableau 1.2</b> : Potentiel de l'énergie solaire en Algérie-----	14
<b>Tableau 3.1</b> : Tension de sortie d'un onduleur (commande MLI vectorielle)-----	44

# Liste des abréviations et symboles

### Liste des abréviations et symboles

FAP: Filtre actif parallèle

PV : photovoltaïque

GPV : Générateur photovoltaïque.

$D_h$  : Le rayonnement diffus

$I_{GPV}$  ,  $V_{GPV}$ : Courant et la tension du générateur photovoltaïque

$N_p$ ,  $N_s$  : sont les nombres des modules en parallèle et en série

G : Eclairement (W/m<sup>2</sup>)

$G_{ref}$ : Eclairement Dans les conditions standards en 1000 W/m<sup>2</sup>

$I$  : Le courant fourni par la cellule (A).

$V$ ,  $I$ : Tension (V) et courant (A) de sortie du panneau.

$I_{ph}$  : Courant produit par la photopile (A).

$I_d$  : courant de la diode

$R_s$  : Résistance série( $\Omega$ ).

$R_p$  : Résistance parallèle( $\Omega$ ).

$I_{phref}$  : Courant de court-circuit de la cellule dans les conditions standards

$I_0$ :Le courant de saturation inverse d'une diode

$V_{OC}$  : Tension de circuit ouvert

$K$  : constante de Boltzmann.

$T$  : la température absolue.

$I_s$  : courant de saturation.

$q$  : Charge de l'électron  $q=1.602.10^{-19}$ coulomb.

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

$\eta_m$ : Rendement énergétique maximum.

$p_{max}$  : Puissance maximale produite PV (W).

$V_{max}$  : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

$I_{max}$  : Courant qui correspond à la puissance maximale (A)

S : Surface de la cellule solaire.

$V_e$  : tension d'entrée

$V_{ch}$  : tension de sortie

P&O: Perturbation et Observation.

MLI: Modulation de largeur d'impulsion.

THD: Total Harmonic Distortion

Vdc: Tension aux bornes du condensateur.

$q(t)$  : Puissance réactive instantanée.

$P(t)$  : Puissance active instantanée.

UPQC: Unified Power Quality Conditioner.

DC: Courant Continu (Direct Current)

AC : Courant alternatif

$\eta$ : Rendement (%)

P: Puissance (W).

.

.

### الملخص

يتم توفير الطاقة الكهربائية كتيار جيبي بحت، ولكن في الوقت الحاضر، وبسبب تطور المعدات الإلكترونية التي تسبب اضطرابات في جودة الطاقة الكهربائية، لحل هذه المشكلة سوف يتم تكريس عملنا للحد من التيارات الغير المتناسقة في الشبكة الكهربائية عن طريق محاكاة تركيب عامل التصفية المتوازية يتم تشغيله بواسطة ألواح كهروضوئية .

الهدف من هذا العمل هو دراسة فلتر نشط متوازي ذو بنية الجهد بهدف تحسين جودة الطاقة في شبكات الجهد المنخفض .

في هذا العمل تم دراسة جزء الطاقة وجزء التحكم في الفلتر النشط وتم استخدام هذا الفلتر النشط في الشبكة الكهربائية لإزالة التوافقيات.

يتم محاكاة الفلتر المربوط مع مصدر التغذية والحمولة الغير خطية بواسطة برنامج ماطلاب /سملينك .

### Résumé

L'énergie électrique est fournie sous forme de courant sinusoïdal pur, mais à l'heure actuelle, en raison du développement des équipements électroniques qui provoquent des perturbations dans la qualité de l'énergie électrique, pour résoudre ce problème, nos travaux seront consacrés à la réduction des courants incohérents dans le réseau électrique. en simulant l'installation d'un filtre parallèle actionné par des panneaux photovoltaïques.

Le but de ce travail est d'étudier un filtre actif parallèle à structure de tension afin d'améliorer la qualité de l'alimentation dans les réseaux basse tension

Dans ce travail, la partie puissance et la partie contrôle du filtre actif seront étudiées, et ce filtre actif sera utilisé dans le réseau électrique pour éliminer les harmoniques.

Le filtre couplé à la source d'alimentation et à la charge non linéaire est simulé par le logiciel Matab/Smlink.

### Abstract

Electric power is supplied as a pure sinusoidal current, but at present, due to the development of electronic equipment that causes disturbances in the quality of electrical power, to solve this problem, our work will be devoted to reducing the inconsistent currents in the electrical network by simulating the installation of a parallel filter operated by Photovoltaic panels.

The aim of this work is to study a parallel active filter with a voltage structure in order to

improve the power quality in low voltage networks

In this work, the power part and the control part of the active filter will be studied, and this active filter will be used in the electrical network to remove harmonics.

The filter coupled with the feed source and the non-linear load is simulated by Matlab/Simulink software.

# Introduction général

## **Introduction général**

La production d'énergie électrique par un système photovoltaïque connaît une forte croissance et une évolution remarquable dans ces dernières années, car elle présente de nombreux avantages par rapport aux sources d'énergie conventionnelles. Toutefois ; le raccordement du système PV avec le réseau électrique peut provoquer de nombreux impacts néfastes sur le fonctionnement du réseau. Parmi ceux-ci, citons les effets les plus significatifs l'injection d'harmoniques dans le réseau et l'augmentation de la consommation de puissance réactive. C'est pourquoi tous les domaines de recherche sur l'énergie photovoltaïque reposent sur l'amélioration de l'efficacité et la facilitation de l'intégration de ces systèmes dans le réseau.

Les éléments non-linéaires causant une déformation à l'alimentation électrique sont nombreux tels que les convertisseurs électriques, les consommateurs électroniques, fours électriques à arc et les lampes à décharges électriques Au-delà, les transformateurs et les moteurs peuvent également causer une déformation due à leurs caractéristiques non idéales. Bien que les charges non-linéaires existent pendant des décennies, non seulement les équipements industriels de haute puissance, mais également les appareils électriques de faible puissance. Bien qu'une application de faible puissance ne provoque pas une déformation notable en comparaison par exemple à un four électrique à arc, plusieurs dispositifs de basse puissance fonctionnant simultanément peuvent poser des problèmes assez sévères [1].

Les tensions et les courants distordus ont plusieurs effets nocifs, tels que, la génération des résonances entre les inductances et les capacités du réseau d'alimentation, les surintensités du courant et surtensions dans les moteurs et les générateurs. Dans les transformateurs, les courants déformés causent l'échauffement et les vibrations mécaniques, ce qui mène en plus aux effets thermiques et mécaniques qui dégradent l'isolant. La déformation réduit également, l'exactitude de divers instruments de mesure et dégrade les caractéristiques de fonctionnement de la protection du système d'alimentation. En plus, les systèmes de communication et les consommateurs électroniques peuvent être perturbés ou endommagés.

Les filtres passifs ont été traditionnellement utilisés pour atténuer la déformation due aux courants harmoniques dans les systèmes d'alimentation industriels, mais leurs performances dépendantes de l'impédance du système et du courant harmonique de la charge non-linéaire, les rendent inefficaces sous certaines conditions et laissent des possibilités aux propagations

des harmoniques dans le système d'alimentation.

Pour remédier à ces inconvénients, les filtres actifs de puissance sont introduits. Ils injectent une tension ou un courant harmonique avec une amplitude et angle de phase appropriées dans le système et compensent les harmoniques des charges non linéaires .

De nombreuses configurations de filtres actifs ont été introduites dans la littérature. Celles qui répondent le mieux aux contraintes industrielles de nos jours sont les filtres actifs parallèles, les filtres séries ou même la combinaison série-parallèle. Dans le cas où les courants de la source sont non linéaires, le filtre actif parallèle est la meilleure solution pour la réduction des perturbations de faible et moyenne puissance. Le filtrage actif est plus avantageux lorsqu'une réponse rapide est nécessaire en présence d'une charge dynamique. D'autre part, il est important de noter que les performances des filtres actifs sont profondément liées à l'algorithme de détection des références harmoniques ainsi qu'à la méthode utilisée pour la poursuite de ces références.

# **Chapitre 1: Perturbations électriques et énergies renouvelables**

## 1.1 Introduction

Généralement, le distributeur d'énergie électrique sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Les paramètres caractéristiques de ce système sont la fréquence, l'amplitude, la forme d'onde, qui doit être sinusoïdale et la symétrie du système triphasé. Mais depuis quelques années, avec l'évolution technologique des composants d'électronique de puissance les distributeurs d'énergie rencontrent plusieurs problèmes liés à l'accroissement du nombre de convertisseurs statiques raccordés aux réseaux de distribution d'énergie. En effet, ces convertisseurs sont des sources polluantes qui absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment pour la plupart de la puissance réactive. Les harmoniques générés sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations se superposent à l'onde fondamentale. Elles ont donc pour conséquence de modifier l'onde de tension ou de courant ce qui se traduit par une dégradation du facteur de puissance et/ou par la génération de courants et de tensions alternatives de fréquence différente de celle du fondamental.

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20 à 30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement.

## 1.2 Les perturbations électriques

La qualité d'énergie est un concept très large qui peut se définir par rapport à la continuité de la fourniture de l'énergie électrique et de la forme d'onde de la tension disponible. L'évaluation de cette qualité consiste habituellement à caractériser les différentes perturbations électriques [1].

Les perturbations sont l'ensemble des phénomènes internes ou externes au réseau ayant un pouvoir de modifier d'une manière transitoire ou permanente en amplitude et/ou en forme les grandeurs électriques du réseau (courant, tension, fréquence) [2]. Ces perturbations

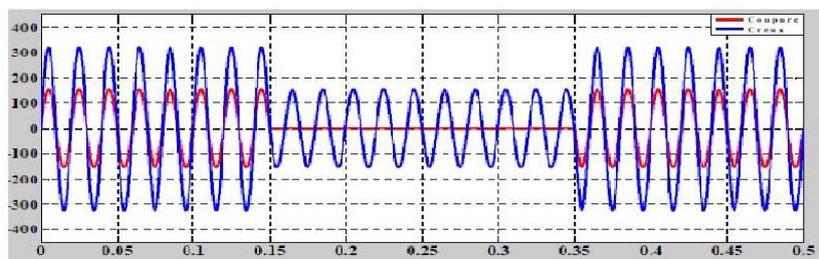
peuvent être groupées en quatre catégories selon qu'elles affectent l'amplitude, la forme d'onde, la fréquence et la symétrie. Elles peuvent aussi être classées selon qu'elles soient permanentes, semi-permanentes ou aléatoires (foudre, court-circuit, manœuvre...) [1].

Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres cités précédemment peuvent se manifester par[3]:

### 1.2.1 Creux et coupures de tension

Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publics que ceux des utilisateurs. ils apparaissent également lors de manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.) .une coupure de tension quand à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms [4].

La figure (I.1) montre un exemple de creux et de coupure de tension.



**Figure 1.1** : Creux et coupures de tension.

Il y a deux types de phénomène à l'origine des creux de tension :

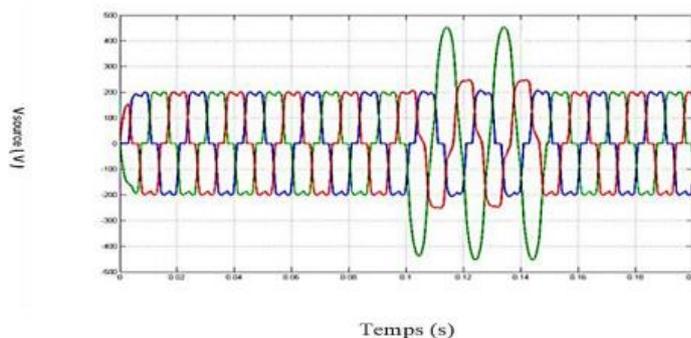
- ❖ Les creux provenant du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteurs, transformateurs...etc.).
- ❖ les creux liés aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tous les courts circuits accidentels sur les réseaux de distribution ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, protection de branches sur les lignes aériennes...etc.).

### 1.2.2 Fluctuations des tensions

Pour les fluctuations de la tension, les solutions consistent à changer le mode d'éclairage ; installer des alimentations sans interruption ; modifier le perturbateur (le changement du mode de démarrage des moteurs à démarrages fréquents permet par exemple de réduire les surintensités), augmenter la puissance de court-circuit ; éloigner électriquement la charge perturbatrice des circuits d'éclairage [5].

### 1.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

Un récepteur triphasé électrique qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension figure( I.2) dus à la circulation de courant sont équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour les récepteurs monophasés en basse tension. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire.



**Figure 1.2 :** déséquilibre du système triphasé.

Le degré de déséquilibre est défini en utilisant la méthode des composantes de Fortescue par le rapport de la composante inverse ( $U_{1i}$ ) (ou homopolaire ( $U_{10}$ )) du fondamental à celui de la composante directe ( $U_{1d}$ ) du fondamental.

$$\Delta U_i = \frac{\|U_{1i}\|}{|U_{1d}|} \text{ et } \Delta U_0 = \frac{\|U_{10}\|}{|U_{1d}|} \quad (1.1)$$

avec :  $v_i$  = tension de la phase i et

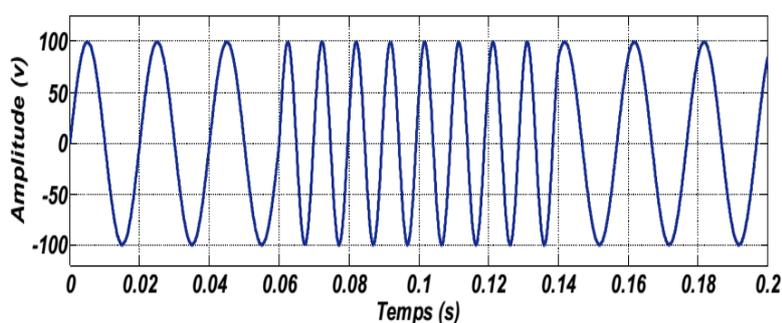
$$V_{moy} = (V_1 + V_2 + V_3)/3 \quad (1.2)$$

La tension inverse (ou homopolaire) est provoquée par les chutes de tension le long des impédances du réseau dues aux courants inverses (ou homopolaire) produits par les charges

déséquilibrées qui conduisent à des courants non identiques sur les trois phases [6].

### 1.2.4 Variation de fréquence

une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome (voir la figure I.3 ). au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau [7].



**Figure 1.3 :** Variation de la fréquence.

### 1.2.5 Définition de l'harmonique

Un harmonique est défini comme étant une composante sinusoïdale d'un signal périodique, ayant une fréquence multiple de l'onde fondamentale. Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 Hz et 2000 Hz (entre les harmoniques de rangs  $h=2$  et  $h=40$ ). Mais, on peut observer des sous-harmoniques ou des inter-harmoniques à des fréquences non multiples entières de la fréquence fondamentale [8]. Toute fonction périodique peut être représentée par une série de Fourier sous la forme.

$$Y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} Y_h \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(h\omega t - \varphi_h) \quad (1.3)$$

$Y_h$  : La valeur efficace de la composante de rang  $h$ .

$\varphi_h$  : Phase de la composante  $h$  lorsque  $t = 0$ .

$Y_0$ : Valeur moyenne ou composante continue du signal  $y(t)$ .

$\omega$ : Pulsation fondamentale ( $2\pi \cdot f = 2\pi/T$ ).

$h$  : rang de l'harmonique.

### 1.2.6 Harmonique de Courant et de tension

Les harmoniques présents sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation de charges non linéaires. Quand elles sont connectées au réseau d'une certaine fréquence, elles absorbent un courant non sinusoïdal mais de même fréquence [8]. Ces charges se comportent comme des sources de courant harmonique, c'est-à-dire que le courant est fixé par la charge et non par la tension du réseau. Ces courants provoquent, dans le réseau, des chutes de tensions harmoniques selon la loi d'Ohm :

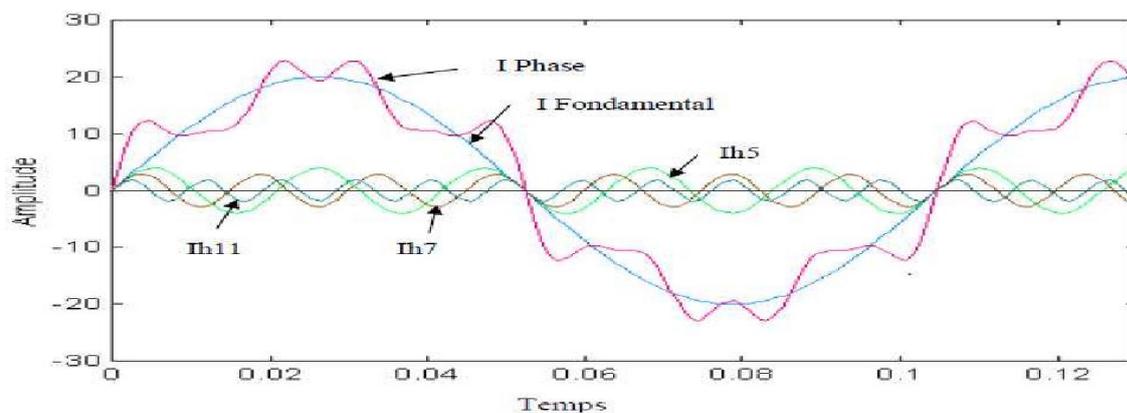
$$V_h = Z_h I_h \quad (1.4)$$

$V_h$ : Tension harmonique de rang  $h$  .

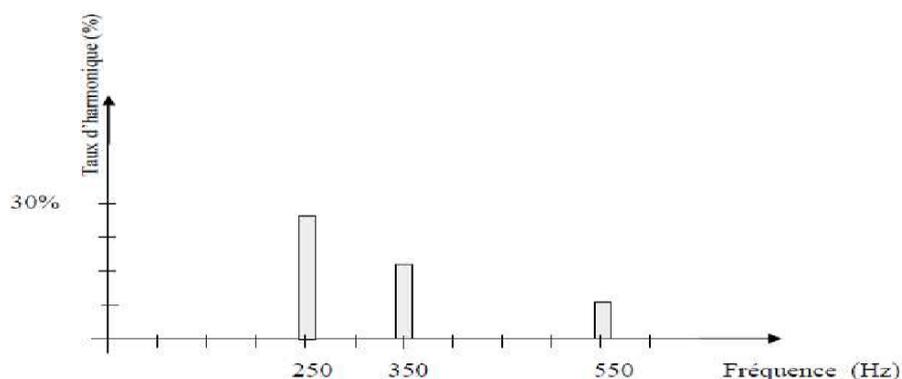
$Z_h$ : Impédances harmoniques de rang  $h$  .

$I_h$ : Courant harmonique de rang  $h$ .

Soit par exemple la figure suivante représentant la forme de l'onde d'un courant pollué avec ,en même temps, l'image des différents courants harmoniques le constituant qu'on peut exprimer grâce à une représentation en série de Fourier du courant global:



**Figure I.4 :** La représentation de la forme de l'onde d'un courant déformé avec les différents courants harmoniques le constituant.



