

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE  
N° :2017 / TS3ER 02/97/482



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE  
FILIERE : ELECTRONIQUE  
OPTION : TS3ER

**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique**

**Proposé et dirigé par :**

Dr. DJAZIA Kamel

**Réalisé Par :**

Tazia Mohammed el mabrouk  
Zikem Hossam

**Intitulé**

***Amélioration de la qualité d'énergie électrique  
issue d'un système photo voltaïque utilisant la  
méthode du courant de source maximum( $I_{smax}$ )***

**Soutenu devant le jury composé de :**

Dr. BELOUTI Adel	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Dr. DJAZIA Kamel	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Rapporteur
Mr. BENHAMADOUCHE Abdelouahab Emabrouk	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2016 /2017**

## *Remerciements*

*Nous tenons à remercier tout premièrement Allah le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces années.*

*Tout d'abord, nous tenons à remercier chaleureusement notre encadreur Dr. Kamel Djazia, pour avoir d'abord proposé ce thème, son encadrement, son suivi permanent, pour tous ses encouragements et discussions et ses précieux conseils*

*Merci pour sa grande disponibilité.*

*Nous remercions tous les professeurs du département d'électronique.*

*Nous voudrions remercier chaleureusement et respectivement tous ceux qu'ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de fin d'étude accepte nos grands et sincères remerciements.*

*Finalement, je tiens à exprimer mes reconnaissances à tous mes Amis et collègues*

*Merci à tous.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail*

*À ma chère mère, en lui exprimant mon amour, mon respect  
et vive gratitude pour sa patience, pour ses sacrifices tout  
les longs des années, qu'Allah la protège.*

*A mes frères et sœurs*

*A ma famille*

*A mes Amies*

*Tous mes collègues.*

# Nomenclature

## Symboles

$\alpha_h$  : Phase initiale de la tension harmonique d'ordre h,

$\beta_h$  : Phase initiale du courant harmonique d'ordre h,

$\phi_h$  : Déphasage de la tension harmonique d'ordre h sur le courant harmonique d'ordre h.

$F$  : Facteur de puissance.

$D$  : Puissance déformante.

$P, P_c$  : Puissance active (W)

$Q$  : Puissance réactive. (VAR)

$S$  : Puissance apparente. (VA)

$S_{eff}$  : valeur efficace

$I_1, I_h$  :: Valeur efficace du courant fondamental et du courant harmonique de rang h

$V_1, V_h$  : Valeur efficace de la tension fondamentale et de l'harmonique de rang h

$\alpha_1, \alpha_h$  : Déphasage du courant fondamental et du courant harmonique de rang h

$THD$  : Taux de distorsion de rang h.

$Fd$  : facteur de distorsion.

$\tau_h$  : rapport des puissances

$\tau_{hri}$  : rapport de puissance apparente

$S_1, S_2, S_3$  : signaux de commande .

$f_h$  : Fréquence de la composante harmonique de rang h (Hz).

$f_1$  : Fréquence de la composante fondamentale (Hz).

$\cos\phi$  : Facteur de puissance.

$\omega$  : pulsation fondamentale du réseau

$Z_{ccl}, Z_{cch}$  : Impédance de court-circuit à la fréquence fondamentale et du rang h

$L$  : Inductance (H).

$C$  : Capacité (F).

$R$  : Résistance ( $\Omega$ ).

$V_s$  : Tension simple de la source (V).

$i_c, i_{ch}$  : Courant de la charge (A)..

$i_f$  : Courant généré par le filtre actif (A).

$R_f, L_f$  : Résistance et inductance du filtre de sortie ( $\Omega, H$ ).

$R_d, L_d$  : Résistance et inductance de la charge ( $\Omega, H$ ).

$R_{Source}, L_{Source}$  : Résistance et L'indéance de source  
 $\Delta V_C$  : Variation de la tension aux bornes de la capacité C (F).  
 $C_{dc}$  : La capacité du bus continu. (F)  
 $e_a, e_b, e_c$  Tensions simples du réseau (V)  
 $V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$  : Tensions simples à l'entrée du pont redresseur(V) .  
 $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  : Courants débités par le réseau (A) .  
 $i_{cha}, i_{chb}, i_{chc}$  : Courants de charge (A) .  
 $i_{fa}, i_{fb}, i_{fc}$  : Courants du filtre(A).  
 $V_{dc}$  : Tension aux bornes de la capacité (V).  
 $V_L$  : Tension aux bornes de l'inductance de couplage  
 $V_{dc_{ref}}$  : Tension de référence aux bornes de la capacité (V).  
 $I_D$  : Courant de la jonction (A).  
 $E_g$  : Largeur de la bande interdite (eV) (1.1eV pour le Silicium).  
 $I$  : Courant photo-généré par la cellule photovoltaïque sous éclairément donné (A).  
 $I_o$  : Courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité (A).  
 $q$  : Charge de l'électron (C).  
 $R_S$  : Résistance série du cellule photovoltaïque ( $\Omega$ ).  
 $R_{sh}$ : Résistance parallèle ou shunt ( $\Omega$ ).  
 $m$  : Coefficient d'idéalité de la cellule photovoltaïque.  
 $k$  : Constante de Boltzmann (1,3810-23 J/K).  
 $T$  : Température absolue (K).  
 $V_{OC}$  : Tension à circuit ouvert (V).  
 $I_{sm}$  : courant de source maximum  
 $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  :courants de références instantanés de la source .  
 $\mu, \alpha$  :l'angle d'empiétement et l'angle de retard  
 $I_{sc}$  : Courant de court-circuit de la courbe de référence (A).  
 $P_m$  : Puissance maximale débitée par la cellule photovoltaïque (W).  
 $I_m$  : Courant maximal de la cellule photovoltaïque (A).  
 $V_m$  : Tension maximale de la cellule photovoltaïque (V).  
 $G$  : Eclairément global incident sur la cellule photovoltaïque (W/m2).  
 $S$  : Surface totale de la cellule photovoltaïque (m2).  
 $I_{PV}$  : Courant générateur photovoltaïque (A).  
 $V_{PV}$ : Tension du générateur photovoltaïque (V).

$N_p$  : Nombre de modules photovoltaïques associés en parallèle.

$N_s$  : Nombre de modules photovoltaïques associés en série.

$T_e$  : Période d'échantillonnage (s).

$V_{oc}$  : Tension de circuit ouvert.

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

$V_{MPP}, I_{MPP}$ : Tension et courant au point de puissance maximale (V), (A).

$T_s$ : Période de commutation (s).

$D$  : Rapport cyclique du commutateur.

$f$  : Fréquence du réseau (50Hz)

$\omega_a$  : Pulsation de résonance du filtre

$K_p, K_i$ : Gain de régulateur Proportionnel Intégral

## **Acronymes**

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion

PWM: Pulse Width Modulation

DPF : Taux d'ondulation (Displacement Power Factor)

VSI (Voltage Source Inverter)

CSI : Curent Source Inverter

AC/DC Conversion alternative continue

DC/DC Conversion continue continue

THD Total Harmonic Distortion

FP Facteur de Puissance

FAP Filtre Actif Parallèle

FAS : Filtre Actif Série

PI : Régulateur Proportionnel intégral

UPQC : Unified Power Quality Conditioner

SAPF: Shunt Actif Power Filter

LCL: filter based active rectifier

## **Lettres Grecques**

$\eta$  : Rendement d'une cellule photovoltaïque

$\alpha, D$  : Rapport cyclique

$\tau$  : Constante de temps

$\omega$  : Pulsation du réseau =  $2.\pi.f$  (rd/s)

$\varphi$  : Déphasage entre la fondamentale du courant de charge et sa tension.

# Sommaire

<b>Introduction Générale</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE</b>	
I. Introduction	3
I.1 Rayonnement solaire	4
I.1.1 Le rayonnement direct	4
I.1.2 Le rayonnement diffus	4
I.1.3 Le rayonnement réfléchi	4
I.1.4 Le rayonnement global	4
I.2 L'effet photovoltaïque	5
I.3 Principe de fonctionnement	5
I.4 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque	6
I.5 Paramètres d'une cellule photovoltaïque	7
I.5.1 Courant de court-circuit, $I_{sc}$	7
I.5.2 Tension de circuit ouvert, $V_{oc}$	7
I.5.3 Point de puissance maximale, $P_{max}$	8
I.5.4 Facteur de forme, FF	8
I.5.5 Rendement	9
I.6 Générateur photovoltaïque	9
I.7 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$	10
I.8 Influence de l'association série des modules PV	12
I.9 Influence de l'association parallèle des modules PV	13
I.10 Influence de l'association mixte (Série + Parallèle) des modules PV	14
I.11 L'adaptation entre un Générateur PV et une charge	15
I.11.1 Convertisseurs DC/DC	15
I.11.2 Structure avec hacheur et onduleur	15
I.12 Convertisseur de puissance(DC/DC) de système photovoltaïque	16
I.12.1 Hacheur série ou Buck (abaisseur de tension)	16
I.12.2 Hacheur parallèle (Convertisseur Boost )	17
I.12.3 Hacheur Buck-Boost	18
I.12.4 Le choix de convertisseur	19
I.13 Commande (MPPT) des convertisseurs DC/DC	20
I.13.1 Algorithme et Principe de commande	20
I.14 CONCLUSION	23
<b>CHAPITRE II : PERTURBATIONS HARMONIQUES ET SOLUTIONS DE COMPENSATION</b>	
II. Introduction	24
II.1 Qualité de l'énergie	24
II.1.1 Qualité de la tension	24
II.1.2 Qualité du courant	25
II.2 Perturbations dans les réseaux de distribution électrique	26
II.2.1 Les perturbations harmoniques	26
II.3 Sources des harmoniques et leurs effets	27

II.3.1	Sources harmoniques identifiables	28
II.3.2	Sources harmoniques non identifiables	28
II.3.3	Les effets (Conséquence des harmoniques)	32
II.4	Caractérisation des harmonique et leur effet sur l'onde de tension et de courant	33
II.4.1	Analyse des harmoniques	33
II.4.2	Le Facteur de puissance	36
II.5	Normes et réglementations	37
II.6	Solutions possibles pour réduire les harmoniques et améliorer la qualité de l'énergie	38
II.6.1	Solutions traditionnelles	38
II.6.2	Solutions nouvelles	41
II.7	Conclusion	44
<b>Chapitre III : Filtrage Actif Parallèle</b>		
	Introduction	42
III.2.	Principe de fonctionnement d'un Filtre Actif de Puissance	43
III.2.1	Mise en œuvre	43
III.2.2	Structure du Filtre Actif Parallèle	44
III.2.3.	Etudes de la partie puissance	48
III.2.4	Etude de la partie commande	53
III.2.5	Réglage De La Tension Continue De l'onduleur	49
III.3.	Dimensionnement Des Paramètres Du Filtre Actif Parallèle	54
III.3.1	Système de stockage d'énergie	54
III.3.2	Filtre de sortie	55
III.4.	Stratégies De Commande Du Filtre Actif Parallèle Triphasé	55
III.4.1	Détermination des Courants Harmoniques de Référence	55
III.4.2	Stratégie de contrôle du filtre actif	56
III.5.	Simulation numérique	57
III.6	Conclusion	60
<b>Chapitre VI Système de Compensation Photovoltaïque</b>		
VI.	Introduction	61
VI.1.	L'état d'étude	62
	Le premier cas : Connexion d'une charge linéaire puis une autre non-linéaire au Réseau électrique	63
	Le deuxième cas: Connexion du filtre actif avec le réseau et la charge non-linéaire	64
	Le troisième cas: la connexion du GPV avec le FAP et l'injection de l'énergie active au réseau	64
VI .2.	Conclusion	66
	Conclusion générale	67

## Liste de figure

---

### Liste de Figure de chapitre I

Figure I.1.Types de rayonnement solaire reçus au sol. ....	4
Figure I.2.Intensité de l'enseillement reçu sur un plan horizontal et incliné .....	5
Figure I.3.Coupe transversale d'une cellule PV typique. ....	6
Figure I.4.Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	6
Figure I.5.point maximale de puissance d'une cellule .....	8
Figure I.6.Mise en série des cellules PV dans le module. ....	10
Figure I.7.Cellules, modules et panneau photovoltaïques.....	10
Figure I.8.L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ . ....	11
Figure I.9.L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$ .....	11
Figure I.10.L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ .....	12
Figure I.11.L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ . ....	12
Figure I.12.Caractéristique de nombre des modules en série. ....	13
Figure I.13.Caractéristique de nombre des modules en parallèles. ....	14
Figure I.14.Caractéristique de nombre des modules en série et parallèle. ....	14
Figure I.15.Convertisseur DC/DC .....	15
Figure I.16.Générateur photovoltaïque et filtre Actif.....	15
Figure I.17.Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost.....	18
Figure I.18. Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck.....	18
Figure I.19.Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck-Boost.....	18
Figure I.20.Le modèle Simulink du hacheur (boost).....	19
Figure I. 21.Résultat de Simulation pour la tension d' entrée et de sortie d'un hacheur boost ....	19
Figure I.22.Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT. ....	20
Figure I.24.Divergence de la méthode P&O .....	21
Figure I.23. Signe de $dP/dV$ à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance .	21
Figure I.25.L'organigramme de la méthode de P&O.....	22

### Liste de Figure de chapitre II

Figure II.1. Synthèse d'un signal à partir des harmoniques.....	27
Figure II.2.Courant d'une alimentation à découpage d'un écran de micro-ordinateur .....	28
Figure II.3. Schéma de charge linéaire avec une source de tension triphasée .....	29
Figure II.4. Model de la charge non linéaire. ....	30
Figure II.5. Montage et Simulation d'une charge linéaire (charge RL) .....	30
Figure II.6. Courant absorbé par une charge linéaire (charge RL).....	30
Figure II.7. Schéma synoptique d'un pont redresseur .....	31

## Liste de figure

---

Figure II.8. Montage et Simulation d'une charge non linéaire.....	31
Figure II.9. Schémas équivalents pour caractériser la déformation de la tension au point de raccordement. ....	34
Figure II.10.Raccordement d'un filtre passif.....	38
Figure II.11. Filtre passif résonant. ....	39
Figure II.12. Filtre passif amorti.....	39
Figure II.13. Filtre passif parallèle anti-résonant .....	39
Figure II.14.Combinaison de filtres passifs pour redresseur à thyristors. ....	40
Figure II.15.schéma de Filtre actif .....	41
Figure II.16.Structure d'un filtre actif série .....	42
Figure II.17.Structure d'un filtre actif parallèle .....	42
Figure II.18. Schéma générale avec UPQC.....	43
Figure II.19:Schéma Filtre hybride .....	43

### Liste de Figure de chapitre III

Figure III.1.Structure générale d'un filtre actif parallèle (SAPF). ....	45
Figure III.2.Principe du compensateur shunt idéal.....	46
Figure III.3.structure d'un filtre actif parallèle.....	48
Figure III.4.Onduleur de tension deux niveaux.....	48
Figure III.5. Schéma d'un Commande du FAP.....	51
Figure III.6.Principe de commande par hystérésis. ....	52
Figure III.7.Commande des interrupteurs par hystérésis.....	52
Figure III.8.Boucle de réglage de tension continu $V_{dc}$ .....	53
Figure III.9.Commande indirecte du filtre actif. ....	56
Figure III.10.Schéma synoptique de circuit de commande. ....	57
Figure III.11.Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante .....	57
Figure III.12.Formes d'ondes des courants: $i_{ch}$ courant de charge, $i_f$ courant du filtre actif et $i_s$ courant de source .....	58
Figure III.13.Formes d'ondes des courants: $i_{ch}$ courant de charge, Spectre du courant de la charge non linéaire.....	59
Figure III.14.Formes d'ondes de courant : $i_s$ courant de source, Spectre du courant de source, Avant et après la mise en service du FAP. ....	59
Figure III.15.Formes d'ondes des courants : $i_{ch}$ courant de charge, $i_f$ courant du filtre actif, $i_s$ courant de source.....	60

## Liste de figure

---

### Liste de Figure de chapitre VI

Figure VI.1. Le dispositif de compensation Photovoltaïque étudié. ....	61
Figure VI.2. Schéma du système global en MATLAB-SIMULINK. ....	62
Figure VI.3. Courant de source avec une charge linéaire et une autre non-linéaire.....	63
Figure VI.4. Formes d'ondes de la tension $V_{sa}$ et des courants : $i_{ch}$ courant de charge, $i_f$ courant du filtre actif et courant de source $i_s$ .....	64
Figure VI.5. Formes d'ondes des courants: $i_{ch}$ courant de charge, $i_f$ courant du filtre actif et le courant de source $I_{as}$ .....	65
Figure VI.6. Allures des puissances instantanées active p de source et de GPV .....	66

### Introduction Générale

Le domaine de l'électronique de puissance est un espace en plein essor dû à l'apparition des technologies de développement durable et d'énergies renouvelables qui font appel aux développements et recherches réalisés dans ce domaine. Actuellement, les recherches dans l'électronique de puissance sont emmenées particulièrement sur les structures des convertisseurs statiques d'énergie électrique utilisant des semi-conducteurs qui satisfont au compromis rapidité et puissance.

Ainsi, on les voit aujourd'hui incorporés dans l'intégrité des systèmes de puissance, notamment les entraînements des moteurs à vitesse ajustable, les redresseurs à diodes et à thyristors, les alimentations sans interruption (ASI), les ordinateurs et leurs périphériques, etc. Ces charges non-linéaires absorbent des courants non sinusoïdaux, même si elles sont alimentées par une tension sinusoïdale, elles se comportent par conséquent comme des générateurs d'harmoniques et échangent en plus de l'énergie réactive. En évidence, ce phénomène d'harmonique mérite d'être pris en considération et au sérieux vu les nombreuses anomalies qu'il peut produire, et qui peuvent même déclencher des incendies.

Pour diminuer ou supprimer ces perturbations et ainsi améliorer la qualité de l'énergie distribuée, plusieurs solutions existent.[1]

Le filtrage actif est plus efficace en qualité de sa précision de dépollution, de sa performance au niveau du filtrage et de sa facilité d'adaptation aux différentes situations de charge. D'un autre point de vue, le filtrage actif facilite un contrôle sélectif des harmoniques dont lequel les fréquences nuisibles peuvent donc être visées et réduites au niveau désiré. Le filtre actif est couramment constitué par un onduleur de tension utilisant des transistors de puissance à grille isolée IGBT. Il peut être mono ou triphasé, séries, parallèles, mixtes, à deux niveaux ou multiniveaux.[2]

Plusieurs résultats de simulation sous l'environnement Matlab/Simulink ont été présentés pour monter et valider les techniques de commande du filtre actif et les algorithmes MPPT du système photovoltaïque associé pour plusieurs cas de fonctionnement du système globale.

Dans ce travail, on s'intéresse à présenter une étude sur le filtrage actif et à prouver ses contributions dans l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique influencée par la présence des charges non-linéaires, le transfert de l'énergie produite par le système solaire et la compensation des harmoniques. On a réparti ce travail en quatre chapitres :

## Introduction Générale

---

Dans le premier chapitre, nous allons présenter d'une façon générale les systèmes photovoltaïques et étudier quelques types de convertisseurs statiques (DC-DC) et l'utilisation de la méthode de la commande MPPT.

Dans le second chapitre nous effectuerons une recherche bibliographique sur l'état de l'art de problématique des harmoniques, leurs origines, leurs conséquences et la réglementation. Ensuite, les différentes solutions traditionnelles et modernes de filtrage possibles.

Dans le troisième chapitre nous présenterons le principe de fonctionnement du filtre actif parallèle de puissance, la structure générale du FAP, les différentes stratégies de commande de l'onduleur de tension et le dimensionnement de l'ensemble réseau, charge polluante et filtre actif parallèle.

Dans le quatrième chapitre nous présenterons le fonctionnement du système global (FAP et GPV) et les résultats de simulation. Enfin, on terminera avec une conclusion générale.

## Chapitre I Générateur Photovoltaïque

### I. Introduction

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, étoile la plus proche de la terre. Il fournit une énergie colossale à la Terre (10 000 fois l'énergie nécessaire) sous forme d'énergie lumineuse, La plupart des utilisations sont directes comme en agriculture, à travers la photosynthèse, ou dans les diverses applications de séchage et chauffage, autant artisanale qu'industrielle. Cette énergie couvre une partie importante de la surface terrestre. [3]

L'énergie solaire photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique. En effet le mot "photovoltaïque" vient de la grecque, "Photo" qui signifie lumière et de "Voltaïque" qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électricité ». [4]

L'électricité solaire est une importante source d'énergie renouvelable qui pourrait être une alternative aux autres sources classiques afin de satisfaire les larges besoins d'énergie dans le futur.[5]

Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et, malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, la quantité restante demeure encore importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m<sup>2</sup> crête dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m<sup>2</sup>, lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en eau[6]. Le flux solaire reçu au niveau du sol dépend des facteurs suivants :

- l'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre.
- la latitude du lieu de collecte, de son degré de pollution ainsi que de son altitude.
- la période de l'année.
- l'instant considéré dans la journée.
- la nature des couches nuageuses.[7]

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

## I.1 Rayonnement solaire

Afin de quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol. En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature :

### I.1.1 Le rayonnement direct :

La conversion du rayonnement direct est une question trigonométrique. Le rayonnement direct, sur le plan horizontal, est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus.

### I.1.2 Le rayonnement diffus :

Il est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.

### I.1.3 Le rayonnement réfléchi :

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....).

### I.1.4 Le rayonnement global :

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol. Dans la figure ci-dessous Figure I.1 est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçu sur une surface terrestre.

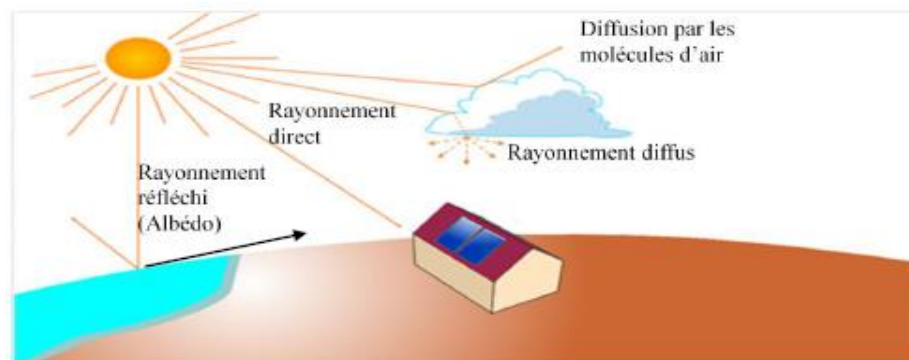
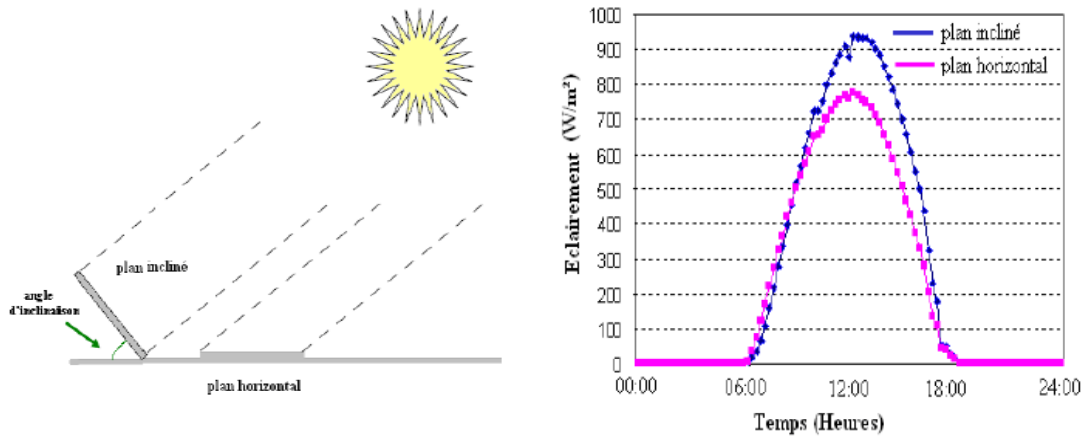


Figure I.1. Types de rayonnement solaire reçus au sol.

L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné est appelée irradiation ou éclairement (noté généralement par la lettre  $G$ ), il s'exprime en watts par mètre carré ( $W/m^2$ ). La valeur du rayonnement reçu par la surface du module photovoltaïque varie selon la position de ce dernier. Le rayonnement solaire atteint son intensité maximale lorsque le plan du module photovoltaïque est perpendiculaire aux rayons.[8]

Dans la Figure I.2 ci-après est illustré l'effet de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur l'intensité de l'éclairement reçu sur leurs surfaces du levé au couché du soleil.



**Figure I.2.** Intensité de l'insolation reçue sur un plan horizontal et incliné

## I.2 L'effet photovoltaïque

Lorsque la lumière atteint une cellule solaire, une partie de l'énergie incidente est convertie directement en électricité. Cette propriété remarquable est au cœur de toute installation photovoltaïque elle est appelée l'effet photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés "semi-conducteurs" qui, exposés à la lumière, produisent de l'électricité. Le plus connu d'entre eux est le silicium cristallin qui est utilisé aujourd'hui dans 90% des panneaux solaires produits dans le monde.

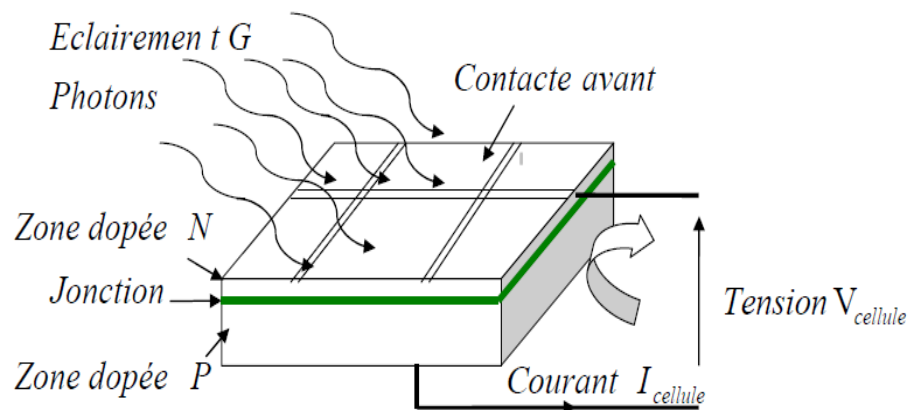
Cet effet fut observé pour la première fois par Becquerel en 1839 entre des électrodes plongées dans un électrolyte à la lumière. C'est en 1876 que l'on observa un phénomène photoélectrique dans un solide, le sélénium et ce matériau furent utilisés pour la mesure de la lumière avant que le silicium ne soit développé.[9]

## I.3 Principe de fonctionnement

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule. La Figure I.3 illustre une cellule photovoltaïque (PV) typique ou sa constitution est détaillée. Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une

dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel.

