



République algérienne démocrate et populaire  
Ministre de L'enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique  
Université Abderrahmane Mira de Bejaia



**Faculté de technologie**  
**Département de génie électrique**  
**Spécialité d'énergie renouvelable**

**Mémoire de Fin d'études**

**Thème :**

Etude et conception d'un filtre actif  
dédié aux énergies renouvelables

Présenté Par :

SOUAMI Kocela  
BELKACEMI Chafaa

Encadré Par :

Mme MOKRANI Zahra  
Mr IHAMMOUCHEN Syphax

Jury :

Mr BOUDRIES Zoubir  
Mr REKIOUA Toufik

Année Universitaire 2023 –2024

# Remerciements

*Nous tenons à remercier tout d'abord le bon Dieu qui nous a donné la force et le courage d'aboutir à ce travail de fin de cycle.*

*Nous remercions nos parents qui étaient mobilisés tout au long de nos études de primaire jusqu'à l'achèvement de notre parcours, comme nous remercions nos enseignants qui nous ont légués un savoir qui a fait de nous des ingénieurs en électrotechnique.*

*Nous remercions évidemment notre encadrante Madame MOKRANI Zahra, qui nous a orientés lors de l'élaboration de notre travail scientifique.*

*Nous remercions toutes celles et tous ceux qui se sont portés volontaire à nous porter aides avec leurs conseils et échanges d'articles ou des travaux scientifiques qui nous avons consultés pour l'intérêt de notre recherche.*

*Nous remercions tous les futurs chercheurs qui prendront comme support notre travail.*

***Tanemmirt-nwen***

# Dédicace

*Je dédie ce travail à mes chers parents qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours d'étude.*

*A mes enseignant(e)s chacun(e) en son nom, qui m'ont encadré de primaire jusqu'à l'université*

*Je dédie ce travail à ma sœur, Thiziri et à mon frère Takfarinas.*

*A mes amis et camarades qui ont marqué ma vie au long de mon parcours*

*A l'ensemble des copains de chambre résidence pépinière*

*Je le dédie à tous les étudiants qui vont le consulter pour être leur référence d'études*

# Dédicace

*Je dédie ce travail à mes parents, qui sont toujours disponibles pour moi afin de m'aider à réussir mon parcours académique.*

*À ma famille à mes frères et sœurs Lydia, Yanis, Sabrina, Amine, Younes À mes nièces et neveux.*

*Je le dédie également à mes amis, et à mes camarades de classe, chacun en son nom.*

*Je le dédie enfin à tous les étudiants qui utiliseront ce travail comme support de recherche.*

## Table des matières

### Chapitre I

I.1 Introduction .....	1
I.2 Qualité de l'énergie électrique .....	1
I.3 Perturbations électriques et leur origine .....	2
I.3.1 Creux et coupures de tension.....	2
I.3.2 Les fluctuations de tensions(flicker) .....	2
I.3.3 Déséquilibre du système triphasé de tension .....	3
I.3.4 Variation de fréquence.....	3
I.3.5 Les harmoniques .....	4
I.4 Origine des harmoniques.....	5
I.5 Conséquences des harmoniques.....	8
I.6 Les caractéristiques des perturbations harmoniques.....	9
I.6.1 Expression de la grandeur déformée.....	9
I.6.2 Taux de distorsion harmoniques .....	10
I.6.3 Facteur de puissance.....	10
I.6.4 Série de Fourier.....	11
I-7 Normes et réglementations .....	11
I.8 Méthodes de suppression d'harmoniques .....	14
I.8.1 Filtrage passif.....	14
I.8.1.1 Filtre résonnant .....	14
I.8.1.2 Filtre amorti.....	15
I.8.2 Filtrage actif.....	16
I.8.2.1 Principe de fonctionnement.....	16
I.8.2.2 Filtre actif parallèle (FAP) .....	16
I.8.2.3 Filtre actif série.....	17
I.8.2.4 Filtre actif série-parallèle .....	18
I.8.3 Filtrage hybride.....	18
I.8.3.1 Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle .....	18
I-9 Conclusion .....	19
<b>Chapitre II</b>	
II.1 Introduction.....	20
II.2 Rôle du filtre actif .....	20

II.3 Structure générale d'un filtre actif parallèle .....	20
II.4.1 Onduleur de tension .....	22
II.4.2 Système de stockage d'énergie capacitif.....	24
II.4.3 Filtre de sortie inductif.....	24
II.5 La partie commande .....	24
II.5.1 Identifications des courants harmoniques .....	25
II.5.1.1 Méthodes du domaine fréquentiel .....	25
II.5.1.2 Méthodes du domaine temporel.....	25
II.5.1.2.1 Méthode de référentiel synchrone (SRF).....	26
II.5.2 Régulation de la tension du bus continue.....	29
II.5.3 Commande de l'onduleur .....	30
II.5.3.1 Commande par hystérésis .....	30
II.5.3.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) .....	32
II.6 Conclusion .....	32
<b>Chapitre III</b>	
III.1 Introduction.....	34
III.2 Le Système Photovoltaïque.....	34
III.3 Les notions générales sur les systèmes photovoltaïques .....	35
III.3.1 Energie solaire photovoltaïque .....	35
III.3.2 L'effet photovoltaïque.....	35
III.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	36
III.5 Types des cellules.....	37
III.6 Modélisation des cellules photovoltaïques.....	37
III.6.1 Modèle à une diode.....	37
III.7 Caractéristiques électriques d'une cellule PV .....	39
III.7.1 La tension à circuit ouvert $V_{CO}$ .....	40
III.7.2 Le courant de court-circuit $I_{sc}$ .....	40
III.7.3 La Puissance maximale $P_{max}$ .....	41
III.7.4 Le facteur de forme FF.....	41
III.7.5 Rendement énergétique maximum $\eta$ .....	41
III.8 Les paramètres qui influent sur les caractéristique PV .....	42
III.8.1 Influence de l'éclairement .....	42
III.8.2 Influence de la température .....	43
III.9 Assemblage des modules photovoltaïques .....	44
III.9.1 Association en série .....	44
III.9.2 Association en parallèle .....	45