**Figure I.5 :** Représentation spectrale des harmoniques

### 1.3 Les énergies renouvelables

L'une des formes inépuisables d'énergie produite par la nature, comme l'énergie du soleil, de l'eau, du vent, etc., car elles se renouvellent à un rythme qui dépasse la consommation humaine. Elles ont un impact négatif sur l'environnement et les humains, car elles génèrent des émissions nocives, principalement du dioxyde de carbone. En étudiant et en explorant les énergies issues de la nature, on peut atteindre un total de six grandes familles énergétiques qui sont les suivantes :

L'énergie solaire, la biomasse, l'énergie éolienne, l'énergie de l'eau, la géothermie et les énergies marines.

#### 1.3.1 L'énergie du soleil

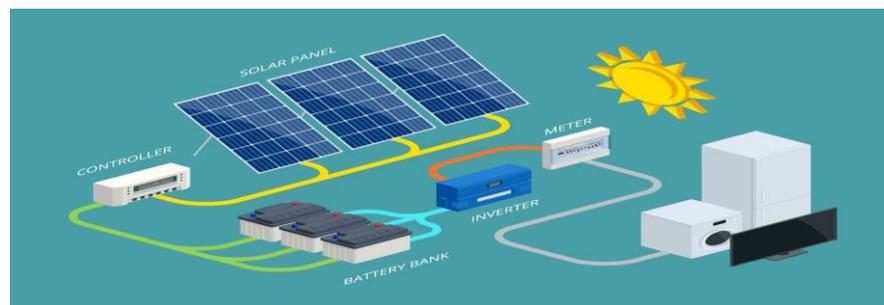
C'est la lumière et la chaleur émises par le soleil, dont la température de surface atteint  $5700^{\circ}\text{C}$ , à travers les réactions de fusion continue. Le rôle le plus important dans le cycle de l'eau dans la nature à travers l'évaporation de l'eau et d'autres rôles. Par conséquent, l'énergie du soleil est la plus largement utilisée dans le monde et la plus populaire pour y investir en raison de sa disponibilité dans la plupart des régions du monde.

Par exemple, le nombre moyen d'heures solaires en Algérie est d'environ 3000 heures par an, alors qu'il est environ 3900 heures par an dans le désert algérien, ce qui est un grand gain pour l'Algérie, puisque le désert représente 80% de sa superficie [9].

L'énergie du soleil peut être utilisée pour produire deux types d'énergie:

### 1.3.1.1 L'énergie solaire photovoltaïque pour produire de l'électricité

C'est le processus de production d'électricité en convertissant la lumière du soleil en énergie à l'aide de panneaux solaires en silicium, qui est un matériau abondant sur le sol {que l'on trouve notamment dans le sable} Ces panneaux solaires sont constitués d'un groupe de cellules photovoltaïques unité photovoltaïque où le courant électrique généré est proportionnel à la surface de la cellule photovoltaïque éclairée et à l'intensité de la lumière qui varie avec l'heure de la journée, et qui peut également être utilisé pour alimenter les maisons en énergie en installant des panneaux sur les toits.



**Figure I.6:** Système de production d'électricité dépendant de l'énergie solaire photovoltaïque

### 1.3.2 L'énergie éolienne

qui est la conversion des courants d'air en énergie électrique grâce à des éoliennes dérivées de moulins à vent, où la machine est constituée de trois pales reliées à un axe de rotation et soulevées par un poteau. Les pales convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, On fait fonctionner le générateur qui la transforme en énergie électrique, Que l'énergie mécanique des pales passe par un multiplicateur qui a pour rôle d'accélérer le mouvement de l'arbre de transmission lent. Plus les pales sont grandes, plus leur cycle est lent.

l'installation d'un parc éolien, plusieurs études sont menées. La première étape consiste à s'assurer que le site proposé est adapté à un tel projet, car il convient de choisir l'endroit le plus approprié en fonction de critères spéciaux qui permettent d'obtenir la plus grande quantité d'énergie électrique possible à l'endroit choisi, [10]et souvent le choix se porte sur

les zones côtières, les plaines ouvertes et même les pentes des montagnes.

En conséquence l'énergie éolienne est divisée en deux types :

### 1.3.2.1 L'énergie éolienne terrestre

Il est exempt de placer des éoliennes équipées de hautes tours dans des endroits spécifiques, et les sites montagneux et de plateau, en particulier, sont des sites appropriés pour exploiter l'énergie éolienne, car le mouvement du vent est fort dans ces zones, en plus de cela, de nombreux Les turbines peuvent être préparées en un seul endroit et elles sont appelées fermes Wilderness Wind énergie .



**Figure 1.7** Les ventilateurs de production d'énergie éolienne sont installés en hauteur

### 1.3.2.2 L'énergie éolienne marine

Elle est produite par des turbines marines installées dans les mers et les océans, et elle se distingue de l'énergie éolienne terrestre par sa productivité élevée, puisqu'elle augmente de 40 à 60 %, en raison de la force du vent offshore. des turbines peuvent également être placées dans une zone pour former ce qu'on appelle des fermes marines pour l'énergie éolienne . [10]



**Figure I.8** Des ventilateurs de production d'énergie éolienne sont installés sur la mer

### 1.3.3 L'énergie de l'eau

L'énergie de l'eau est produite à partir de l'énergie de l'eau qui coule ou tombe dans le cas des chutes d'eau et des barrages (chutes d'eau), ou du mouvement des vagues dans les mers et les océans.

En conditions normales, l'énergie est estimée entre 10 et 100 kilowatts par mètre de plage dans les régions moyennes proches de l'équateur L'énergie hydroélectrique constitue une source majeure de production d'énergie au niveau mondial puisque sa production globale atteint environ 1 3000 térawatt heures en l'an 2002. Elle constitue environ 18% de la production mondiale d'électricité. [10]



**Figure 1.9** Produire de l'énergie hydraulique grâce à des barrages

### 1.3.3.1 Avantages de l'énergie hydroélectrique

La part de l'énergie hydroélectrique est estimée à 18 % de la production mondiale d'électricité. Ce type d'énergie est très rentable, car son rendement atteint 90 % ou plus.

## 1.4 Production d'électricité dans le monde

La production mondiale d'électricité, selon les estimations pour l'année 2018, s'élevait à environ 26 614 800 gigawatts, et la production a connu une augmentation record par rapport aux dernières années en raison de l'augmentation de la demande d'énergie.

La production d'électricité a augmenté à l'échelle mondiale d'environ 6,2 % en 2021, la demande augmentant suite aux répercussions de la pandémie de Corona, ce qui rappelle le bond de la croissance réalisé au lendemain de la crise financière mondiale en 2010 lorsqu'elle a augmenté de 6,4 %, selon le soixante et onzième rapport annuel publié par la société BP, et la Chine a acquis la plus grande part de l'électricité totale produite dans le monde en 2021, de 30 %, contre 15,5 % pour les États-Unis d'Amérique, tandis que les dix

premiers pays représentaient près de 70 %, et 30 % pour le reste du monde, et en ce qui concerne les régions, la région Asie-à)acifique Près de la moitié de l'électricité mondiale « 49,2 % » a été produite en 2021, contre 18,9 % pour l'Amérique du Nord, 14,2 % pour l'Europe, 4,6 % pour le Moyen-Orient et 3,2 % pour l'Afrique [14].

	<b>Pays</b>	<b>Sortie (térawatts)</b>
<b>1</b>	Chine	7111800
<b>2</b>	USA	4460800
<b>3</b>	Inde	1561100
<b>4</b>	Russie	1110800
<b>5</b>	Japon	1051600
<b>6</b>	Canada	654400
<b>7</b>	Algérie	76400
<b>8</b>	Allemand	648700
<b>9</b>	Corée du Sud	594300
<b>10</b>	Brésil	588000

**Tableau1.1** Les plus grands pays producteurs d'électricité

### 1.5 Energies renouvelables en Algérie

Compte tenu de l'énorme potentiel de l'Algérie pour investir dans les énergies propres et réduire la dépendance énergétique aux combustibles fossiles, l'Algérie envisage de remplacer progressivement ce combustible par des sources d'énergie inépuisables. Développé par le gouvernement algérien, l'Algérie se caractérise par d'importantes capacités d'énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, éolienne l'énergie, la géothermie et l'énergie de la biomasse, qui sont les énergies successives pouvant se substituer aux

hydrocarbures.

### 1.5.1 Potentiel des énergies renouvelables en Algérie

#### 1.5.1.1 L'énergie solaire

La situation privilégiée, l'Algérie possède le plus grand champ d'énergie solaire du bassin méditerranéen, et l'ensoleillement moyen sur le territoire algérien dépasse les 2000 heures annuelles, et la quantité totale d'énergie solaire reçue est estimée à 169400 terra watt heures/an , soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays. L'Algérie possède le gisement d'énergie solaire le plus important au monde, et si l'on compare l'énergie solaire au gaz naturel, le potentiel d'énergie solaire en Algérie est égal à l'équivalent de 37 000 milliards de mètres cubes, soit plus de 8 fois les réserves de gaz naturel du pays.

<i>Regions</i>	<i>région côtière</i>	<i>Région des plateaux</i>	<i>le desert</i>
<i>Surface %</i>	4	10	86
<i>Durée moyenne d'exposition au soleil (heures par an)</i>	2650	3000	3500
<i>Énergie moyenne possible (kWh/m<sup>3</sup> par an)</i>	1700	1900	2650

**Tableau1.2** Potentiel de l'énergie solaire en algérien

#### 1.5.1.2 Energie éolienne

Les vents en Algérie, selon la situation géographique, dans le nord du pays, sont caractérisés par une vitesse moyenne modérée de (1-4 sec/m), et dans le sud, la vitesse moyenne du vent dépasse 4 sec/ m, d'autant plus que l'Algérie se caractérise par des zones rapidement riches dans le sud-est, avec des vents supérieurs à 6 m/s dans la région de l'Adrar, des vents bons et économiques de plus de 5 m/s, comme les régions de Tindouf, Tiaret et Oran , et il existe aussi des zones avec ces champs adaptés au haut débit comme la région d'Adrar, Timimoune et Ain Salah, atteignant plus de 1 m s/M6 pour implanter des

[15] parcs éoliens pour produire de l'énergie électrique.

### **1.5.2 Stratégies et perspectives pour le solaire et l'éolien**

.Depuis 2009, l'Algérie a développé une centrale solaire pour concurrencer l'énergie produite dans le reste du monde, et on s'attend à ce qu'elle atteigne 5% de la capacité de production nationale en 2015, et donc l'Algérie a une opportunité appropriée pour exporter cette énergie vers l'Italie et le reste des pays européens, et selon le ministère de l'Énergie et des Mines, l'Algérie dispose d'une immense zone ensoleillée avec un énorme potentiel pour l'exploiter, elle dispose également des ressources humaines et financières nécessaires, et elle ne manque de rien, pour rivaliser avec d'autres pays comme il est capable[16].

L'Algérie cherche à investir environ 60 milliards de dollars dans le domaine des énergies renouvelables en l'an 2030, et que ces énormes investissements pourraient atteindre 70 milliards de dollars, et seront alloués pour produire 12 000 mégawatts d'énergie solaire destinés au marché local, et la Sonelgaz l'entreprise en charge de la mise en œuvre de ce programme prévoit d'atteindre 650 mégawatts d'électricité produite à partir de ces énergies alternatives, L'Algérie a adopté une stratégie en 2011 [16] dans le but de produire 40% de l'électricité à partir de ressources renouvelables d'un an 2030,La stratégie vise également à développer une véritable industrie de l'énergie solaire et a adopté un plan à long terme, car elle atteint 22 000 mégawatts entre 2011 et 2030 [16], dont 12 000 mégawatts couvrent la demande locale et 10 000 mégawatts peuvent être exportés, D'ici 2030, il est prévu qu'en 2030, plus de 37% de la production nationale d'énergie solaire d'électricité et environ 3% de la production d'énergie éolienne (ce dernier devrait générer des bénéfices de plus de 3 milliards d'euros par an, ainsi que La capacité de ce secteur prometteur. Dans la création de milliers d'emplois et la fourniture d'énergie propre) en produisant 2000 mégawatts d'énergie éolienne, 2800 mégawatts d'énergie photovoltaïque [16], En plus de 7200 mégawatts d'énergie thermique, un bol qui fournira à l'Algérie 12 mille mégawatts d'ici 2030, ce qui garantira 40% de l'auto-épurement de l'Algérie et de ses besoins énergétiques en générant de l'électricité solaire à partir de sources non numériques. Pour Référence, l'énergie éolienne est une énergie économique, ce qui le rend moins cher par rapport à l'énergie solaire, il n'est pas non plus pollué[16].

### **1.6 Les avantages et les inconvénients des énergies renouvelables**

### **1.6.1 Avantages:**

L'un des avantages des énergies renouvelables a un prix fixe, car l'effet de l'augmentation ou du raccourcissement des aliments fossiles a un impact direct sur l'inflation, tandis que le coût de la production d'énergie provenant de sources renouvelables dépend du montant d'argent dépensé dans les infrastructures, et donc [17], le coût de la production d'énergie à partir de sources renouvelables est plus stable que d'autres, car les sources d'énergie renouvelables sont durables. Le soleil brillera pendant des milliards d'années, et l'eau et le vent continueront à fournir une source d'énergie fixe [17], car elles ne sont pas soumises Aux crises mondiales, de sorte que les fournitures de combustibles fossiles peuvent être affectées par les guerres, les conflits commerciaux et les grèves, tandis que les sources d'énergie renouvelables telles que le soleil et le vent sont présentes partout, car nous constatons que les sources d'énergie renouvelables sont respectueuses de l'environnement car elles ne les contaminent pas avec du dioxyde de carbone et d'autres gaz toxiques produits par les combustibles fossiles, car ils ne réduisent pas les ressources naturelles qui peuvent être conservées pendant longtemps Au fil du temps, s'appuyer sur les technologies des énergies renouvelables devrait offrir des opportunités d'emploi dans le monde, et des millions de possibilités d'emploi ont déjà été offertes aux États-Unis et dans d'autres pays européens qui se sont transformés en sources d'énergie renouvelables [17].

### **1.6.2 Inconvénients des énergies renouvelables**

Le développement de stations d'énergie renouvelable nécessite beaucoup de coûts à la fois dans la recherche et la fabrication des composants nécessaires pour mener à bien le processus, tandis que le processus d'extraction des combustibles fossiles est moins coûteux car tous les outils de fabrication sont déjà en place, et presque toutes les énergies renouvelables les sources sont vulnérables aux fluctuations météorologiques et aux conditions climatiques changeantes, des pluies abondantes ou des vents lents peuvent réduire la production de cette énergie, et le changement climatique attendu dans certains endroits peut rendre difficile la production d'énergie renouvelable dans les 50 ans [17], et contrairement au charbon centrales qui produisent de grandes quantités d'énergie, les sources renouvelables ne peuvent pas produire de grandes quantités d'énergie en peu de temps, ce qui nécessite de réduire la consommation d'énergie ou de construire de nouvelles

installations capables de produire de l'énergie à un rythme plus rapide. La production d'une grande quantité d'énergie renouvelable nécessite la mise en place de nombreux panneaux solaires et parcs éoliens. Produire de grandes quantités d'énergie renouvelable [17] .

### **1.7 Conclusion**

Ce chapitre est consacré à l'étude des perturbations électriques et des moyens de les améliorer pour en tirer profit. Les énergies renouvelables ont également été présentées avec une brève explication de leur concept de production d'électricité dans différentes centrales.

## **Chapitre 2:** Description système photovoltaïque alimentant un FAP (FAP-PV)

## 2.1 Introduction

L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie lumineuse des rayons solaires (photon) en électricité, il utilise pour se faire des modules photovoltaïques composés de cellules, ces cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), et, le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature [18].

Les nouvelles structures de dépollution des réseaux appelé filtre actif de puissance. Ce type de filtre actif existe sous 3 formes : série, parallèle et hybride en fonction de la nature des perturbations : tension, courant, tension et courant.

Nous nous proposons de faire une étude avec simulation d'un filtre active de puissance parallèle (compensateur shunt) dans le but d'éliminer les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs) produits par les charges non linéaires .

## 2.2 les cellule photovoltaïque

### 2.2.1 Description de la cellule

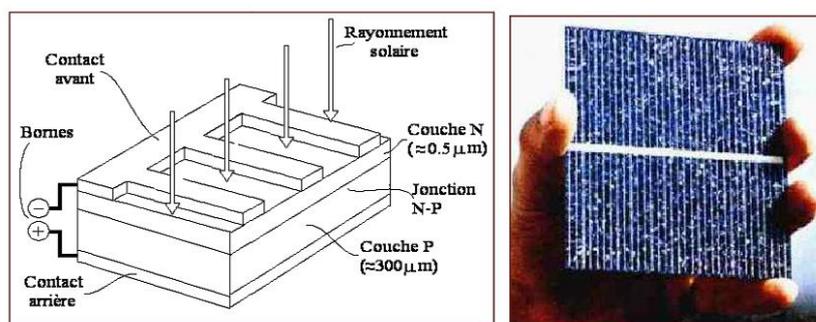
C'est l'élément de base qui grâce à lui la conservation est faite par l'assemblage de plusieurs cellules, on peut atteindre la puissance que l'on veut.

Les photopiles ou cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs ayant des propriétés intermédiaires entre conducteurs et isolants. Le matériau de base est dans la plupart des cas le silicium. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, poly-cristalline ou monocristalline. D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de gallium (As Ga), Tellurure de cadmium (Cd Te) [19].

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des "impuretés") sont substitués à des atomes de silicium dans un réseau cristallin : c'est ce que l'on appelle le dopage :

- ❖ Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type "N"(ex : dopage au phosphore).
- ❖ Si l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le Silicium, le matériau sera déficitaire en électrons : il sera dit de type "P" (ex : dopage au bore).

- ❖ Une cellule solaire sera obtenue en constituant une jonction de (jonction PN). Au voisinage de la jonction, un champ électrique apparaît provoqué par le déséquilibre de charges. Il va contribuer à drainer les électrons qui auront été détachés par l'énergie des photons (grains de lumière) in deux zones de type opposées incidents. Pratiquement, la cellule PV est composée de plusieurs couches minces figure à savoir :
- ❖ Une couche "antireflet" sur la face avant dont le but est de faciliter au maximum la pénétration d'un maximum de photons à travers la surface et de réduire les pertes par réflexion
- ❖ Une grille conductrice avant " collectrice des électrons " qui doit également être liée au silicium et ne pas être sensible à la corrosion.
- ❖ Une couche dopée N avec porteurs de charge libres négatifs (électrons).
- ❖ Une couche dopée P avec porteurs de charge positifs (trous).
- ❖ Une surface de contact conductrice en métal (collectrice des électrons), ayant une bonne conductivité ainsi qu'un bon accrochage sur le silicium.