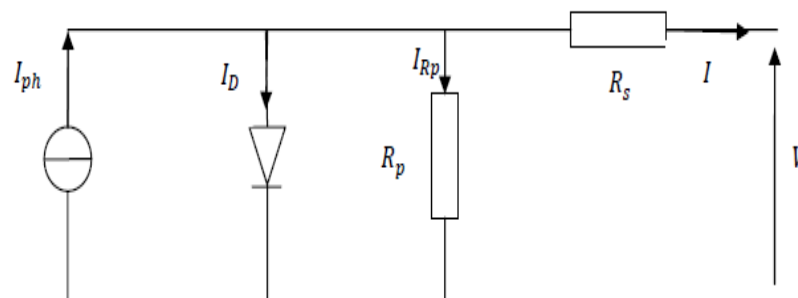
Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs.[10]



**Figure I.3.** Coupe transversale d'une cellule PV typique.

#### I.4 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque

La Figure I.4 présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Il correspond à un générateur de courant  $I_{ph}$  monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma.[8]



**Figure I.4.** Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique  $I = f(V)$  de la cellule :

- La résistance série ( $R_s$ ) 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 ou parallèle ( $R_p$ ) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par[6]:

$$I = I_{ph} - I_s \left[ e^{\frac{q \cdot (V + IR_s)}{nKT}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1.1)$$

Où  $I_s$  est le courant de saturation,  $K$  est la constante de Boltzmann ( $1,381 \times 10^{-23}$  J/K)  $T$  est la température effective des cellules en Kelvin(K),  $q$  est la charge de l'électron ( $e = 1,6 \times 10^{-19}$  C),  $n$  est le facteur d'idéalité de la jonction ( $1 < n < 3$ ),  $I_{PV}$  est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur,  $V$  est la tension aux bornes de cette même cellule,  $I_{ph}$  est le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court- circuit),  $R_p$  est la résistance shunt ou parallèle caractérisant les courants de fuite de la jonction,  $R_s$  est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

## I.5 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Cette relation (1.1) représente la caractéristique courant tension idéale permettant de déterminer les grandeurs caractéristiques principales du fonctionnement des cellules solaires :

[3]

$I_{sc}$ : Le courant de court-circuit.	$I_{max}$ : Densité de courant au point de puissance maximale
$V_{oc}$ : La tension en circuit ouvert.	$V_{max}$ : Tension au point de puissance maximale.
$P_{max}$ : Puissance maximale débitée par la photodiode.	$FF$ : Le facteur de forme.
	$\eta$ : Le rendement de conversion d'énergie

### I.5.1 Courant de court-circuit, $I_{sc}$

C'est le courant obtenu aux bornes de la cellule quand la tension à ces bornes est nulle,  $V=0$ . Il constitue le maximal de courant qui peut être obtenu d'une cellule. Sa valeur typique sera à peu près d'une dizaine de milliampères pour centimètre carré de cellule. Puisque  $R_s < R_p$  on peut mettre  $I_{sc} \approx I_{ph}$

### I.5.2 Tension de circuit ouvert, $V_{oc}$

C'est la tension pour laquelle le courant aux bornes de la cellule est nul ; elle constitue la tension maximale qui peut être obtenue d'une cellule; elle se situe autour de 0.6 V pour la cellule en silicium. Elle est obtenue grâce à l'équation (1.1) pour  $I=0$  en posant  $V_T = KT/q$  comme étant le potentiel thermique on obtient l'expression de  $V_{oc}$  comme suit :

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \cdot \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_s} + 1 \right) = V_T \cdot \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_s} + 1 \right) \quad (1.2)$$

### I.5.3 Point de puissance maximale, $P_{max}$

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée  $P_{max}$ ) pour un point de fonctionnement  $P_{max}$  ( $I_{max}$ ,  $V_{max}$ ) de la courbe courant-tension.

Cette puissance maximale ( $P_{max}$ ) peut être déterminée en portant sur le même graphique la caractéristique IV et les hyperboles de puissance constante. Le point de fonctionnement optimal correspond au point de tangence des deux courbes comme le montre la Figure I.5 La puissance maximale délivrée à la charge est donnée par l'expression (1.3) :

$$P_{max} = I_{max} \cdot V_{max} \quad (1.3)$$

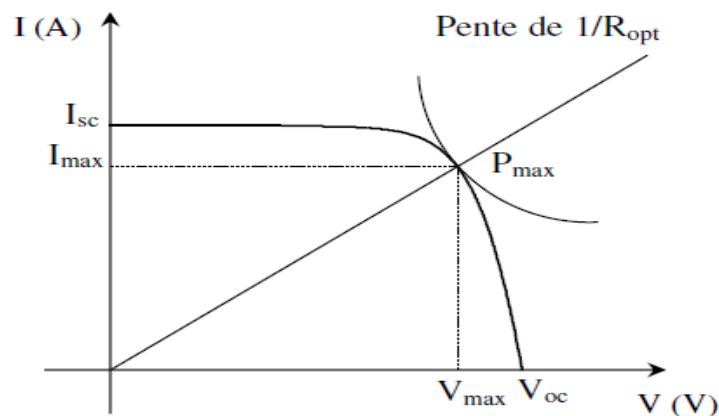


Figure I.5. point maximale de puissance d'une cellule

### I.5.4 Facteur de forme, FF

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique  $I(V)$  pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV c'est le facteur de remplissage ( $FF$ ), (ou fill factor en Anglais), ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{max}$  et la puissance formée par le rectangle  $I_{sc} \cdot V_{oc}$ . Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes et diminue avec la température, leur expression est donnée par :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (1.4)$$

### I.5.5 Rendement

Le rendement de la cellule photovoltaïque est le rapport de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, qui est égal au rapport de la puissance maximale de sortie sur la puissance des radiations lumineuses. C'est le paramètre qui définit le mieux le fonctionnement de la cellule PV, est donné par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{E \cdot S} \quad (1.5)$$

Où  $P_{in}$  la puissance d'entrée qui est l'éclairement incident sur la cellule PV par unité de surface, correspondant à l'éclairement lumineux  $E$  du soleil sous forme de photons par unité de surface reçue (aux conditions standard,  $1000 \text{ W/m}^2$ ),  $S$  est la surface de la cellule et  $FF$  est le facteur de forme. L'efficacité de conversion de puissance  $\eta$  d'une cellule solaire est proportionnelle aux trois paramètres photovoltaïques principaux: le courant de court-circuit  $I_{sc}$ , tension en circuit ouvert  $V_{oc}$ , et le facteur de remplissage  $FF$ , pour un éclairement donné  $E$ .

## I.6 Générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque se compose d'un certain nombre de modules qui sont constitués par l'association de cellules en série. Il est l'unité de production d'énergie électrique sous forme de courant continu. Le composant élémentaire de cette unité qui convertit l'énergie solaire en l'énergie électrique est la cellule photovoltaïque.

### i) Cellule PV

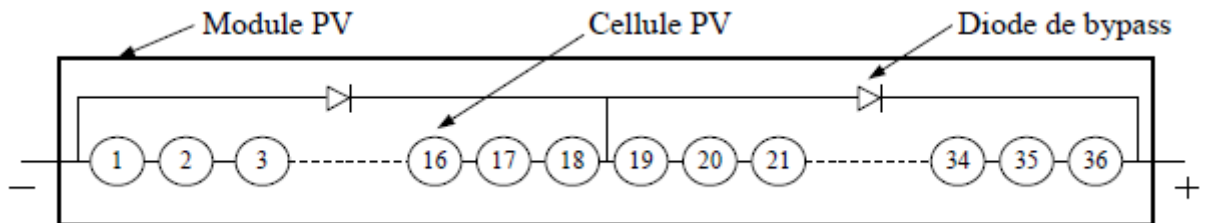
La tension générée par une cellule photovoltaïque est limitée à la valeur du gap du matériau dont elle est issue. Elle est de l'ordre de 0.6 V pour les cellules de type cristallin et amorphe. Pour le courant, il est en fonction de la surface de la cellule et pour une même surface, il dépend du rendement de la cellule. Le rendement des cellules monocristallines est de l'ordre de 15 à 22%, tandis que celui des cellules multi cristallines est de l'ordre de 10 à 15%. [11]

### ii) Module PV

La tension et le courant et la puissance, d'une cellule ne sont pas adaptées aux applications courantes, il est donc nécessaire de les associer. De plus, les cellules photovoltaïques sont fragiles et sensibles à l'environnement extérieur, elles sont donc munies d'une protection mécanique (l'encapsulation). Pour toutes ces raisons, les cellules sont assemblées en modules photovoltaïques. Les cellules sont généralement connectées en série dans les modules courants commercialisés. La mise en série des cellules permet d'augmenter la puissance. Le courant reste identique tandis que la tension est multipliée par le nombre de

cellules en série. Un module PV « classique » contient 36 ou 72 cellules. Mais ce nombre de cellules peut varier selon les modules servant aux applications spécifiques.

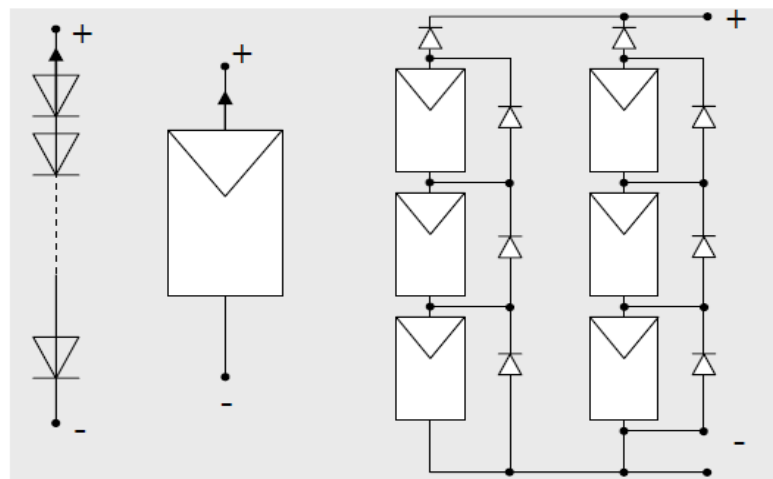
On peut trouver des modules de 40, 54, 60 ou même 92 cellules en série. La Figure I-6 montre un module contenant 36 cellules interconnectées en série. [11]



**Figure I.6.** Mise en série des cellules PV dans le module.

### iii) Générateur PV

D'une manière générale, un générateur photovoltaïque est formé par  $N_p$  lignes connectées en parallèle, chaque ligne est constituée de  $N_s$  modules photovoltaïques connectés en série.

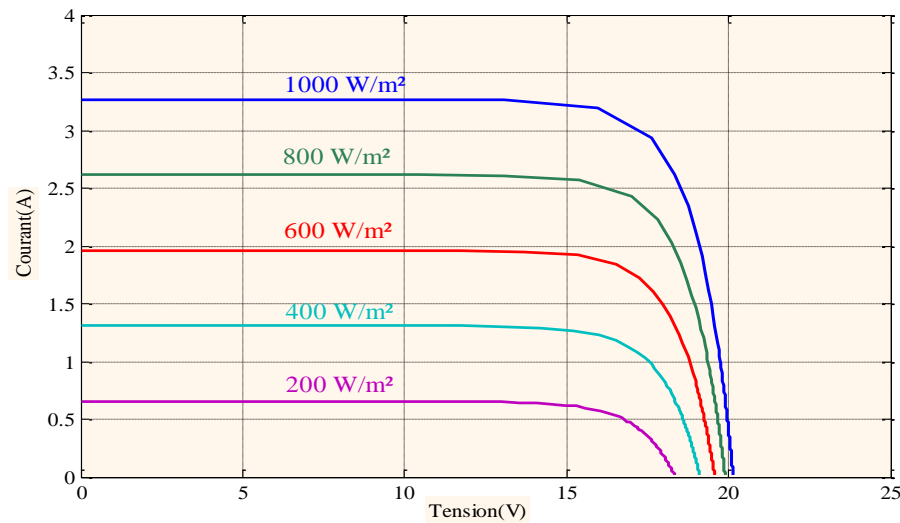


**Figure I.7.** Cellules, modules et panneau photovoltaïques.

## I.7 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$ :

La Figure I.8 ; montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$ . A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par

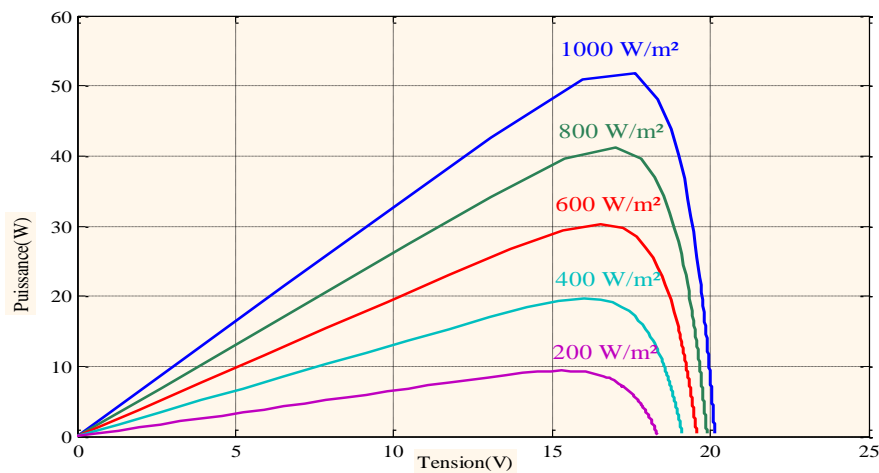
contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de



**Figure I.8.** L'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$ .

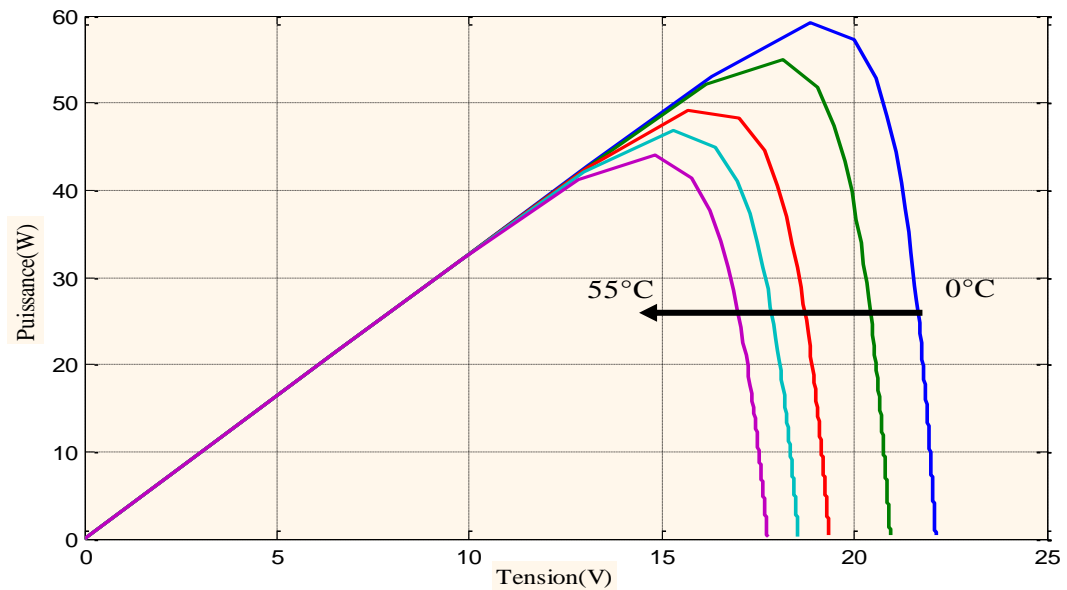
l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

La Figure I.9 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  $P(V)$ .

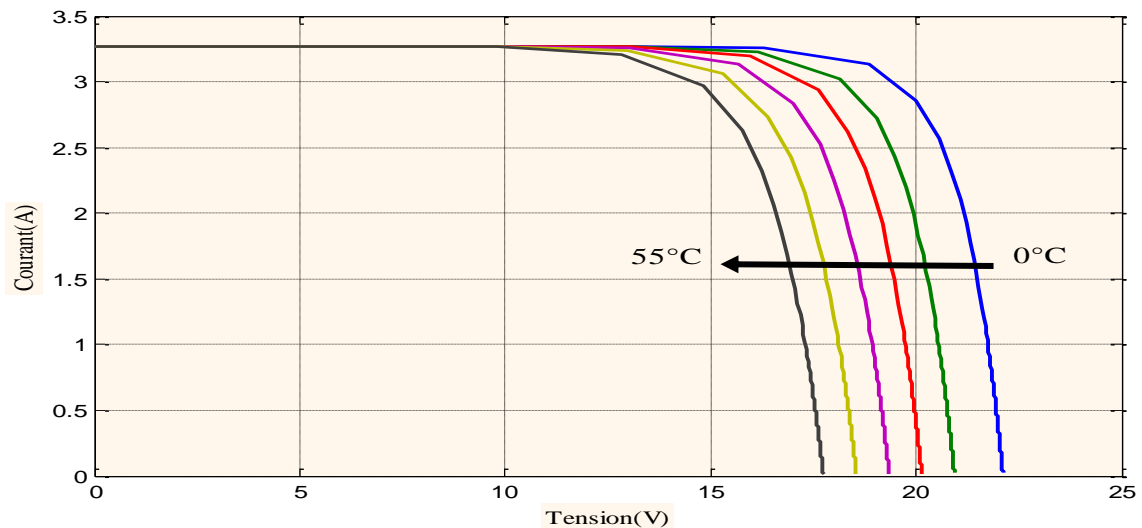


**Figure I.9.** L'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P=f(V)$ .

La Figure I.11 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  $I=f(V)$ .



**Figure I.10.** L'influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$ .



**Figure I.11.** L'influence de la température 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 I.10 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  $P=f(V)$

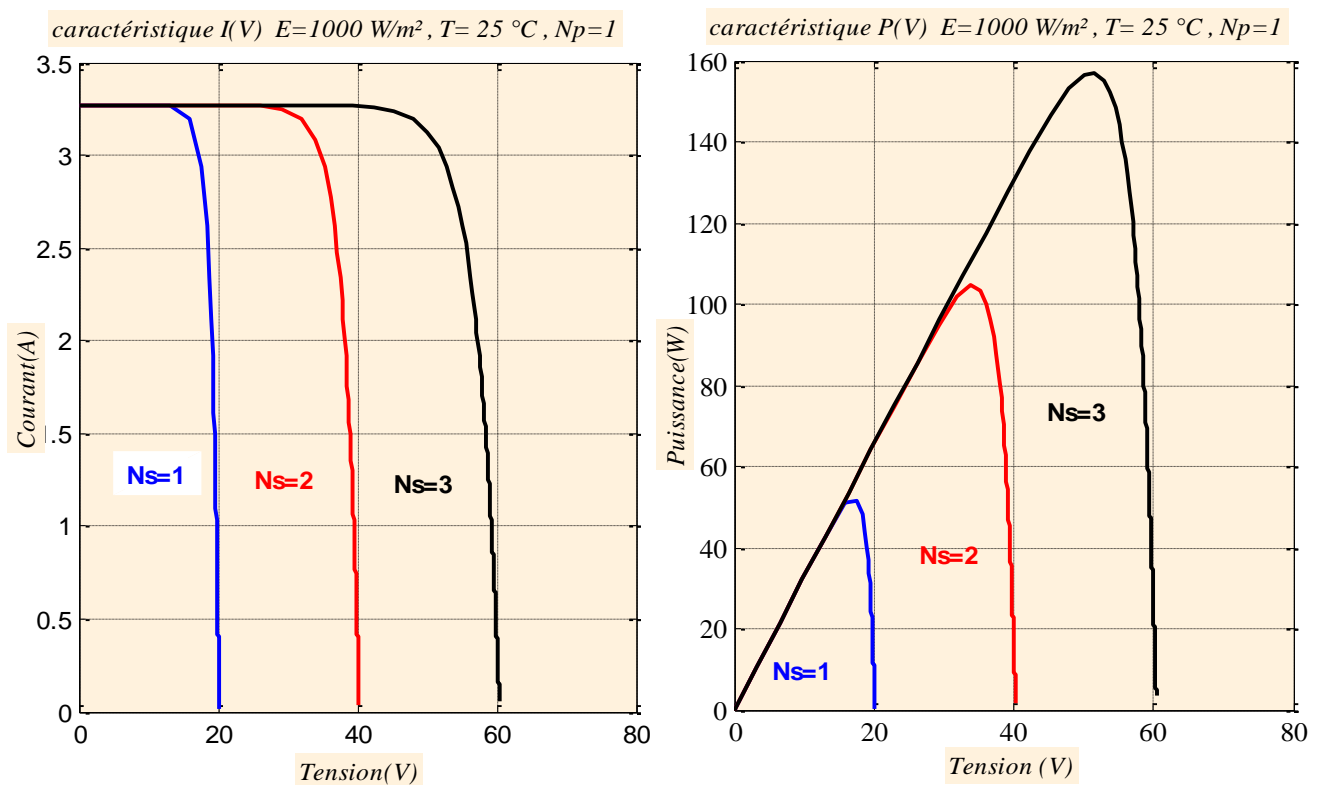
### **I.8 Influence de l'association série des modules PV**

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

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

Un module de 36 cellules en série est suffisant pour obtenir une tension compatible avec la charge. Pour avoir plus de tension, il faut assembler modules en série, par contre pour le courant généré, un nombre de modules en parallèle permet d'en ajouter, les diodes de protection série et parallèles protègent le circuit contre le retour de courant. L'association en série des modules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'un seul module [7]

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



**Figure I.12.**Caractéristique de nombre des modules en série.

### I.9 Influence de l'association parallèle des modules PV

L'association en parallèle des modules délivre un courant égal à la somme des courants individuels et une tension égale à celui d'un seul module.[7]

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

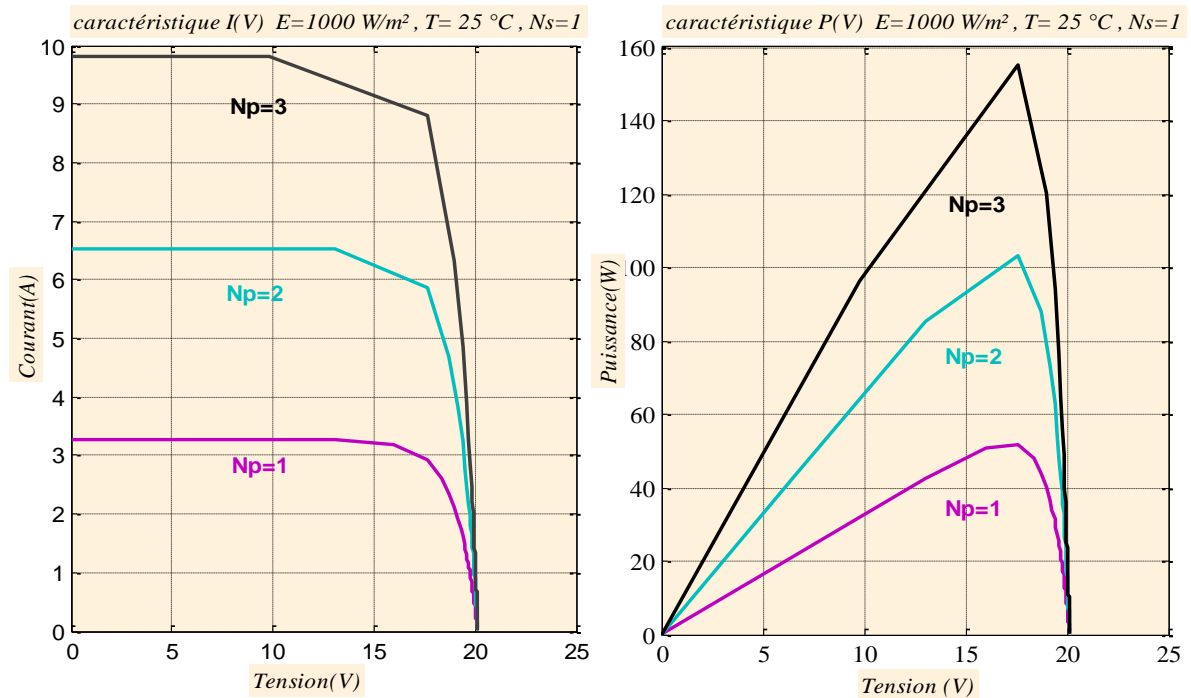


Figure I.13. Caractéristique de nombre des modules en parallèles.

### I.10 Influence de l'association mixte (Série + Parallèle) des modules PV

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle.[7]

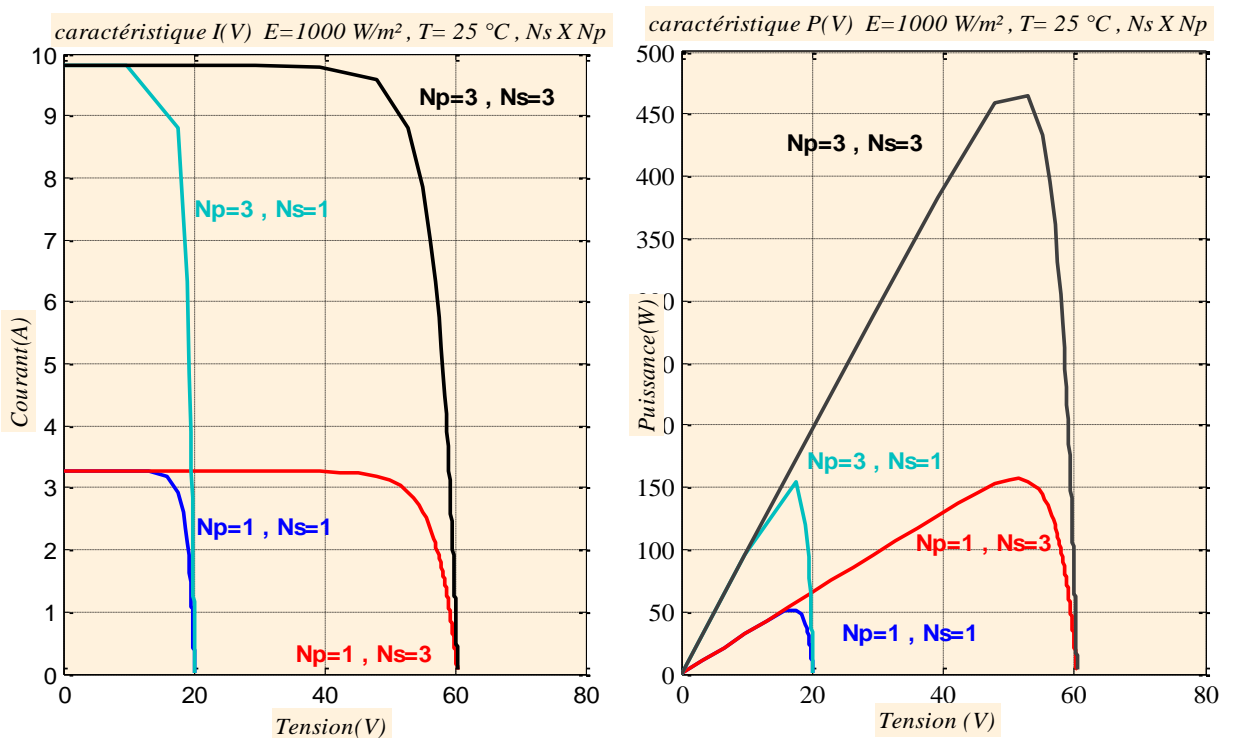


Figure I.14. Caractéristique de nombre des modules en série et parallèle.