III.9.3 Association mixte des générateurs photovoltaïques.....	45
III.10 La commande MPPT.....	46
III.10.1 Principe de fonctionnement de la commande MPPT.....	46
III.10.2 Principe de la Recherche du PPM.....	47
III.10.3 Techniques de commande MPPT Perturbation & Observation (P&O).....	48
III.10.3.1 Algorithme de Perturbation et Observation.....	49
III.10.3.2 Avantages et inconvénients de la méthode P&O.....	50
III.11 Adaptation du générateur photovoltaïque.....	50
III.11.1 Connexion directe source-charge.....	51
III.11.2 Etage d'adaptation entre une source et une charge.....	51
III.11.3 Convertisseur DC-DC.....	52
III.12 Conclusion.....	57
<b>Chapitre IV</b>	
IV.1 Introduction.....	58
IV.2.1 Essai de la commande Hystérésis avec la méthode SRF.....	58
IV.2.2 Essai de la commande MLI avec la méthode SRF.....	70
IV.3 Etude comparative entre les deux commandes (Hystérésis et MLI) avec la méthode SRF.....	80
IV.4 Filtre-PV.....	81
IV.5 Conclusion.....	82

## Liste des figures

Figure I.1: creux et coupures de tension [4].....	2
Figure I.2: fluctuations de tension (flicker).....	3
Figure I.3: cas de déséquilibre du système triphasé de tension.....	3
Figure I.4: Variations de fréquence [4].....	4
Figure I.5: Harmoniques d'ordre 3, l'Onde fondamentale et déformée [4].....	4
Figure I.6: Les harmoniques, les inters et infra harmoniques [3].....	5
Figure I.7: structure du filtre résonant .....	15
Figure I.8: filtre passif amorti, (A) : 1erordre, (B) : 2emeordre, (C) : 3emeordre.....	15
Figure I.9: principe de connexion du filtre actif.....	16
Figure I.10: principe de connexion du filtre actif.....	17
Figure I.11: Montage d'un filtre actif série.....	17
Figure I.12: Combinaisons des filtres actifs série et parallèles .....	18
Figure I.13: Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif .....	19
Figure II.1 : Structure générale d'un FAP triphasé à une charge non-linéaire.....	21
Figure II.2: Représentation vectorielle de passage de repère (abc) vers le repère (dq).....	27
Figure II.3: Diagramme de génération des courants de référence par la méthode du référentiel synchrone .....	28
Figure II.4: Schéma de la boucle a verrouillage de phase.....	29
Figure II.5: Schéma de principe de la régulation en boucle fermée de la tension du bus continue.....	30
Figure II.6: Commande par hystérésis .....	31
Figure II.7: Comportement d'un contrôleur à Hystérésis .....	31
Figure II.8: Principe de la commande MLI.....	32
Figure III.1: Schéma d'un système photovoltaïque .....	34
Figure III.2: Schéma explicatif de l'effet photovoltaïque .....	36
Figure III.3: Structure et principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	36
Figure III.4: Circuit équivalent d'une cellule PV –Modèle à une diode .....	38
Figure III.5: les différentes zones de la caractéristique I (V) [33].....	40
Figure III.6 : Le model Matlab du panneau Suntech 80w.....	42
Figure III.7 : Simulation de l'influence de l'éclairement sur la puissance et le courant par rapport à la tension du PV sur Matlab .....	43
Figure III.8: Simulation de l'influence de la température sur la puissance et le courant par rapport à la tension du PV sur Matlab .....	44
Figure III.9 : caractéristique résultant d'un groupement série de Ns cellules identiques .....	44
Figure III.10: caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de Np cellules identique .....	45
Figure III.11: Caractéristique résultante d'un groupement mixte de cellules PV identiques ....	46
Figure III.12: chaine élémentaire de conversion photovoltaïque. ....	47
Figure III.13: Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclairement (a) et la charge R (b) .....	47
Figure III.14 : Fluctuation du PPM avec l'intensité de la température (c). ....	48
Figure III.15: Présentation de l'organigramme amenant le système à un fonctionnement à Son PPM .....	48
Figure III.16 : schéma du principe de la méthode P&O .....	50
Figure III.17: organigramme de l'algorithme de perturbation et observation « P&O ».....	50
Figure III.18 : connexion directe entre un GPV et une charge.....	51
Figure III.19: Etage d'adaptation entre un GPV et une charge .....	51
Figure III.20 : Circuit électrique de base du hacheur survolteur .....	52
Figure III.21 : schéma électrique du hacheur lorsque l'interrupteur (S) fermé.....	53