**Figure 2.1 :** Description d'une cellule

### 2.3 Le Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir d'une jonction pN au silicium (diode). Pour obtenir du silicium dopé n, on ajoute du phosphore. Ce type de dopage permet au matériau de libérer facilement des électrons (charge -). Pour obtenir du silicium dopé p, on ajoute du bore. Dans ce cas, le matériau crée facilement des lacunes électroniques appelées trous (charge +). La jonction pN est obtenue en dopant les deux faces d'une tranche de silicium. Sous l'action d'un rayonnement solaire, les atomes de la jonction libèrent des charges électriques de signes opposés qui s'accumulent de part et d'autre de la jonction pour former un générateur électrique [20].

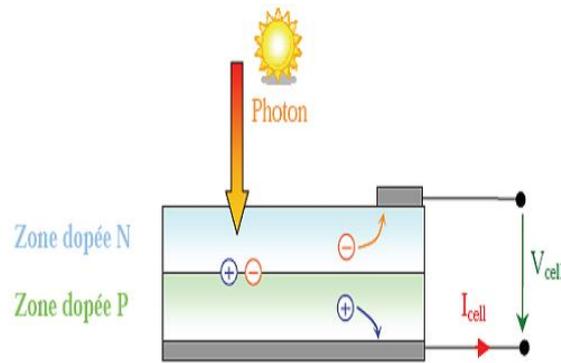


Figure 2.2: Le Principe de fonctionnement d’une cellule photovoltaïque

### 2.4 Caractéristiques de la cellule photovoltaïque

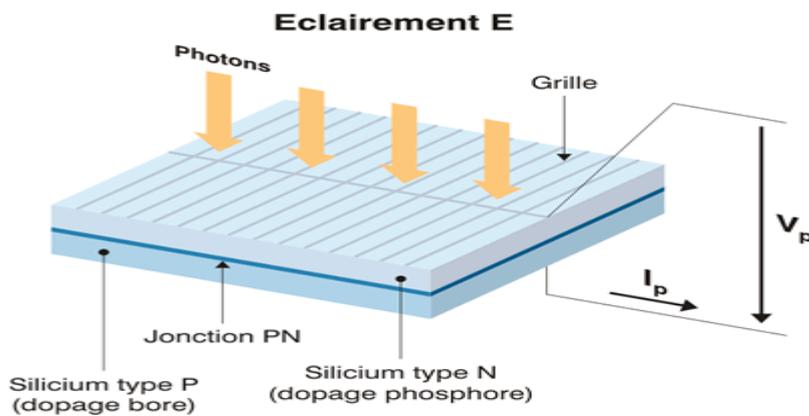


Figure 2.3: composants de cellule photoélectrique

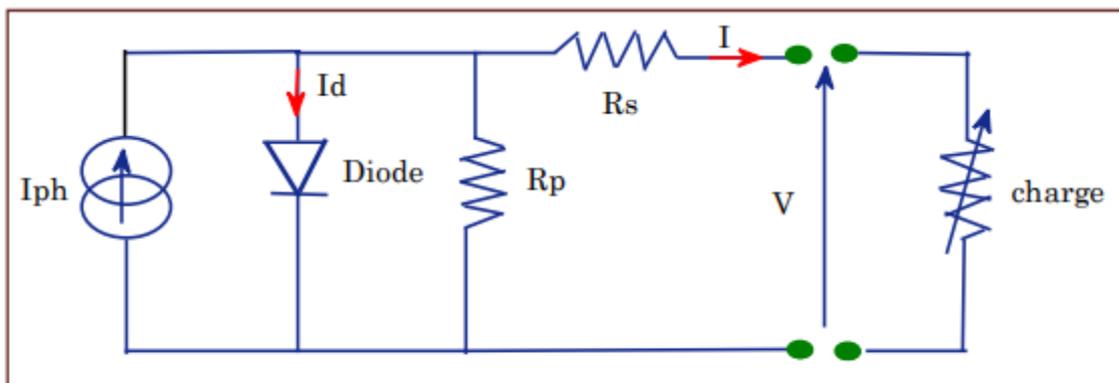


Figure 2.4: Schéma équivalent d’une cellule photovoltaïque

Comme montre la figure 2.4 une cellule photovoltaïque comporte en réalité une résistance série  $R_s$  et une résistance shunt  $R_p$ . Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la cellule : [22]

La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement

de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.

La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

le modèle mathématique pour la caractéristique [23] courant-tension est donné par

$$I = I_{PH} - I_D - \frac{V+I.R}{R_p} \quad (2.1)$$

$$I_D = I_0 \left( \exp \left[ \frac{q}{m.k.T_c} (V + I.R_s) - 1 \right] \right) \quad (2.2)$$

**V** : Tension des ortie de la cellule.

**R<sub>s</sub>**: Résistance série

**I** : Courant des ortie de la cellule.

**R<sub>p</sub>**: Résistance parallèle

**I<sub>PH</sub>**: Courant photo-généré ou photo-courant(A)  
1.6\*10<sup>-19</sup>(c)

**q**: : La charge électrique

**I<sub>0</sub>**: Courant des maturation de la diode(A)  
1.38\*10<sup>-23</sup>

**K** : Constant de Boltzmann

**T<sub>c</sub>**: Température absolue de fonctionnement de la jonction (K°)

**m** : Facteur d'idéalité de la diode (**m** ∈ [1,2]),La valeur typiquement **m**= 1, 2

En pratique, l'équation peut être simplifiée, dans le cas d'une cellule solaire de bonne qualité, à : [23]

La résistance a une valeur assez élève. Donc terme

$$\left( \frac{V+I.R}{R_p} \right) = 0 \quad (2.3)$$

L'expression

$$\left( \exp \left[ \frac{q}{m.k.T_c} (V + I.R_s) - 1 \right] \right) \gg 1 \quad (2.4)$$

Par conséquent. l'équation courant-tension de la cellule s écrit donc :

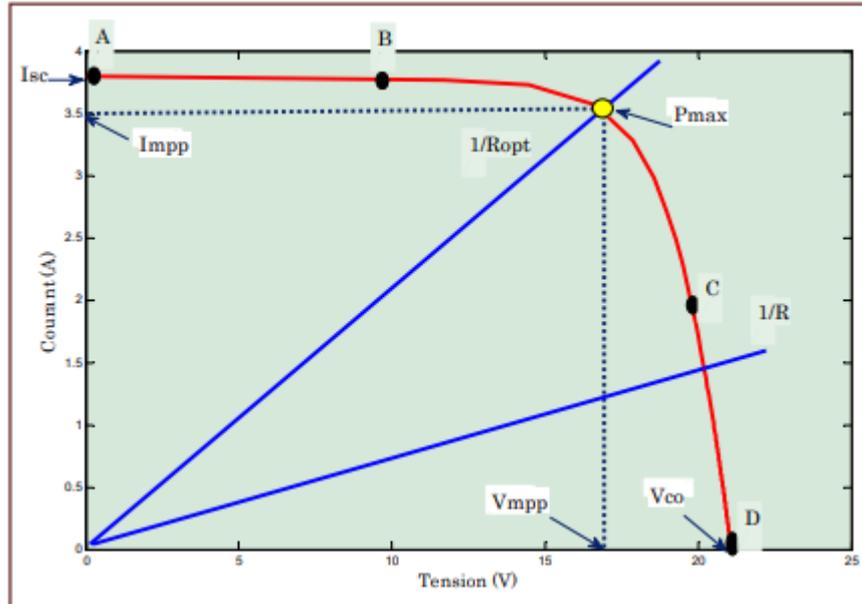
$$I = I_{PH} - I_0 \left( \exp \left[ \frac{q}{m.k.T_c} (V + I.R_s) \right] \right) \quad (2.5)$$

La montre la caractéristique courant-tension(I-V)d'un cellule PV a une

Température fixée,**T<sub>c</sub>** et à une certaine ambiante irradiation **G<sub>A</sub>**

Si une résistance série variable R connectée au terminale de la cellule, le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de la courbe **I-VV** et la caractéristique

**I-VV** de la charge. La caractéristique de la charge résistive est une droite avec  $I/V=1/R$ . Si la résistance est petite la cellule fonctionne dans la région **A** vers **B** seulement (comme une source de courant constant) et si la résistance est large, la cellule fonctionne dans la région **C** vers **D** de la courbe (comme une source de tension constant) [23].



**Figure 2.5** caractéristique I-V

### 2.4.1 Paramètres d'une cellule PV

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes **I-V**. [24]

### 2.4.2 Le courant de court-circuit ( $I_{CC}$ )

C'est la plus grande valeur de courant générée par la cellule sous les conditions de court circuit où  $V=0$ .  
(Pratiquement  $I_{CC} = I_{PH}$ )

### 2.4.3 Tension de circuit-ouvert ( $V_{CO}$ )

C'est la tension pour laquelle le courant débité par le générateur **PV** est nul (la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur **PV**). Son expression est déduite de l'équation suivante [24] :

$$V_{CO} = \left(\frac{m.k.T_c}{q}\right) \ln\left(\frac{I_{PH}}{I_0}\right) = V_{th} \cdot \ln\left(\frac{I_{PH}}{I_0}\right) \quad (2.6)$$

Avec

$$V_{th} = \left(\frac{m.k.T_c}{q}\right) \quad (2.7)$$

la tension thermique.

#### 2.4.4 La puissance maximale

C'est la puissance électrique maximale que peut fournir le module, qui est associé à une tension maximale  $V_M$  et à une intensité maximale  $I_m$ . Lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement **STC** standard ( $25^\circ$  et un éclairement de  $1000\text{W/m}^2$ ), on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête [24].

#### 2.4.5. Facteur de forme Ff

C'est le rapport de la puissance maximale qui peut être délivré à la charge sur le produit de ( $V_{CC}, V_{CD}$ )

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{CC} \times V_{CO}} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{I_{CC} \times V_{CO}} \quad (2.8)$$

Pour les cellules ayant moyen rendement le FF des valeurs d'ordre 0.7 à 0.85.

le facteur de forme FF diminue si la température augmente [24].

#### 2.4.6 L'efficacité de la conversion :

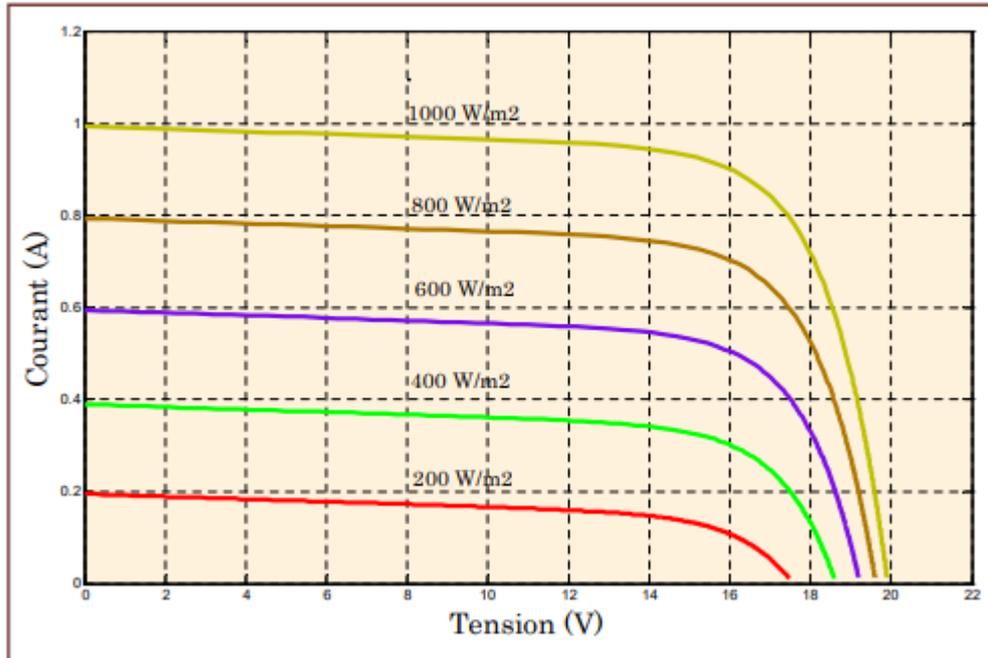
C'est le rapport de la puissance électrique maximale pouvant être extraite, à la puissance de rayonnement incident sur la surface  $X$  de la cellule.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{S \cdot G_a} \quad (2.9)$$

Avec  $P_{INC}$  est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique [24].

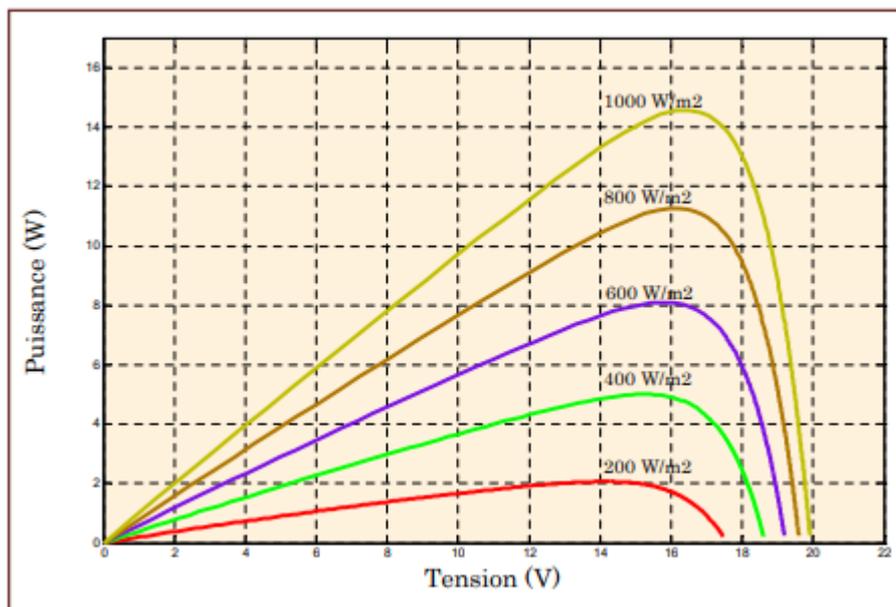
### 2.5 Facteurs affectant la cellule photovoltaïque

#### 2.5.1 Influence de l'éclairement:



**Figure 2.6 :** L'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I= f(V)$

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La **figure** (2.6) représente la caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes. Le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement [28].



**Figure 2.7 :** L'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P= f(v)$

**La figure** (2.7) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la

tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P(V)$

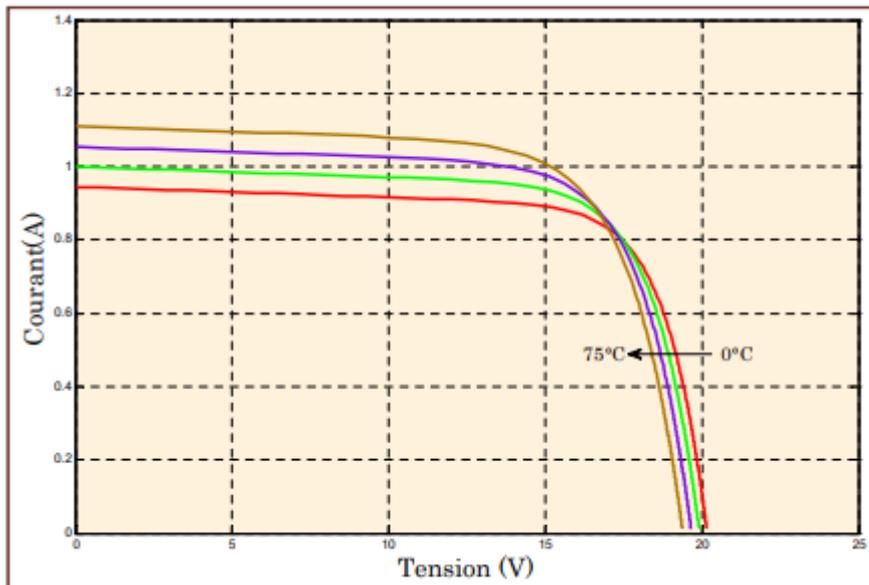
### 2.5.2 Influence de la température

L'influence de la température est importante et a des conséquences pour la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques. La température est un paramètre essentiel puisque les cellules sont exposées aux rayonnements solaires, susceptibles de les échauffer. De plus, une partie du rayonnement absorbé n'est pas convertie en énergie électrique, il se dissipe sous forme de chaleur ; c'est pourquoi la température de la cellule ( $T_c$ ) est toujours plus élevée que la température ambiante  $T_a$  [28].

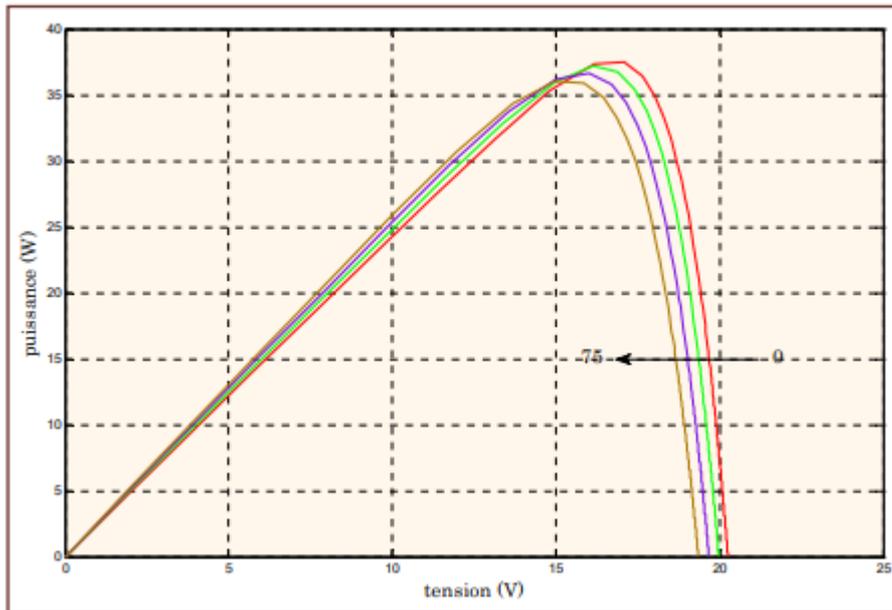
$$T_c = T_a + \frac{E_m}{800} (TUC - 20) \quad (2.10)$$

avec:

$E_m$ : éclairement moyenne ( $W/m^2$ )  $TUC$ : température d'utilisation de la cellule ( $c$ )



**Figure 2.8:** L'influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$



**Figure 2.9 :** L'influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$

**La figure (2.9),** montre l'influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$ . Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique  $I=f(V)$ .

Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution.

**La figure (2.9)** illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$  [24].

## 2.6 Les différentes technologies des cellules PV :

Le rendement des cellules PV dépend principalement des matériaux constitutifs, la plupart des recherches se dirigent dans ce domaine, car c'est l'élément qui freine jusqu'à maintenant la production photovoltaïque et sa répartition à grande échelle. Les technologies des cellules solaires se sont développées de manière très diverses [26].