## I.11. L'adaptation entre un Générateur PV et une charge

### I.11.1. Convertisseurs DC/DC

Les hacheurs présentent la partie essentielle dans le dispositif de commande d'un générateur photovoltaïque, ils sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

Il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs. [6]

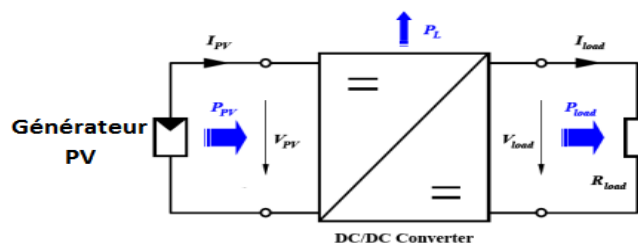


Figure I.15. Convertisseur DC/DC. [12]

Le hacheur apparaît comme un quadripôle Figure I.15, jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues. [6]

### I.11.2. Structure avec hacheur et onduleur

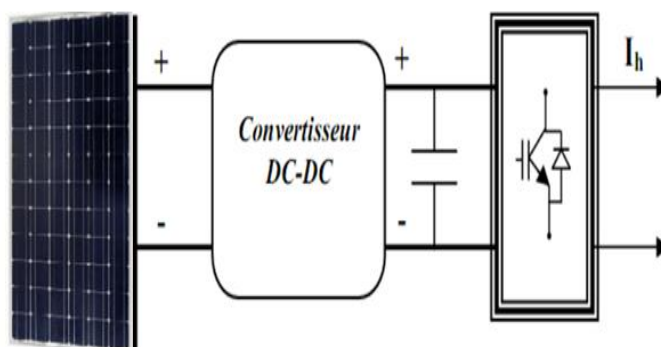


Figure I.16. Générateur photovoltaïque et filtre Actif.

On adjoint un onduleur pour avoir une sortie sinusoïdale. Cette structure est ainsi conçue pour fonctionner en parallèle et en interconnexion avec le réseau public d'électricité

ou pour un compensateur des harmoniques (filtre actif) (Figure I.16). Le principal composant de ce type de système (filtre actif) est l'onduleur. Il convertit la puissance continue (DC) obtenue à partir des modules PV en puissance alternative en respectant les conditions de qualité de la tension et de la puissance exigées par le réseau, avec une possibilité d'arrêt automatique quand le réseau n'est pas en fonctionnement. Cela permet de produire une puissance alternative à partir du système PV soit en alimentant directement toutes les charges électriques, soit en injectant le surplus d'électricité (PV) dans le réseau lorsque les besoins sont plus importants. Dans cette structure on va associer à la capacité du bus continu, un générateur photovoltaïque pour répondre aux mieux aux exigences du système de filtrage actif d'harmonique.

### **I.12. Convertisseur de puissance(DC/DC) de système photovoltaïque**

Par convention, des systèmes de conversion photovoltaïques reliés au réseau se composent de convertisseur DC/DC et d'onduleur. Le convertisseur DC/DC est contrôlé pour la poursuite du point de puissance maximum du panneau photovoltaïque et l'onduleur est contrôlé pour produire le courant de telle manière que le courant de système ait une faible déformation totale d'harmonique et il ait en phase avec la tension de réseau. Cette partie décrit certains convertisseurs d'électronique de puissance et les techniques de commande et de conversion (DC/DC).[6]

Le rôle du convertisseur DC/DC (dans le cadre du PV) est de faire l'adaptation entre la source (GPV) et la charge pour un transfert de puissance maximal. Ceci est fait en maintenant le PF sur ou assez proche du MPP pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc.).[12]

Les convertisseurs DC/DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Les trois configurations de base sont[7]:

- ❖ Convertisseur dévolteur(Buck) ;
- ❖ Convertisseur survolteur ( boost) ;
- ❖ Convertisseur dévolteur- survolteur (Buck-boost) ;

#### **I.12.1.Hacheur série ou Buck (abaisseur de tension)**

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée. ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à gauche du MPP [12]. Il comporte un interrupteur à

amorçage commandé (MOSFET, IGBT ...) et en série avec la source Figure I.18 et une diode de roue libre. Le cycle de fonctionnement, de période de hachage  $T$ , comporte deux étapes. Lors de la première, on rend le MOSFET passant et la diode polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de  $0$  à  $DT$ , avec :

$D$ : est appelé rapport cyclique, et compris entre  $0$  et  $1$  Lors de la seconde, on bloque le MOSFET. La diode devient passante. Cette phase dure de  $DT$  à  $T$ . On en déduit facilement la tension et l'intensité dans la charge par les équations suivantes[13]:

$$\begin{cases} V_{\text{load}} = \frac{t_{\text{on}}}{T} V_{\text{PV}} = D \cdot V_{\text{PV}} & (I.6) \\ I_{\text{load}} = \left(\frac{1}{D}\right) I_{\text{PV}} & (I.7) \end{cases}$$

$$\text{Avec : } D = \frac{t_{\text{on}}}{T}, 0 < t < t_{\text{on}}.$$

Le processus de commutation est décrit par la position de l'interrupteur(S). Dans le premier laps de temps ( $D.T$ ) le transistor est dans un état de saturation, alors l'inductance  $L$  se charge d'énergie avec augmentation du courant  $I_L$ . le courant de l'inductance est donnée par:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{\text{pv}} - V_{\text{load}}}{L} \quad (I.8)$$

Dans le deuxième laps de temps  $(1 - D)T$  l'inductance  $L$  libère cette énergie à la charge avec une diminution de courant  $I_L$ . En négligeant la chute de tension à travers la diode, le taux de changement du courant est donné par [14]:

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{V_{\text{load}}}{L} \quad (I.9)$$

### I.12.2 Hacheur parallèle (Convertisseur Boost) :

Le hacheur boost est aussi appelé hacheur survolteur. Dans ce hacheur, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée. Cette structure demande un interrupteur commandé et en parallèle avec la source Figure I.18, Le montage le plus simple consiste à mettre périodiquement en court-circuit la résistance  $R$  pendant une durée  $t = DT_{\text{on}}$  bien déterminée ; cette mise en court-circuit est assurée par un hacheur branché en parallèle avec la résistance.[13]

$$\text{De } 0 \text{ à } t_{\text{on}} \quad V_{\text{Ch}} = 0, i_{\text{ch}} = 0$$

$$\text{De } t_{\text{on}} \text{ à } T \quad ; \quad V_{\text{Load}} = R \cdot i_{\text{Load}}$$

Donc ;

$$\begin{cases} V_{Load} = (1/1 - D)V_{PV} \\ i_{Load} = (1 - D)i_L \end{cases} \quad (I.10)$$

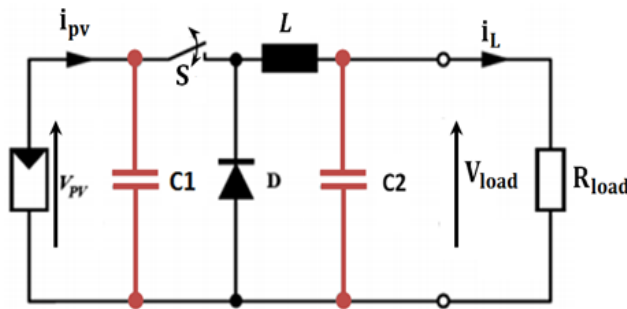


Figure I.18: Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck

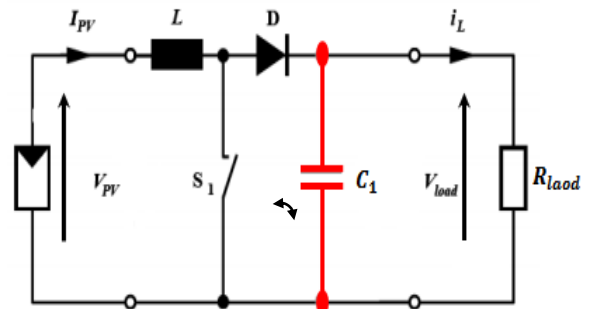


Figure I.18: Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost

### I.12.3. Hacheur Buck-Boost :

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse.

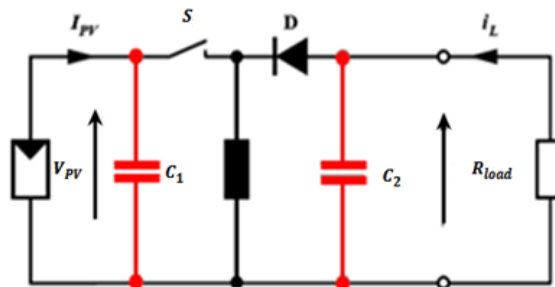


Figure I.19: Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck-Boost.

Durant l'état «on», l'énergie apportée par la source (générateur PV) est stockée dans l'inductance L (Figure I.19). L'énergie stockée dans l'inductance L est livrée ensuite à la charge pendant l'état «off» (Figure I.19). En raison de la présence de la diode D, le courant circule à travers l'inductance L seulement dans une direction durant les deux états. Par conséquent,  $V_{load}$  a une polarité opposée à  $V_{PV}$ . Pour cette raison, ce circuit est aussi appelé convertisseur inverseur. Les équations décrivant ce circuit peuvent être obtenues de la même manière qu'au paravent. Comme indiqué précédemment, le condensateur C1 soutient la

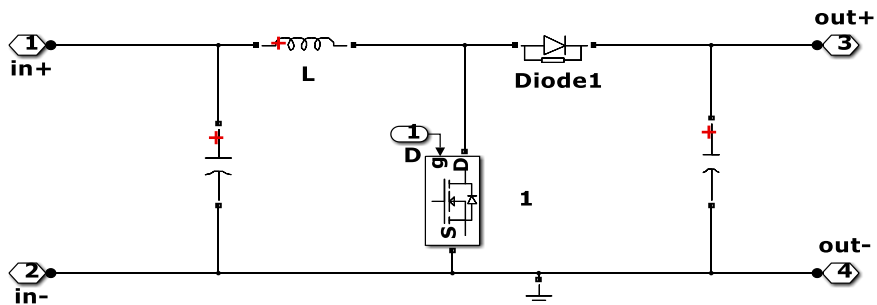
tension d'alimentation  $V_{PV}$ ,  $C_2$  lisse la tension de la charge. En conclusion, l'amplitude de  $V_{load}$  peut être inférieure ou supérieure à  $V_{PV}$  suivant la valeur de ton et  $t_{off}$ . [12]

$$V_{Load} = -\frac{t_{on}}{t_{on}} V_{PV} = \frac{D}{1-D} V_{PV} \quad (I. 11)$$

**I.12.4. Le choix de convertisseur**

Les études faites sur les deux hacheurs Boost et Buck, montrent que le hacheur Boost a un rendement élevé pour une grande partie du rapport cyclique. Il est le plus utilisé dans les systèmes photovoltaïques car la puissance maximale que peut délivrer une source en l'occurrence du GPV est [6]:

$$P_{max} = V_{max} \cdot I_{max} \quad (I. 12)$$



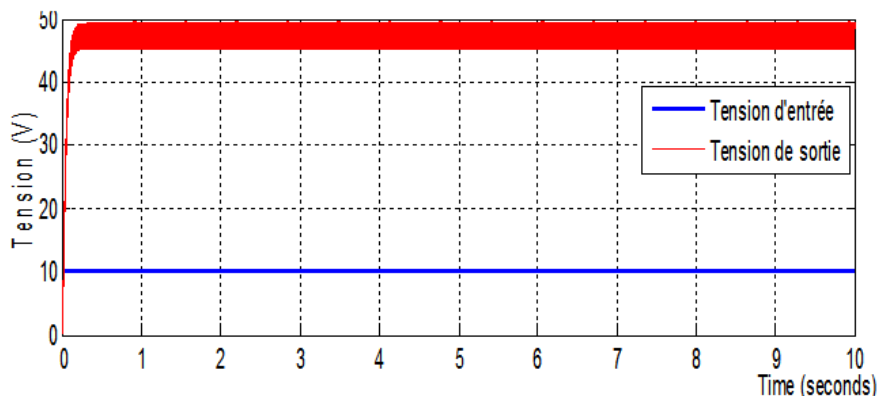
**Figure I.20:**Le modèle Simulink du hacheur (boost)

La puissance délivrée par le hacheur (buck ou boost) est donnée par:

$$P = \frac{1}{T} \int V_{in} I_{in} dt \cong \frac{1}{T} (V_{in}(T_{on}) \cdot I_{in} \cdot (T_{on}) \cdot T_{on} + V_{in}(T_{off}) I_{in}(T_{off}) \cdot T_{off})$$

$$\eta_{hacheur} = P/P_{max} \quad (I. 13)$$

Dans les trois cas cités en haut, l'adaptation entre la source et la charge est réalisée en choisissant des valeurs adéquates du rapport cyclique; mais dont le rapport cyclique D est variable. La valeur du rapport cyclique permet de contrôler la quantité d'énergie transmise.



**Figure I. 21.**Résultat de Simulation pour la tension d' entrée et de sortie d'un hacheur boost

### I.13. Commande (MPPT) des convertisseurs DC/DC

Les panneaux solaires de première génération sont généralement dimensionnés pour que leurs (MPP) correspondent à la tension nominale (12 ou 24 Volts). Grâce à cette configuration, une simple connexion directe via une diode anti-retour suffit pour effectuer le transfert d'énergie du générateur photovoltaïque (GPV) à la charge. Cependant, les caractéristiques non-linéaires du module photovoltaïque et sa sensibilité aux conditions extérieures, comme l'éclairement et la température, induisent des pertes énergétiques. L'utilisation d'un étage d'adaptation afin d'optimiser la production d'énergie à tout moment est ainsi de plus en plus préconisée. Le principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $D$  à la valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du panneau PV.[13]

$D = \alpha$  : Rapport cyclique.

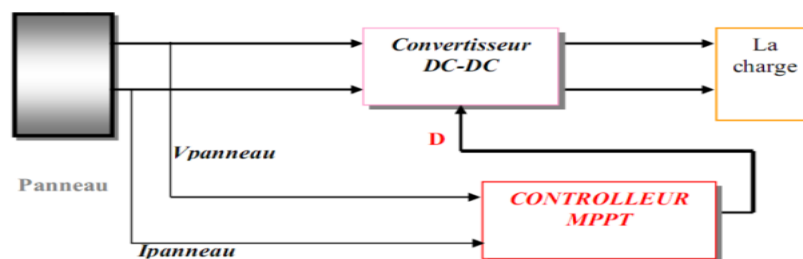


Figure I.22. Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT.[6]

#### I.13.1. Algorithme et Principe de commande :

L'algorithme de recherche du point de puissance maximum (MPPT) est appliqué au convertisseur DC/DC (MPPT locale) dans le cas d'un double étage de puissance et au convertisseur DC/AC (MPPT globale) avec un seul étage de conversion [15]. Il y a plusieurs algorithmes ont été proposés pour la réalisation de la commande MPPT [13]. Dans ce travail l'algorithme de maximisation P&O est étudié et présenté, adopté pour sa simplicité et facilité d'implantation en temps réel.

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension  $V_{PV}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{PV}$  qui en résulte. Ces méthodes, aujourd'hui largement utilisées de par leur facilité d'implémentation, présentent cependant quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elles engendrent en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement. [13]

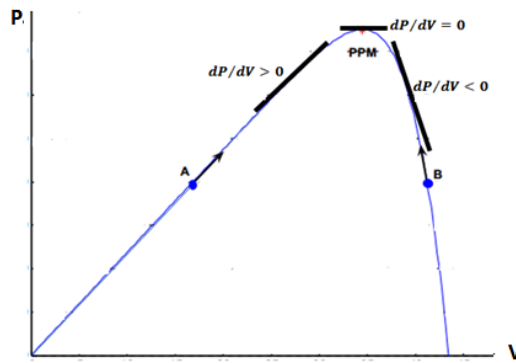


Figure I.24. Signe de  $dP/dV$  à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance

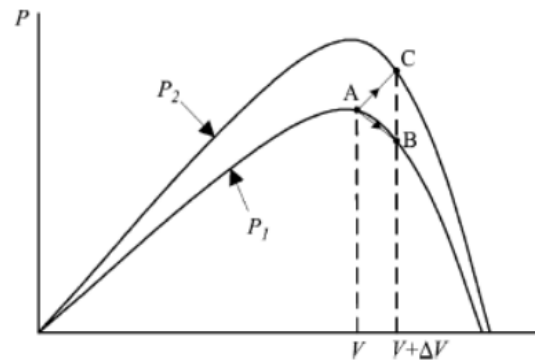


Figure I.23. Divergence de la méthode P&O

C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM), il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence ( $V_{ref}$ ), ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (DC/DC), puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie GPV en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique. Sur la Figure I.24, on voit que si la tension de fonctionnement est perturbée dans une direction donnée et que la puissance augmente ( $dP/dV > 0$ ), alors il est clair que la perturbation a déplacé le point de fonctionnement vers le MPP. L'algorithme P&O continuera à perturber la tension dans la même direction. Par contre, si la puissance diminue ( $dP/dV < 0$ ), alors la perturbation a éloigné le point de fonctionnement du MPP. L'algorithme inversera la direction de la perturbation suivante. Cet algorithme est résumé sur **Tableau I.1.** et l'organigramme de la **Figure I.25.** L'algorithme peut être représenté mathématiquement par l'expression [14] [12]:

$$V(k) = V(k-1) + \Delta V \cdot \text{sign} \left( \frac{dV}{dP} \Big|_{V=V_{k-1}} \right) \quad (I.14)$$

Tableau I.1. Les cas de fonctionnement de l'algorithme P&O pour suivre le point de puissance maximale		
Perturbation	Changement dans la Puissance	Perturbation suivante
positif	positif	Positif
positif	négative	Négative
négative	positif	négative
négative	négative	positif

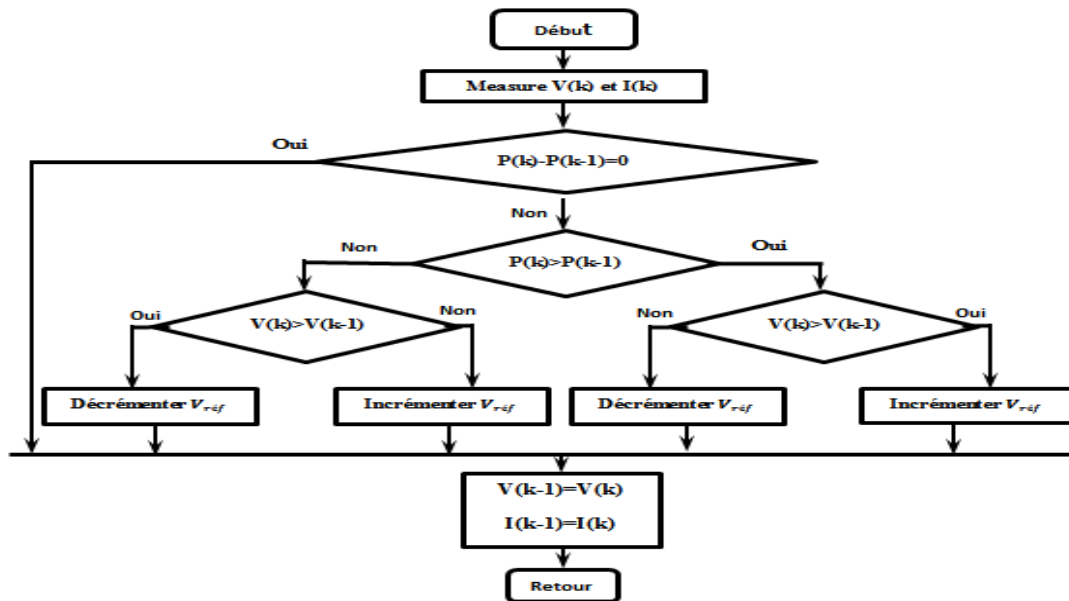


Figure I.25. L'organigramme de la méthode de P&O

Il est important de noter qu'avec l'algorithme P&O, la variable à contrôler peut-être soit la tension soit le courant du GPV. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. Sur la Figure I.8 et Figure I.11, on voit bien que la variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV.

Un inconvénient de la méthode P&O est qu'elle peut échouer lors d'un rapide changement des conditions atmosphériques sur la Figure I.23 . Commencant par un point de fonctionnement A, si les conditions climatiques restent constantes, une perturbation  $\Delta V$  dans la tension  $V$  amènera le point de fonctionnement au point B, et le sens de la perturbation sera inversé à cause de la diminution de la puissance. Par contre, si l'éclairement augmente et déplace la courbe de puissance de P1 à P2, sur un cycle du MPPT, le point de fonctionnement sera déplacé de A vers C. Cela représente une augmentation de la puissance, l'algorithme croit que ceci est le résultat de sa propre action et le sens de la perturbation restera le même. Par conséquent, le point de fonctionnement s'éloigne du MPP et continuera à s'éloigner si l'éclairement augmente (ou diminue) progressivement. Pour pallier à ce problème, on pourra ajouter le poids d'un troisième point et le comparer aux deux autres avant de prendre une décision sur le sens de la perturbation. Une autre solution serait de diminuer le cycle du MPPT.[12]

**I.14 CONCLUSION :**

La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque a été élaborée à partir de modèles de la littérature (champ PV, convertisseurs, le MPPT ,...) ; cette modélisation est une étape essentielle permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi les paramètres constituant. Dans un système énergétique photovoltaïque, on désire toujours travailler au voisinage du point de puissance maximale MPP, afin de minimiser au maximum les pertes en énergie produite.

## Chapitre II : PERTURBATIONS HARMONIQUES ET SOLUTIONS DE COMPENSATION

### II. Introduction:

L'énergie électrique produite et transférée aux utilisations multiples de la consommation, selon cahier de charge spécifiée, ce cahier comprend la mesure de la qualité de l'énergie, les paramètres caractéristiques de ce système comme la fréquence et l'amplitude, la forme d'onde qui doit être sinusoïdale ... etc., ce passage de l'énergie à travers plusieurs étapes à partir du début de la production à être transportés dans les lignes du réseau électrique, en utilisant des convertisseurs statiques, celle-ci dépend essentiellement de l'électronique de puissance, de manière à obtenir de tension et courant sinusoïdale avec une qualité acceptable compatible avec le contenu de ce cahier de charge.

En revanche, nous constatons que l'utilisation accrue des convertisseurs statiques dans les équipements électriques, aussi bien au niveau de la production ou la consommation domestique ou industrielle ... etc. Ces convertisseurs absorbent des courants non sinusoïdaux du réseau. Ils se comportent alors comme des générateurs de courants harmoniques, ils sont considérés parmi les causes de la pollution du réseau électrique et la distorsion de la ligne de réseau. Cela affecte la qualité de l'énergie. En outre provoque des dysfonctionnements dans les équipements électriques.

Dans ce chapitre, on éludera les concepts de base de l'analyse harmonique, les origines et les conséquences de la pollution harmonique...etc.

### II.1 Qualité de l'énergie :

La qualité d'énergie électrique est étroitement liée à la qualité de l'onde de tension, ou elle est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant,

#### II.1.1. Qualité de la tension

La qualité de tension alternative est étroitement liés aux caractéristiques de ses constituants représentés dans:

- ❖ La forme d'onde qui doit être sinusoïdale : sans de distorsions, de pics, de creux...
- ❖ L'amplitude.
- ❖ La fréquence.

❖ la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leurs déphasages relatifs.[16]

➤ **Amplitude**

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est une constante. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions. En fonction de la variation de l'amplitude on distingue deux grandes familles de perturbations :

- Les creux de tension, coupures et surtensions. Ces perturbations se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude. Elles ont pour principale origine des court-circuités, et peuvent avoir des conséquences importantes pour les équipements électriques.

- Les variations de tension. Ces perturbations se caractérisent par des variations de l'amplitude de la tension inférieure à 10% de sa valeur nominale. Elles sont généralement dues à des charges fluctuantes ou des modifications de la configuration du réseau.

➤ **Fréquence**

Les variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, de l'ilotage d'un groupe sur ses auxiliaires ou son passage en réseau séparé, ou d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge. Il faut également remarquer que les variations de fréquence peuvent être bien plus importantes pour les réseaux autonomes, Selon la norme convenue.

➤ **Forme d'onde**

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non-périodiques, alors dénommés bruits.

➤ **Symétrie**

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. La dissymétrie de tels systèmes est communément appelé déséquilibre.

### **II.1.2. Qualité du courant**

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres, Le terme «

qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension ».[17]

## II.2 Perturbations dans les réseaux de distribution électrique :

Les perturbations sont l'ensemble des phénomènes physiques 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) [18]. Il apparaît évident que la qualité de cette énergie dépend de celle de la tension au point de livraison. Cette tension subit généralement beaucoup de perturbations de deux origines distinctes :

- Les perturbations de tension causées par le passage, dans les réseaux électriques, des courants perturbateurs comme les courants harmoniques, déséquilibrés et réactifs,
- Les perturbations de tension causées par des tensions perturbatrices comme les tensions harmoniques et déséquilibrées et les creux de tension.[19]

Ces perturbations sont classées selon la durée du phénomène. Ainsi, il est possible de distinguer :

- Les altérations de l'onde de tension (harmoniques, déséquilibre, flicker ). Ces phénomènes sont permanents ou durent au minimum plusieurs minutes,
- Les creux de tension et coupures brèves d'une durée de l'ordre d'une à quelques secondes,
- les surtensions transitoires, de durée inférieure à une période ,[18]

Selon leurs modes d'affectation, on distingue trois familles principales :

- Perturbations sur l'amplitude ou les valeurs efficaces,
- Déséquilibre des systèmes triphasés,
- Distorsions harmoniques,[20]

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

### II.2.1. Les perturbations harmoniques :

Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental. En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impairs existent. 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  $h=40$ ),[16]

La Figure II.1 montre la superposition des harmoniques, l'onde d'une tension distordue contenant, en plus du terme fondamental de fréquence 50Hz, trois harmoniques de rang impair 5,7et 11.[18]

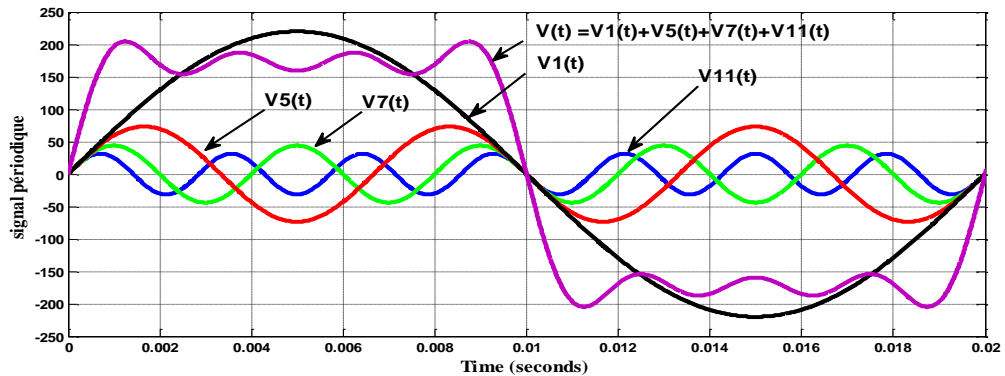


Figure II.1. Synthèse d'un signal à partir des harmoniques

On caractérise la pollution d'un réseau de manière globale par le taux de distorsion harmonique en tension ou en courant :

$$THD(\%) = 100 \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{f_h^2}{f_1^2}} \quad (\text{II. 1})$$

Où  $f_h$  représente la composante harmonique de rang  $h$  et  $f_1$  représente la composante fondamentale .