Figure III.22 : courbes d'Ondulation de courant $I_{pv}$ et de tension $V_{pv}$ .....	53
Figure III.23 : schéma électrique du hacheur lorsque l'interrupteur (S) ouvert.....	54
Figure III.24 : courbes d'Ondulation de courant $I_{L}$ et de tension $V_L$ .....	54
Figure IV.1 : Courant de source triphasé avant et après le filtrage a $t=0.2s$ .....	59
Figure IV.2: Courants de source pour la phase (a) avant et après le filtrage.....	59
Figure IV.3: Tensions de la source triphasé avant et après le filtrage .....	60
Figure IV.4: Spectre d'harmonique du courant de source avant le filtrage.....	60
Figure IV.5: Spectre harmonique du courant de source après le filtrage.....	61
Figure IV.6: Courants injectés par le filtre .....	61
Figure IV.7: Courant de phase a injectés par le filtre .....	62
Figure IV.8: Tension $V_{dc}$ après le filtrage .....	62
Figure IV.9: Courant de source triphasée avant et après l'insertion de la charge variable RL .....	63
Figure IV.10: Courant de source de la phase(a), avant et après l'insertion de la charge variable .....	63
Figure IV.11: Spectre harmonique du courant de source avant l'insertion de la charge variable a $t=0.2$ .....	64
Figure IV.12: Spectre harmonique du courant de source après l'insertion de la charge variable a $t=0.4$ .....	64
Figure IV.13: Tension de la source triphasée avant et après l'insertion de la charge variable.....	65
Figure IV.14: Courant de phase (a) injecté par le filtre .....	65
Figure IV.15: Tension du bus continue $V_{dc}$ .....	66
Figure IV.16: Courants de source triphasées .....	66
Figure IV.17: Courant de source de la phase (a).....	67
Figure IV.18: Spectre harmonique du courant de source.....	67
Figure IV.19: Tensions de source triphasée $V_{sabc}$ .....	68
Figure IV.20: courant du filtre de phase (a).....	69
Figure IV.21: Tension de bus continu $V_{dc}$ .....	69
Figure IV.22: courant de source triphasé avant et après filtrage (à $t=0.2s$ après filtrage).....	70
Figure IV.23: courant de source phase (a) avant et après filtrage (à $t=0.2$ après filtre).....	70
Figure IV.24: les tensions de source avant et après filtrage (à $t=0.2$ après filtrage).....	71
Figure IV.25: spectre d'harmonique du courant de source avant le filtrage .....	71
Figure IV.26: spectre harmonique du courant de source après le filtrage.....	72
Figure IV.27: courant injecté par le filtre .....	72
Figure IV.28: courant injecté par le filtre .....	73
Figure IV.29: tension du bus continu avec tension de référence.....	73
Figure IV.30: les courant de source triphasé sont et avec charge variable.....	74
Figure IV.31: courant de source phase (a) sont et avec charge variable.....	74
Figure IV.32: les tensions de source avec charge variable .....	75
Figure IV.33: spectre d'harmonique du courant sont charge variable .....	75
Figure IV.34: spectre d'harmonique du courant avec charge variable .....	75
Figure IV.35: courant du filtre de phase (a) injecte par le filtre avec charge variable.....	76
Figure IV.36: tension du bus continu avec charge variable .....	76
Figure IV.37: les courant de source triphasé sont et avec filtre de source déséquilibré.....	77
Figure IV.38: Courant de source phase (a) sont et avec filtre de source déséquilibré.....	77
Figure IV.39 : les tensions de source avec filtre de source déséquilibré.....	78
Figure IV.40: Spectre d'harmonique du courant avec filtre de source déséquilibré.....	78
Figure IV.41 : les courants du filtre injectent par le filtre avec filtre de source déséquilibré.....	79
Figure IV.42 : courant du filtre de phase (a) injecte par le filtre avec filtre de source déséquilibré.....	79
Figure IV.43 : tension du bus continu avec filtre de source déséquilibré .....	80
Figure IV.44: Tension $V_{dc}$ après association du panneau.....	81
Figure IV.45: Courants de source triphasé.....	81
Figure IV.46 : Tensions de source $V_{sabc}$ .....	82

## Liste des tableaux

Tableau I.1: présentation de quelques convertisseurs statiques et l'allure des courants qu'ils génèrent [5].....	7
Tableau I.2: Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (norme CEI 61000-2-2).....	12
Tableau I.3: Limites des composantes harmoniques en courant (Norme CEI 61000-3-2).....	13
Tableau I.4: Limites des tensions harmoniques selon IEEE-519.....	13
Tableau II.1: Etats de commutations possibles .....	23
Tableau III.1 : les paramètres du module à une diode. ....	39
Tableau III.2 : Fiche technique du module panneau photovoltaïque Suntech 80w .....	42
Tableau III.3 : Des équations de courant et de tension obtenues dans les deux phases .....	55
Tableau IV.1 : THD des trois phases du courant (Hystérésis avec SRH).....	68
Tableau IV.2 : THD des trois phases du courant (MLI avec SRH).....	78
Tableau IV.3: Tableau du courant de source pour les deux méthodes.....	80

## Liste des symboles

$n$  : Rang harmonique

$f_n$  : Fréquence industrielle

$f_1$  : Fondamental harmonique

$X_h$ : Valeurs exactes des différentes composantes harmoniques (du courant ou de la tension).

$X_1$  : Valeur efficace de la composante fondamentale (du courant ou de la tension).

$P$  : Puissance active

$S$  : Puissance apparente

$Q$  : Puissance réactive

$D$  : Puissance Déformante

$V$  : Valeur efficace de la tension du réseau électrique.