### 2.6.1 Cellule en silicium poly cristallin

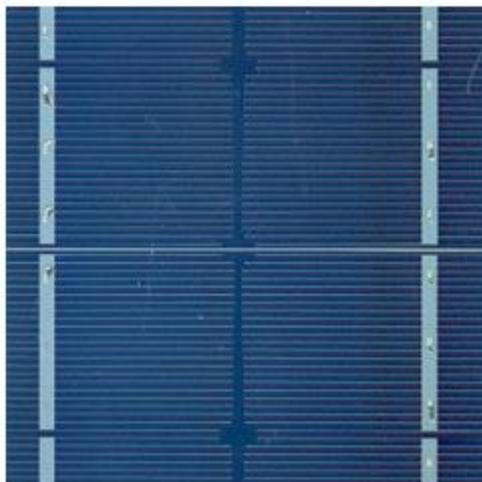
Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.



**Figure 2.10** Cellule en silicium poly cristallin

### 2.6.2 Cellule en silicium monocristallin

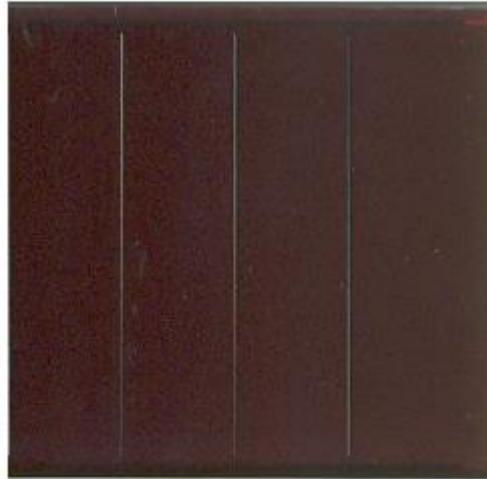
Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme [26] .



**Figure 2.11** Cellule en silicium monocristallin

### 2.6.3 Cellule silicium amorphe en couche mince

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé ou marron. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires".



**Figure 2.12** Cellule silicium amorphe en couche mince

#### **2.6.4 Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS**

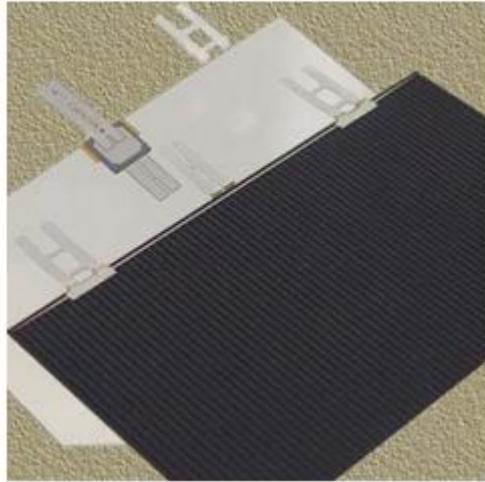
Les cellules CIS représentent une nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces, de type CIS (cuivre, indium, sélénium) ou CIGS (cuivre, indium, gallium et sélénium). Les matières premières nécessaires à la fabrication de ces cellules sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques (bien que ce dernier soit déjà très abondant sur terre). De plus, leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couche mince [26].



**Figure 2.13** Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS

#### **2.6.5 Cellule multi jonction**

Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion [26].



**Figure 2.14** Cellule multi jonction

## **2.7 Classification d'un système solaire photovoltaïque**

Les systèmes PV sont composés selon les exigences en trois types :

### **2.7.1 Autonome**

On dit qu'un système PV est autonome si la charge est passive (exemple : lampes, les moteurs, etc.). Le système PV autonome est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autres sources d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries ou autres moyens de stockage pour une utilisation durant les périodes de la non disponibilité de l'énergie solaire (par exemple les périodes nocturnes, les périodes non ensoleillées). Les systèmes PV autonomes servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, en îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau (dans certains cas) .

En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique. À l'heure actuelle, c'est dans les endroits isolés, loin d'un réseau électrique et où les besoins en énergie sont relativement faibles (généralement moins de 10KWc) [27].

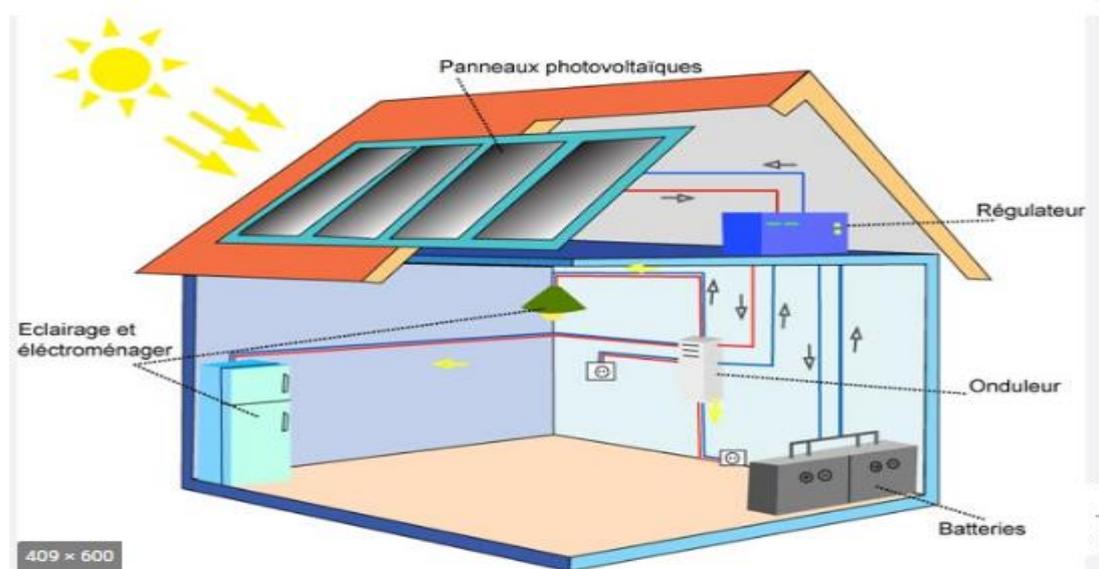


Figure 2.15 : Exemple de la structure d'un système PV autonome

### 2.7.2 Les systèmes solaires hybrides

gènèrent de l'énergie de la même manière qu'un système solaire conventionnel, mais utilisent des onduleurs et des batteries hybrides spéciaux pour stocker l'énergie pour une utilisation ultérieure. Cette capacité à stocker de l'énergie permet à la plupart des systèmes hybrides de fonctionner également comme une alimentation de secours en cas de panne d'électricité, similaire à un système UPS.

Traditionnellement, le terme hybride faisait référence à deux sources de production telles que l'énergie éolienne et solaire, mais dans le monde solaire, le terme «hybride» désigne une combinaison de stockage d'énergie solaire et d'énergie qui est également connectée au réseau électrique [28].



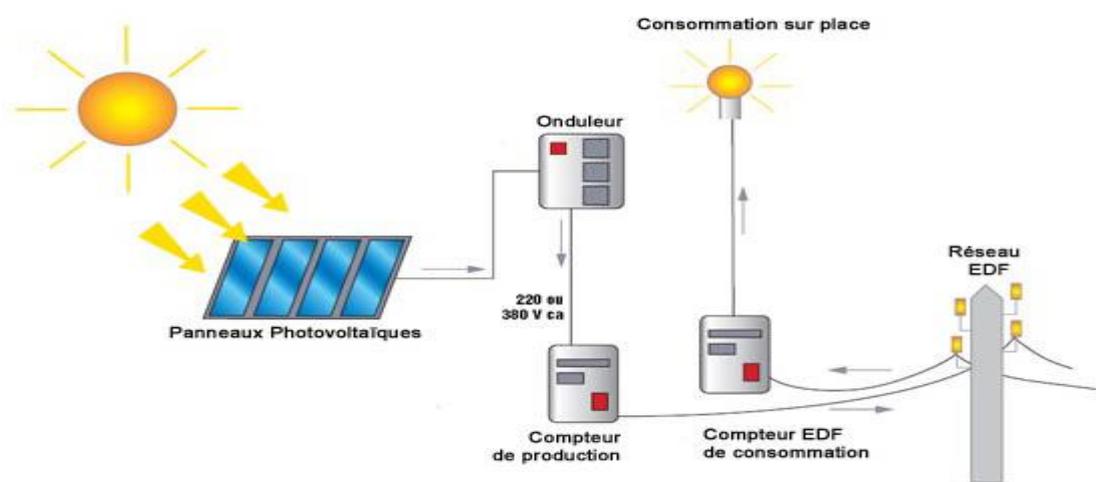
Figure 2.16 : Exemple de la structure d'un système PV hybride

### 2.7.3 Système PV raccordée au réseau

Une installation PV peut être connectée en parallèle avec le réseau d'électricité.

Les panneaux solaires sont connectés en série pour former des « strings », eux même reliés à un onduleur. La tâche de l'onduleur est de transformer le courant continu sortant des panneaux en courant alternatif. Chaque onduleur est choisi en fonction de la puissance des panneaux et peut accueillir un ou plusieurs strings .

Si la consommation locale est supérieure à la production de l'installation PV, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs [29].



**Figure 2.17** : Exemple de la structure d'un système PV raccordée au réseau

## 2.8 Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution.

Dans le passé, les réseaux de distribution se comportaient comme des éléments passifs dans lesquels les flux de puissance s'écoulaient de manière unidirectionnelle du poste source vers les consommateurs finaux. Du fait de l'insertion des productions décentralisées, les flux de puissance et les tensions sont impactés non seulement par les charges mais aussi par les sources. Par suite de ces spécificités techniques des installations photovoltaïques, le raccordement des systèmes PV au réseau peut avoir des impacts importants sur son fonctionnement. Les influences les plus significatives des systèmes PV sur le réseau de distribution sont les suivantes [28].

## 2.9 Influence sur la qualité de l'énergie

### 2.9.1 Injection d'harmoniques de courant

La présence d'interfaces électronique de puissance peut injecter des harmoniques de découpage au réseau si les onduleurs ne sont pas munis de filtres efficaces. Les onduleurs actuels contribuent tout de même à l'augmentation des harmoniques de courant car ils fonctionnent le plus souvent à puissance réduite (un appareil fonctionnant à puissance réduite ne peut fournir la même qualité de courant qu'à puissance nominale), ainsi les THD sont plus importants. Les conséquences de ces harmoniques peuvent être instantanées sur certains appareils électroniques : troubles fonctionnels (synchronisation, commutation), disjonctions intempestives, erreurs de mesure sur des compteurs d'énergie.

### **2.9.2 Injection de courant continu au réseau**

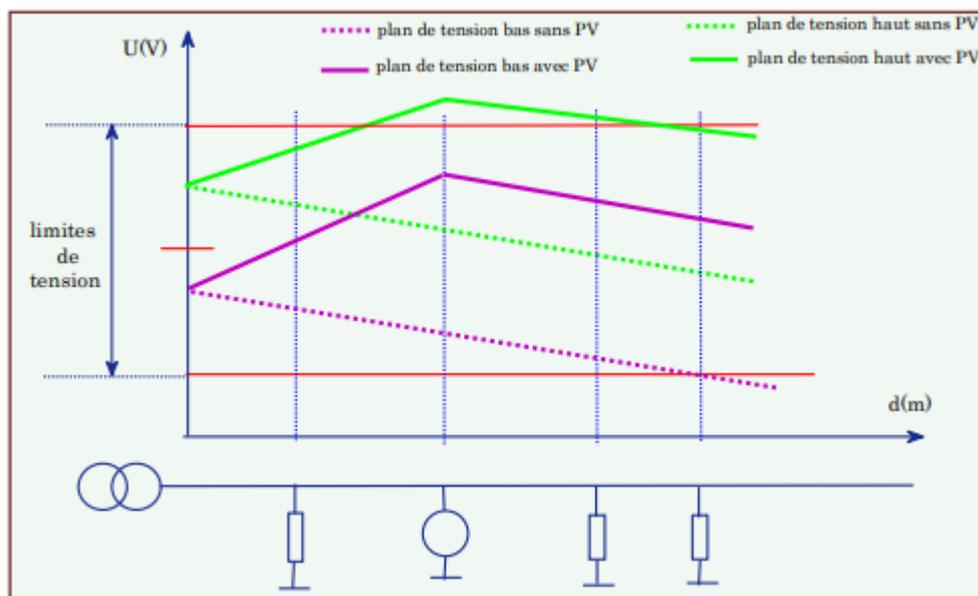
Une étude réalisée en Espagne montre que les onduleurs actuels (avec transformateur haute fréquence et avec ou sans transformateur basse fréquence) du marché européen injectent une composante continue dans le réseau. La présence de courants DC dans les réseaux de distribution peut affecter le bon fonctionnement des dispositifs de coupure différentiels, créer des erreurs sur les compteurs d'énergie, affecter la durée de vie des composants du réseau, notamment à travers une augmentation de leur corrosion et enfin contribuer à une saturation des transformateurs [28].

### **2.9.3 Déséquilibre entre phases**

L'insertion des systèmes PV engendre un déséquilibre entre phases en cas d'utilisation d'onduleurs monophasés. Si la puissance produite n'est pas correctement répartie entre les 3 phases d'un même système PV triphasé, alors ce système va contribuer à déséquilibrer le réseau BT.

### **2.9.4 Influence sur le plan de tension**

La présence de générateurs PV a une influence sur le plan de tension et sur les dispositifs de réglage du réseau. La tension varie en fonction des injections de puissances active et réactive sur le réseau. En particulier pendant une période de fort ensoleillement et de faible consommation, la tension de certains nœuds du réseau peut dépasser le seuil admissible. Une étude de l'université d'agriculture et technologie de Tokyo montre que, dans la localité d'Ota City qui concentre quelques **550** installations PV, l'injection d'énergie sur le réseau fait croître la tension jusqu'à un seuil provoquant le découplage de certains systèmes, notamment en fin de semaine lorsque la consommation est faible [28].



**Figure 2.18:** Exemple de variations de tension sur un réseau BT en fonction de la présence de production PV

## 2.10 Filtrage du système électrique

Le filtre est un élément électrique qui effectue le traitement du signal et l'élimination des impuretés. En d'autres termes, il atténue certaines composantes du signal et en laisse passer d'autres.

### 2.10.1 Le filtre actif

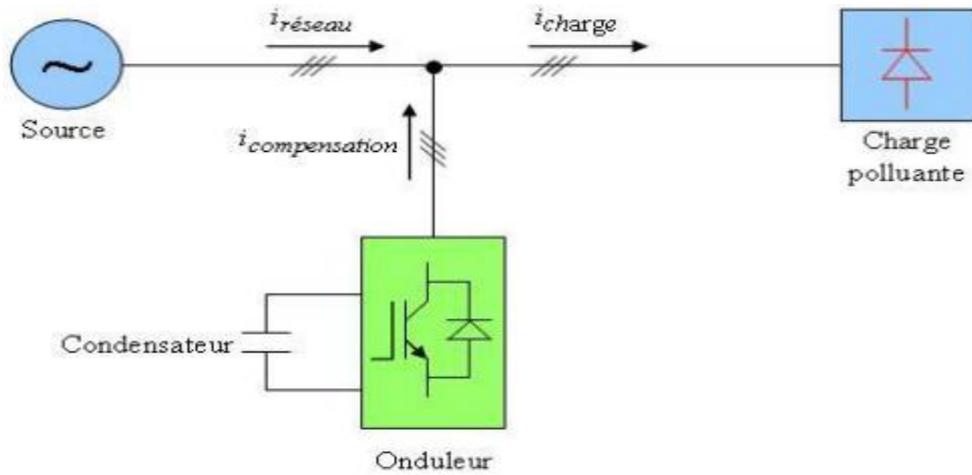
Le filtre actif est un convertisseur de puissance agissant comme une source de courant ou de tension il permet à neutraliser l'effet d'une perturbation en injectant une grandeur (courant ou/et tension) égale à la perturbation mais de phase opposée. Il existe trois grandes familles des filtres actifs, à savoir les filtres actifs parallèles (FAP), séries (FAS) et hybrides [32].

#### 2.10.1.1 Filtre actif parallèle

Il est appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution **figure 2.25**. Il est habituellement commandé comme un générateur de courant. Son principe est d'injecter dans le réseau électrique des courants harmoniques  $I_{inj}$  égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau  $I_s$  soit sinusoïdale et en phase avec la tension simple correspondante. Ainsi, il empêche les courants harmoniques, réac

$I_{fs}$  et déséquilibrés de circuler à travers l'impédance du réseau. Par conséquent, Il améliore

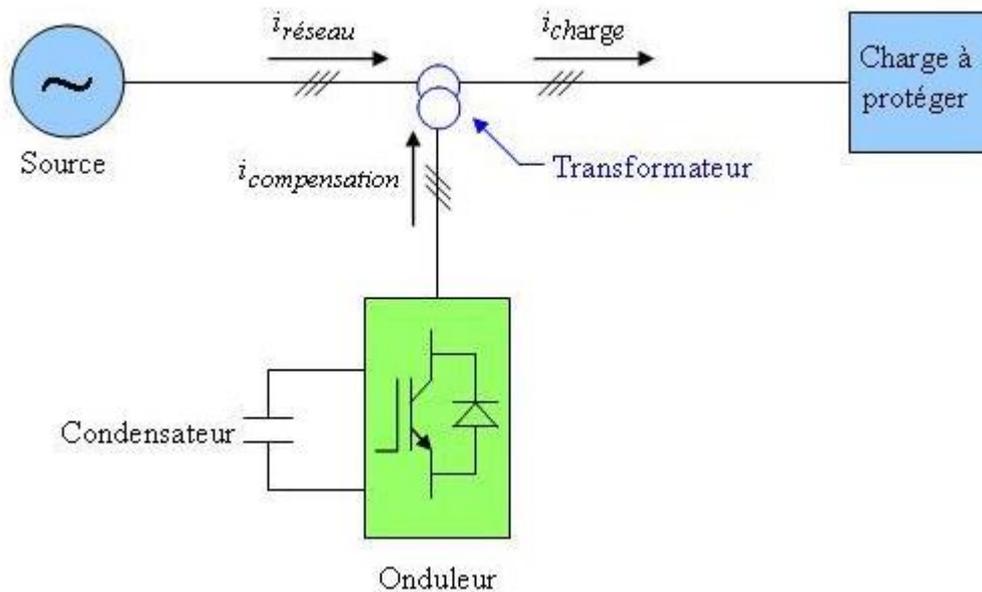
le taux de distorsion en courant et en tension [30].