### II.3. Sources des harmoniques et leurs effets

L'utilisation de convertisseurs statiques au cours des dernières années, elle a contribué de manière significative à l'efficacité de l'équipement et les machines électriques, et a contribué à l'optimisation de la vitesse de production.[18]

Mais au contraire, cela a conduit à la propagation de la pollution harmonique dans le réseau électrique parce que, ces équipements électriques sont considérés comme des charges non-linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale ou parfois à des fréquences quelconques, donc la cause principale de l'existence des harmoniques de tension, comme on le montrera ultérieurement, est l'injection dans le réseau des courants non sinusoïdaux par des charges non linéaires. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner

des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique.[21]

Il s'agit alors de sources génératrices de courants harmoniques qui peuvent être classées en deux types :

### II.3.1. Sources harmoniques identifiables :

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

### II.3.2. Sources harmoniques non identifiables :

Ce type de générateur de courants harmoniques est principalement représenté par les appareils utilisés dans les domaines électrodomestiques ou tertiaires tels que les téléviseurs et les micro-ordinateurs. Ces équipements comportant souvent un redresseur monophasé à diodes avec un condensateur de lissage, prélèvent des courants harmoniques non négligeables. Dans ce cas, il est de la responsabilité du distributeur de l'énergie électrique d'empêcher la propagation de la perturbation harmonique sur le réseau puisqu'individuellement chaque utilisateur génère un faible taux d'harmonique. A titre d'exemple, la Figure II.2, ci-dessous montre l'allure du courant absorbé par un micro-ordinateur. Il est de forme impulsionnelle, riche en harmoniques et possède un taux de distorsion inadmissible.[16]

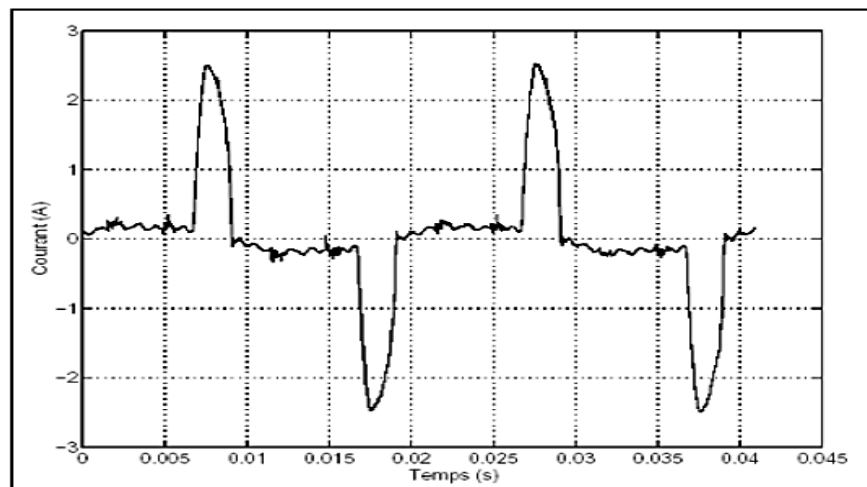


Figure II.2. Courant d'une alimentation à découpage d'un écran de micro-ordinateur

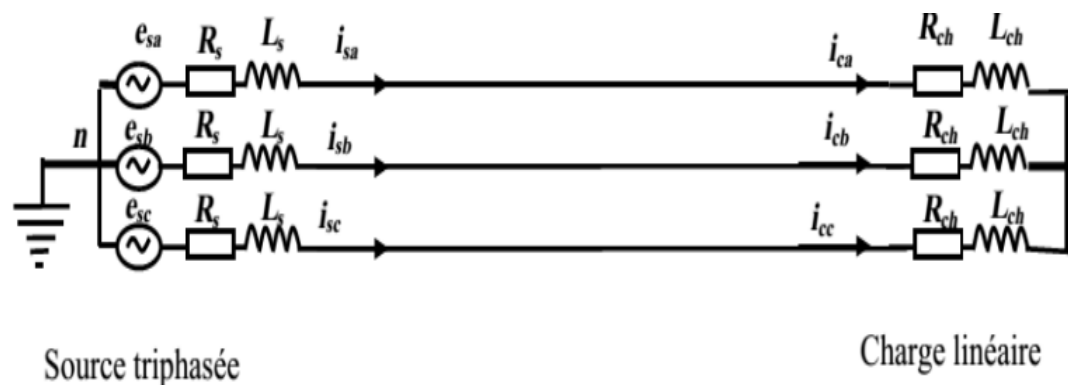
➤ **Modélisation de la charge polluante (redresseur à diode) :**

➤ **Notion de charge :**

L'énergie électrique est distribuée sous forme de trois tensions sinusoïdales constituant le réseau triphasé équilibré. Selon leurs caractéristiques d'entrée, certaines charges peuvent perturber cette distribution.

➤ **Charge linéaire**

Si l'on alimente une charge linéaire par une tension sinusoïdale, le courant circulant dans cette charge est lui aussi sinusoïdal (les convecteurs électriques ou encore les lampes à incandescences) Figure II.3. Cependant, le courant peut être déphasé par rapport à la tension d'un angle  $\varphi$ .



**Figure II.3.** Schéma de charge linéaire avec une source de tension triphasée[22]

➤ **Charge non linéaire**

Une charge est dite "non-linéaire" si le courant absorbé n'est pas sinusoïdal Figure II.8 (b), lorsqu'elle est alimentée par une tension sinusoïdale. elle peut être considérée comme une réactance saturable, une résistance non linéaire, un convertisseur à base des semi-conducteurs de puissance (redresseurs, hacheurs, gradateurs, onduleurs, variateurs de vitesse.....etc.) Figure II.4, Ces harmoniques de courant circulent dans la source de tension, en même temps qu'ils parcourent la charge. En plus, ce qui concerne le réseau électrique, ces courants harmoniques vont engendrer une détérioration de l'onde de tension au point de raccordement d'autres charges connectées au même réseau.

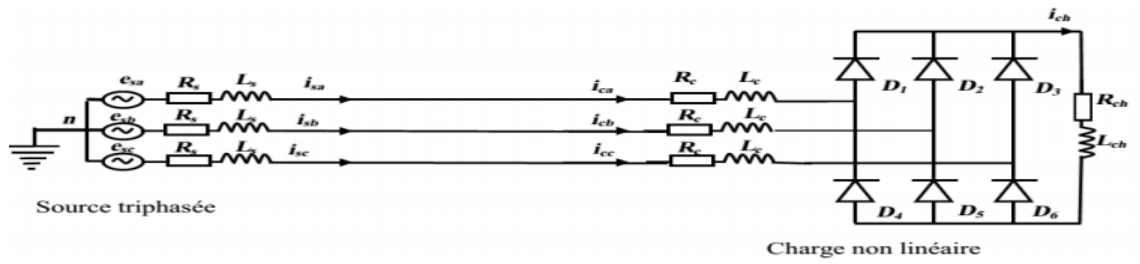


Figure II.4. Model de la charge non linéaire.

➤ Simulation d'une charge RL linéaire

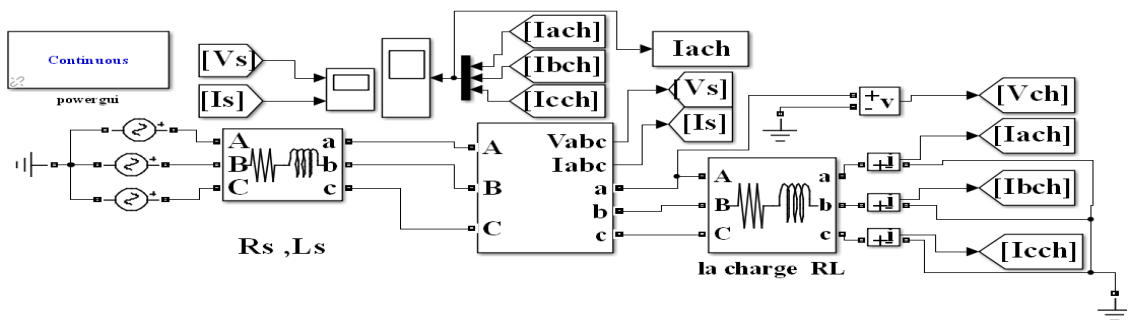
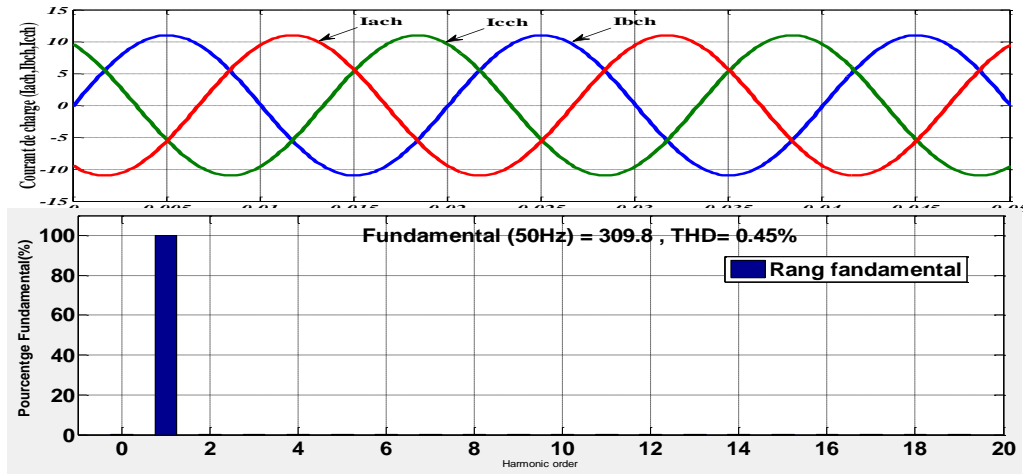


Figure II.5. Montage et Simulation d'une charge linéaire (charge RL)



B -Analyse spectrale des courants de charge RL

Figure II.6. Courant absorbé par une charge linéaire (charge RL)

Il s'agit de considérer le cas d'une source triphasée alimentant une charge RL triphasée comme le montre la Figure II.6. On remarque que le courant de charge est purement sinusoïdal, le spectre harmonique montre que la fondamentale (50 Hz ou le rang 1).

➤ Simulation d'une charge non linéaire (pont redresseur à diodes)

Le pont de Graetz triphasé de nature charge non linéaire alimente une charge RL, la Figure II.7, montre le schéma de principe du circuit considéré.

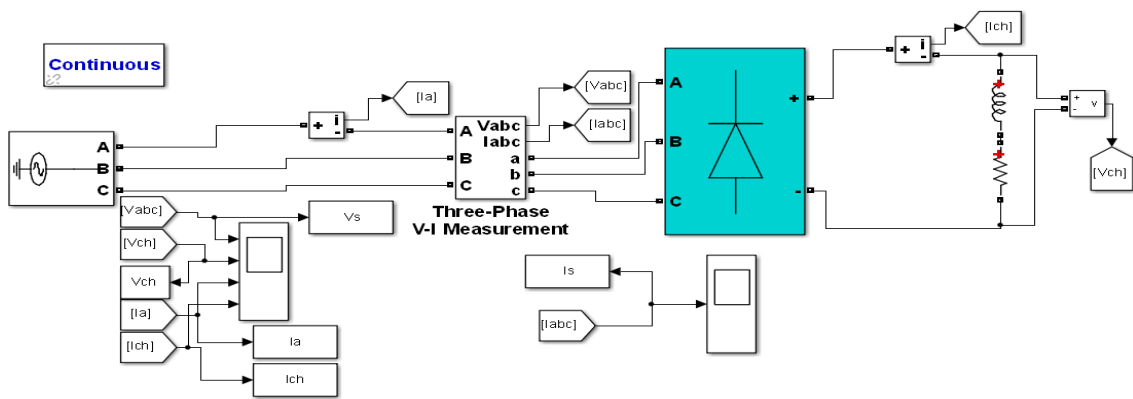
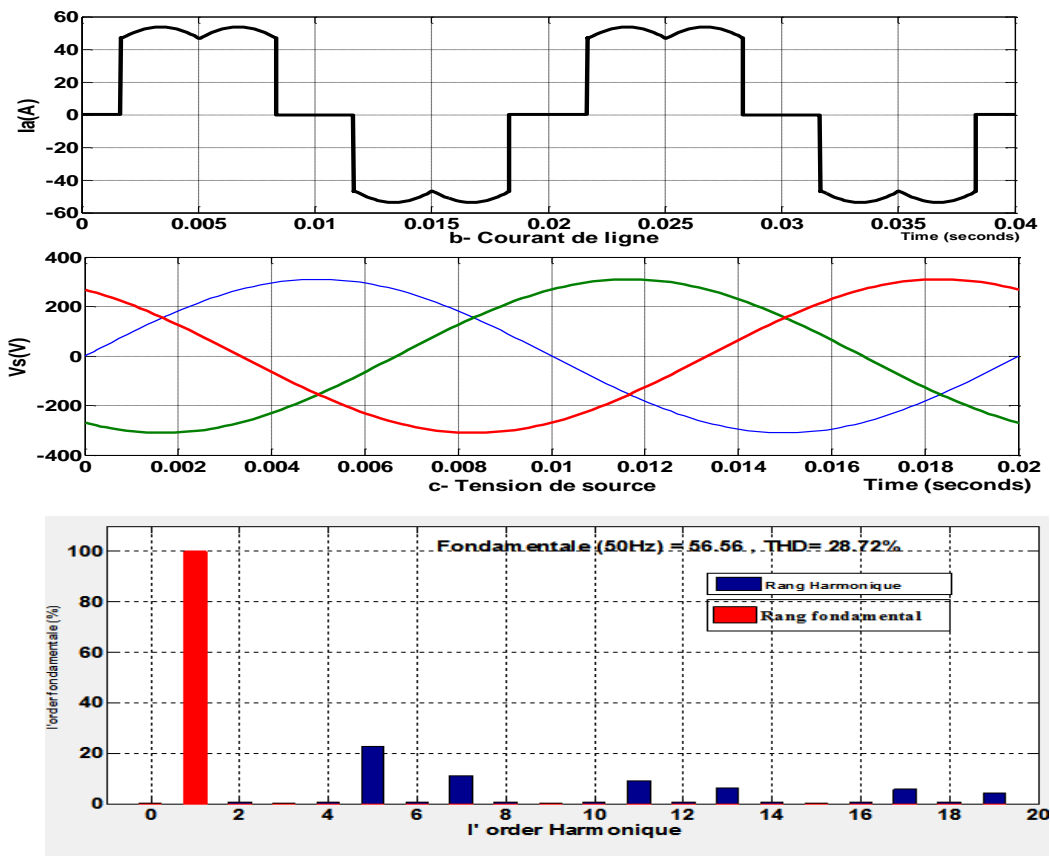


Figure II.7. Schéma synoptique d'un pont redresseur



d- Analyse spectrale des courants de charge non linéaire

Figure II.8. Montage et Simulation d'une charge non linéaire

Les courants de charge ont des formes presque rectangulaires, ils sont riches en harmoniques. Finalement, l'analyse fréquentielle illustrée par la Figure II.8 : montre la présence, en plus de la fondamentale (rang 1), des harmoniques de rang. 5, 7, 11, 13, 17, 19 ...etc. La charge non linéaire est considérée comme une source générant des harmoniques de courant de rang d'ordre  $k$  ( $k = 1,2,3,\dots,n$ ). Par conséquent, le réseau absorbe une énergie réactive. Le courant de charge  $i_{ch}$  consommé par ce pont redresseur, peut être décomposé en série de Fourier.[22]

### II.3.3 Les effets (Conséquence des harmoniques)

Les courants et les tensions harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie des équipements électriques. Bien que les susceptibilités des différents équipements et appareils électriques, raccordés à un réseau pollué, soient très diversifiées, On distingue des effets potentiels de ce qui suit[18]:

#### ➤ Effets instantanés

Ces effets immédiats apparaissent dans certaines formes de ces dispositifs :

##### 1- Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques,

Cela se produit en raison des changements répétés de la tension et le courant pendant la demi-période en présence d'harmoniques

##### 2- Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs : comme la dégradation de la qualité de l'image.

##### 3- Erreurs dans les appareils de mesure:

A cause des perturbations et la pollution dans les réseaux électriques, certains appareils de mesure comme les compteurs d'énergie à induction, présentent des dégradations de mesures et des erreurs de lecture supplémentaires.

##### 4- Vibrations et bruits:

Les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances et machines tournantes).

##### 5- L'interférence dans les systèmes de télécommunication :

L'importance de ces interférences est fonction de l'amplitude et de la fréquence des courants électriques ainsi que de l'importance du couplage électromagnétique entre les réseaux. Dans le cas de résonance, une partie des réseaux de télécommunication peut être rendue inutilisable. Le vieillissement des isolants Souvent dû à une contrainte en tension

consécutives à la présence des harmoniques, et donc à une augmentation locale du courant de fuite, ou encore à l'échauffement exagéré dans les conducteurs. Le plus spectaculaire de ce type d'effet est la destruction d'équipement (condensateur, disjoncteur, équipements d'éclairage et des batteries ...).[17]

### **6- Influence sur les relais de protection.[23]**

#### ➤ **Effets à terme :**

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique. L'effet à terme le plus important est de nature thermique, il se traduit par l'échauffement. Il conduit à une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclassement des équipements.

- 1- Echauffement des câbles et les équipements Concernant, les câbles qui peuvent être, d'un sur échauffement du neutre et des éléments bobinés (transformateurs, moteurs, etc..).
- 2- Echauffement des condensateurs.
- 3- Echauffements des pertes supplémentaires des machines et des transformateurs .[22]

## **II.4 Caractérisation des harmonique et leur effet sur l'onde de tension et de courant**

La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique (THD) défini pour la tension ou le courant. Ce critère est le plus souvent employé pour quantifier le contenu harmonique d'un signal distordu. Il mesure également le degré de déformation du signal apporté par les harmoniques par rapport à une onde sinusoïdale. Il va de soi que la répartition spectrale complète généralement l'information sur le THD en indiquant le rang des harmoniques dominants. Pour chiffrer la consommation de puissance réactive le facteur de puissance (FP) est généralement utilisé. Le courant absorbé par une charge non linéaire (convertisseur statique) n'est pas sinusoïdal, mais sa valeur moyenne sur chaque phase est souvent nulle. [21]

### **II.4.1. Analyse des harmoniques**

#### ➤ **Valeurs efficaces :**

Un procédé couramment utilisé pour décrire un signal est l'évaluation de sa valeur efficace. La valeur efficace d'un signal  $s(t)$  périodique de période  $T$  est donnée par :

$$S_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T S^2(t) dt} \quad (2.2)$$

La valeur efficace d'un signal déformé tient compte de la présence de toutes les composantes harmoniques, inter-harmoniques et de la composante continue. Lorsqu'un

signal comporte des composantes harmoniques, sa valeur efficace est, donc, différente de la valeur efficace du signal fondamental. Il est, alors, possible d'évaluer grossièrement la déformation du signal en comparant la valeur efficace de la composante fondamentale avec celle du signal est donnée par :

$$i(t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + \sum_{h=2}^{\infty} 2I_h \sin(h\omega t + \alpha_h) \quad (2.3)$$

Avec

$I_1, I_h$ : valeur efficace du courant fondamental et du courant harmonique de rang  $h$ .  
 $\alpha_1, \alpha_h$ : déphasage du courant fondamental et du courant harmonique de rang  $h$ .

$\omega$  : pulsation fondamentale du réseau.

Le taux de distorsion harmonique de ce courant s'exprime sous la forme suivante :

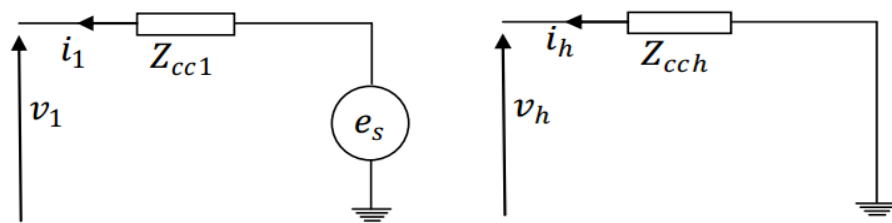
$$\mathbf{THD}_i = \sqrt{\sum_{h=2}^n \frac{I_h^2}{I_1^2}} \quad (2.4)$$

Le facteur de distorsion est défini comme:

$$\mathbf{Fd} = \frac{I_{11}}{I_{\text{eff}}} \quad (2.5)$$

Il est égal à un, lorsque la forme d'onde est sinusoïdale et décroît lorsqu'elle est perturbée.[24]

Pour étudier la déformation de la tension du réseau provoquée par le prélèvement de courants distordus, nous représentons la source d'énergie par une f.é.m. ( $e_s$ ) à la fréquence fondamentale mise en série avec une impédance variable avec la fréquence comme le montre la Figure II.9.



(a) : pour la fréquence fondamentale

(b) : pour l'harmonique de rang  $h$

**Figure II.9.** Schémas équivalents pour caractériser la déformation de la tension au point de raccordement.[21]

Sur ces schémas, les impédances représentent :

$Z_{cc1}$  : Impédance de court-circuit de la source à la fréquence fondamentale,

$Z_{cch}$  : Impédance de court-circuit de la source à la fréquence du rang  $h$ .

La tension au point de raccordement,  $v(t)$ , est composée de la somme ci-dessous :

$$V(t) = V_1(t) + \sum_{h=2}^n V_h(t) \quad (2.6)$$

$$\text{Avec : } v_1(t) = e(t) - |Z_{cc1}| I_1 \sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha_1 + \phi_{cc1})$$

$$v_h(t) = e(t) - |Z_{cch}| I_1 \sqrt{2} \sin(h\omega t + \alpha_h + \phi_{cch})$$

Où :

$|Z_{cc1}|, |Z_{cch}|$  représente le module de  $Z_{cc1}$  et  $Z_{cch}$  respectivement.

$\phi_{cc1}, \phi_{cch}$  représente l'argument de  $Z_{cc1}$  et  $Z_{cch}$  respectivement.

De l'équation (2.6), on constate que la tension du réseau n'est plus sinusoïdale et est déformée par les courants harmoniques par l'intermédiaire de l'impédance de court-circuit. Pour la rendre sinusoïdale deux solutions sont possibles : modification de l'impédance du réseau ou annuler les harmoniques de courant.

Le taux de distorsion harmonique en tension est un paramètre qui sert à évaluer la déformation de la tension et s'exprime sous la forme suivante :

$$\text{THD}_v = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{V_h^2}{V_1^2}}{1}} \quad (2.7)$$

Il est possible aussi de caractériser les harmoniques par leur participation dans la puissance apparente. Nous utilisons alors la notion de puissance déformante "D". Dans le cas d'un réseau équilibré à  $m$  phases, la puissance apparente  $S$ , la puissance active  $P$  et la puissance réactive  $Q$  sont données par les relations suivantes :

$$S = I \cdot V = m \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} = m V_{eff} I_{eff} \quad (2.8)$$

❖ **La puissance active :**

$$P = \frac{1}{T} \int_T V(t) \cdot I(t) dt = m \sum_{h=1}^n V_h I_h \cos \varphi_h \quad (2.9)$$

$$\text{avec:} \quad \varphi_h = \alpha_h - \beta_h \quad (2.10)$$

$\beta_h$  : Phase initiale de la tension harmonique d'ordre  $h$

$\alpha_h$  : Phase initiale du courant harmonique d'ordre  $h$ ,

$\varphi_h$  : Déphase de la tension harmonique d'ordre  $h$  sur le courant harmonique d'ordre  $h$ .

❖ **La puissance réactive :**

La puissance réactive est une puissance qui est absorbée au réseau et qui ne se transforme pas en travail. Elle est mesurée en VAR et son expression est donnée par (2.11)

$$Q = m \sum_{h=1}^n V_h I_h \sin \varphi_h \quad (2.11)$$

❖ **La puissance déformante :**

Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D), elle caractérise la contribution des harmoniques est définie par la formule suivante [18,21] :

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} = m V_1 \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2} \quad (2.12)$$

Cette puissance est véhiculée par les tensions et les courants harmoniques de rang différents, elle est dite puissance déformante et notée D.

**II.4.2. Le Facteur de puissance :**

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S. Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements.

$$FP = \frac{P}{S} = \left( \sum_{h=1}^n V_h I_h \cos \varphi_h \right) / \left( \sqrt{\sum_{h=1}^n V_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2} \right) \quad (2.13)$$

Nous pouvons aisément voir à partir de l'équation (2.13), que FP est inférieur à 1, les harmoniques réduisent le facteur de puissance donc réduisent la puissance disponible.

Si la valeur du facteur de puissance est faible cela traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements.

Pour une charge linéaire lorsqu'elle est soumise à une tension sinusoïdale consomme un courant sinusoïdal, il a été observé que le réseau est plus efficace si la tension et le courant sont en phase, donc on a introduit la notion de facteur de puissance qui est le  $\cos(\varphi)$  pour décrire ce déphasage.

Une charge non linéaire consomme un courant non sinusoïdal sous une tension sinusoïdale, donc la notion de  $\cos(\varphi)$  n'est plus valide, on parle d'un facteur de puissance « $F_p$ » qui prend en compte la puissance déformante D:

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2+D^2}} \quad (2.14)$$

Le déphasage (ou le  $\cos(\varphi)$ ) n'est plus le facteur de puissance dans le cas des régimes non sinusoïdaux, pour enlever l'ambiguïté on introduit un nouveau terme, le DPF (Displacement Power Factor) pour désigner le  $\cos(\varphi)$  en régime perturbé.[24]

$$DPF = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} \quad (2.15)$$

## II.5 Normes et réglementations:

Pour éviter tous les désagréments générés par la présence de courants et de tensions harmoniques sur le réseau et pour préserver la pollution du réseau et assurer une bonne qualité d'énergie dans le réseau électrique, des normes sont imposées aux fournisseurs et utilisateurs. Le taux de distorsion harmonique (THD) et le facteur de puissance (FP) sont également les deux grandeurs employées pour quantifier respectivement ces perturbations et la consommation de la puissance réactive. Rappelons que deux taux de distorsion harmonique sont distingués :

- ❖ le taux de distorsion harmonique en courant, noté  $THD_i$ ;
- ❖ le taux de distorsion harmonique en tension, noté  $THD_v$ .

À cet effet, les fournisseurs et les utilisateurs de l'énergie sont amenés à respecter des normes et des recommandations imposées qui définissent les règles relatives à la compatibilité électromagnétique (CEM) définies comme suit :

- au niveau international par CEI (Commission Electrotechnique Internationale),
- au niveau européen par (CENELEC) (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique),
- au niveau Français par :
  - l'UTE (Union Technique de l'Electricité) ;
  - Le CEF (Comité Electrotechnique Français).
- au niveau nord-américain par l'IEEE 519-1992 standard.[22]

Les principales normes en matière des pollutions harmoniques dans un réseau public à basse tension dont le courant par phase est inférieur à 16A sont: soit au niveau international les normes CEI 61000 ; au niveau européen la NF EN 50160 ; au niveau Français la NF C15-100. (voir annexe)

## II.7 Solutions possibles pour réduire les harmoniques et améliorer la qualité de l'énergie

Afin de compenser toutes les perturbations, séparées en 2 types (courant et tension), 2 groupes de solutions de dépollution, traditionnelle et modernes ou nouvelles [16,18]

### II.6.1 Solutions traditionnelles :

Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et /ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation communément appelé *filtres passifs*.

#### II.6.1.1 Filtrage passif :

Le principe du filtrage passif réside dans la modification locale de l'impédance du réseau, afin de faire dévier les courants harmoniques et en même temps éliminer les tensions harmoniques résultantes, ces filtres sont composés des éléments passifs (capacitifs et inductifs), qui elles sont disposés de manière à obtenir une résonance en série sur une fréquence déterminée, qui elles sont connectés en parallèle avec les charges injectant des courants harmoniques (les redresseurs à diodes ou à thyristors, fours à arcs électrique, etc.).[18]

Si on veut par exemple éliminer le courant harmonique de rang 5, on dimensionne alors les éléments passifs de manière à ce que l'impédance équivalente du filtre soit la plus petite possible à la fréquence  $5 \times$  fondamental, le courant circulera alors dans l'impédance la plus faible, c'est à dire dans le filtre passif et donc plus dans l'impédance de court-circuit du réseau comme l'illustre la Figure II.10.