$I_n$  : Valeur efficace du courant de la charge.

FP : Facteur de Puissance

$Y_0$ : Valeur moyenne du signal  $y(t)$

$h$  : Rang harmonique

$Y_h$ : Valeur efficace de l'harmonique rang  $h$

$W$  : Pulsation fondamentale

$Q_h$ : Phase de l'harmonique au rang  $h$

$R$  : Résistance

$C$  : Condensateur

$L$  : Inductance

$L_f$  : L'inductance de filtres

$S_a, S_b, S_c$  : Signaux de commande des interrupteurs de puissance

$V_{dc}$  : Tension du bus continue

$V_{fa}, V_b, \mathcal{N}$  : Les tensions de ligne, imposées par l'onduleur

$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ : Courants débités par le réseau

$C_{dc}$  : Condensateur de stockage

$\varepsilon$  : Taux d'ondulation Admissible.

$\omega_h$  : Pulsation de l'harmonique du rang h

$I_h$  : Courant harmonique du rang h

d-q : Repère synchrone tournant

$i_d, i_q, i_0$  : Composantes du vecteur courant dans le repère synchrone

$i_a^*, i_b^*, i_c^*$  : Courants de référence

$\bar{i}_d, \bar{i}_q$  : Composante continue de courant de charge dans le repère d-q

$\tilde{i}_d, \tilde{i}_q$  : Composante alternative de courant de charge dans le repère d-q

$\alpha, \beta$  : Repère stationnaire

$V_{Sabc}$  : Tensions simples à l'entrée du pont redresseur

E : champ électrique

$R_s$  : résistance série

$R_p$  : résistance parallèle

I : courant fourni par la cellule

$I_d$  : courant de jonction

$I_{ph}$  : photo-courant de cellule

$I_S$  : est le courant de saturation de la diode

$T_{jref}, E_{sref}$  : représente l'éclairement et la température sous conditions STC.

K : constante de Boltzmann ( $K=1.38 * 10^{-23}$  J/K).

q : Charge d'électron =  $1,602 * 10^{-9}$  C

$N_S$  : nombre de cellules en série dans un module.

A : facteur d'idéalité de la diode

$P_1, P_2, P_3, P_4$  : paramètres du module à une diode

$I_{RP}$  : courant traversant  $R_P$

G : l'irradiation solaire

$I_{CC}$  : Le courant de court-circuit

$V_{CO}$  : La tension en circuit ouvert

A : Le facteur de qualité

FF : Le facteur de forme

$V_0$  : tension de sortie du convertisseur boost

$D$  : correspond au rapport cyclique

$I_{rip}$  : l'ondulation de courant de l'inducteur

$f_s$  : la fréquence de commutation

$C_{ch}$  : Capacité de la charge

## Liste des abréviations

THD : Taux de distorsion harmonique

THD<sub>V</sub> : Taux de distorsion harmonique pour la tension

THD<sub>I</sub> : Taux de distorsion harmonique pour le courant

ASI : Alimentation Sans Interruption

CEI : Commission Électrotechnique Internationale

IEEE : l'Institut des Ingénieurs Électriciens et Électroniciens

PCC : Point Commun de Couplage

FAS : Filtres Actifs Série

FAP : Filtres Actifs Parallèles

UPQC : Conditionneur de Qualité de Puissance Unifié

IGBT : Transistor Bipolaire à Grille Isolée

MOSFET : Métal Oxyde Semi-conducteur Field Effect Transistor

PI : Régulateur proportionnel Intégral

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion

SRF : Synchrones Reference Frame

FPB : Filtre Passe-bas

FPH : Filtre Passe-haut

PLL : Phase Locked Loop

PV : Photovoltaïque

GPV : Générateur Photovoltaïque

PPM : point de fonctionnement optimale

MPPT : traqueurs de point de puissance maximale

DC/DC : conversion continu-continu

DC/AC : conversion continu-alternatif

P&O : Perturbation et Observation

# **Introduction Générale**

# Introduction Générale

L'intégration croissante des énergies renouvelables dans les réseaux électriques est devenue nécessaire pour répondre aux défis environnementaux et énergétiques mondiaux. Parmi ces sources d'énergie, les systèmes photovoltaïques jouent un rôle très important en fournissant une énergie propre et durable. Cependant, cette intégration pose des problèmes de la qualité de l'énergie électrique, notamment les perturbations harmoniques générées par les équipements électroniques de puissance. Pour répondre à ces défis, l'utilisation de filtres actifs parallèles (FAP) s'avère essentielle pour améliorer la qualité de l'énergie électrique.

Ce projet de fin d'étude vise à développer et implémenter un filtre actif parallèle dédié aux énergies renouvelables, en particulier les générateurs photovoltaïques. L'objectif principal est d'explorer les solutions de dépollutions harmoniques pour garantir une bonne qualité de l'énergie électrique.

Le premier chapitre aborde les différentes perturbations affectant le réseau électrique, notamment les harmoniques. Ces perturbations, causées par les composants d'électroniques de puissance, déforment la forme d'onde de la tension et du courant, ce qui réduit la qualité de l'énergie électrique. La solution proposée pour atténuer ces effets est l'utilisation de filtres actifs parallèles, qui compensent les courants perturbateurs et restaurent la forme d'onde.