**Figure 2.19:** Montage du filtre actif parallèle

### 2.10.1.2 Filtre actif série

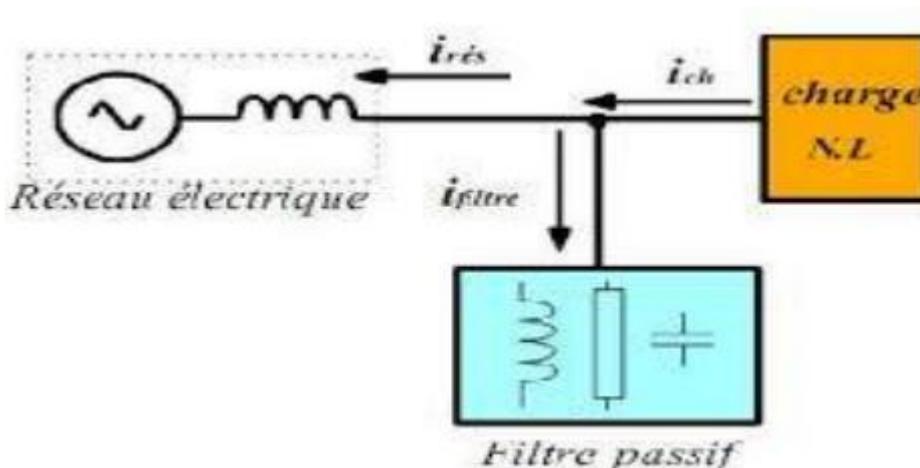
Ce filtre fournit une tension harmonique de même amplitude et en opposition de phase avec la tension harmonique venant de la charge non linéaire. Ce type des filtres est utilisé pour la compensation de toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension. Il est monté en série sur le réseau à travers un transformateur comme le montre la figure (I-9). En revanche, ce dispositif ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge [32].



**Figure 2.20:** montage du filtre actif série

### 2.10.2 Filtrage passif

Le principe d'un filtre passif est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à dériver les courants harmoniques et à diminuer les tensions harmoniques là où c'est nécessaire. Le dimensionnement de ces filtres est effectué de sorte que son impédance soit très faible à la fréquence de l'harmonique à éliminer. Il existe deux classes de filtres passifs (résonant, amorti) permettant de réduire les harmoniques [33]. La figure I- 8 montre le raccordement d'un filtre passif.



**Figure 2.21:** raccordement d'un filtre passif.

### 2.10.3 Filtre actif hybride

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas on connectera en parallèle ou en série des filtres passifs pour compenser les harmoniques prépondérants. Plus qu'elle permet d'optimiser les coûts, cette structure permet aussi d'améliorer les formes d'ondes. [ 34] De nombreuses configurations existent combinant éléments passifs et filtre actif série ou parallèle. On distingue alors plusieurs types

Corrélation entre filtres actifs et passifs dont les plus étudiés sont :

- ❖ Filtre actif série avec filtres passifs parallèles.
- ❖ Le filtre actif séquentiel est connecté en série avec des filtres parallèles passifs.
- ❖ Le filtre actif en parallèle avec le filtre passif en parallèle [ 35].

## 2.11 Conclusion

Dans la littérature, de nombreux travaux ont porté sur l'étude des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau électrique dont le signal peut être pollué et inadapté. D'après ce que nous avons présenté au cours de ce chapitre, il semble que la solution moderne basée sur

des filtres actifs parallèles et série avec leurs combinaisons est la meilleure à ce jour, pour tous les types de perturbations qui peuvent apparaître dans le réseau électrique.

## **Chapitre 3: Modélisation et commande du système** **(*FAP-PV*)**

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons la structure générale du filtre actif parallèle connecté au système photovoltaïque, et cette structure est divisée en deux parties, la partie puissance et la partie commande du variateur où la partie puissance de ce système se compose d'un onduleur, d'un filtre de couplage et un système photovoltaïque et la partie commande est constituée de trois blocs de commande, la limitation des courants harmoniques, la régulation de la tension du bus DC, et la commande de l'onduleur.

L'objectif de ce chapitre est de comprendre le fonctionnement de ce système et en particulier la théorie de la méthode de détermination des courants harmoniques et la méthode de contrôle de la puissance maximale du générateur photovoltaïque.

### 3.2 Principe de fonctionnement d'un filtre actif parallèle

Le système se compose généralement d'un réseau électrique, une charge non linéaire qui produit des harmoniques et consomme de l'énergie réactive et le filtre de puissance active pour éliminer ces harmoniques. Le circuit de l'identification de distorsion du courant sépare le courant harmonique du courant de charge, qu'il est inversé pour produire un signal de commande afin de compenser le signal de courant harmonique, de sorte que le circuit de commande de l'onduleur génère des impulsions de commutation et l'onduleur produit un courant de compensation, qui suit sa référence. Par conséquent, le courant de réseau ne contient que la composante fondamentale, de sorte que la fonction de compensation de l'harmonique est réalisée [20]. Si le filtre actif doit à la fois compenser le courant harmonique et l'énergie réactive, il est nécessaire d'ajouter uniquement le composant réactif du courant de charge au signal de compensation du courant [20].

### 3.3 Structure du Filtre actif parallèle

Le SAPF est une structure de tension connectée en parallèle au réseau. Il est composé essentiellement de deux parties, une partie de puissance et une partie de commande [20], comme le montre la **figure 3.1**

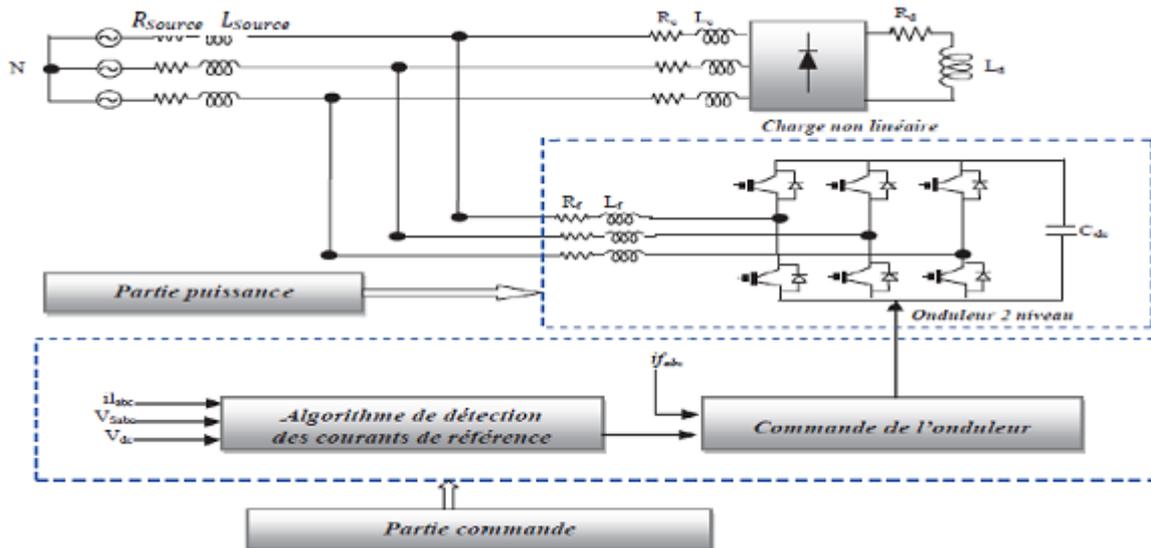


Figure 3.1 Structure d'un filtre parallèle

### 3.4 Onduleur

L'onduleur triphasé est constitué d'interrupteurs bidirectionnels en courant. Ils sont réalisés par des semi-conducteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture (IGBT, Thyristor, GTO) montés en antiparallèle avec une diode. Pour cette structure, on doit respecter les contraintes suivantes :

- ❖ a un instant donné, un seul interrupteur d'un même bras doit conduire afin d'éviter tout court-circuit de la source de tension ;
- ❖ le courant de ligne doit toujours trouver un chemin possible d'où la mise en antiparallèle de diodes au niveau des interrupteurs.[1]

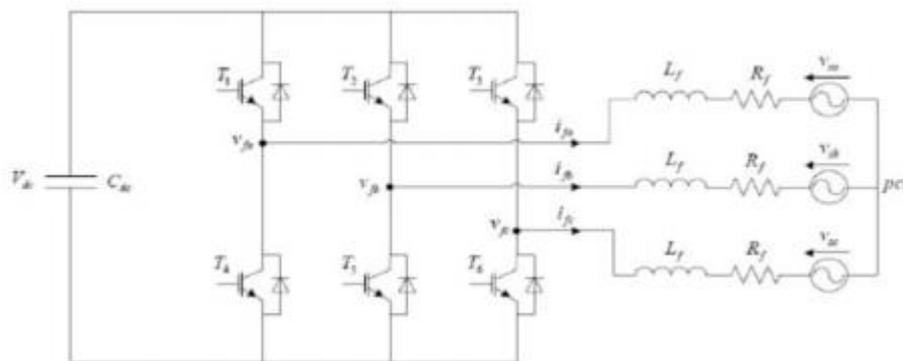


Figure 3.2: Onduleur.

On constate que la fermeture et l'ouverture des interrupteurs dépend de l'états des signaux de commande Sa, Sb et Sc qui peuvent prendre chacune deux valeurs 0 ou 1; comme définit

ci-dessous. [1].

$$S_a = \begin{cases} 1 & \text{T1 fermé et T4 ouvert} \\ 0 & \text{T1 ouvert et T4 fermé} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$S_b = \begin{cases} 1 & \text{T2 fermé et T5 ouvert} \\ 0 & \text{T2 ouvert et T5 fermé} \end{cases} \quad (3.2)$$

$$S_c = \begin{cases} 1 & \text{T3 fermé et T6 ouvert} \\ 0 & \text{T3 ouvert et T6 fermé} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$u_{ab} = v_{fa} - v_{fb} \quad (3.4)$$

$$u_{bc} = v_{fb} - v_{fc} \quad (3.5)$$

$$u_{ca} = v_{fc} - v_{fa} \quad (3.6)$$

$$v_{fa} = \frac{u_{ab}}{3} - \frac{u_{ca}}{3} \quad (3.7)$$

$$v_{fb} = \frac{u_{bc}}{3} - \frac{u_{ab}}{3} \quad (3.8)$$

$$v_{fc} = \frac{u_{ca}}{3} - \frac{u_{bc}}{3} \quad (3.9)$$

Les tensions  $v_{fa}$ ,  $v_{fb}$  et  $v_{fc}$  sont référencées par rapport au neutre du réseau et vérifient les équations suivantes

$$\begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} + R_f \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

On suppose que les trois tensions du réseau soient équilibrées et sachant que la somme des courants injectés par l'onduleur est nulle, on peut écrire :

$$v_{sa} + v_{sb} + v_{sc} = 0 \quad (3.11)$$

$$i_{fa} + i_{fb} + i_{fc} = 0 \quad (3.12)$$

Donc on peut déduire la relation suivante

$$v_{fa} + v_{fb} + v_{fc} = 0 \quad (3.13)$$

A partir de la relation (II-2) et (II-5) nous obtenons

$$\begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2s_a - s_b & -s_c \\ -s_a & 2s_b - s_c \\ -s_a - s_b & 2s_c \end{bmatrix} \frac{v_{dc}}{3} \quad (3.14)$$

Ainsi, on pourra exprimer huit cas possibles de la tension de sortie de l'onduleur, comme il

est indiqué dans le **tableau 3.1** [1].

Vecteur	$s_{a1}$	$s_{b1}$	$s_{c1}$	$s_{f1}$	$s_{fb}$	$s_{fc}$
$v_0$	0	0	0	0	0	0
$v_1$	1	0	0	$2v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$
$v_2$	1	1	0	$v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$	$-2v_{dc}/3$
$v_3$	0	1	0	$-v_{dc}/3$	$2v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$
$v_4$	0	1	1	$-2v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$
$v_5$	0	0	1	$-v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$	$2v_{dc}/3$
$v_6$	1	0	1	$v_{dc}/3$	$-2v_{dc}/3$	$2v_{dc}/3$
$v_7$	1	1	1	0	0	0

**Tableau 3.1:** tension de sortie d'un onduleur (commande MLI vectorielle)

### 3.5 Description de la partie de commande

Le contrôle-commande d'un filtre actif parallèle est mise en œuvre en trois étapes :

- ❖ la première étape ; la tension de réseau et le courant de charge sont détectés à l'aide d'un capteur de mesures ;
- ❖ la deuxième on détermine le courant de référence à partir d'une méthode d'identification approuvée [2].
- ❖ la troisième étape de commande ; les signaux de commutation de semi-conducteur de l'onduleur du FAP sont générés ont utilisant l'un des techniques de contrôle connus [3].

### 3.6 Identification des courants harmoniques

Les méthodes d'identification des grandeurs harmoniques sont classées dans deux domaines, fréquentiel et temporel [5]. La première est basée sur la transformée de Fourier de la tension ou du courant non sinusoïdal pour en extraire les harmoniques de

compensation. Cet algorithme présente la difficulté de nécessiter beaucoup de calcul surtout lorsque on augmente le nombre d'harmoniques à éliminer ; il en résulte un temps de réponse élevé [6].

La deuxième approche est basée sur la comparaison instantanée des grandeurs de compensation harmonique de référence, sous forme de tension ou de courant, aux grandeurs harmoniques réels. Beaucoup de méthodes entrent dans cette famille, notamment la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.

On distingue des méthodes d'extraction globale (tous les harmoniques à compenser sont présents dans la référence) et sélective (les harmoniques à compenser sont choisis et limités) [7]. Le choix de la méthode dépendra des objectifs fixés : compensation de tous les courants harmoniques, compensation sélective de certaines harmoniques, compensation des harmoniques dans des cas de configurations défavorables susceptibles de survenir dans les réseaux triphasés industriels car la tension du réseau est souvent perturbée ou déformée [8] , dans cette partie nous allons décrire.

### **3.7 Méthode des puissances actives et réactives instantanées (P-Q)**

Elle était utilisée afin d'éviter les difficultés dues lors de la mise en œuvre des méthodes fréquentielles. L'extraction des harmoniques est réalisée à partir de la puissance instantanée calculée en repère fixe. En utilisant la transformation de Concordia de tensions simples et courantes de ligne, afin de calculer les puissances réelles, imaginaires instantanées. Ensuite, pour déterminer les courants harmoniques de la charge, les puissances sont décomposées en une composante continue liée au fondamental, et l'autre alternative liée aux harmoniques. Afin de ne garder que la composante alternative liée aux harmoniques de la puissance active instantanée et éliminer la composante continue (correspondant à la composante fondamentale) on utilise généralement, soit un filtre passe-haut (FPH), soit un filtre passe-bas (FPB), cette transformation est nécessaire si nous voulons éliminer facilement la composante continue. La **figure 3.3** montre le schéma de principe de cette méthode.[9].

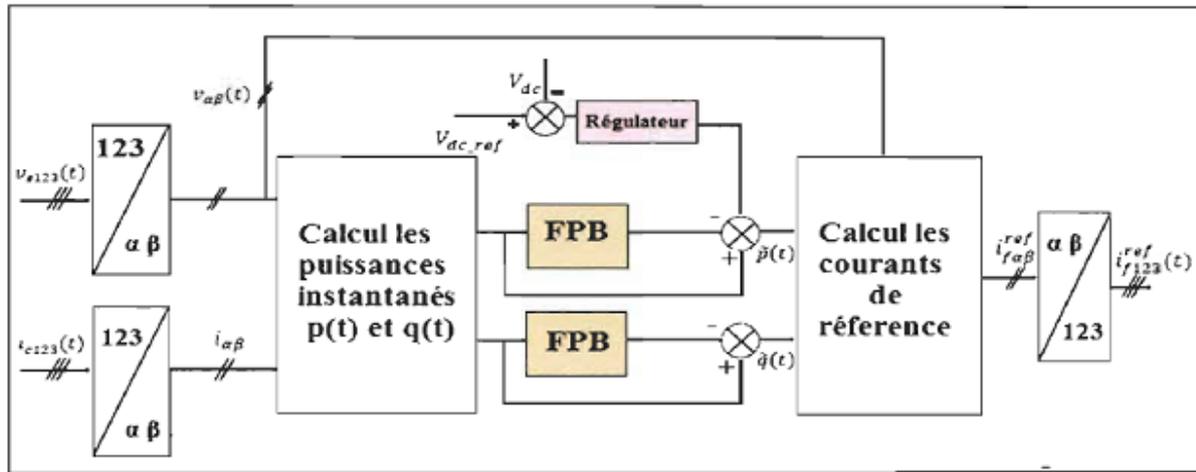


Figure 3.3 : Schéma de principe de la méthode d'identification instantanée.

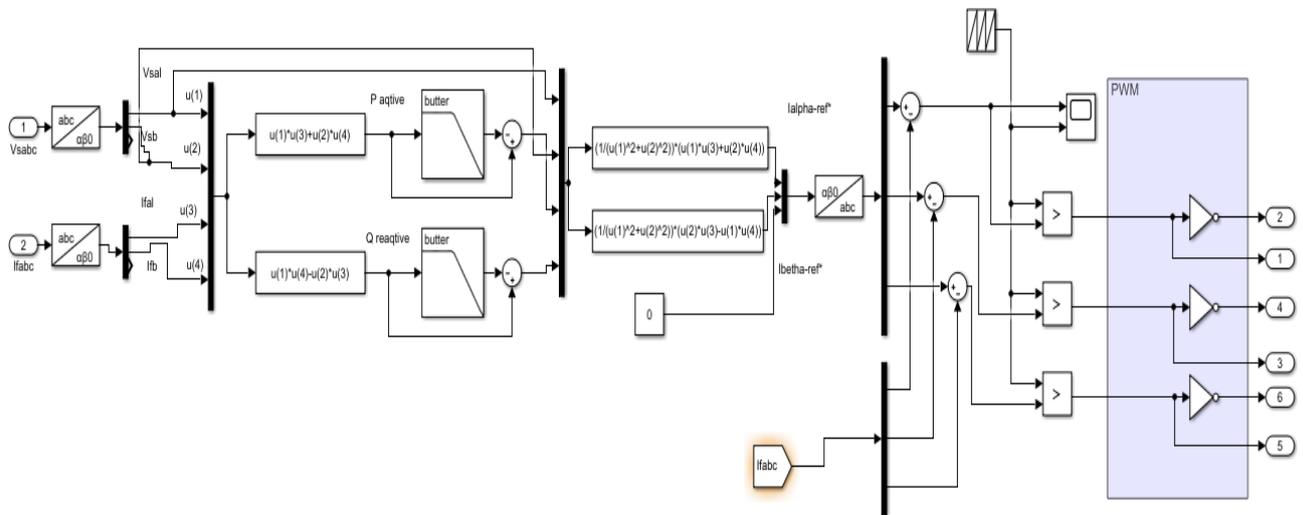


Figure 3.4 : Schéma algorithme PQ

### 3.8 Théorie de la méthode des puissances instantanées

On note respectivement les vecteurs des tensions simples d'alimentations  $v_s$  et les courants de charge d'un système triphasé équilibré  $i_s$  par :

$$v_s = \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix}, \quad I_c = \begin{bmatrix} I_{c1} \\ I_{c2} \\ I_{c3} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

La transformation des valeurs triphasées instantanées de la tension et du courant dans le repère des coordonnées  $\alpha \beta$  à l'aide de transformation de Concordia est donnée par les expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

la puissance active et la puissance réactive instantanées sont données par les relations suivantes :

$$p(t) = p_{\alpha\beta} = v_\alpha * i_\alpha + v_\beta * i_\beta \quad (3.18)$$

$$q(t) = q_{\alpha\beta} = v_\alpha * i_\beta - v_\beta * i_\alpha \quad (3.19)$$

Ces relations peuvent être écrites sous forme matricielle par :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Chacune de ces puissances est constituée d'une partie continue image de la puissance du fondamental, et d'une partie alternative image de la puissance liée aux ondulations ou harmoniques. Ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous

$$\begin{cases} p(t) = \bar{p} + \tilde{p} \\ q(t) = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (3.21)$$

$\bar{p}, \bar{q}$  Sont les composantes continues des puissances actives et réactives respectivement, correspondant à la composante fondamentale active et réactive du courant et de la tension [9].