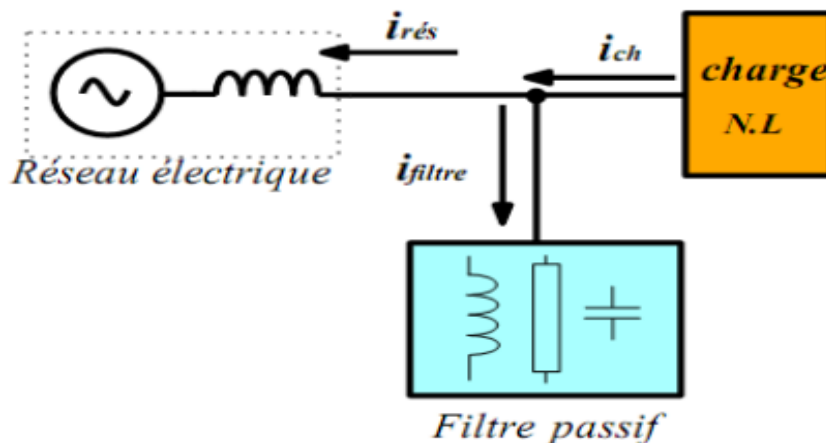


Figure II.10. Raccordement d'un filtre passif.

L'équation des courants de charge :

$$i_{ch} = i_{fundamental} + i_{h_5} + i_{h_7} + i_{h_{11}} + i_{h_{13}} \dots \dots + i_{h_{n_{order}}} \quad (2.16)$$

$$i_{filtre} = i_{h_5}$$

$$i_{ch} = i_{fundamental} + i_{h_7} + i_{h_{11}} + i_{h_{13}}$$

Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut.

➤ **Filtre passifs résonants**

Ils sont constitués d'un circuit RLC en série accordé sur une fréquence déterminée. Ces filtres sont très sélectifs.[22]

C'est un filtre sélectif constitué d'une résistance, d'un condensateur et d'une bobine en série, comme décrit sur la Figure II.11, son impédance équivalente est :

$$Z_{eq} = \frac{1-LC\omega^2+JRC\omega}{JC\omega} \quad (2.17)$$

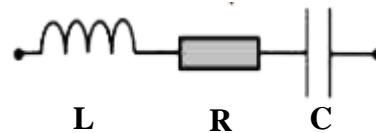


Figure II.11. Filtre passif résonant.

Le rang d'accord 'h<sub>a</sub>' correspond au multiple, entier ou non, de la fréquence nominale du réseau. La pulsation de résonance du filtre est  $\omega_a = 2. \pi. f_a = 1/\sqrt{LC}$

➤ **Filtre passifs amortis**

C'est un filtre passe haut constitué d'une inductance en parallèle avec une résistance, le tout en série avec un condensateur comme décrit sur la Figure II.12 Son impédance équivalente est :

$$Z_{eq}(\omega) = \frac{1-LC\omega^2+J\frac{L}{R}\omega}{-\frac{L}{R}C\omega^2+JC\omega} \quad (2.18)$$

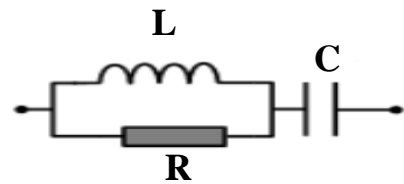


Figure II.12. Filtre passif amorti

➤ **Phénomène de l'antirésonance**

Le phénomène de l'antirésonance Figure II.13 se rencontre dans les réseaux électriques quel que soit leur niveau de tension. L'impédance vue par le réseau et le filtre passif résonant est :

$$Z_{eq}(\omega) = JL_s\omega \frac{1 - LC\omega^2 + JRC\omega}{1 - (L + L_s)C\omega^2 + JRC\omega} \quad (2.19)$$

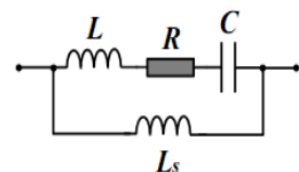


Figure II.13. Filtre passif parallèle anti-résonant.

Dans ce cas, les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre. Finalement, cette solution est dédiée à un type de charge et une configuration réseau et perd de son efficacité lorsque les caractéristiques de ceux-ci évoluent [6].

Le choix le plus commun pour le redresseur à thyristors de haute puissance consiste à utiliser une combinaison de plusieurs filtres réglés sur une seule fréquence (sur les harmoniques 5, 7, 11 et 13) et un filtre passe-haut du deuxième ordre réglé autour de la fréquence de l'harmonique 17 comme illustré sur Figure II.14

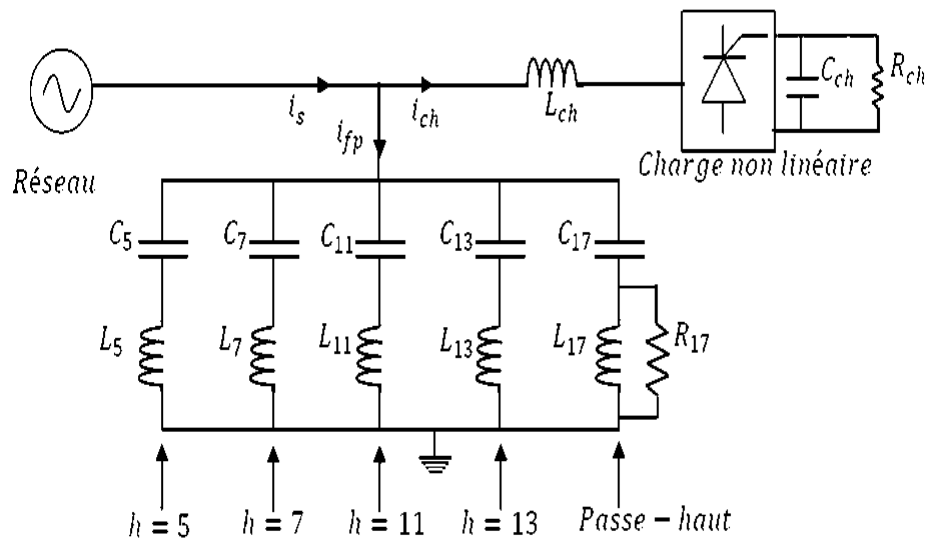


Figure II.14. Combinaison de filtres passifs pour redresseur à thyristors. [18]

Malgré l'efficacité, le pouvoir de corriger le facteur de puissance, la simplicité et le coût, cette configuration de filtres passifs pose tout de même certains problèmes :

- le dimensionnement dépend du spectre harmonique de la charge et de l'impédance de la source, cette dernière est d'ailleurs susceptible d'engendrer des résonances ;
- le filtre passif peut absorber les courants harmoniques d'autres charges non linéaires présentes sur le même réseau et entraîner dans cette hypothèse une surcharge ;
- toute modification du réseau (restructurations, nouveaux clients, ...), par changement de la fréquence d'accord, peut rendre le filtre passif inadapté et perturbateur (phénomène de résonance) ;
- les filtres passifs sont encombrants et présentent des risques de dérive de la fréquence au fur et à mesure que les composants vieillissent.

Cette solution est donc d'une efficacité moyenne, elle offre très peu de flexibilité et quasiment aucune évolutivité. Pour toutes ces limitations une attention particulière a été portée aux solutions nouvelles qui sont basées sur l'électronique de puissance [18]

## II.6.2 Solutions nouvelles :

Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques. Parmi toutes les solutions modernes, on trouve deux types de structures classiquement utilisées :

- ❖ Le filtre actif (série, parallèle ou bien encore associant les deux)
- ❖ Le filtre actif hybride (série, parallèle).
- **Filtrage Actif :**

Le principe de fonctionnement du filtre actif ou compensateur actif réside dans le fait que celui-ci génère soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal et rattrapé le courants harmoniques créés par les charges non linéaires , tendant ainsi à rétablir un courant appelé par la charge quasi sinusoïdal, sont utilisés en parallèle (FAP) ou en série (FAS) au sein d'une installation nécessitant un traitement harmonique Figure II.15.

Le filtre actif est d'une utilisation plus large que le filtre passif puisqu'il peut compenser plusieurs rangs d'harmoniques à la fois. Actuellement on a développé des techniques de commande de telle façon que les filtres modernes peuvent déterminer le courant harmonique à compenser en temps réel, donc ces filtres sont sélectifs et adaptatifs.



Figure II.15. schéma de Filtrage actif

Ce vocable générique regroupe donc en fait une multitude de systèmes, qui se différencient par :

- le nombre de convertisseurs utilisés, et leur mode d'association,
- leur type (source de tension, source de courant),
- les lois de régulation globales (compensation en courant ou en tension),
- l'association éventuelle avec des composants passifs

Les filtres actifs sont composés d'un VSI (Voltage Source Inverter) ou d'un CSI (Current Source Inverter). Les filtres VSI utilisent une capacité comme élément de stockage d'énergie; tandis que le CSI utilise une bobine comme élément de stockage, ces filtres agissent comme source de tension/courant harmonique qui est en opposition de phase avec ceux du réseau afin de rétablir un courant de source quasi sinusoïdal.

Selon leur aptitude de compenser les harmoniques du courant ou de tension, les filtres actifs peuvent être classés selon leur topologie en :

➤ **Filtre actif série :**

Le filtre actif série (FAS) se place entre la source et la charge Figure II.16, le rôle d'un FAS est de modifier localement l'impédance du réseau. Il se comporte comme une source de tension harmonique qui annule les tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et celles générées par la circulation de courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi, la tension aux bornes de la charge peut être rendue sinusoïdale. Cependant, le FAS ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.

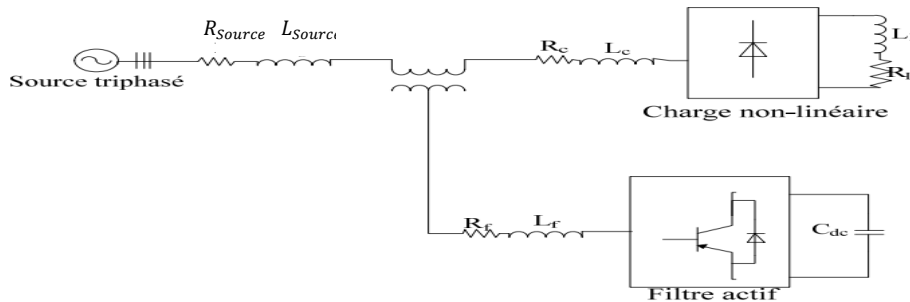


Figure II.16. Structure d'un filtre actif série

➤ **Filtre actif parallèle (FAP) :**

Le Filtre actif parallèle se connecte en parallèle avec le réseau et injecte en temps réel les composantes harmoniques des courants absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau Figure II.17.

L'objectif d'un filtre parallèle générateur de courant consiste à empêcher les courants harmoniques absorbés par la charge non linéaire de circuler à travers l'impédance du réseau située en amont du point de connexion du filtre. Le dimensionnement du filtre actif est lié au courant harmonique à générer. La majorité des filtres actifs parallèles actuellement installés sur les réseaux électriques fonctionne selon ce principe. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal.

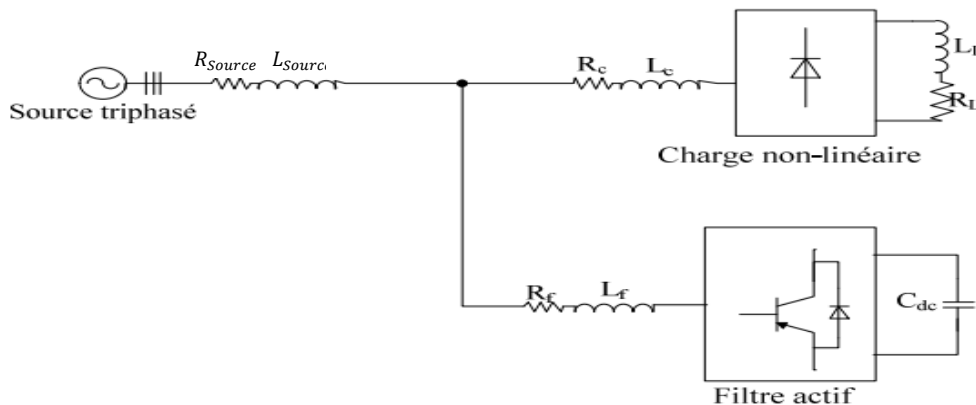
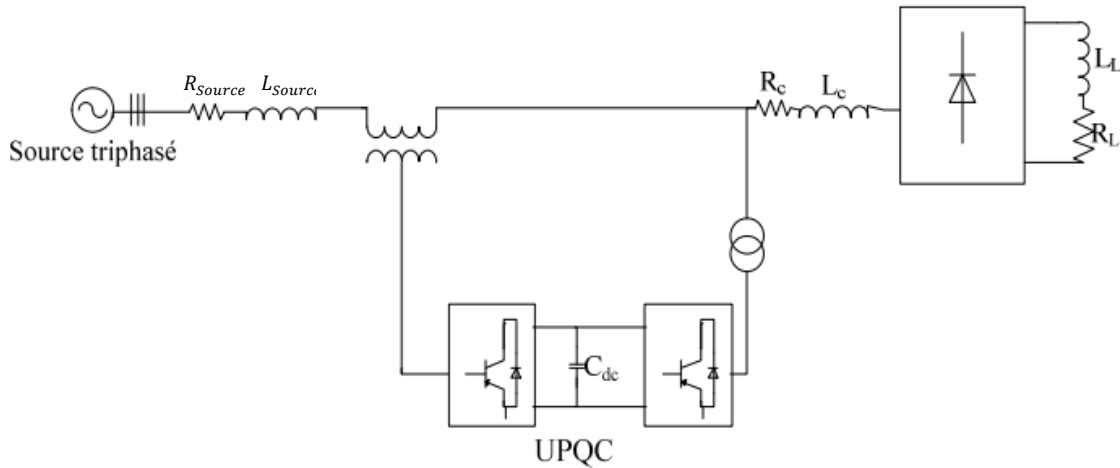


Figure II.17. Structure d'un filtre actif parallèle

➤ **Filtre actif universel(UPQC) :**

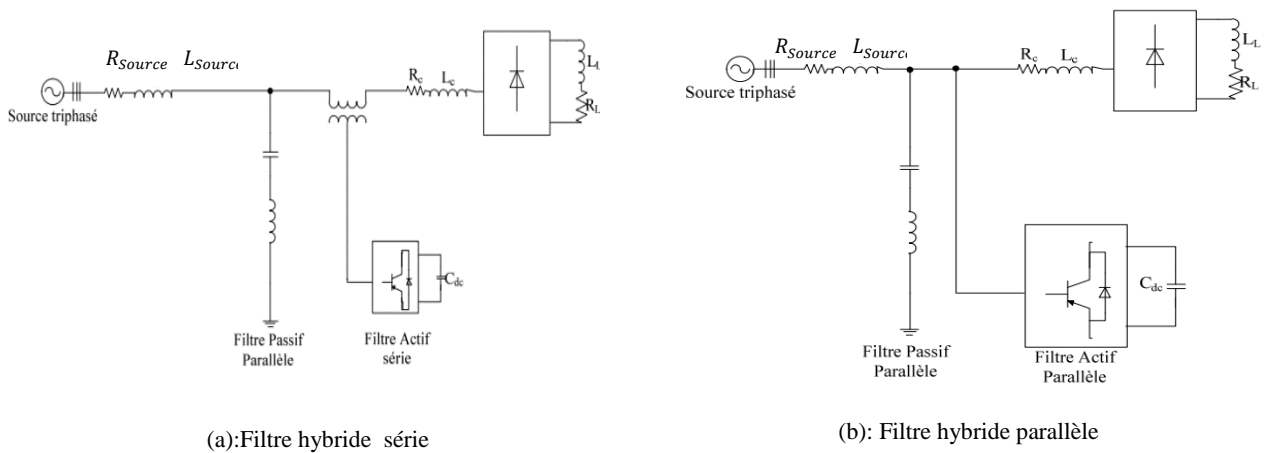
Le filtre universel (Unified Power Quality Conditionner UPQC), c'est la configuration idéale qui élimine les harmoniques de tension et de courant Figure II.18; elle est capable de délivrer une puissance propre sous des pollutions harmoniques assez élevées, mais son coût est très élevé, et sa commande est très complexe.



**Figure II.18.** Schéma générale avec UPQC

➤ **Filtre Hybride :**

Le filtre hybride combine les filtres actif et passif afin de réduire le coût du filtre actif en réduisant sa puissance nominale Figure II.19 ; Donc on utilise le filtre passif pour éliminer les harmoniques qui ont une amplitude importante (généralement l'harmonique 5 et 7) et laisser le reste pour le filtre actif. [24]



**Figure II.19:**Schéma Filtre hybride

## II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons illustré, en premier lieu, le phénomène des harmoniques, leurs sources, la notion de la charge linéaire et la charge non linéaire, on a vu les effets indésirables de la pollution harmonique. Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées.

La solution des filtres actifs parallèles et séries avec leurs combinaisons se présente comme la meilleure jusqu'à ce jour pour tous types de perturbations susceptibles d'apparaître dans le réseau électrique.

## Chapitre III : Filtrage Actif Parallèle

### Introduction

L'utilisation des filtres actifs devient de plus en plus populaire à cause de la pollution croissante des réseaux électriques. Un filtre actif sert principalement à dépolluer le réseau et garder le THD selon la norme IEEE 519-1992. Une des tâches la plus importante des filtres actifs est d'éliminer les harmoniques. En effet, Les charges non linéaires produisent des harmoniques et polluent les réseaux électriques[25].

Le filtre actif parallèle, appelé aussi compensateur shunt, permet, avec une commande appropriée, de neutraliser les courants harmoniques des charges polluantes et de compenser les déséquilibres et les courants réactifs[26].

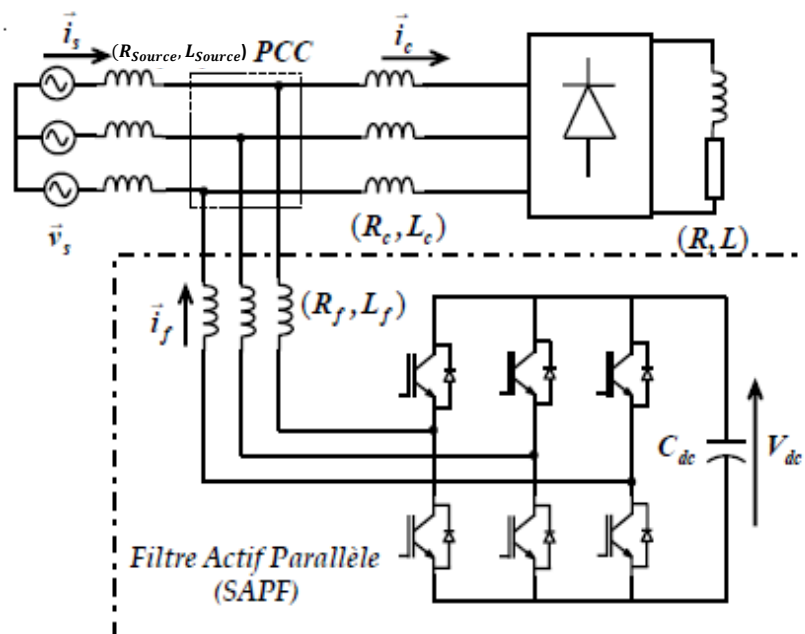


Figure III.1. Structure générale d'un filtre actif parallèle (SAPF).

Dans ce chapitre nous commencerons par le principe général du FAP triphasé, mise en œuvre et la structure générale du filtre actif parallèle, dans la troisième partie, traite l'état de l'art des différentes techniques d'extraction des harmoniques, dans la quatrième partie nous allons décrire la technique de commande et on termine ce chapitre avec une conclusion après qu'on donne les résultats de simulation.

### III.2 Principe de fonctionnement d'un Filtre Actif de Puissance

Dans le cas idéal le rôle du filtre actif consiste à éliminer tous les harmoniques produits par la charge non linéaire en fournissant à tout instant des harmoniques égaux en amplitude et en opposition de phase à ceux produits par la charge, et ceci afin que le courant dans la ligne reste purement sinusoïdal et égal au fondamental du courant de charge. La Figure III.2 illustre le principe de compensation parallèle idéale.

En pratique, on ne peut pas obtenir un courant de ligne purement sinusoïdal comme dans le cas idéal mais le but est d'avoir un courant qui sera le plus proche possible de la sinusoïde[27].

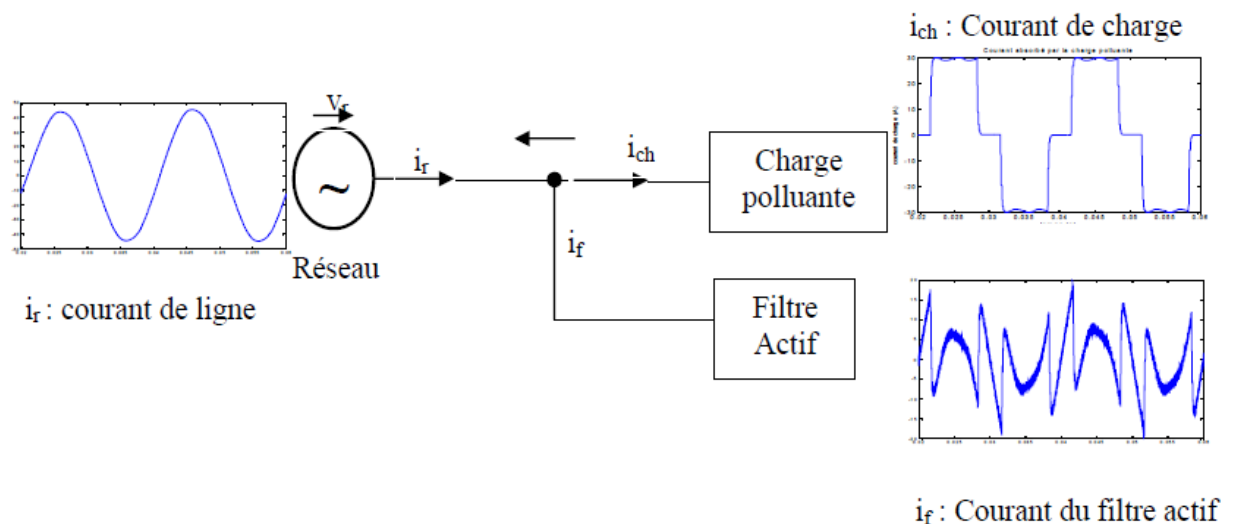


Figure III.2.Principe du compensateur shunt idéal.

#### III.2.1 Mise en œuvre

Les premiers principes de fonctionnement des *filtres actifs parallèles* ont été présentés dans la littérature dès le début des années 1970. En 1976, une première famille de *filtre actif parallèle* a été conçue à partir d'onduleurs à transistors de puissance commandés en MLI. Ces premiers dispositifs de puissance étaient alors proposés pour la seule compensation des courants harmoniques. Cependant, à cette époque, il était encore difficile de concevoir ce type de système pour des applications industrielles. En effet, dans ces années-là, il était presque impossible de trouver, sur le marché, des interrupteurs de puissance capables de fonctionner aux fréquences de commutation et aux niveaux de puissance exigés par la réalité industrielle. Cette barrière technologique sera franchie, dès 1977, lors de la conception d'un premier prototype de *filtre actif parallèle* à base de thyristors à commutations naturelles pour la

compensation de courant harmonique. Cependant, l'application des onduleurs à base de thyristor a tout de suite posé le problème de la génération non désirée de composantes injectées sur le réseau à la fréquence de commutation. La même raison a également empêché l'utilisation de compensateurs statiques parallèles à thyristors, lesquels avaient été conçus pour la compensation conjointe de la puissance réactive et des courants déséquilibrés.

Au cours des années 1980, des progrès importants dans le domaine des semi-conducteurs ont permis de développer de nouveaux composants de puissance associant hautes fréquences de commutation et fortes puissances. Profitant de ces avancées, et de l'avènement des interrupteurs de puissance du type GTO et IGBT, de nombreux onduleurs de puissance, commandés en MLI, ont pu être conçus en vue de répondre aux contraintes industrielles de conception des *filtres actifs parallèles*. Ainsi, ces derniers ont commencé à être commercialisés et installés à travers le monde, et plus spécialement dans les pays les plus industrialisés comme le Japon. Ces premiers prototypes ne compensaient alors que les perturbations harmoniques de courant. Suite à ces premiers développements, d'autres types de *filtre actif parallèle* ont pu être réalisés pour compenser à la fois la puissance réactive, et/ou les harmoniques et les déséquilibres de courant.

Actuellement, les *filtres actifs parallèles* sont essentiellement installés par les consommateurs industriels. L'évolution future de ces dispositifs de puissance pourrait autoriser le fournisseur d'énergie à prendre un rôle plus important, en lui permettant de les installer lui-même. Cette approche permettrait d'amortir la propagation des harmoniques causées par la résonance, laquelle peut être observée entre les inductances du réseau et les batteries de condensateur installées pour améliorer le facteur de puissance. De même, des *filtres actifs parallèles* installés par le fournisseur auraient aussi pour objectif de réduire la distorsion harmonique de tension en amont, côté réseau électrique [28].

### III.2.2. Structure du Filtre Actif Parallèle

La structure des filtres actifs se compose essentiellement de deux parties, une partie puissance et une partie commande. La partie puissance se compose d'un onduleur, d'un filtre de couplage et d'un élément passif lui servant de source d'énergie. La partie commande, sert à contrôler la commutation des semi-conducteurs formant l'onduleur.

➤ **La partie puissance** : est constituée d' un onduleur de tension deux niveaux a basse d' interrupteur de puissance (IGBT) avec une diode antiparallèle ; d' un circuit de stockage d' énergie, souvent capacitif et d' un filtre à la sortie de l'onduleur.

➤ *La partie commande* : elle est constituée de l' algorithme de détection de courant de référence et de la commande de l' onduleur de tension [29].

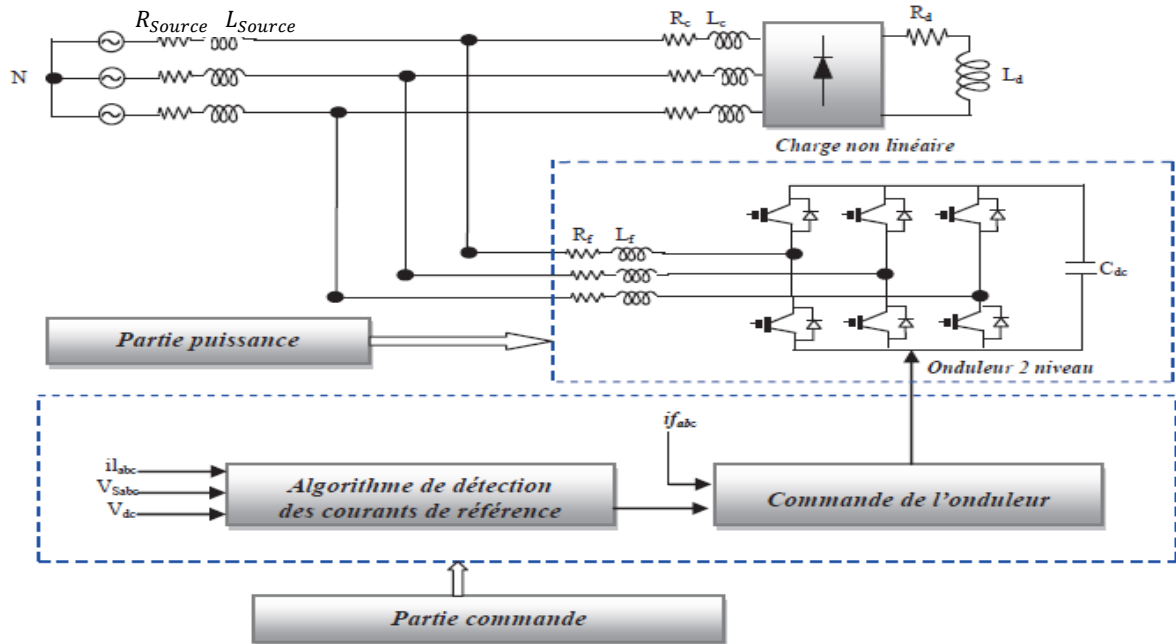


Figure III.3. structure d'un filtre actif parallèle.