Dans le second chapitre, nous étudierons le filtre actif parallèle en détaillant ses composants essentiels et leurs fonctionnements. Les stratégies de commande de notre filtre sont également discutées pour optimiser sa performance et assurer une compensation efficace des harmoniques.

Le troisième est consacré au générateur photovoltaïque, en utilisant le modèle à une diode pour représenter les cellules solaires. En complément, l'intégration d'un hacheur boost est examiné pour maximiser l'extraction de puissance du générateur PV. La méthode Perturbation et Observation (P&O) est présentée comme une technique efficace de suivi du point de puissance maximale (MPPT), permettant d'optimiser l'efficacité du système PV.

Le dernier chapitre se concentre sur la simulation et l'interprétation des résultats obtenus. Les performances du filtre actif parallèle, couplé au générateur photovoltaïque et l'hacheur boost, sont analysées à travers diverses simulations. Les résultats démontrent l'efficacité du FAP dans la réduction des harmoniques et l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique.

En conclusion, notre travail vise à fournir une solution intégrée et efficace pour la gestion des harmoniques dans les systèmes électriques alimentés par des énergies renouvelables, en combinant les avantages des filtres actifs parallèles et des générateurs photovoltaïques optimisés.



Chapitre I :  
Perturbations du réseau électrique et  
solution de dépollution harmoniques.

## I.1 Introduction

La distribution de l'énergie électrique doit être de qualité équilibrée de la source aux utilisateurs. A cet effet des perturbations sont souvent enregistrées et affectent la qualité de cette dernière. Plusieurs altérations sont la cause en particulier les charges non linéaires, les variateurs électroniques de vitesse, en outre les incidents relatifs à la nature physique et matérielle, comme il existe aussi des causes intrinsèques. Pour s'échapper à ce genre de dysfonctionnement il est nécessaire de capter la faille pour résoudre le problème avec des solutions adéquates pour les éliminer.

Dans ce chapitre nous avons axé notre travail sur les principaux défauts perturbants la tension et le courant du réseau électrique, en évoquant l'origine de cette défaillance.

## I.2 Qualité de l'Energie électriques

L'Energie électrique est distribuée sous forme de tension incluant un système sinusoïdal triphasé, combinant la qualité de la tension et du courant cependant cette dernière est caractérisée par des éléments initiaux dont il s'agit de :

- La fréquence
- L'amplitude de tension
- La forme d'onde « sinusoïdal »
- Equilibre et symétrie parfaite des trois tensions (déphasages entre les phases)

Des phénomènes physiques influant sur une ou plusieurs de ces caractéristiques peuvent entraîner des perturbations dans le réseau électrique. La classification de ces perturbations selon leur durée permet de les identifier et de les traiter, parmi ces perturbations on peut distinguer :

- Les altérations de l'onde de tension (harmoniques, déséquilibre, flicker) qui sont permanents ou durent au minimum plusieurs minutes
- Les creux de tension et coupures brèves durent d'une à quelques secondes
- Les surtensions transitoires qui durent moins d'une période [1].

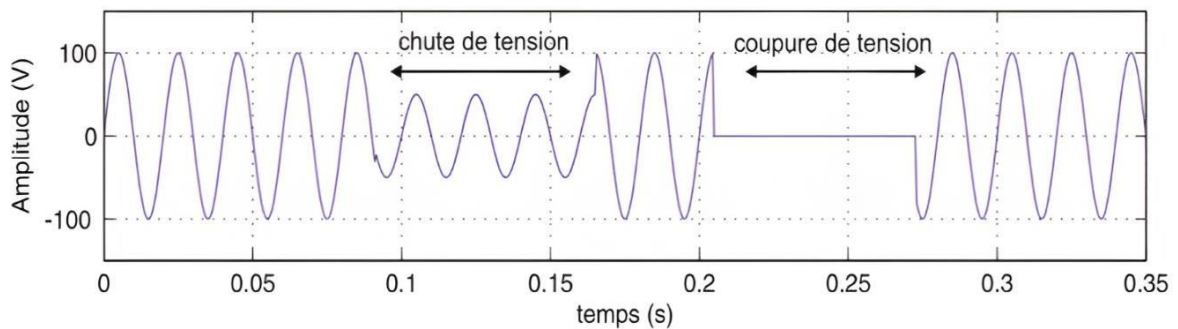
### I.3 Perturbations électriques et leur origine

Les perturbations électriques c'est toute une anomalie interne ou externe au réseau ayant un pouvoir de modifier d'une manière transitoire ou permanente en amplitude et/ou en forme des grandeurs [2].

#### I.3.1 Creux et coupures de tension

Il s'agit d'une chute brutale de tension a une valeur située entre 10% et 90% de la tension nominale pendant un temps relevant de 10 ms jusqu'à quelques secondes.