$\tilde{p}, \tilde{q}$  Sont les composantes alternatives de la puissance active et réactive respectivement. Liées à la somme des composantes harmoniques du courant et de la tension. La compensation des harmoniques par le filtre actif se fait en général par les puissances suivantes  $p^* = \tilde{p}$ ,  $q^* = \tilde{q}$ .

Les courants de référence selon les axes ( $\alpha, \beta$ ) est exprimé à partir de l'équation en fonction des puissances à compenser comme le montre l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{d} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$d = v_\alpha v_\alpha - (-v_\beta v_\beta) = v_\alpha^2 + v_\beta^2 \quad (3.23)$$

**d= determinant**

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

En considérant les équations (3.19) et (3.20), nous pouvons séparer le courant dans le repère ( $\alpha$ - $\beta$ ) en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques.

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{courants harmonique}} \quad (3.25)$$

Cette expression montre que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) revient à séparer les composantes continues des puissances réelles et les imaginaires des composantes alternatives. Si l'objectif est de compenser juste les harmoniques du courant. Dans ce cas il faudrait compenser les composantes harmoniques du courant identifié. Nous éliminons alors la composante continue de la puissance active et réactive simultanément à l'aide d'un simple filtre passe-bas (FPB). Les courants de référence seront dans ces conditions comme suit :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

En tenant compte des pertes dans le filtre pc, on obtient :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} & -pc \\ \tilde{q} & \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

En appliquant la transformation inverse de Concordia on trouve les courants de référence produits par charge non linéaire comme suit ;

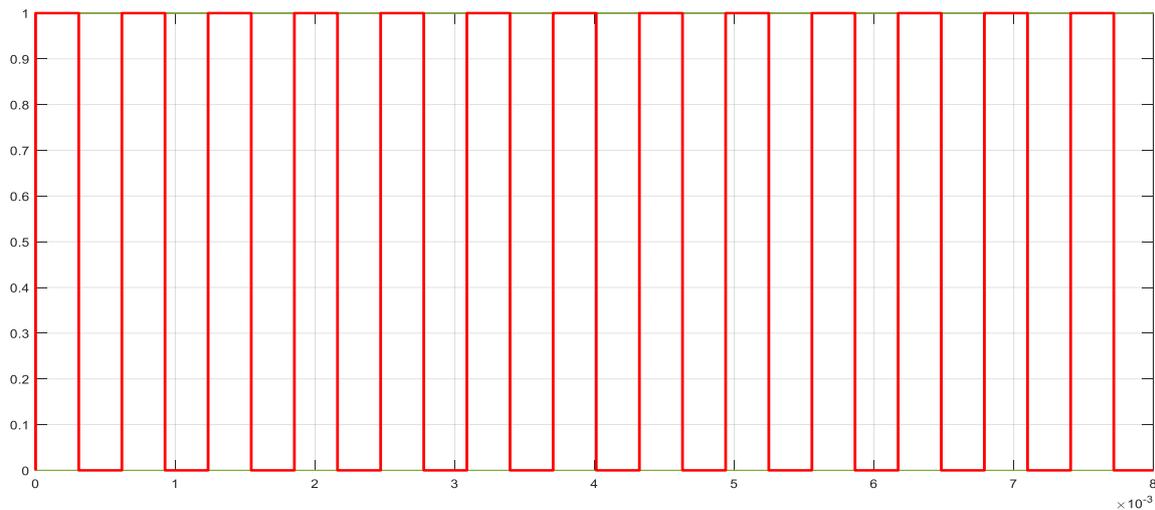
$$\begin{bmatrix} I_{Ref1} \\ I_{ref2} \\ I_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{p\alpha} \\ I_{p\beta} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Avec  $I_{p\alpha}, I_{p\beta}$  : courants perturbateurs calculés dans le repère ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) à partir des courants réactifs et harmoniques de la relation (3.24). [ 7 ]

### 3.9 Commande MLI

L'utilisation de la Pulse Width Modulation (MLI) ou Pulse Width Modulation (MLI) permet d'éliminer les harmoniques de premier ordre présents afin d'améliorer le signal, mais cette

technique ne résout pas totalement le problème des harmoniques[12].



**Figure 3.5** signal Commande MLI

### 3.10 Taux de distorsion harmonique THD

Le taux de distorsion est un paramètre qui définit globalement la déformation de la grandoeur alternative.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n y_n^2}}{y_1} * 10 \quad (3.25)$$

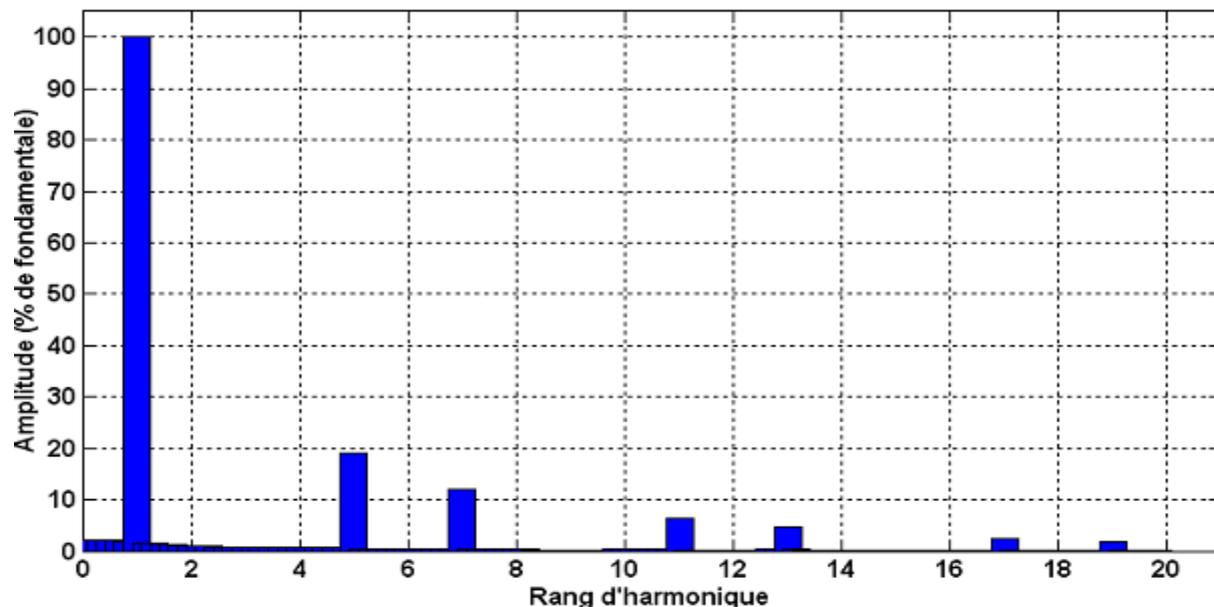
$y_1$ : La valeur efficace de la composante fondamentale (du courant ou de la tension).

$y_n$ : Les valeurs exactes des différentes composantes harmoniques (du courant ou de la tension).

THD : total harmonica distorsions

### 3.11 Spectre d'harmonique

C'est la représentation de l'amplitude des harmonique en fonction de leur rang, la valeur des harmoniques étant généralement exprimée en pourcentage du fondamental par un histogramme **Figure (3.8)**.



**Figure 3.6:** Le spectre des harmoniques du courant de charge polluante

### 3.12 Charges linéaires et non linéaires

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales :

les récepteurs linéaires (ou charges linéaires)

les récepteurs non -linéaires (ou charges non-linéaires)

Une charge est dite **linéaire** courant sinusoïdal. Cependant, le courant et la tension peuvent être déphasés.

les charges linéaires couramment utilisées sont constituées de résistances, de capacités et d'inductance, alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme [13].

Une charge est dite **non-linéaire** si l'on alimente une charge non linéaire par une tension sinusoïdale, le courant circulant dans cette charge n'est plus sinusoïdal. Ce courant peut être décomposé en une composante fondamentale et des harmoniques [13].

### 3.13 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la structure générale de l'ensemble de notre système, nous avons commencé par sa partie puissance, le filtre actif parallèle au système photovoltaïque, puis consacré une grande partie aux différents blocs de contrôle, détermination des courants harmoniques, contrôle de l'onduleur et puissance maximale technologie de suivi pour GPV.

## **Chapitre 4: Résultats de simulation et discussions**

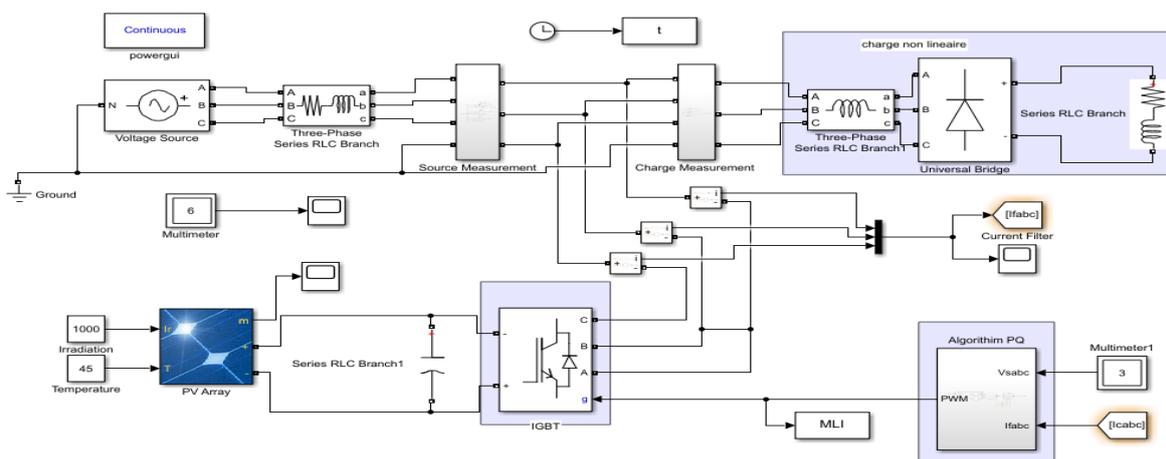
## 4.1 Introduction

Dans ce travail, nous utilisons le logiciel Simulink Matlab pour analyser les formes d'onde du courant absorbé par la charge polluante, et nous nous intéressons particulièrement au taux de distorsion harmonique de ce courant et aux traitements utilisés pour l'améliorer.

Notre travail est basé sur une configuration parallèle, à l'aide d'un onduleur, la tension triphasée est contrôlée par MLI, alimenté par un panneau photovoltaïque à tension constante, un interrupteur triphasé est utilisé entre le filtre et le réseau pour faciliter l'étude avant et après le filtrage, on modélise ensuite le filtre actif parallèle, puis l'ensemble de la charge polluante, le réseau électrique et enfin le filtre actif de puissance. Nous allons montrer le chemin du courant source et charge et le courant injecté par le filtre actif suivi du THD après compensation.

Afin d'évaluer et de vérifier les performances et le contrôle du filtre actif parallèle FAP, notre système illustré sur la figure se compose de :

- ❖ Alimentation à tension sinusoïdale équilibrée
- ❖ Filtre parallèle actif FAP
- ❖ Charge non linéaire
- ❖ un générateur photovoltaïque



**Figure 4.1** Schéma globale système photovoltaïque connecté avec un filtre active parallèle (FAP).

## 4.2 Simulation de système sans filtres

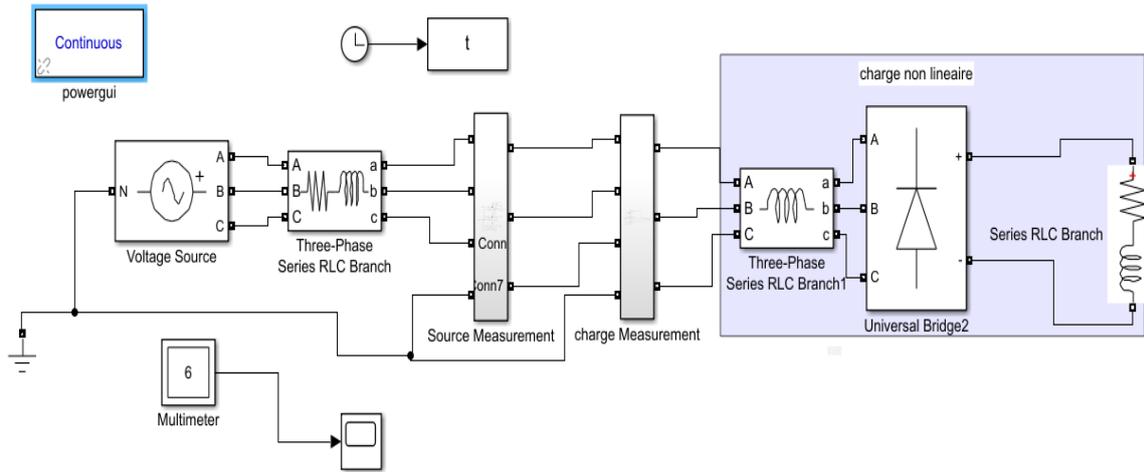


Figure 4.2: réseau électrique avant de connecter le filtre actif en parallèle.