### III.2.3. Etudes de la partie puissance

#### a) Modélisation de l'onduleur de tension deux niveaux :

L'onduleur de tension, contrairement à celui de courant est caractérisé par son élément d'alimentation en énergie qui est un condensateur. La tension aux bornes de ce condensateur doit être maintenue constante [30].

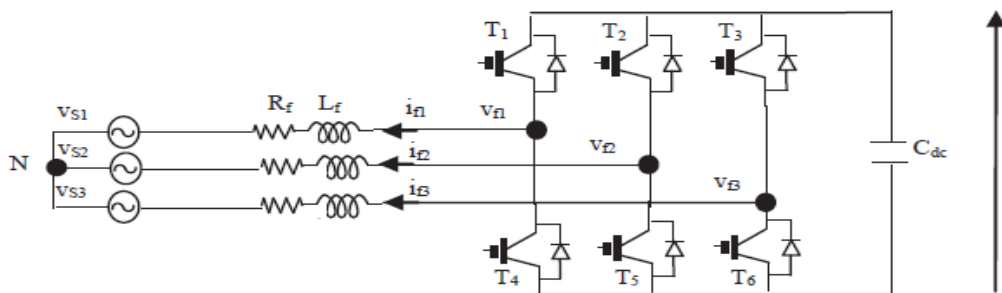


Figure III.4. Onduleur de tension deux niveaux.

Les interrupteurs sont unidirectionnels en tension et doivent être réversibles en courant. Pour y parvenir, les éléments semi-conducteurs composant l'onduleur son associés en

parallèle avec des diodes. Ces semi-conducteurs sont commandés à la fermeture et à l'ouverture[31]. Les semi-conducteurs d' un même bras de l'onduleur sont commandés de façon alternée, la conduction de l'un entraînant le blocage de l'autre. Le fonctionnement de l'onduleur se déroule de manière à ce que les semi-conducteurs d'un même bras ne sont jamais fermés simultanément, au risque de court-circuiter le condensateur. En effet, les semi-conducteurs du même bras peuvent être ouverts pendant un temps défini comme étant un temps mort afin d'éviter ce risque [30].

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l' onduleur de la Figure III.4 dépendent de l'état des signaux de commande (S1, S2, S3) comme il est défini par[32]:

$$S_1 = \begin{cases} 1 & T_1 \text{ fermé } T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & T_1 \text{ ouvert } T_4 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_2 = \begin{cases} 1 & T_2 \text{ fermé } T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & T_2 \text{ ouvert } T_5 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_3 = \begin{cases} 1 & T_3 \text{ fermé } T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & T_3 \text{ ouvert } T_6 \text{ fermé} \end{cases}$$

Les tensions de ligne, imposées par l'onduleur, sont alors définies par :

$$\begin{bmatrix} v_{f1} - v_{f2} \\ v_{f2} - v_{f3} \\ v_{f3} - v_{f1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 - S_2 \\ S_2 - S_3 \\ S_3 - S_1 \end{bmatrix} v_{dc} \quad (3.1)$$

Les tensions de sortie de l'onduleur, poses par  $V_{fx}$ ; avec ( $x = \{1, 2, 3\}$ ), sont référencées par rapport au neutre du réseau et vérifient l'équation suivante :

$$V_{fx} = V_{sx} + L_f \frac{di_{fx}}{dt} + R_f \cdot i_{fx} \quad (3.2)$$

Les tensions du réseau étant supposées équilibrées et sachant que la somme des courants injectés par l' onduleur est nulle, on peut écrire :

$$\begin{cases} V_{s1} + V_{s2} + V_{s3} = 0 \\ i_{f1} + i_{f2} + i_{f3} = 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

Nous pouvons donc déduire des équations (3.2) et (3.3) la relation suivante :

$$V_{f1} + V_{f2} + V_{f3} = 0 \quad (3.4)$$

A partir des équations (3.1) et (3.4), nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_1 - S_2 - S_3 \\ -S_1 - 2S_2 - S_3 \\ -S_1 - S_2 - 2S_3 \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{3} \quad (3.5)$$

Puisque les grandeurs  $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$  peuvent prendre chacune deux valeurs (0 ou 1), il en résulte huit commandes possibles, présentées dans le Tableau III.1 . (Voir l'annexe)

**b) Système de stockage d'énergie :**

La source continue de l'onduleur de tension est un condensateur  $C_{dc}$  qui joue le rôle d'une source de tension continue  $V_{dc}$  [33]. Une certaine quantité de l'énergie doit être emmagasinée en permanence dans la source continue. Mais à cause des pertes dans les interrupteurs et dans le condensateur, la source continue doit recevoir son énergie du réseau continuellement à travers le convertisseur. Pour son fonctionnement, la tension  $V_{dc}$  est maintenue constante afin de remédier aux fluctuations qui peuvent affecter la qualité du filtrage[30].

**c) Filtre de sortie :**

Le filtre de sortie a pour rôle d'assurer la liaison entre le réseau et l'onduleur de tension. Le dimensionnement de ce filtre doit tenir compte les deux points important suivants :

- Il doit fournir une atténuation suffisante des rebondissements causés par la commutation des semi-conducteurs de l'onduleur du filtre actif.
- Il doit préserver les performances du filtre actif, définie par :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{di_{ref}}{dt} \quad (3.6)$$

Un filtre de sortie du premier ordre est le plus souvent utilisé dans la littérature, il est composé d'une inductance  $L_f$  et de résistance interne  $R_f$ . Une valeur relativement faible de  $L_f$  permet d'obtenir une bonne dynamique du FAP en satisfaisant l'égalité (3.6)[31,33].

### III.2.4 Etude de la partie commande

La commande est mise en œuvre en trois étapes. Dans la première étape, la tension de réseau et le courant de la charge sont détectés à l'aide de capteurs de mesures. Dans la deuxième étape, on détermine le courant de référence à partir des méthodes d'identifications approuvées. Dans la troisième étape de commande, les signaux de commutation de semi-conducteur de l'onduleur du FAP sont générés en utilisant, l'hystérésis, MLI classique ou vectorielle, en mode glissant, ou des techniques de contrôle à base de logique floue [29].

Donc la commande d'un filtre actif parallèle triphasé est basée sur la division du système en deux boucles [28]. La première sert à générer les courants de références, que l'onduleur doit injecter dans le point de raccordement, quant au deuxième, elle sert à contrôler les courants injectés par l'onduleur de sorte qu'ils suivent le plus fidèlement possible ceux de la référence comme présenté dans la Figure III.5[29].

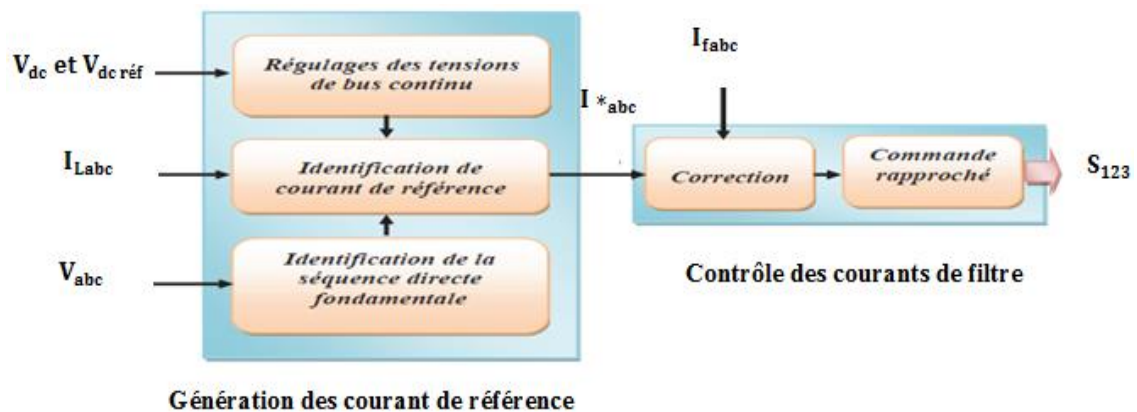


Figure III.5. Schéma d'un Commande du FAP

La commande du filtre actif parallèle est basée sur la nature de l'onduleur qui produit le courant à injecter dans le réseau et la commande choisi pour contrôler cet onduleur.

#### ➤ Commande par hystérésis :

L'objectif de la commande par hystérésis, encore connue sous la dénomination de commande en tout ou rien, est de contrôler les courants de compensation en les forçant à suivre ceux de référence. Un système de base pour le contrôle de la bande d'hystérésis est représenté sur la Figure III.6.

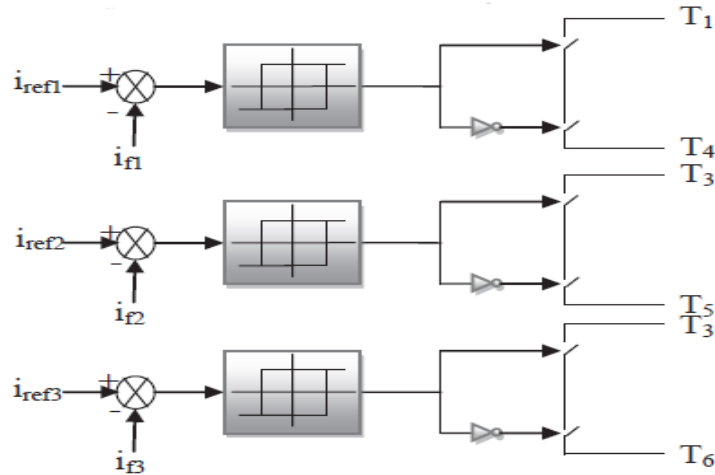


Figure III.6.Principe de commande par hystérésis.

Les courants de charge réels sont détectés et comparés avec leurs composants non actifs. Cette technique peut être caractérisée par une bande d'hystérésis qui est le seul paramètre de contrôle de courant de chaque bras de l'onduleur. Les signaux de sortie des comparateurs à hystérésis sont utilisés pour commander l'ordre de commutation des interrupteurs de chaque bras de l'onduleur. Le courant de compensation va rester dans une bande autour du signal de référence, voir la Figure III.7.

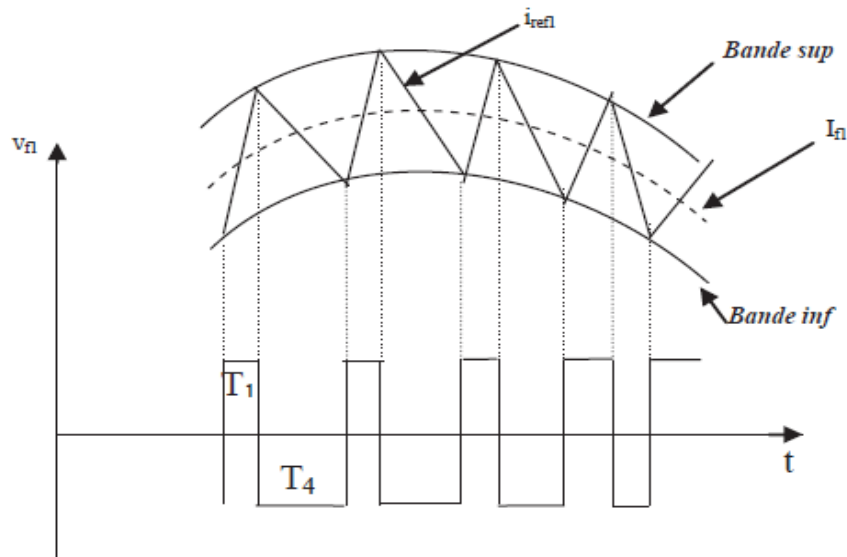


Figure III.7.Commande des interrupteurs par hystérésis.

La simplicité de la mise en œuvre, est le principal atout de cette technique. En revanche, les commutations évoluent librement à l'intérieur de bande d'hystérésis, on ne peut maîtriser correctement le spectre de haute fréquence dû aux fréquences de commutations.

III.2.5 Réglage De La Tension Continue De l'onduleur

L'onduleur est tenu de fournir en tout temps les courants de compensation harmonique dans le réseau. Et pour atteindre ce but, il faut qu'il soit alimenté par une source d'énergie stable.

La boucle d'asservissement de la tension  $V_{dc}$  permet de réaliser cette stabilité car le courant de compensation injecté présente des erreurs en estimation, à cause de la perte d'énergie due aux :

- ♦ Pertes statique et dynamique dans les semi-conducteurs de puissance de l'onduleur.
- ♦ Pertes Joule dans les inductances de découplage  $L_f$  et la capacité  $C_{dc}$ .
- ♦ L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante.

❖ Difficulté de la Régulation

La variation de tension  $\Delta V_C$  aux bornes du condensateur de stockage dépend principalement de la valeur de la capacité  $C_{dc}$ . En effet, une diminution de  $C_{dc}$  entraîne l'augmentation de  $\Delta V_C$  et inversement. L'objectif principal de la régulation de tension revient donc à limiter la variation de la tension  $\Delta V_C$  en utilisant une capacité de valeur aussi faible que possible. De cette façon, le dimensionnement du condensateur pourra être optimisé.

Pour cela la régulation du niveau de tension  $V_{dc}$  est faite par un régulateur de type proportionnel intégral (PI). Le courant de référence additionnel  $I_{réf}$  est généré par le régulateur PI comme suit :

$$I_{réf} = k_p \cdot (v_{dc_{réf}} - v_{dc}) + k_i \int (v_{dc_{réf}} - v_{dc}) \cdot dt \tag{3.7}$$

Avec  $k_p$  et  $k_i$  les termes du régulateur PI. Ils sont déterminés à partir de l'étude de la fonction de transfert en boucle fermée élaborée sur la Figure III.8.

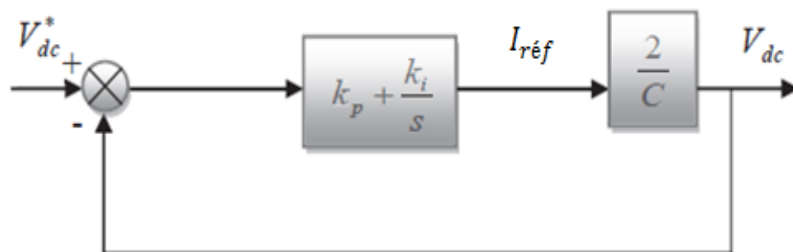


Figure III.8. Boucle de réglage de tension continu  $V_{dc}$

La fonction de transfert est donnée par :

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc_{réf}}} = \frac{2 \cdot \xi \omega_c s + \omega_c^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \omega_c s + \omega_c^2} \tag{3.8}$$

Ou le coefficient d'amortissement  $\xi$  et la fréquence de coupure  $\omega_c$  sont donnés par :

$$\begin{cases} \omega_c = \sqrt{\frac{2k_i}{C}} \\ \xi = k_p \sqrt{\frac{1}{2k_i C}} \end{cases} \quad (3.9)$$

### III.3. Dimensionnement Des Paramètres Du Filtre Actif Parallèle

#### III.3.1 Système de stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur  $C_{dc}$ , qui joue le rôle d'une source de tension continue  $V_{dc}$ , comme le montre la Figure III.2. Le choix des paramètres du système de stockage ( $V_{dc}$  et  $C_{dc}$ ,) se répercute sur la dynamique et la qualité de compensation du FAP. En effet, une tension  $V_{dc}$  élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue  $V_{dc}$ , causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de  $C_{dc}$ , peuvent dégrader la qualité de compensation du FAP. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. Pour cette raison, nous pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage. Pour démontrer ceci, deux méthodes peuvent être utilisées :

❖ 1<sup>er</sup> méthode se base sur le calcul de l'énergie fournie par le FAP pendant une demi-période de la pulsation de puissance liée aux deux premiers harmoniques (5 et 7 pour un pont redresseur de Graetz) [27].

En choisissant un taux d'ondulation acceptable ( $\epsilon$ ), généralement de l'ordre de 5% de  $V_{dc}$ , nous pouvons calculer la capacité  $C_{dc}$  à partir de la relation suivante :

$$C_{dc} = \frac{V_s \sqrt{I_5^2 + I_7^2 - 2I_5 I_7 \cos(5\alpha - 7\alpha)}}{2\omega \epsilon V_{dc}^2} \quad (3.10)$$

Avec  $V_s$  la tension simple du réseau,  $I_h$  le courant harmonique du rang h et  $\alpha$  l'angle d'allumage des thyristors du pont Graetz.

$V_s$  : La valeur efficace de la tension simple du réseau.

$\alpha$  : L'angle d'allumage des thyristors du pont de Graetz.

❖ 2<sup>ème</sup> méthode, plus simple, se base sur la mesure du courant harmonique  $I_h$  du rang le plus faible. La capacité C se calcule de la façon suivante :

$$C = \frac{I_h}{\epsilon V_0 \omega_h} \quad (3.11)$$

$\omega_h$  : est la plus faible pulsation des harmoniques à compenser.

$I_h$  : Le courant harmonique du rang h.

### III.3.2 Filtre de sortie

Il y a deux types de filtre de raccordement fortement répondus dans la littérature, un filtre RL de premier ordre et filtre LCL de troisième ordre. Pour le dimensionnement d'un tel filtre on est souvent amené à faire un compromis entre trois critères essentiels à satisfaire [34]:

1. Assurer la dynamique du courant.
2. Empêcher les harmoniques de commutation de se propager du côté réseau.
3. Causer le minimum de chute de tension à ses bornes.

#### ➤ Filtre du premier ordre

Ce type de filtre est le plus utilisé dans la littérature. Il est composé d'une inductance  $L_f$  de résistance interne  $R_f$ , comme le montre la Figure III.4.

### III.4. Stratégies De Commande Du Filtre Actif Parallèle Triphasé

Les performances des filtres actifs dépendent très fortement de plusieurs facteurs :

- L'algorithme de commande utilisé pour identifier les références de courants ou de tensions.
- Les performances de la boucle de régulation de la tension du réservoir capacitif.
- Le mode de contrôle utilisé pour la génération des ordres de commande des interrupteurs de puissance.

Puisque, le but étant d'améliorer les caractéristiques du filtrage tout en utilisant une méthode de commande de complexité réduite. Pour ce dernier facteur, la stratégie de commande qui fait l'objet de notre étude sur le FAP triphasé est la commande par hystérésis classique. Pour cela, nous donnons dans cette section un détail approfondi sur cette technique [34].

#### III.4.1 Détermination des Courants Harmoniques de Référence

La charge polluante absorbe un courant constitué d'une composante fondamentale et de composantes harmoniques. Le but du filtrage actif est la génération de courants harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec ceux absorbés par la charge. Pour extraire le courant ou la tension harmonique à partir des ondes déformées correspondantes, on distingue deux stratégies :

1. *Stratégie de détection harmonique dans le domaine fréquentiel :*

Cette stratégie est basée sur l'analyse de Fourier du courant ou de la tension. L'application *on-line* de la transformée de Fourier (système d'équations non-linéaires) est un calcul encombrant ; il en résulte un temps de réponse relativement lent.

2. *Stratégie de détection harmonique dans le domaine temporel :*

Cette stratégie est basée sur la dérivation instantanée du signal correspondant aux composantes harmoniques du courant ou de la tension de la charge non-linéaire. Dans ce domaine, la commande du FAP dépend de la méthode de détection utilisée, on peut distinguer trois méthodes :

- Identification à partir de la détection du courant de la charge polluante.
- Identification à partir de la détection du courant de la source.
- Identification à partir de la détection de la tension de la source.

Les deux premières méthodes sont les plus utilisées. Dans notre cas, nous avons choisi la deuxième méthode. Dans cette méthode, on détecte le courant de source et on le compare avec une référence sinusoïdale pour obtenir le courant de compensation harmonique de référence. Ensuite, ce courant de compensation harmonique de référence sera comparé avec le courant de compensation réel injecté par le FAP et le résultat de comparaison sera envoyé à un contrôleur afin de générer les impulsions des gâchettes de l'onduleur du FAP. Le point le plus important ici est que le courant injecté par le FAP est surveillé et commandé pour suivre son courant de compensation harmonique de référence [34].

III.4.2 Stratégie de contrôle du filtre actif

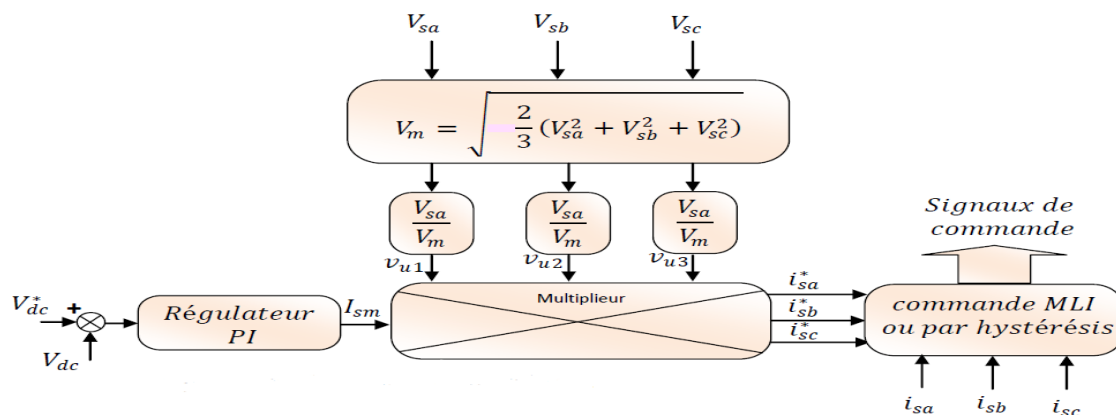


Figure III.9. Commande indirecte du filtre actif.

Dans cette application, la technique de commande dite indirecte du courant du filtre actif est appliquée. Le principe est donné à la Figure III.9. Il est décrit comme suit la tension

du bus continu du filtre actif est mesurée et comparée avec une tension de référence  $V_{dc}^*$ . L'erreur qui y est engendrée sert d'entrée pour le régulateur PI, qui estime le courant maximum de la source  $I_{sm}$ . Ce courant prend en charge le courant actif pour la régulation de la tension du bus continu et pour la compensation des pertes engendrées dans l'onduleur. Les courants de références instantanés de la source ( $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$ ) sont évalués en multipliant le courant maximum  $I_{sm}$  par trois vecteurs unitaires  $V_{u1}$ ,  $V_{u2}$ ,  $V_{u3}$  de la tension de source utilisés pour estimer le courant de référence de la source [34,35,18].

**III.5. Simulation numérique**

Un système d'électronique de puissance est un ensemble de conversion d'énergie qui contient les organes suivants :

- Source d'énergie.
- Convertisseur statique.
- Charge réceptrice.
- Dispositif de commande du convertisseur.

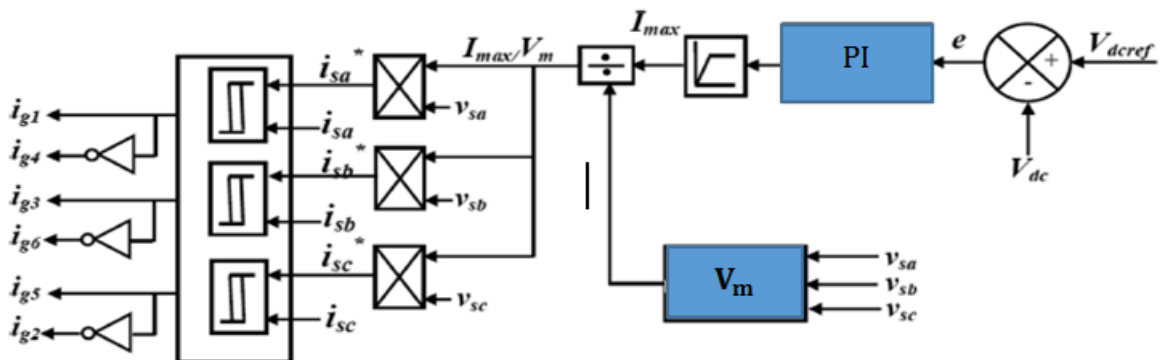


Figure III.10. Schéma synoptique de circuit de commande.

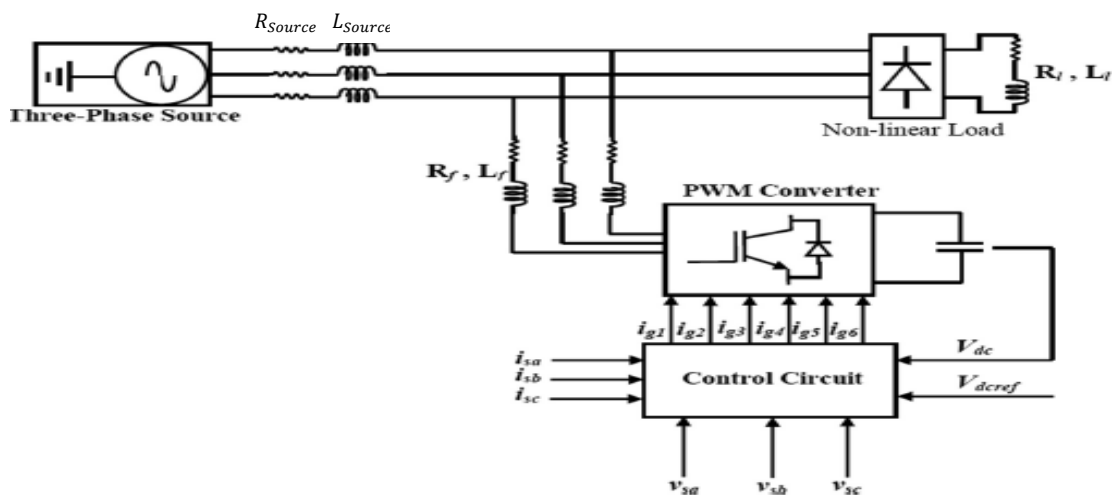


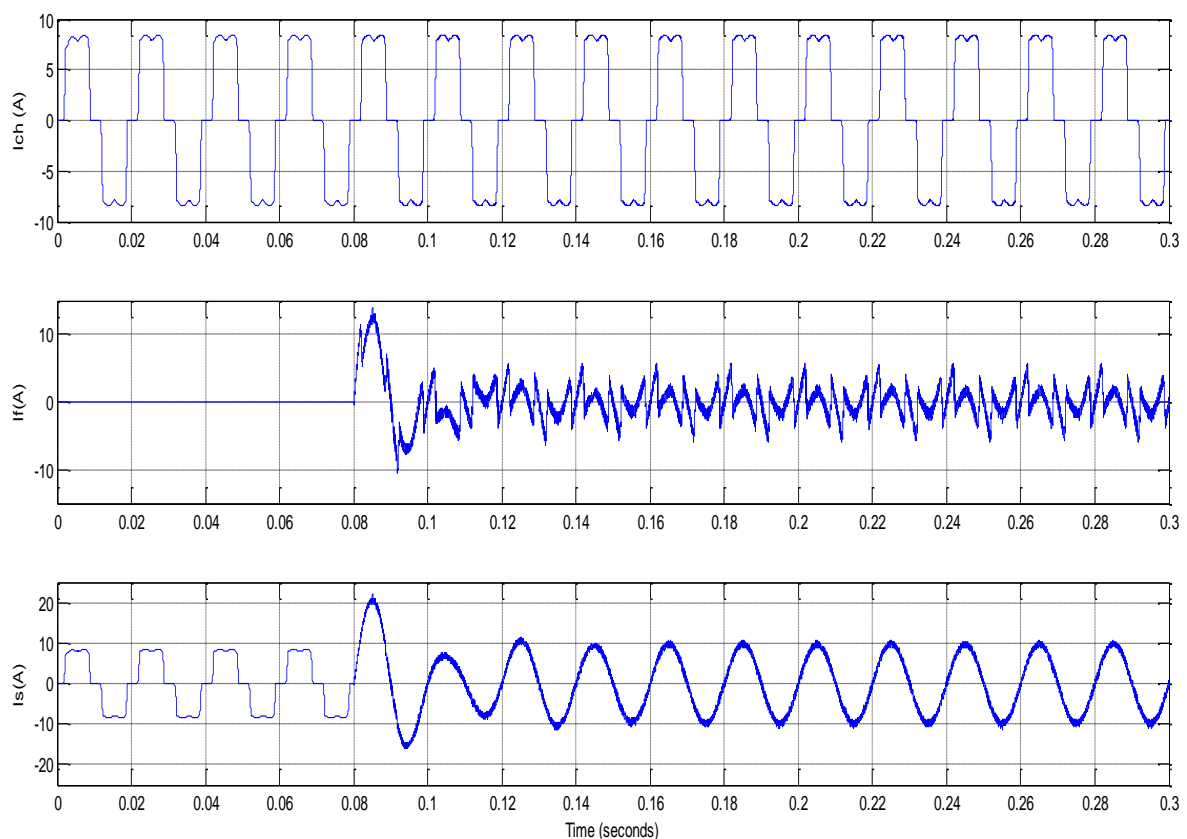
Figure III.11. Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante.