Ce genre de perturbation dû à des phénomènes naturels ou des défauts d'installations des matériaux comme il apparait dans la figure ci-dessous :

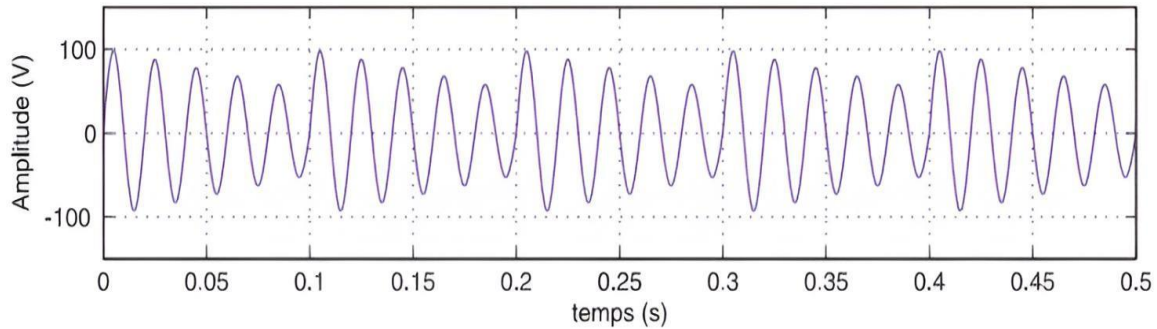


**Figure I.1:** creux et coupures de tension [4]

#### I.3.2 Les fluctuations de tensions (flicker)

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de  $\pm 10\%$  et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes [4].

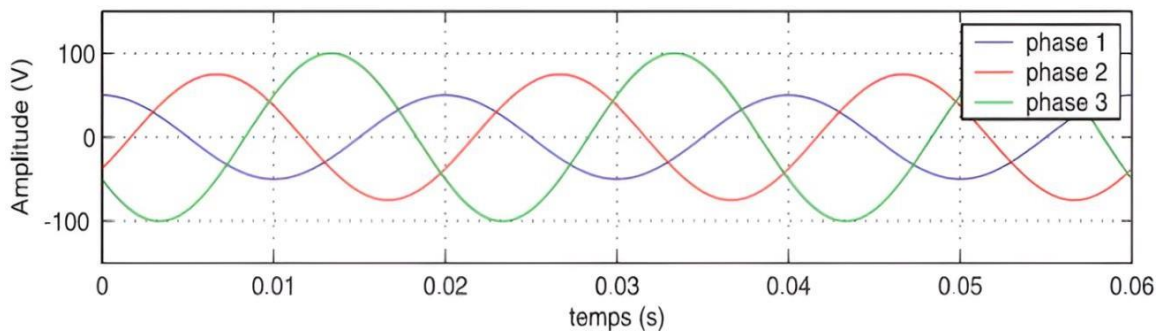
Les causes de cette fluctuation est provoquée par la propagation sur les lignes du réseau du courant d'appel.



**Figure I.2:** fluctuations de tension (flicker)

### I.3.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

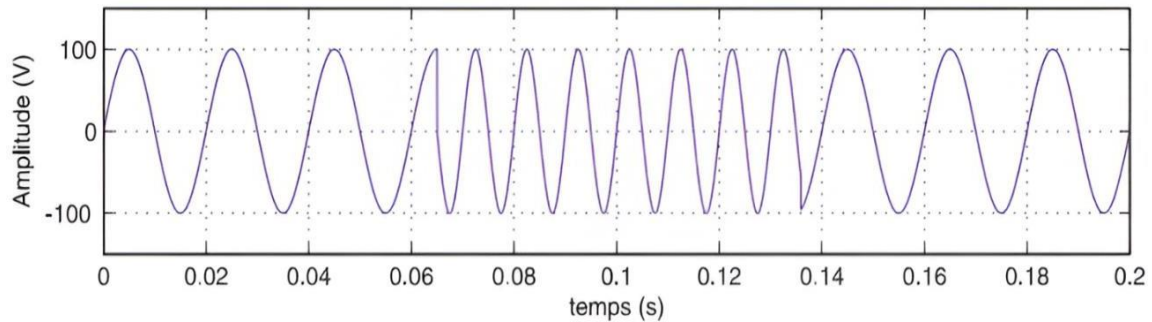
Lorsqu'il s'agit de différence en amplitude des trois tensions et/ou ne sont pas décalées d'un angle de  $120^\circ$  les uns par rapport aux autres, on évoque le déséquilibre du système triphasé [4].



**Figure I.3:** cas de déséquilibre du système triphasé de tension

### I.3.4 Variation de fréquence

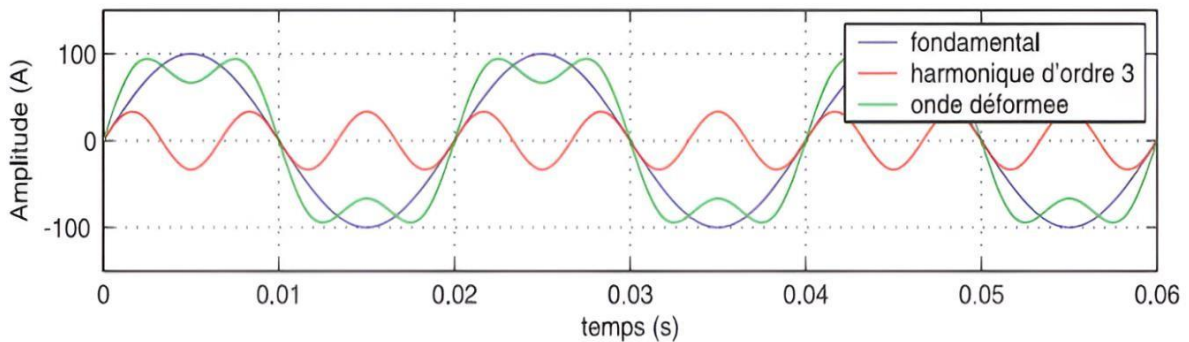
La norme d'une fréquence du réseau de distribution doit se mesurer entre  $50 \pm 1\%$ . La variation de fréquence du système de distribution s'affiche chez le consommateur qui utilise d'autre sources électriques (système solaire), Ces variations sont rares et se produisent dans des conditions exceptionnelles comme, les défauts dans les turbines des centrales de production [5].