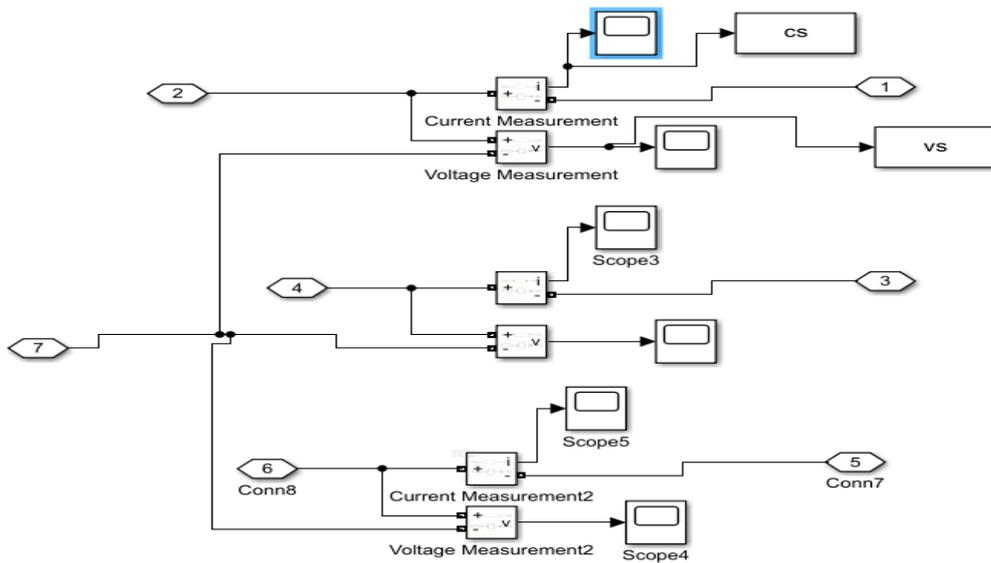


Figure 4.3: Système de mesure de tension et de courant à la source

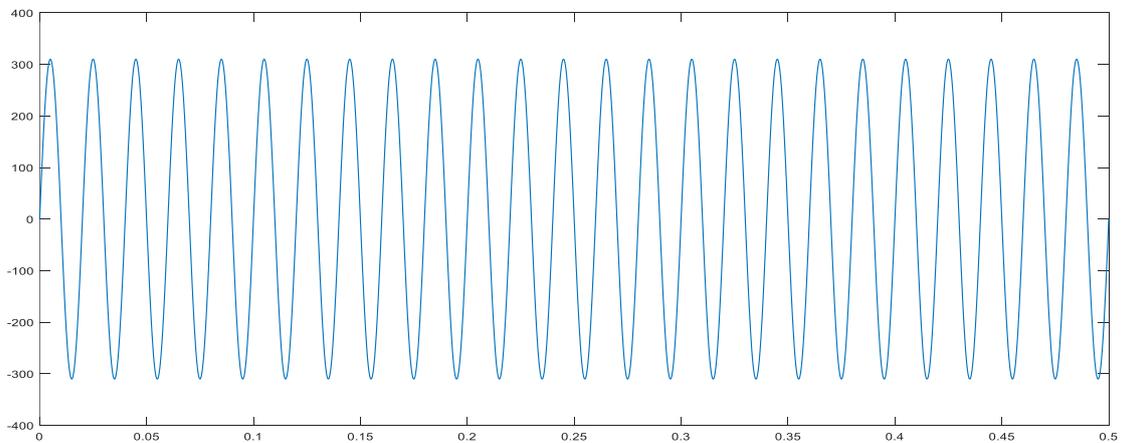


Figure 4.4: Tension de source

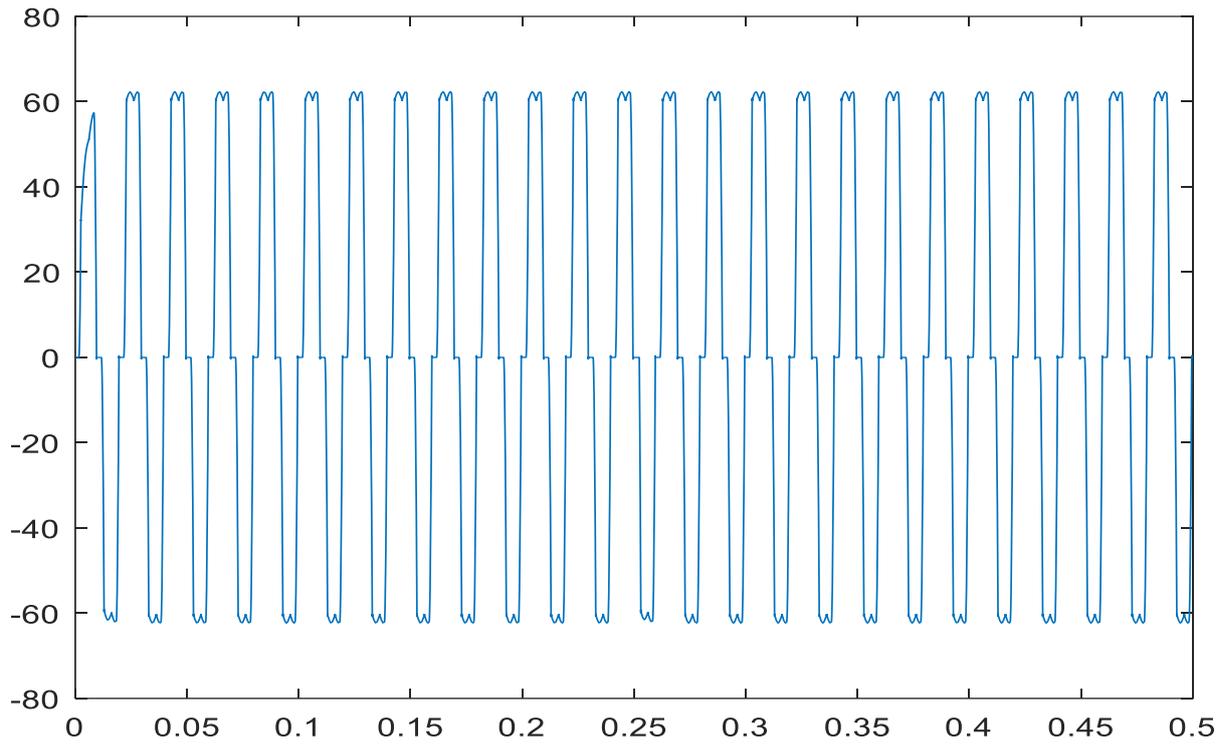


Figure 4.5 : Courant de source

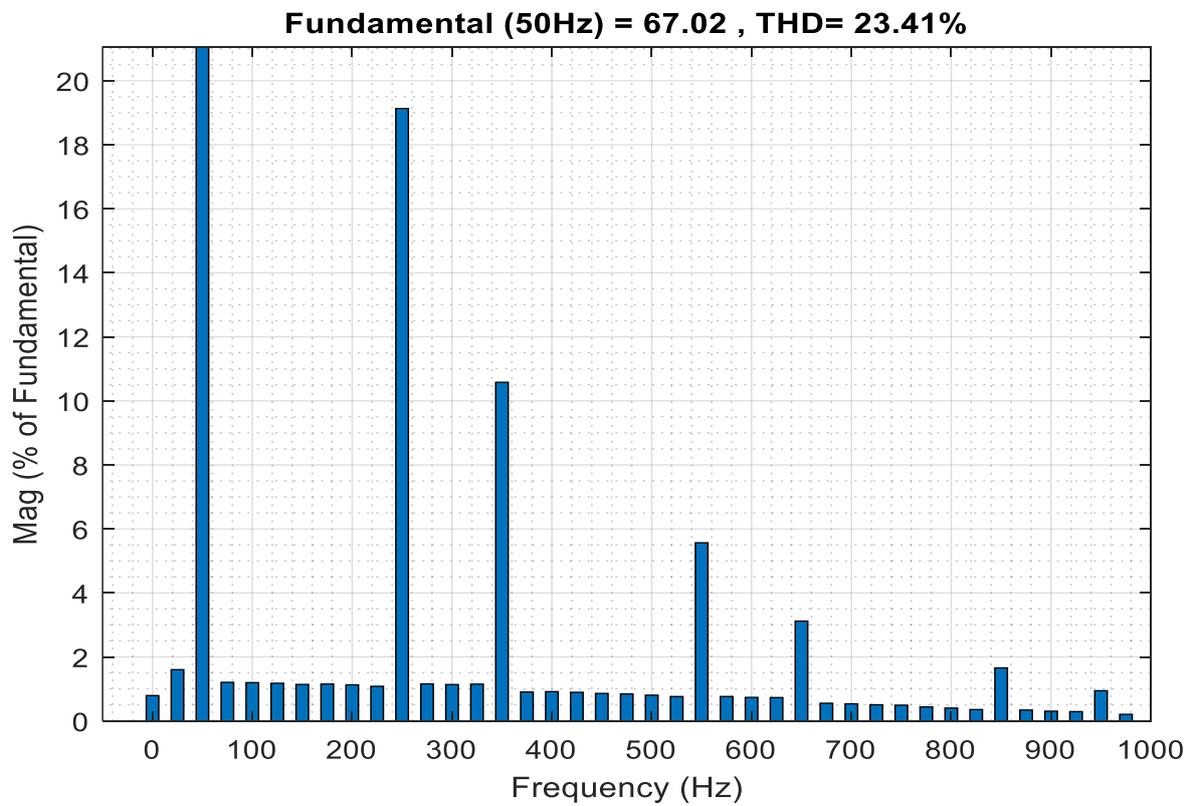


Figure 4.6 : Formes d'ondes et spectre d'harmonique du courant de source

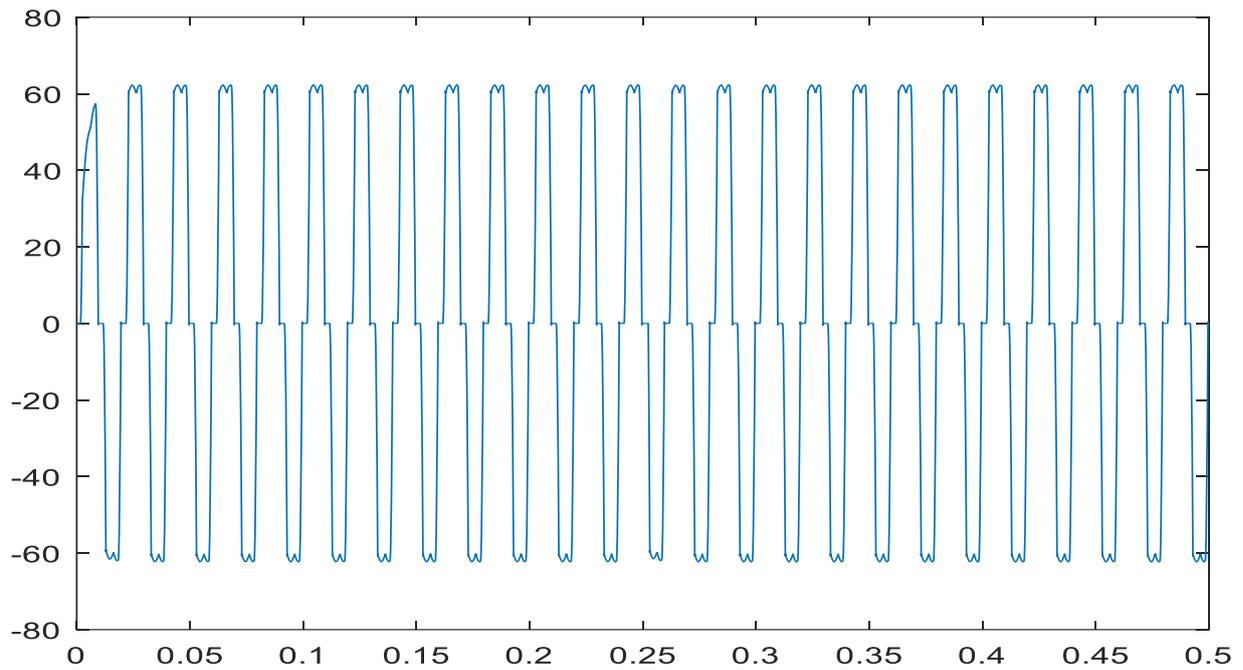


Figure 4.7 : Courant de charge

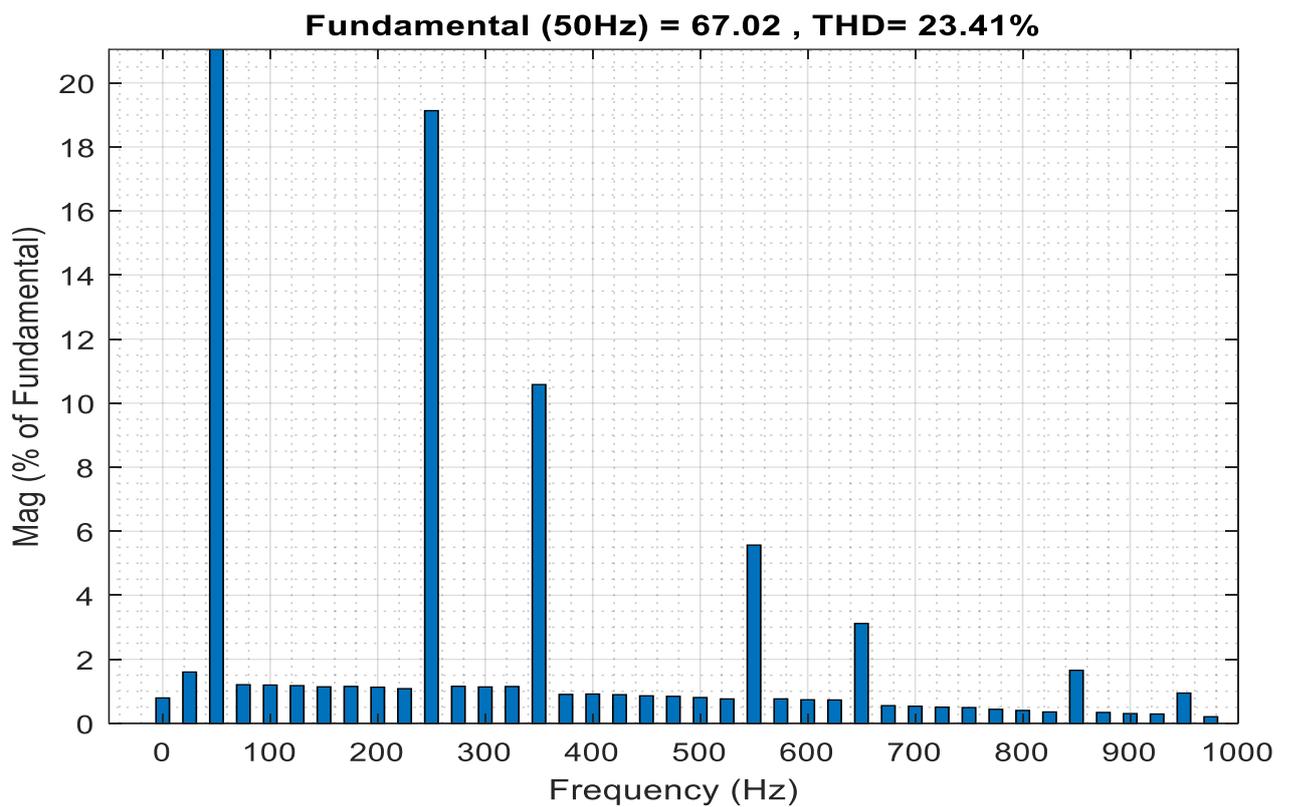


Figure 4.8: Formes d'ondes et spectre d'harmonique du courant de charge

#### 4.2.1 Interprétation des résultats

Nous avons simulé l'ensemble du système sans filtre pour évaluer la qualité de

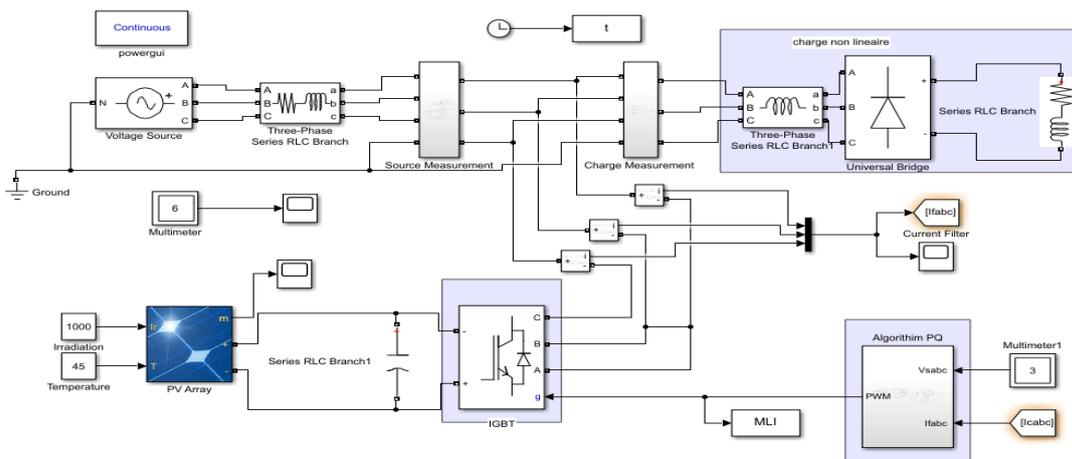
l'alimentation (courant).

Après avoir affiché les résultats obtenus dans les figures 4.5 et 4.7, nous trouvons ce qui suit:

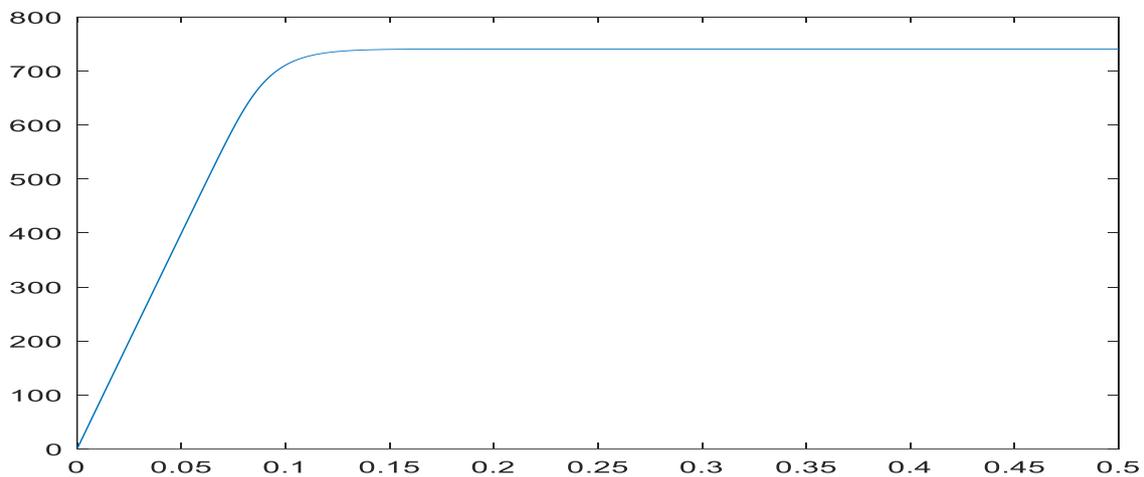
- Les courants de source et de charge ont la même amplitude avec  $THD = 23.41 > 5\%$ . Voir les figures (4.5) et (4.7).

Par conséquent, nous pouvons conclure que nous avons une énergie électrique de mauvaise qualité et donc le système électrique est pollué et il est recommandé de le nettoyer.

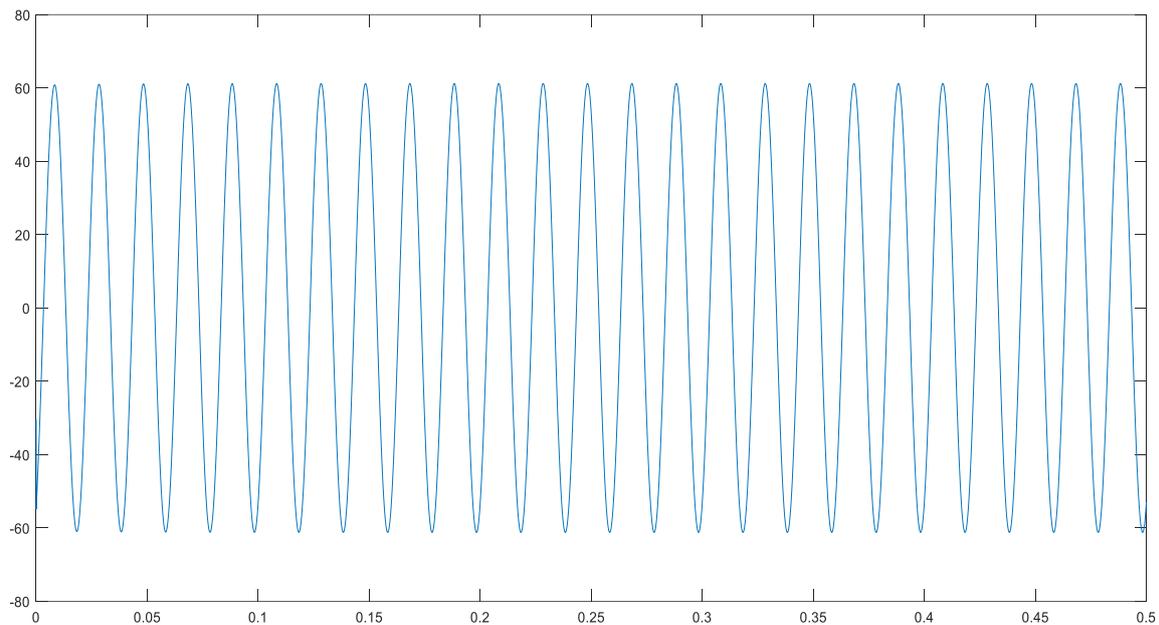
### 4.3 Simulation du système avec des filtres



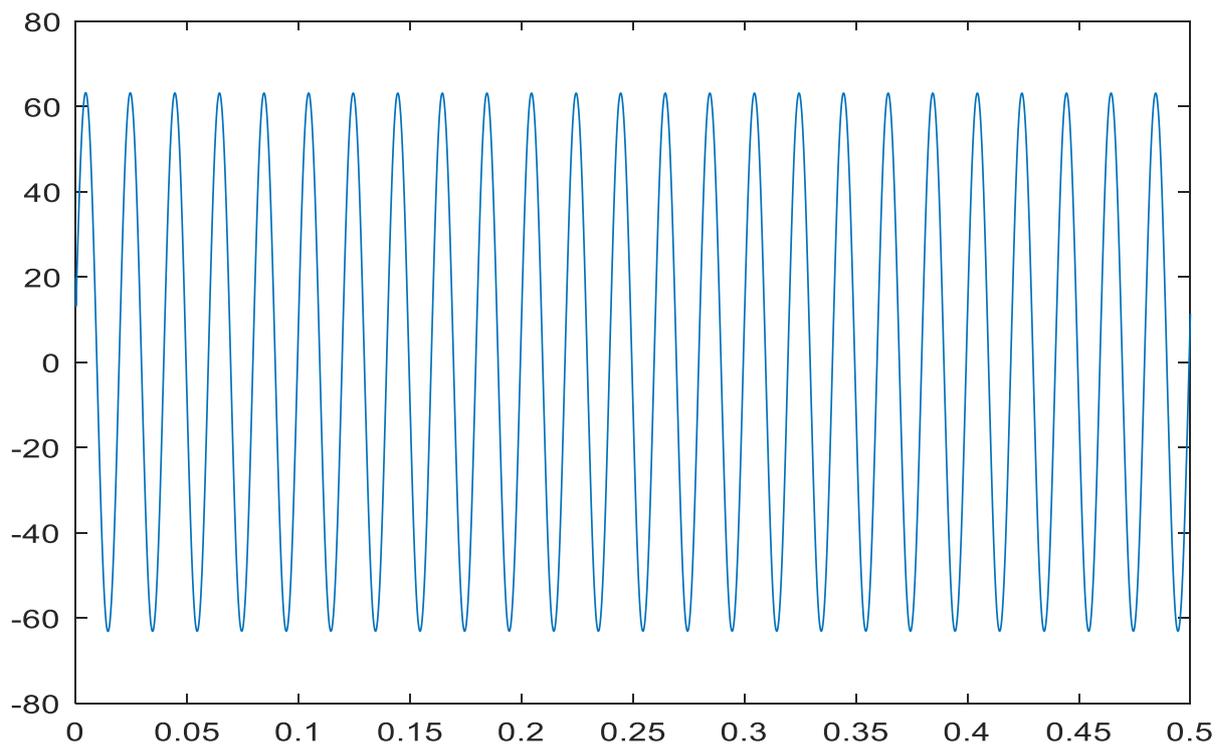
**Figure 4.9** Schéma globale système photovoltaïque connecté avec un filtre active parallèle(FAP).