### ➤ Paramètres de simulation

La simulation du système global (réseau électrique, charge non linéaire, FAP) est réalisée sous l'environnement Matlab /Simulink. Tous les paramètres de simulation sont récapitulés dans le Tableau III. 2. (Voir annexe).

### ➤ Simulation de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante

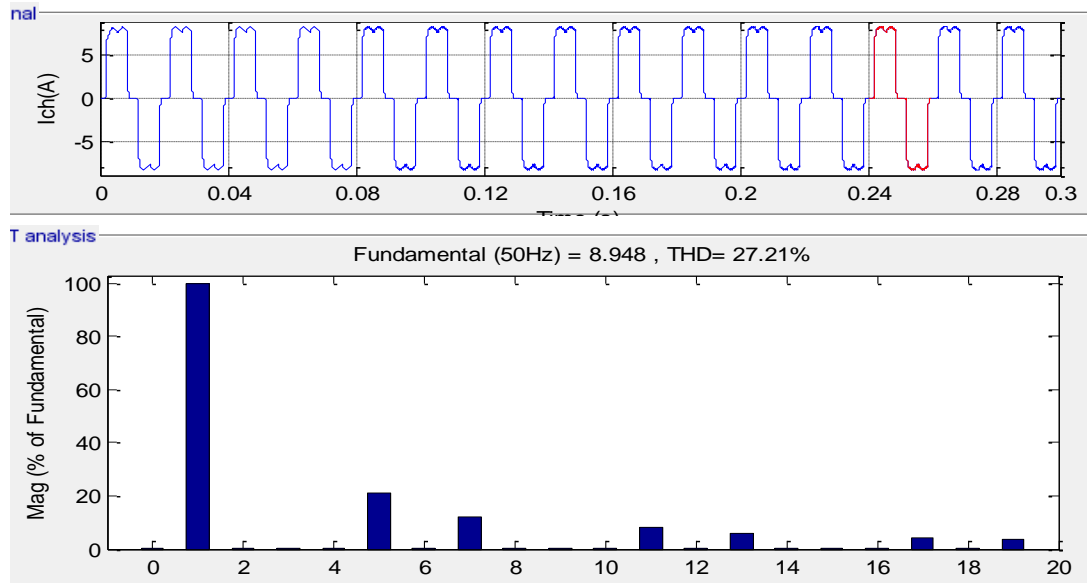
• **Première charge non linéaire** (Cas de Pont de Graetz triphasé à diodes alimentant une charge RL série.)



**Figure III.12.** Formes d'ondes des courants:  $i_{ch}$  courant de charge,  $i_f$  courant du filtre actif et  $i_s$  courant de source

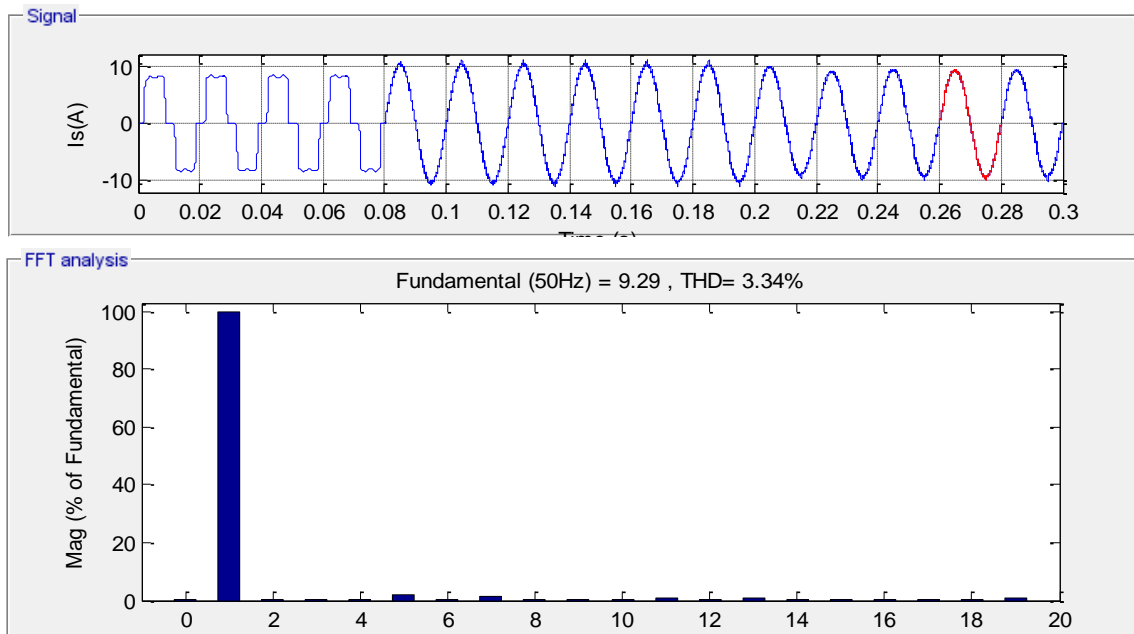
La Figure III.12 illustre les différentes formes d'onde avant et après la mise en service du FAP. Avant la mise en service (avant  $t = 0.08s$ ) nous remarquons que le courant de charge  $i_c$  et de source  $i_s$  ont la même forme (une forme distordue) et que le courant du filtre est nul. A l'instant  $t=0.08s$ , le FAP est mis en service il commence à injecter les courants de compensation  $i_f$ , ce qui permet, après un transitoire, aux courants du réseau de redevenir quasi-sinusoidaux.

Les Figure III.13 présente l'analyse spectrale de courant de la charge non linéaire de la phase A. Le THD du courant de la charge non linéaire est de 27.21%.



**Figure III.13.**Formes d’ondes des courants:  $i_{ch}$  courant de charge, Spectre du courant de la charge non linéaire

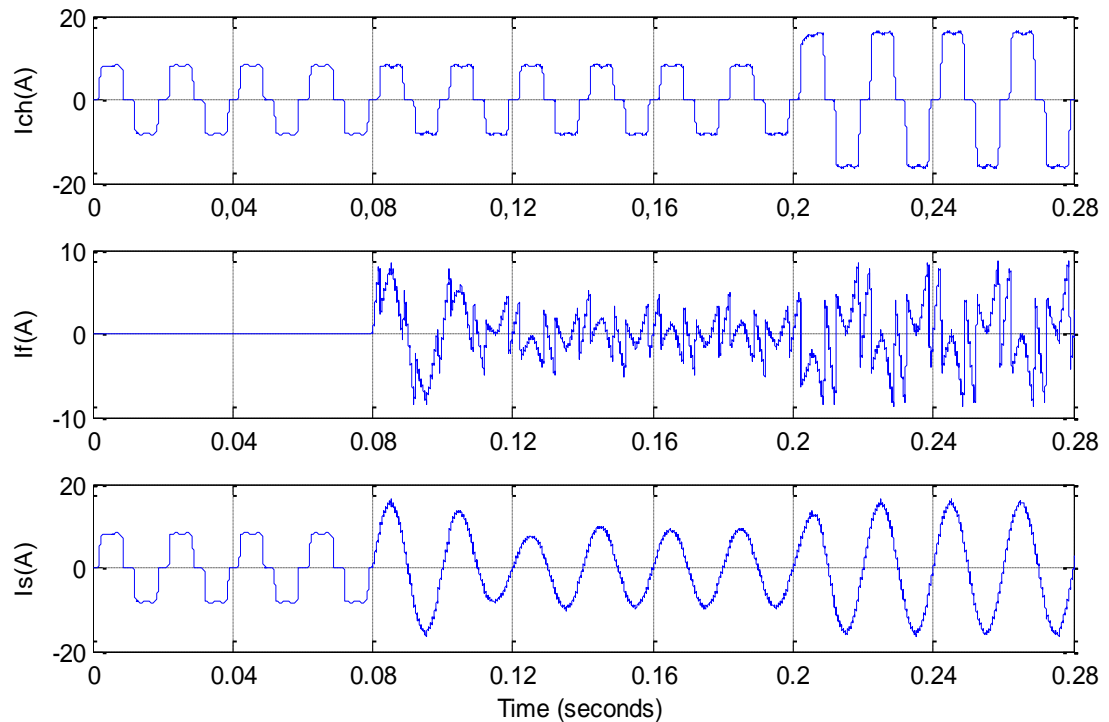
On voit d’après la Figure III.14 que l’allure du courant de source après filtrage est presque sinusoïdale, Le THD du courant de source est de 3.34%, ce qui donne une bonne qualité de filtrage.



**Figure III.14.**Formes d’ondes de courant :  $i_s$  courant de source, Spectre du courant de source, Avant et après la mise en service du FAP.

- **Deuxième charge non linéaire** : (Cas Pont de Graets triphasé à diodes alimentant une charge RL série avec une variation de la charge R ).

Pour étudier la robustesse de la commande, on applique une variation de la charge non linéaire avec un passage de  $R_1$  à  $R_2$ . La Figure III.15 montre qu'à  $t=0.2$  les courants de charge montrent une augmentation brusque alors que les courants de source conservent leurs formes sinusoïdales.



**Figure III.15.** Formes d'ondes des courants:  $i_{ch}$  courant de charge,  $i_f$  courant du filtre actif et  $i_s$  courant de source

### III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de fonctionnement du filtre actif parallèle de puissance, la structure générale du FAP, les différentes stratégies de commande de l'onduleur de tension et le dimensionnement de filtre actif parallèle. On a présenté les résultats de la simulation de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante. La méthode d'identification utilisée s'adapte bien aux variations de la charge.

## Chapitre VI Système de Compensation Photovoltaïque

## Introduction

Dans ce quatrième chapitre nous allons démontrer la faisabilité du système de compensation des harmoniques, alimenté par un Générateur Photovoltaïque d'abord, puis l'amélioration des performances de compensation en réduisant le taux d'harmonique dans le réseau, tout en bénéficiant d'un apport en énergie active.

Le Système de Compensation Photovoltaïque présenté par la Figure (VI.1) montre l'ensemble de la structure du filtre actif parallèle et de son environnement fonctionnel, lequel se compose :

- ♦ D'un réseau d'alimentation triphasé (100V).
- ♦ D'une charge non linéaire génératrice des courants harmoniques et consommant de la puissance réactive.
- ♦ D'un filtre actif parallèle, lequel se compose d'un onduleur de tension triphasés à deux niveaux, à interrupteurs réversibles en courants et bidirectionnels (IGBTs avec des diodes en antiparallèles). La capacité filtre les ondulations de la tension.
- ♦ D'un générateur photovoltaïque qui joue le rôle d'une source de tension continue.

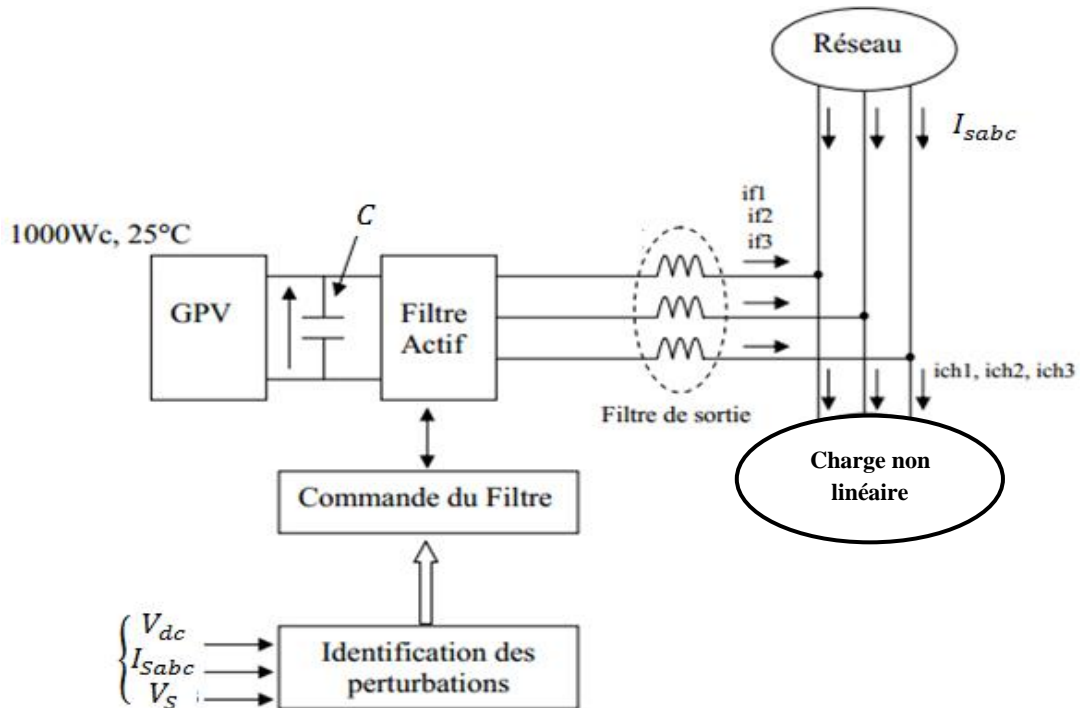


Figure VI.1. Le dispositif de compensation Photovoltaïque étudié.

La modélisation globale de la structure, présentée sur la Fig.VI.1, a permis d'étudier la validité fonctionnelle du filtre actif parallèle à travers plusieurs simulations. Nous avons élaboré plusieurs cas de simulation que nous regroupons dans trois cas d'étude :

- 1- Le cas1: avant et après la connexion du réseau avec la charge non-linéaire.
- 2- Le cas2: la mise en œuvre du filtre actif pour commencer la compensation harmonique.
- 3- Le cas3: la connexion du GPV avec le FAP et l'injection de l'énergie active au réseau.

La Figure VI.2 présente le schéma global utilisé dans la simulation sous l'environnement Matlab/Simulink. Les résultats de simulation nous permirent d'analyser les performances et la faisabilité du système de compensation des harmoniques.

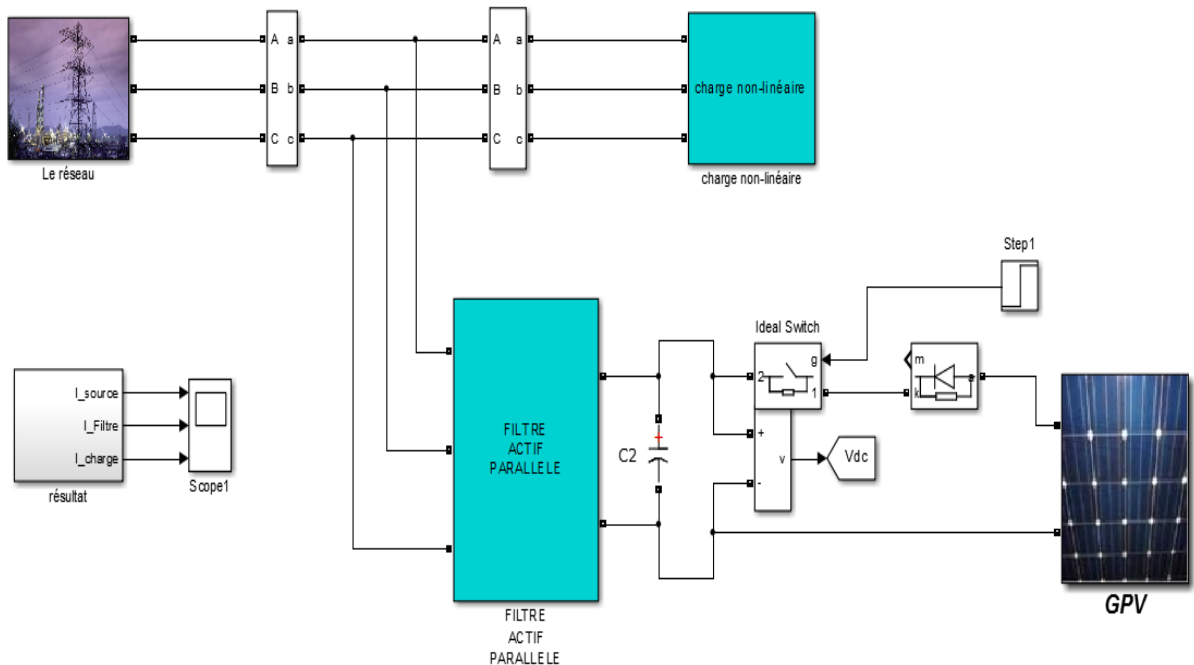


Figure VI.2.Schéma du système global en MATLAB-SIMULINK.

### VI.1. L'état d'étude

- Paramètres de simulation

La simulation du système global (réseau électrique, charge non linéaire, FAP et le GPV) est réalisée sous l'environnement Matlab /Simulink. Tous les paramètres de simulation sont récapitulés dans le tableau VI.1.

Réseau électrique	
Tension	100 V , 50HZ
Résistance et l'inductance de source $R_{source}, L_{source}$	0.1Ω, 50μH

Charge non linéaire	
Résistance et inductance $R_c, L_c$	0.01Ω, 0.56mH
Pont de graetz alimente et une charge RL série, $R_{ch}, L_{ch}$	20Ω, 20mH
Filtre actif parallèle	
Tension continue $V_{dc,ref}$	280V
Capacité du condensateur $C_{dc}$	1100μF
Résistance et inductance $R_f, L_f$	0.01Ω, 1mH
Générateur photovoltaïque	
L'éclairement G	1000 W/m <sup>2</sup> , 0 W/m <sup>2</sup>
Température T	25 °C
Nombre de modules série $N_s$	5
Nombre de modules parallèle $N_p$	66
$I_{sc}$	3.27 A
$V_{oc}$	43.60 V

- Le premier cas: Connexion d'une charge linéaire puis une autre non-linéaire au Réseau électrique.

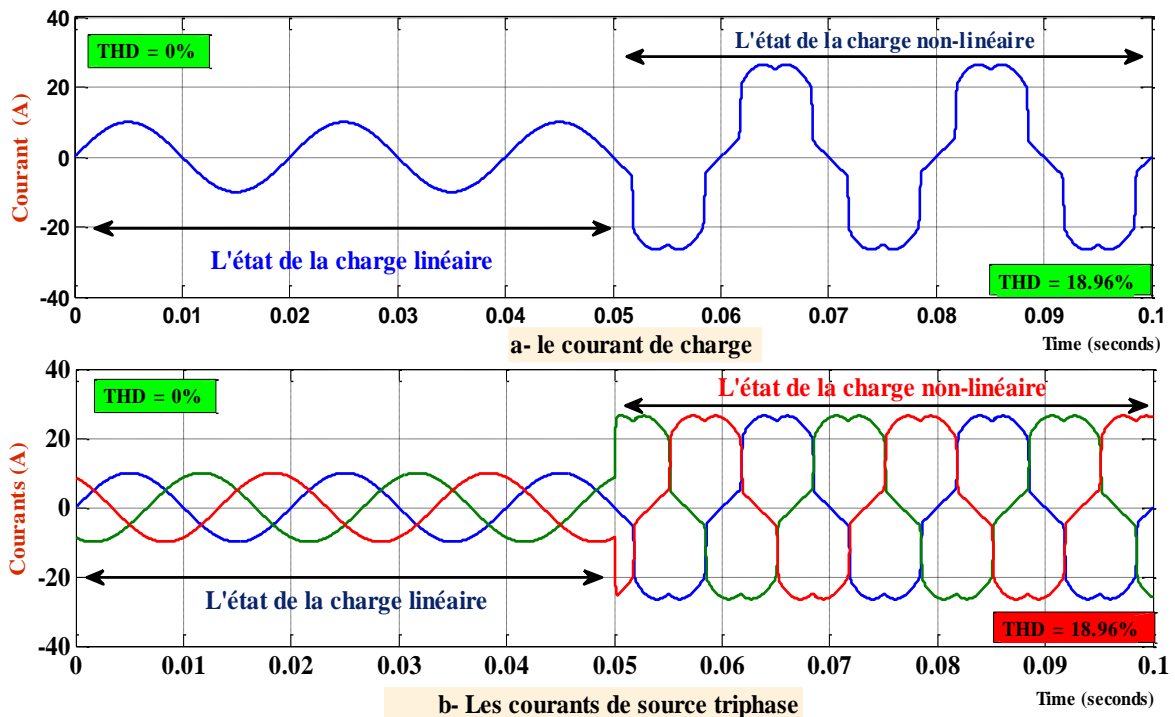
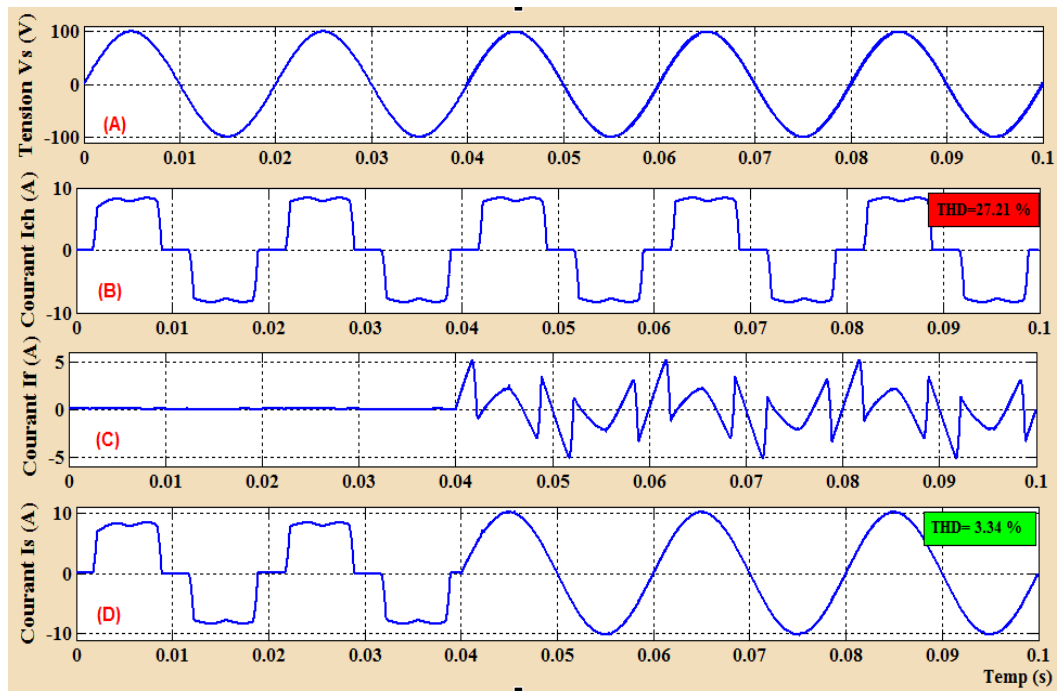


Figure VI.3. Courant de source avec une charge linéaire et une autre non-linéaire.

La Figure VI.3; illustre le courant de la charge linéaire de forme sinusoïdale que le courant de source. Par contre la charge non linéaire absorbe un courant non- sinusoïdal et influe sur la forme du courant de source et le rend distordu.

- **Le deuxième cas: Connexion du filtre actif avec le réseau et la charge non-linéaire**



**Figure VI.4.** Formes d'ondes de la tension  $V_{sa}$  et des courants :  $i_{ch}$  courant de charge,  $i_f$  courant du filtre actif et courant de source  $i_s$

La Figure VI.4 illustre les différentes formes d'onde avant et après la mise en service du FAP. Avant la mise en service (avant  $t=0.04s$ ) nous remarquons que le courant de charge  $i_{ch}$  et de source  $i_s$  ont la même forme (une forme distordue avec un  $THD=27.21\%$ ) et que le courant du filtre est nul. A l'instant  $t=0.04s$ , le FAP est mis en service il commence à injecter les courants de compensation  $i_f$ , ce qui permet, après un transitoire, aux courants du réseau de redevenir sinusoïdaux avec un  $THD=3.34\%$ .

- **Le troisième cas: la connexion du GPV avec le FAP et l'injection de l'énergie active au réseau.**

La Figure VI.5. Schématise les différents forme d'onde avant et après la mise en service du FAP et le générateur photovoltaïque. Avant la mise en service du FAP (avant  $t=0.15s$ ) à l'intervalle (a), nous remarquons que le courant de charge  $I_{ch}$  et de source  $i_s$  ont la même forme (une forme distordue) et que le courant du filtre est nul. A l'instant  $t=0.15s$ , le FAP est mis en service sans GPV dans l'intervalle (b), il commence à injecter les courants de compensation  $if$  (nous ne présentons que la phase (a) pour une bonne visualisation des

ondes), ce qui permet, après un transitoire, aux courants du réseau de redevenir sinusoïdaux avec un  $THD$  qui chute de 27.10 % à 3.12 %.

A l'instant  $t=0.4s$ , on connecte le GPV, dans l'intervalle (c) on remarque une augmentation sur le courant de filtre et le courant de source reste sinusoïdal cette augmentation exprime que le GPV génère un courant et l'injecté dans le réseau à travers le filtre actif.

A l'instant  $t= 0.7s$  on a changé la valeur de l'éclairement à 0 ( $G=0 w/m^2$ ), on remarque que le système fonctionne comme si le GPV est déconnecté.