**Figure I.4:** Variations de fréquence [4]

### I.3.5 Les harmoniques

Une perturbation harmonique est souvent expliquée comme altération de la forme d'onde d'un signal sinusoïdal pur. Sa principale source dans les réseaux électrique est l'utilisation croissante des convertisseurs statiques (charge non linéaire)



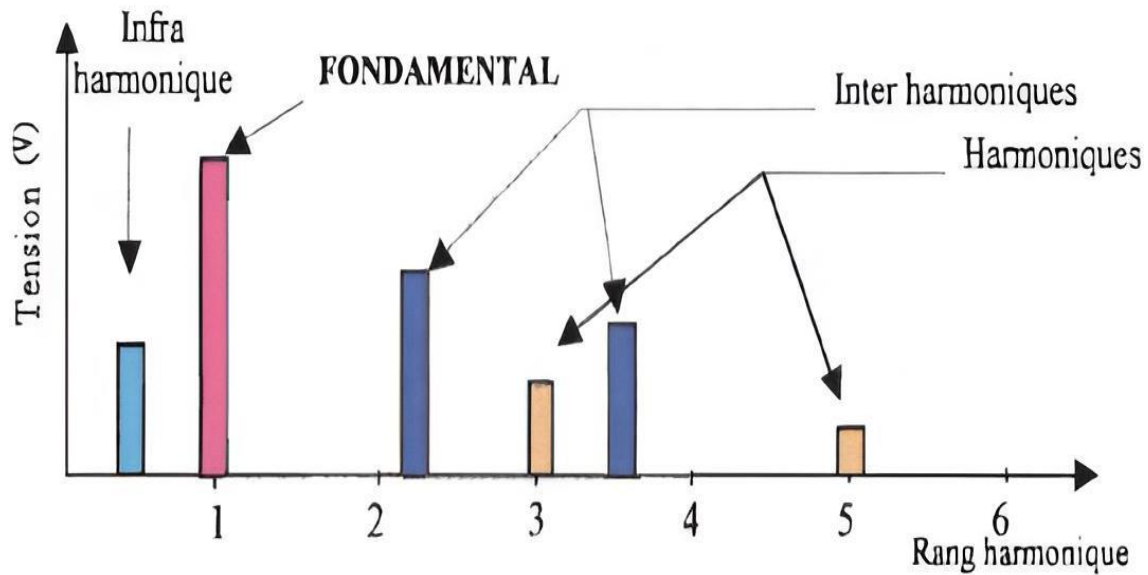
**Figure I.5:** Harmoniques d'ordre 3, l'Onde fondamentale et déformée [4]

- **Inter-harmoniques**

Il s'agit de composantes sinusoïdales d'une grandeur qui ne correspondent pas à des multiples entiers de la fréquence fondamentale.

- **Infra-harmoniques**

Ce sont des composantes qui sont à des fréquences inférieures à celle du fondamental.



**Figure I.6:** Les harmoniques, les inters et infra harmoniques [3]

Ces deux types de perturbations résultent de variations périodiques et aléatoires de la puissance absorbée par certaines machines électrique.

#### I.4 Origine des harmoniques

Au cours des dernières années, l'utilisation croissante d'appareils électriques avec des convertisseurs statiques a fortement augmenté la pollution harmonique dans les réseaux électriques. Ces appareils, appelés charges non linéaires, produisent des courants à des fréquences multiples de la fréquence principale ou à d'autres fréquences. Ces courants peuvent causer des perturbations dans le réseau électrique, provoquant des tensions anormales aux points où ils se connectent. Cela peut affecter la qualité de l'énergie électrique pour d'autres utilisateurs du même réseau. Il est donc important de trouver des solutions pour réduire ces perturbations [6].

##### ➤ Emission en tension

L'émission de tensions harmoniques par les équipements du réseau a une faible influence sur la distorsion des réseaux électriques, se manifestant généralement à des niveaux bas. Cette émission résulte surtout de défauts dans la construction des enroulements des machines tournantes et des transformateurs. Ces imperfections peuvent légèrement altérer la qualité de l'énergie électrique transmise.