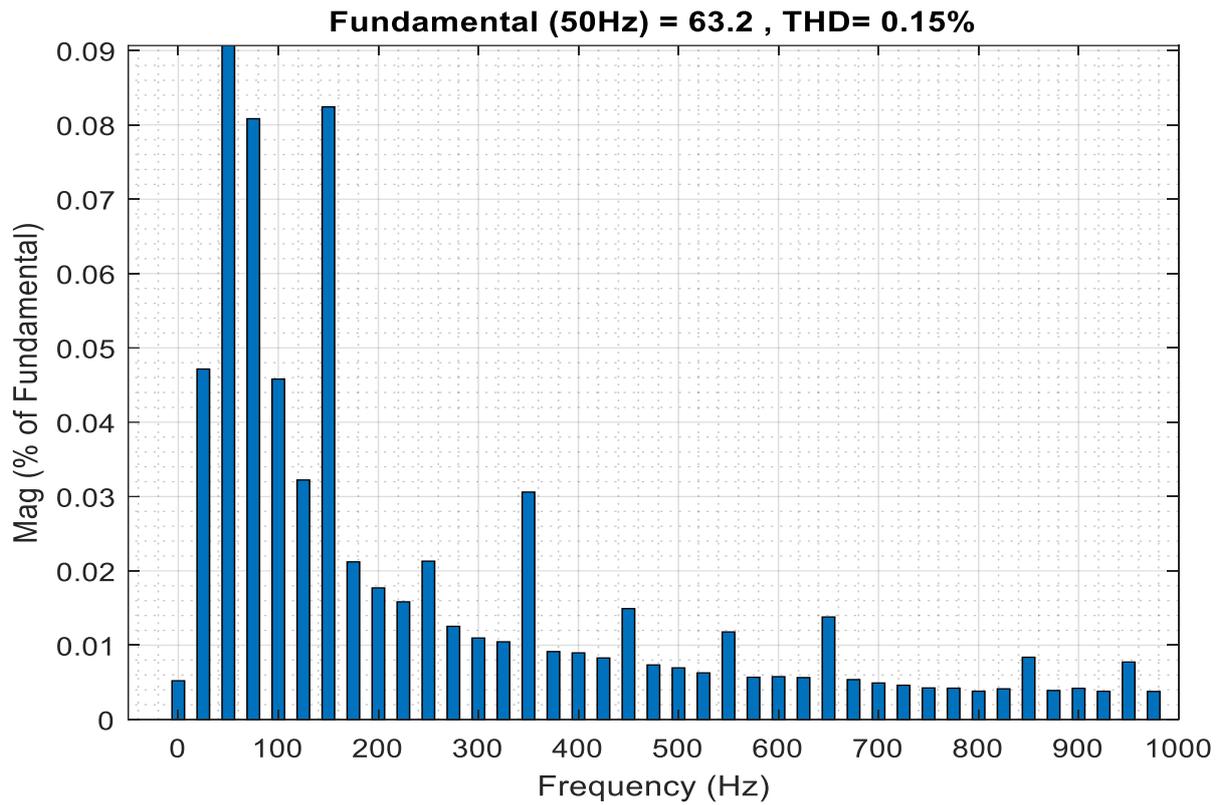
**Figure 4.10** : Tension Vdc



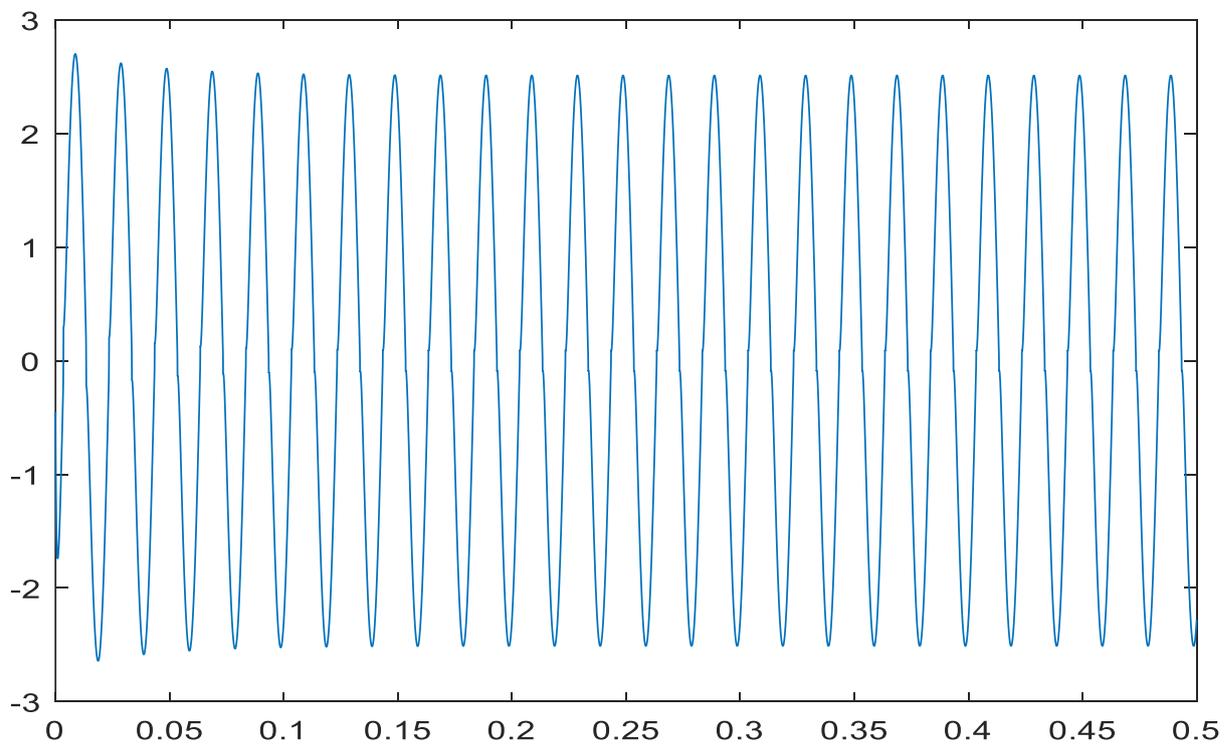
**Figure 4.11 :** Tension de source.



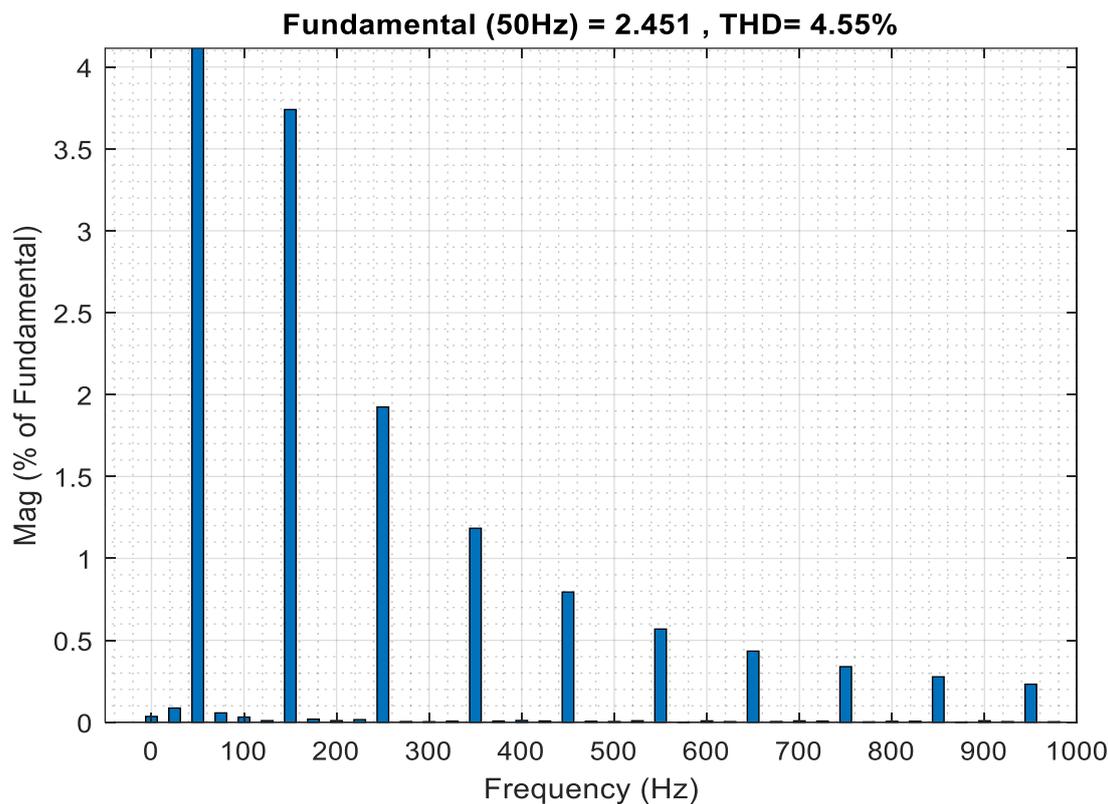
**Figure 4.12 :** Courant de source



**Figure 4.13 :** Formes d'ondes et spectre d'harmonique du courant de



**Figure 4.14 :** Courant de charge



**Figure 4.15 :** Formes d'ondes et spectre d'harmonique du courant de charge

### 4.3.1 Interprétation des résultats

Selon les résultats de simulation obtenus, la Fig. 4,5 vues. L'effet des harmoniques sur les courants de source avant filtrage montre que leur THD est de 23,41 %. Conformément à la figure 4.6

Une fois le filtre actif connecté en parallèle, la figure 4.12 apparaît et semble presque dépourvue d'harmoniques, tandis que le THD est de 0,15 %.

De même, la figure 4.7 montre le courant de charge avant la parallélisations du filtre actif et la figure 4.14 montre le chiffre du courant de charge après la parallélisations du filtre actif et nous remarquons que le THD diminue jusqu'à une valeur de 4,55% Figure 4.15

Du coup, on peut dire que le FAP fait parfaitement son travail, puisque le THD n'est pas supérieur à 5%, les courants de source sont nettoyés, et des courants de compensation sont injectés de manière appropriée.

### 4.4 Conclusion

Une simulation de la structure proposée a été réalisée et les résultats obtenus ont été analysés et commentés. De ces résultats, nous avons conclu que le procédé de contrôle du filtre actif parallèle associé au générateur photoélectrique a prouvé son efficacité et sa

solidité, comme en témoigne le fait qu'il compense les courants d'harmoniques et de puissance réactive.

# Conclusion général

## Conclusion général

Dans notre travail nous avons présenté l'étude d'un système de compensation harmonique constitué d'un filtre actif en parallèle couplé à un générateur photovoltaïque GPV. Cette configuration est basée sur la combinaison d'une source d'énergie renouvelable, en particulier l'énergie photovoltaïque, avec le réseau de distribution électrique via une interface de filtre actif parallèle contrôlée par un contrôle direct de l'énergie, le tout afin de profiter des avantages des deux systèmes et ainsi assurer en même temps que l'énergie active générée par le GPV est injectée dans le réseau et améliore la qualité de l'alimentation au point de contact.

- ❖ Chp1 le premier chapitre était un aperçu du sujet, où les doutes ont été définis, ainsi que les énergies renouvelables, leurs types et leurs sources, et comment en tirer profit, en particulier l'énergie solaire, qui est liée à ce titre à travers le panneau photovoltaïque .
- ❖ Chp2, nous avons plongé plus loin pour identifier les éléments liés à l'étude, tels que les types d'incertitudes et de panneaux photovoltaïques, et pour choisir le type approprié parmi eux pour obtenir des performances élevées.
- ❖ Chp3 Dans ce chapitre, nous présentons la structure générale du filtre actif connecté au système PV en parallèle, en expliquant la partie puissance et la partie contrôle La partie puissance de ce système est composée d'un onduleur et d'un filtre de couplage, le système photovoltaïque et le contrôle Faisant partie de trois blocs de contrôle, le but de ce chapitre est de comprendre le fonctionnement de ce système et en particulier la méthode de détermination des courants harmoniques et la méthode de contrôle de la puissance maximale du générateur photovoltaïque.
- ❖ Chp4 Dans la dernière partie, nous avons essayé de réaliser une simulation dans l'environnement Matlab Simulink d'une centrale photovoltaïque connectée à un filtre actif en parallèle pour filtrer le courant du réseau électrique.
- ❖ Enfin, le filtrage actif parallèle est l'une des meilleures solutions pour

réduire les harmoniques de courant des réseaux électriques.

## Références bibliographiques

### Références bibliographiques

- [1] T. MAHNI, « Etude et conception d'un filtre actif parallèle triphasé à quatre fils en vue de sa commande par des méthodes d'intelligence artificielle », Thèse de doctorat en sciences, Université Mohamed Khider -Biskra, 2017.
- [2] S. CHENNAI, « Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs : Apport des techniques de kra, 2013.
- [3] HACHEME mohamed ben yamina abbes, Dépollution du réseau électrique en utilisant le filtre actif série à base d'une PLL floue, mémoire master (LMD), université Dr. Tahar Moulay de Saïda, 2019-2020.
- [4] AZZUZI Said Ghobni Ali nissesalem, étude et simulation d'un filtre actif parallele commandé par mode glissant memoire master academique ,universitéechahidhammalakhdar d'e ouad, 2021.
- [5] KHALED Zobaidi, ALI Aziz, compensation de l'énergie réactive et filtre les harmoniques par filtre actif, mémoire master académique, université echahidhamma Lakhdar
- [6] NEKKAR Djamel " contribution à l'étudedes stratégies de commande des filtres actifs triphasés", mémoire de magister, université de souk aharas ,2014.
- [7] NECIB Nour Eddine et hadj Ammar Azzedine, Amélioration de la qualité d'énergie électrique dans un réseau basse tension par un filtre actif parallèle, université Echahid hamma Lakhdar d'el oued, 2018.
- [8] GUENDOUD Djedjiga ; BelacelBillal, Filtrage actif de puissance, université mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou,mémoire fin d'études de master académique,2016. d'el-oued,20
- [9] BOUCHERITTE, « Convertisseurs multi niveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau», Mémoire de Magistère, Université de Biskra..
- [10] ABDAGHANI jaghbalat université mouloud Mammeri Tizi-Ouzou
- [11] Abdullah al -Aradi, un dossier sur le développement durable (renouvelable), les études et les lois, le Conseil de Shura, 30 janvier 42 (Janvier) 2012, P
- [12] INSTITUT de recherche appliquée, (ARIJ), Palestine,
- [13] Magazine taqat.energy
- [14] ARAAM article détail

- [15] Barahi Muhammad Hamza, Répertoire des projets d'énergie renouvelable dans le monde arabe, l'Organisation arabe pour l'éducation, la culture et la science, l'administration scientifique.
- [16] Suleiman Kawan , L'expérience de l'Algérie dans l'exploitation de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne.
- [17] Magazine alqabas.
- [18] Ihaddaden Seif eddine ,Bettache Amine. Etude et simulation d'un filtre actif parallèle alimenté par un système photovoltaïque. Mémoire de Master, Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2019.
- [19] MEDDOUR Yousef YAZI Zouhir ,Etude de raccordement d'un système photovoltaïques au réseau électrique ,Mémoire MASTER ACADEMIQUE ,université kasdi merbah ouarglauniversitaire kasdimerbah,2015.
- [20] Khoudrane Ismail. Etude d'un système de poursuite solaire pour les panneaux photovoltaïques. Département de génie mécanique. Université kasdi merbah – ouargla. 09/06/2014
- [21] Caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaïques.
- [22] A. Sahli, « Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau », Mémoire de Magistère, Université de Sétif 2012.
- [23] W. Boucheritte, « Convertisseurs multi niveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau », Mémoire de Magistère, Université de Biskra.
- [24] M. Makhlof, « Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque application au pompage », Mémoire de magister, université de Constantine 2006.
- [25] [ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaïques](http://ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaïques)
- [26] Vondalan du. solar système-d'installation
- [27] Dsnsolar introduction-to-hybrid-solar-system
- [28] Somabe services/installation-photovoltaïque-raccorde-au-réseau
- [29] T. Minh Chau Le, « Couplage Onduleurs Photovoltaïques et Réseau, aspects contrôle/commande et rejet de perturbations » Thèse de Doctorat, Université de Grenoble

France 2012.

[30] R. Merahi, « Modélisation d'un diapositif MPPT pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par les générateurs photovoltaïques », Mémoire de Magistère, Université de Annaba 2010 .

[31] BEN ALI Soufiane, BOUHANAK Saddam, " ETUDE ET SIMULATION D'UN FILTRE ACTIF PARALLEL A QUATRE FILS", Mémoire Master De Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued , 2015.

[32] Ghadbane Ismail ." Commande d'un filtre actif triphasé parallèle par différents régulateurs ", mémoire de MAGISTER 2011, Université de Mohamed Kheider Biskra.

[33] OUFKIR Badr-Eddine décembre 2017 université du Québec à Montréal filtrage d'harmoniques dans un réseau mixte photovoltaïque-électrique par estimation adaptative coupe-bande.

[34] Mémoire de magister, Université Badji Mokhtar Annaba, 2006 présenté par: Laid Zellouma « filtrage actif parallèle des harmoniques du courant génères par un pont redresseur triphasé non commande » .

[35] B. Singh, V. Verma, A. Chandra et K. Al-Haddad, « Hybrid filters for power quality improvement », Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, vol. 152, no 3, pp. 365– 378.

## Annexe

<b>Parties de system</b>	<b>Designation</b>	<b>Valeur</b>
Source	La tension efficace	<b>380 V</b>
	La fréquence	<b>50 Hz</b>
	La résistance	<b>4.5 <math>\Omega</math></b>
	L'inductance	<b>1 H</b>
Charge non linéaire	L'inductance	<b>5<sup>-4</sup> H</b>
	La résistance	<b>1 <math>\Omega</math></b>
	Tension diode	<b>0.7 V</b>
	Résistance <b>Rc</b>	<b>45 <math>\Omega</math></b>
	L'inductance <b>Lc</b>	<b>2.5<sup>-2</sup></b>
Filtre actif parallèle FAP	Résistance <b>Rs</b>	<b>20 <math>\Omega</math></b>
	Résistance <b>Ron</b>	<b>10 <math>\Omega</math></b>
Générateur photovoltaïque	Type de module	1Soltech 1 STH 215-P
	Nombre de cellules en parallèle (Np)	10
	Nombre de cellules en série (Ns)	22