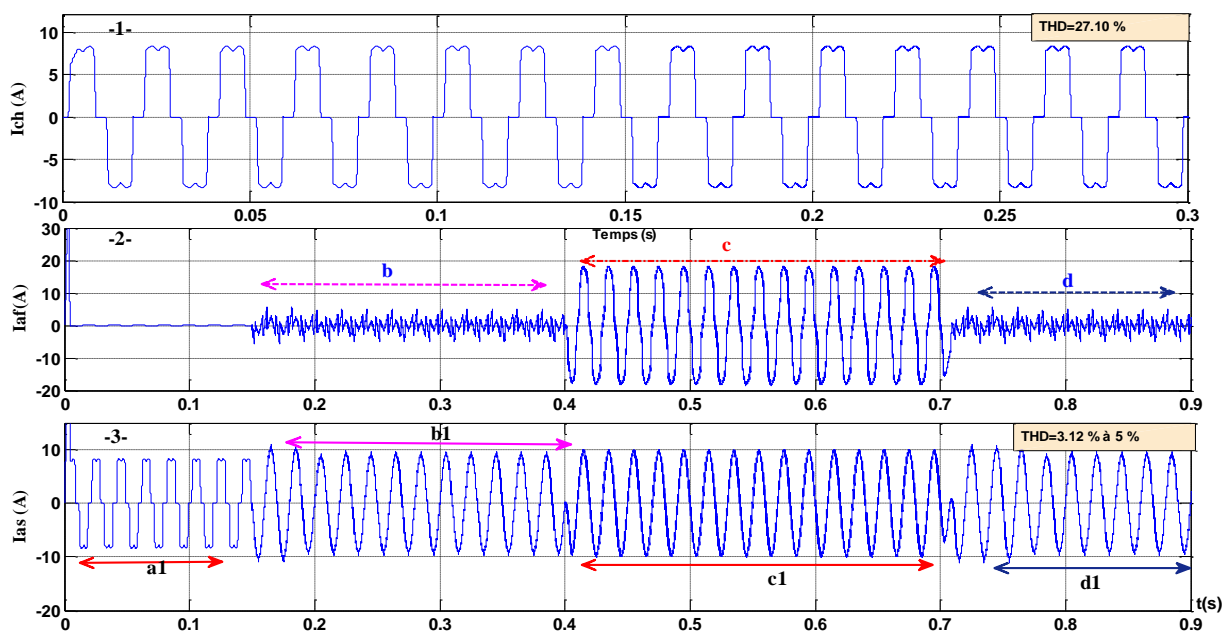


Figure VI.5. Formes d'ondes des courants:  $i_{ch}$  courant de charge,  $I_f$  courant du filtre actif et le courant de source  $I_{as}$

La Figure VI.6 ; illustre les résultats de simulation concernant les puissances instantanées active de GPV et de source après la mise en service du FAP et le GPV.

A l'instant  $t=0.15s$  le FAP est mis en service et a l'absence du GPV, la charge consomme une puissance active de  $P = 1500$  Watts.

A l'instant  $t=0.4s$  le GPV génère une puissance active de 3000W sous un éclairement  $G=1000 (w/m^2)$ . Cette puissance est injectée dans le réseau (source) à travers le filtre actif. On remarque le réseau a bénéficié la puissance délivrée par le GPV et que la puissance  $P_s$  prend la valeur  $P_s=-1500W$ .

Pour montrer la fiabilité du système, on prend un rayonnement solaire  $G= 0 \text{ W/m}^2$  (Obscurité), on remarque le système fonctionne comme filtre actif sans générateur photovoltaïque.

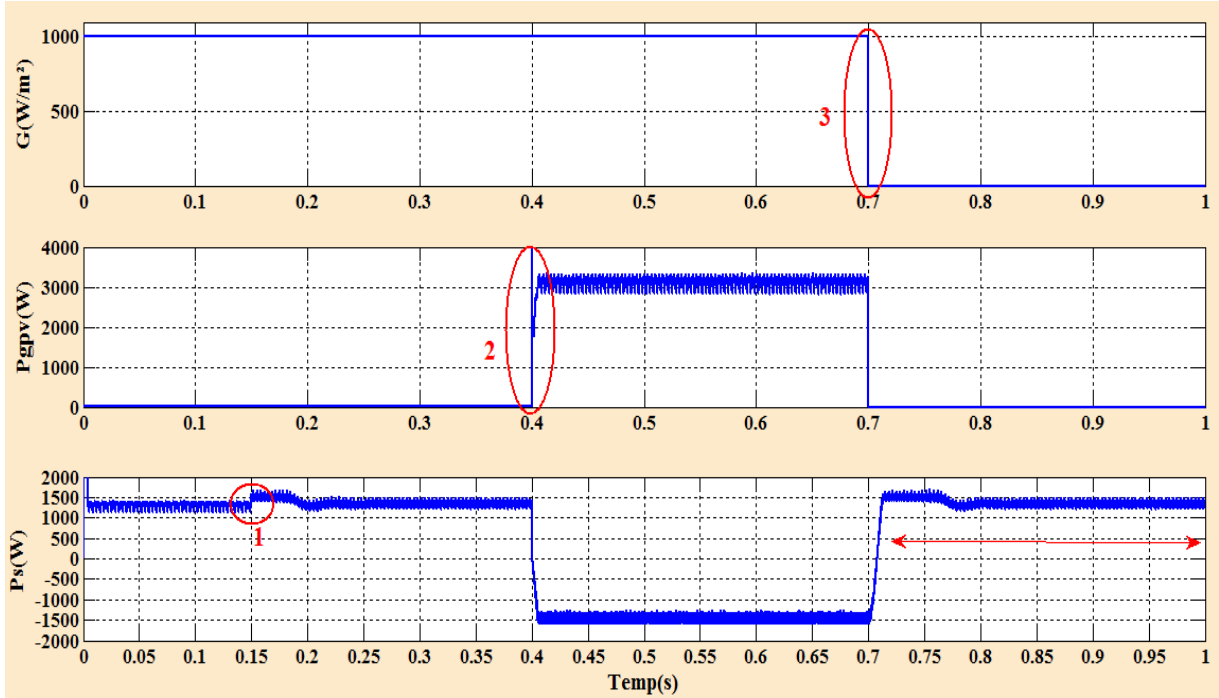


Figure VI.6. Allures des puissances instantanées active p de source et de GPV.

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la simulation du système de compensation des harmoniques comme une solution de dépollution des réseaux électriques en injectant de la puissance active générée par un générateur photovoltaïque.

Les résultats obtenus dans ce chapitre montrent les performances et la fiabilité du système proposé.

### Conclusion générale

Aujourd'hui, les sources d'énergie renouvelables participent au mix énergétique et sont intégrées au niveau du réseau de distribution. Elles représentent une des solutions viables au problème global et mondial de l'énergie. L'énergie photovoltaïque (PV) est en passe de devenir une des ressources majeures parmi les sources d'énergie renouvelables, car elle ne libère aucun gaz à effet de serre sur sa phase d'exploitation.

Au niveau mondial, le marché des systèmes photovoltaïques connaît, depuis maintenant plus de dix années, un taux de croissance très élevé, de l'ordre de 30 à 40% par an. Cette croissance exceptionnelle, due principalement aux systèmes photovoltaïques connectés au réseau de distribution d'électricité.

Ce mémoire présente l'étude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque (GPV) pour l'amélioration de la qualité de l'énergie tout en injectant de la Puissance issue d'un GPV. Plusieurs résultats ont été présentés, les caractéristiques du générateur PV avec ses performances. Ainsi que, l'influence de quelques paramètres sur ces caractéristiques.

Le filtre actif parallèle, appelé aussi compensateur shunt, permet, avec une commande appropriée, de neutraliser les courants harmoniques des charges polluantes. Ils s'adaptent aux variations des charges. Nous avons utilisé une commande dite la commande de courant maximum de source (commande indirect) dans la commande de filtre actif parallèle, il s'agit d'un régulateur linéaire de type PI pour la boucle de tension et un élément à hystérésis à bande fixe pour la boucle de courant pour générer les courants des références.

La réponse du filtre actif montre qu'il est capable de transmettre de l'énergie à partir du système solaire photovoltaïque au réseau électrique et à la charge ainsi que de compenser les courants harmoniques.

Enfin, ce filtrage actif de l'énergie électrique provenant d'une source photovoltaïque est l'une des meilleures solutions pour filtrer les harmoniques de courant des réseaux de distribution.

## Références Bibliographiques

- [1]. Dr. OMEIRI AMAR. " Simulation D'un Filtre Actif Parallèle De Puissance Pour La Compensation Des Harmoniques De Courant" ,Thèse De Doctorat De L'universités De Badji-Mokhtar Annaba. 2007.
- [2]. Dr. BENADJA MOUNIR. " L'auto-additivité Du Filtre Actif Aux Variations De Charge", Thèse De Doctorat De L'universités De Badji Mokhtar Annaba. 2015.
- [3].Mr. HADJAB MOUFDI. "Développement Des Performances D'un Système Photovoltaïque", Mémoire De Magister Université Djilali Liabes Sidi Bel Abbes. 2011.
- [4]. M. IBRAHIM YASSINE. " Système Hybride Photovoltaïque –Eolien-Diesel Sans Stockage " , Projet De Fin D'études Pour Obtenir Le Titre D'ingénieur De L'université Libanaise. 2013.
- [5]. Mr. DJERIOU SALIM. "Simulation D'un Système Photovoltaïque Alimentant Une Machine Asynchrone", Mémoire De Magister- Université Ferhat Abbas De Sétif -. 2010.
- [6]. Mr. SAHLI ABDESLEM. " Filtrage Actif Et Contrôle De Puissances :Application Aux Systèmes Photovoltaïques Interconnectes Au Réseau", Mémoire De Magister-Université Ferhat Abbas - Setif1-. 2012.
- [7]. M. MEDDOUR YUCEF. " Etude De Raccordement D'un Système Photovoltaïques Au Réseau Electrique" ,Mémoire Master-Université Kasdi Merbah Ouargla-. 2015.
- [8]. Mr. DEBILI NARIMENE, "Etude Et Optimisation En Environnement Matlab/Simulink D'un Système De Pompage Photovoltaïque " , Mémoire Magister- Université Constantine I-. 2015.
- [9].Mr. AYACHE KHEDIDJA. "Modélisation Et Simulation D'un Générateur Photovoltaïque Couplé A Un Réseau Electrique", Mémoire De Magister- Université Mohamed Chérif Messaadia De Souk-Ahras -. 2014.
- [10]. Mr. BOUGHOUFALA MOHAMED." Conception Et Réalisation D'un Système De Suiveur Solaire Pour Des Systèmes Photovoltaïques", Mémoire De Magister- Université Des Sciences Et De La Technologie D'Oron -. 2011.
- [11]. Dr. LONG BUN. " Détection Et Localisation De Défauts Pour Un Système Pv", Thèse De Doctorat De -L'universités De Grenoble -. 2011.

- [12]. Mr. BOUKLI. "Conception Et Réalisation D'un Générateur Photovoltaïque Muni D'un Convertisseur MPPT Pour Une Meilleure Gestion Energétique ",Mémoire De Magister-Université Abou Bakr Belkid -Tlemcen-Déc2011.
- [13]. Mr. BENDJAMAA IBRAHIM. " Modélisation Et Commande D'un Système De Stockage Photovoltaïque" ,Mémoire De Magister-Université Abou-Bakr Belkaid –Tlemcen-. 2012.
- [14]. M. Lyes ABBASSEN. "Etude De La Connexion Au Réseau Electrique D'une Centrale Photovoltaïque". 2011.
- [15]. BOUALEM BOUKEZATA." Système Solaire Photovoltaïque Connecté Au Réseau Electrique Et Associé A Un Filtre Actif Parallèle- Laboratoire D'automatique De Sétif (Las)", Université De Sétif 1-. 2014.
- [16]. Dr. BOUAFIA.A. "Techniques De Commande Prédictive Et Floue Pour Les Systèmes D'électronique De Puissance: Application Aux Redresseurs A MLI ", Thèse De Doctorat De L'université De Sétif, Algérie . 2010.
- [17]. Mr .TETBIRT AISSA, BOUGHAR ABDELKHALEK." Commande D'un Filtre Actif Shunt Trois Niveaux" ,Mémoire De Master- Université De Djilali Bounaama-Khemis Miliana. 2014-2015.
- [18]. Dr. DJAZIA KAMEL. " Etude Des Filtres Actifs Pour Réseaux Déséquilibrés Et Distordus" ,Thèse De Doctorat -Université Ferhat Abbas -Sétif 1 -. 2015.
- [19]. Dr. SARRA MUSTAPHA. "Contribution A L'étude Des Filtres Actifs Hybrides ",Thèse De Doctorat-Université Ferhat Abbas -Sétif 1-.
- [20]. Dr. CHENNAI SALIM. "Etude, Modélisation & Commande Des Filtres Actifs : Apport Des Techniques De L'intelligence Artificielle ",Thèse De Doctorat - Université Mohamed Khider - Biskra -. 2013.
- [21]. Mr. DAHANE MOHAMED EL-AMINE. "Commande D'un Filtre Actif Parallèle A Trois Fils", Mémoire De Master-Université Mohamed Khider - Biskra -. 2014.
- [22]. Mr. BOUKADOUM AZIZ. "Contribution A L'analyse Et La Réduction De La Pollution Harmonique Dans Le Réseau Electrique", Mémoire De Magister -Université Badji Mokhtar-Annaba-. 2007.
- [23]. Dr. CHELLI ZOUBIR. "Amélioration De La Qualité De L'énergie Electrique Par Un Filtre Actif D'harmonique ",Thèse De Doctorat-Université Badji Mokhtar-Annaba-. 2015.
- [24]. Mr. SAFA AHMED. " Elaboration D'un Filtre Actif Parallèle. Etude Expérimentale ",Mémoire De Magister- Université Ibn Khaldoun - Tiaret -. 2012.
- [25]. M. SINA SAFARI. " Etude D'une Commande Non Linéaire Pour La Commande D'un Filtre Actif Mémoire Comme Exigence Partielle De La Maitrise En Génie Electrique"

*,Mémoire Présenté A L'Ecole De Technologie Supérieure -Université Du Québec -. Montréal- , 12 Février 2002.*

[26]. Mr. AYAT YAHIA. "Système Photovoltaïque Alimentant Un Filtre Actif De Puissance Connecté Au Réseau", *Mémoire De Master- Université Ferhat Abbas –Setif1-. 2015.*

[27]. Mr. KEBIRI SAMIA. "Modélisation Et Simulation D'un Filtre Actif Multiniveaux ", *Mémoire De Magister-Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou-. 2009.*

[28]. Dr. MOHAMAD ALAA EDDIN ALALI. " Contribution A L'étude Des Compensateurs Actifs Des Réseaux Electriques Basse Tension", *Thèse De Doctorat De- L'universités Louis Pasteur - Strasbourg -. 2002.*

[29]. Mr. NEKKAR DJAMEL. " Contribution A L'étude Des Stratégies De Commande Des Filtres Actifs Triphasés ",*Mémoire De Magister -Université Mohamed Chérif Messaadia De Souk-Ahras -. 2014.*

[30]. M.D. EPANYA. "Application Du Filtrage Actif Pour Une Mise En Œuvre De Méthode De Prédiction Et De Contrôle D'harmoniques Dans Un Réseau De Distribution Electrique, *Mémoire Comme Exigence Partielle De La Maitrise En Génie Electrique » , Thèse De Doctorat -Université Du Québec-. 2010.*

[31]. M.BEAULIEU. "Etude Et Mise Au Point D'un Filtre Actif D'harmoniques En Vue D'améliorer La Qualité De L'alimentation Electrique" , *Mémoire Présente Comme Exigence Partielle De La Maîtrise En Ingénierie- Université Du Québec A Chicoutimi -. 2007.*

[32]. Mr. BOUKADOUM A. "Contribution A L'analyse Et La Réduction De La Pollution Harmonique Dans Le Réseau Electrique", *-Mémoire De Magister- Université D'Annaba -. 2007.*

[33]. Dr. KARIMI. "Continuité De Service Des Convertisseurs Triphasés De Puissance Et Prototypage "FPGA In The Loop - Application Au Filtre Actif Parallèle ", *Thèse De Doctorat.- Université Nancy-I -. 2009.*

[34]. Dr. BELHAOUCHET NOURI. "Fonctionnement A Fréquence De Commutation Constante Des Convertisseurs De Puissance En Utilisant Des Techniques De Commande Avancées Application : Amélioration De La Qualité De L'énergie ",*Thèse De Doctorat De- Université Ferhat Abbas - Sétif -. 2011.*

[35]. M.HAMADI ABDELHAMID. "Amélioration Des Performances Du Filtre Actif : Application Du Régulateur Proportionnel Intégral Et Du Régulateur Flou. *Mémoire Comme Exigence Partielle De La Maitrise En Génie Electrique», Mémoire Présenté A L'école De Technologie - Université Du Québec-. Montréal, 30 Novembre 2004.*

# L'annexe I

## Modélisation d'un système photovoltaïque

### 1. Simulink de l'algorithme MPPT P&O :

#### I.13.3. Description des éléments dans la Modèle SIMULINK de l'algorithme MPPT P&O :

Les deux blocs "Transport Delay" sont utilisés pour retarder l'entrée par un laps de temps spécifié, ce qui permet de calculer la variation de la puissance  $\Delta P(k) = P(k) - P(k-1)$  et la variation de la tension  $\Delta V(k) = V(k) - V(k-1)$ . Après on passe Le bloc "Multiport Switch" qui permet de traiter les quatre cas résumés sur le Tableau 1. (le cas de normale qui représente le pas de perturbation de la commande MPPT, représenté Le bloc "Constant pas". Le bloc "Saturation" assure que le rapport cyclique D reste dans l'intervalle [0,1]. Le bloc "Zero-Order Hold" est un échantillonneur bloqueur qui permet de maintenir la valeur du rapport cyclique D constante sur un cycle du MPPT. Le bloc "IC (Initial Condition)" permet de spécifier le rapport cyclique initial. le bloc "Memory" garde en mémoire la valeur du rapport cyclique pour le cycle prochain. Un masque de sous-système est utilisé pour faciliter le paramétrage (rapport cyclique initial, perturbation et fréquence du MPPT).

Le bloc « PWM » génère le signal PWM nécessaire à la commande du commutateur. Sa description est schématisée Dans ce qui suit, les paramètres du GPV qui seront utilisés pour la simulation sont donnés sur le tableau 1 les coordonnées du MPP sont ( $P_{MPP}=105.1$  W;  $V_{MPP}=12.31$ V;  $I_{MPP}=8.535$  A) .

paramètres	Les valeurs	paramètres	Les valeurs
$K$	$1.38^{-23}$	$I_{scSTC}$	$3.27$ A
$E_g$	$1.124$	$A$	$1.2$ m <sup>2</sup>
$q$	$1.6^{-19}$	$Sc$	$103.6^{-4}$
$G$	$1000$ w/m <sup>2</sup>	$N_p$	$3$
$R_s$	$0.6$ Ω	$I_{oSTC}$	$43^{-9}$ A
$T_{réf}$	$289$ K	$N_s$	$36$
$V_{ocSTC}$	$43.60$ V	$R_{sh}$	$800$ Ω

## L'annexe II

### Perturbations harmoniques et solutions de compensation

#### Les Norme et réglementations

On choisit des exemple, La norme IEEE 519 -1992 Standard ou L'IEEE définit les exigences et recommandations pratiques pour contrôler le taux de pollution harmonique présent sur les réseaux électriques. Elle spécifie les limites pour les courants harmoniques qu'un abonné ne doit pas dépasser au point de raccordement du fournisseur d'électricité. Il spécifie également des limites pour la distorsion de tension que doit garantir le fournisseur d'électricité

Niveau de tension	Taux de distorsion individuel de tension	Taux de distorsion global de tension (%)
< 69 kV	3.0	5.0
> 69.001 kV et < 161 kV	1.5	2.5
> 161.001 kV	1.0	1.5

Dans ce Standard, les limites sont données par rapport au quotient des courants de court-circuit ( $I_{sc}$ ) au point de raccordement du réseau et du courant de charge fondamentale ( $I_{ch}$ ). La norme IEEE 519-1992 recommande notamment une distorsion harmonique totale de tension inférieure à 5% pour les systèmes de moins de 69KV et une distorsion harmonique individuelle de tension inférieure à 3% .

$I_{sc}/I_{ch}$	< 11	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$h \leq 35$	$THD_i$
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7	6.0	2.5	1.4	20

$I_{ch}$ : Demande maximale du courant de charge au point de raccordement du réseau (le fondamental).  
 $I_{sc}$  : Courant de court-circuit maximal au point de raccordement du réseau  
 $THD_i$  : Taux de distorsion global du courant en %  
h : ordre harmonique

## Les normes CEI-61000-2-2

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

<b>Tableau 5: Niveaux de compatibilité des harmoniques de tension (CEI-61000-2-2)</b>					
<b>Harmoniques impairs</b>				<b>Harmoniques pairs</b>	
<b>non multiple de 3</b>		<b>multiple de 3</b>			
<b>Rang</b>	<b>Vh/V1 (%)</b>	<b>Rang</b>	<b>Vh/V1 (%)</b>	<b>Rang</b>	<b>Vh/V1 (%)</b>
<b>5</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
<b>7</b>	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>1.5</b>	<b>4</b>	<b>1</b>
<b>11</b>	<b>3.5</b>	<b>15</b>	<b>0.5</b>	<b>6</b>	<b>0.5</b>
<b>13</b>	<b>3</b>	<b>≥ 21</b>	<b>0.2</b>	<b>8</b>	<b>0.5</b>
<b>17</b>	<b>2</b>			<b>10</b>	<b>0.5</b>
<b>19.23 et 25</b>	<b>1.5</b>			<b>≥ 12</b>	<b>0.2</b>
<b>&gt; 25</b>	<b>0.2+0.5*25/h</b>	<b>En générale le THD global de tension ne dépassant pas 8 %</b>			

Afin de concilier distributeurs et consommateurs, des normes ont été dictées. Le tableau 1.2 résume les principales normes concernant la qualité d'énergie et la tension dans les systèmes électriques[16].

<b>Tableau 6: Classification des normes concernant la qualité d'énergie électrique</b>	
<b>Thèmes</b>	<b>Normes</b>
<b>Classification de la qualité d'énergie</b>	<b>CEI 61000-2-5 :1995</b> <b>CEI 61000-2-1 :1990</b> <b>IEEE 1159 :1995</b>
<b>Creux /Surtension/Interruption</b>	<b>CEI 61009-2-1 :1990</b> <b>IEEE 1159 :1995</b>
<b>Harmoniques</b>	<b>CEI 61000-2-1 :1990</b> <b>CEI 61000-2-2</b> <b>CEI 61000-3-2</b> <b>CEI 61000-2-4</b> <b>CEI 61000-4-7 :1991</b> <b>IEEE 519 :1992</b>
<b>Flicker de tension</b>	<b>CEI 61000-4-15 :1997</b>
<b>Transitoires</b>	<b>CEI 61000-2-1 :1990</b> <b>CEI 816 :1984</b> <b>IEEE 1159 :1995</b> <b>IEEE C62.41 :1991</b>

## L'annexe III

### Filtrage Actif Parallèle

Tableau III.1. Tensions générées par l'onduleur de tension deux niveaux.

État	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$V_{f_1}$	$V_{f_2}$	$V_{f_3}$
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
2	0	1	0	$V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
3	1	1	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
4	0	0	1	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
5	1	0	1	$V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
6	0	1	1	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
7	1	1	1	0	0	0

#### ➤ Paramètres de simulation

Tableau III.2. Valeurs des éléments caractérisant la structure étudiée.

Réseau électrique	
Tension	100 V
Résistance et inductance $R_{source}, L_{source}$	$0.1\Omega, 50\mu\text{H}$
Charge non linéaire	
Résistance et inductance $R_c, L_c$	$0.01\Omega, 0.56\text{mH}$
Pont de graets alimente Une charge RL série, $R_{ch}, L_{ch}$	$20\Omega, 20\text{mH}$
$R_2$	$20\Omega$
Filtre actif parallèle	
Tension continue $V_{dc}$	280V
Capacité du condensateur $C_{dc}$	$1100\mu\text{F}$
Résistance et inductance $R_f, L_f$	$0.01\Omega, 1\text{mH}$

## Résumé

Ce mémoire est consacré à l'étude d'un générateur solaire photovoltaïque connecté au réseau de distribution et participant à l'amélioration de la qualité de l'énergie au point de connexion grâce aux fonctionnalités de filtrage actif parallèle.

L'utilisation des convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué à améliorer des performances et l'efficacité de ces systèmes. En revanche, ils ont participé à détériorer la qualité du courant et de la tension des réseaux de distribution. En effet, ces systèmes consomment des courants non-sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale, ils se comportent comme des générateurs de courants harmoniques.

Plusieurs méthodes permettant l'identification des composantes harmoniques du courant, on a choisi d'appliquer la méthode de courant maximal de source (commande indirect) dans le circuit commande de filtre actif parallèle vue sa simplicité.

La compensation des courants harmoniques présents sur le réseau et issus de charges non linéaires. Le système se compose d'un générateur photovoltaïque et d'un onduleur de tension triphasé. Pour optimiser l'énergie extraite du générateur photovoltaïque, une technique d'extraction de puissance maximale de type P&O est utilisée. Les résultats de simulation confirment les performances de cette stratégie de contrôle.

**Mot clés :** Harmoniques, Filtrage Actif parallèle, Convertisseurs Statiques, Générateurs Photovoltaïques, courant maximal de source, commande indirect

## **abstract**

This memory is devoted to the study of a photovoltaic solar generator connected to the distribution network and participating in the improvement of the energy quality at the connection point thanks to the parallel active filtering capabilities.

The use of static converters in electric power conversion plants has greatly improved the performance and efficiency of these systems. On the other hand, they helped to deteriorate the quality of the current and the voltage of the distribution networks. Indeed, these systems consume non-sinusoidal currents, even if a sinusoidal voltage powers them: they behave like generators of harmonic currents.

Many methods allowing the identification of the harmonic components of the current have been chosen to implement the method of maximum current of source (indirect control) in the parallel active filter control circuit seen its simplicity.

The compensation of the harmonic currents presents on the network and resulting from nonlinear loads. The system consists of a photovoltaic generator and a three-phase voltage inverter. To optimize the energy extracted from the photovoltaic generator, a technique of extraction of maximum power of type P & O. The simulation results confirm the performance of this control strategy.

**Key words:** Harmonics, Parallel Active Filtering, Static Converters, Photovoltaic Generators, Maximum Source Current, Indirect Control

## ملخص

في هذه المذكرة نقوم بدراسة مولد للطاقة الشمسية الضوئية المتصلة بشبكة التوزيع والمساعدة على تحسين نوعية الطاقة عند نقطة اتصال من خلال تصفية فاعلة على التوازي.

وقد ساهم استخدام المحولات الثابتة في المنشآت تحويل الطاقة الكهربائية إلى حد كبير في تحسين أداء وكفاءة هذه النظم. ومع ذلك، كانت تشارك في تدهور نوعية شبكات توزيع التيار والجهد. وبالفعل، فإن هذه النظم تستهلك تيارات غير جيبيية، حتى لو كانت تغذى بجهد الجيبي: أنها بمثابة مولدات التيارات التوافقية.

هناك عدة طرق تسمح بتحديد مكونات التيار التوافقي وقد تم اختيار طريقة التيار الأقصى لمصدر الطاقة (التحكم غير المباشر) في دارة التحكم الخاصة بالمصفاة النشطة على التوازي من ناحية بساطتها..

تعويض التيارات التوافقية في الشبكة ومن الحمولة غير الخطية. ويتكون النظام من مولد الضوئية وعلى ثلاث مراحل الجهد العاكس. لتحسين الطاقة المستخرجة من مجموعة الضوئية، وتقنية استخراج الحد الأقصى للطاقة (P & O). وتؤكد نتائج المحاكاة الأداء الجيد لهذه الاستراتيجية في التحكم.

الكلمات المفتاحية: التوافقيات، تصفية نشطة على التوازي، محولات ساكنة، مولدات فوتو ضوئية، التيار الأعظمي للمصدر، التحكم غير المباشر.