### ➤ **Emission en courant**

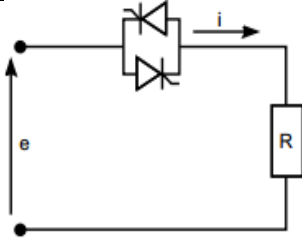
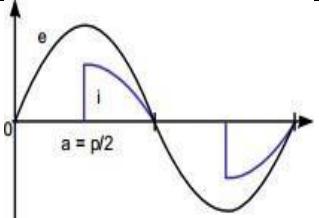
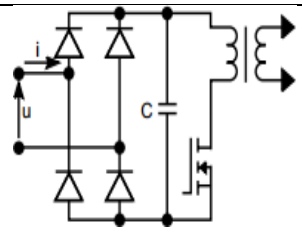
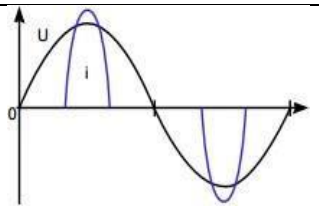
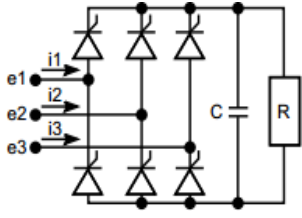
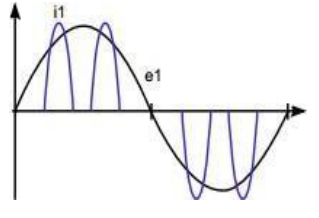
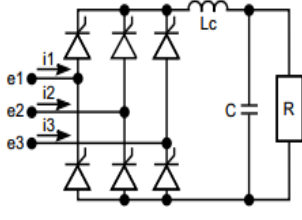
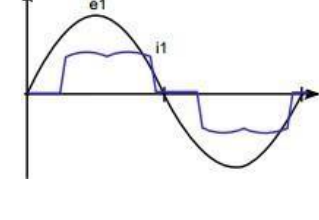
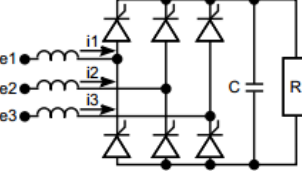
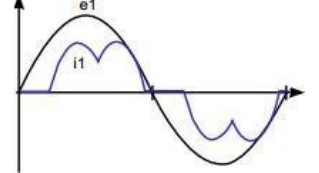
Les charges non linéaires, qui consomment un courant non sinusoïdal du réseau, sont les principales contributrices aux courants harmoniques dans les réseaux électriques. Ces charges peuvent être classées en sept catégories principales d'équipements perturbateurs chez les utilisateurs, dont quatre sont des dispositifs électroniques :

- Le redresseur monophasé avec un filtre capacitif,
- Le gradateur monophasé,
- Le redresseur triphasé à thyristors,
- Le redresseur triphasé avec diodes et filtre capacitif,
- Les moteurs asynchrones,
- Les lampes,
- Les équipements utilisant un arc électrique.

Chacun de ces types de charges à une manière spécifique d'interférer avec la qualité du courant électrique, ce qui peut entraîner des problèmes de qualité de l'alimentation électrique dans le réseau global.

Tous ces systèmes jouent un rôle dans l'accroissement de la pollution harmonique des réseaux électriques auxquels ils sont connectés. Les figures illustrées juste en bas dans le tableau démontrent les principaux convertisseurs statiques responsables de cette pollution harmonique.

**Tableau I.1:** présentation de quelques convertisseurs statiques et l'allure des courants qu'ils génèrent [5]

Type de convertisseur	Schéma	Allure de courant
Gradateur de lumière ou de chauffage		
Redresseur d'alimentation à dé-coupage, par exemple : ordinateur, électroménager		
Redresseur triphasé avec condensateur en tête par exemple : variateur de vitesse pour moteurs asynchrones		
Redresseur triphasé avec inductance de filtrage en continu, par exemple : chargeur de batterie		
Redresseur triphasé avec inductance de lissage en alternatif, par exemple : ASI de forte puissance		



## I.5 Conséquences des harmoniques

Les courants harmoniques se propagent dans le réseau électrique, déforme l'allure du courant de la source et polluent les consommateurs alimentés par ce même réseau. Ils peuvent occasionner des incidents au niveau de l'appareillage du client et donner lieu à des surcoûts de production d'énergie importants. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux types : les effets instantanés et les effets à terme [5].

- Effets instantanés

Ils apparaissent rapidement dans certains appareillages

- **Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques** : en présence le courant et la tension se transforme plusieurs fois dans une demi-période.
- **Erreurs dans les appareils de mesures** : Certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesure et des erreurs de lecture supplémentaires en présence d'harmoniques.
- **Vibrations et bruits** : les courants harmoniques provoquent des bruits et des vibrations, en particulier dans les appareils électromagnétiques.
- **Effets à termes**

Ils apparaissent après une exposition longue a la perturbation harmonique, ils se manifestes par une nature thermique, cela se traduit par l'échauffement qui conduit à l'endommagement des matériaux.

- **Échauffement des câbles et des équipements** : Cette démarche touche en particulier le sur-échauffement de neutre et les matériels bobinés.

- **Échauffement des condensateurs** : L'échauffement est causé par les pertes dues au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique. Les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.
- **Échauffement dû aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs** : Cette panne est provoquée par les pertes statoriques dû aux différences de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor.

Les harmoniques génèrent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par effet Joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les circuits magnétiques [5].

## I.6 Les caractéristiques des perturbations harmoniques

- **Rang harmonique** : Est le rapport de sa fréquence  $fn$  à celle du fondamental, généralement la fréquence industrielle (50Hz-60Hz) Le fondamental  $f_1$  a le rang 1 [9].

$$fn/ f_1 = n \quad (I.1)$$

- **Spectre** : C'est un histogramme donnant l'amplitude de chaque harmonique en fonction de rang l'amplitude est donnée en valeur relative par rapport au fondamental en un point spécifié [9].

### I.6.1 Expression de la grandeur déformée

L'analyse des signaux sinusoïdaux basée sur les harmoniques, permettent la décomposition des signaux électriques perturbés. Le concept d'harmoniques été introduit par Joseph Fourier, l'auteur de cette recherche a démontré que tout signal périodique non sinusoïdale peut être représenté par une somme ou série des sinusoïdes de fréquences discrètes. La composante zéro qui porte le nom du chercheur Fourier est la composante continue, alors que la première composante est nommée composante fondamentale. Le reste des composantes de la série sont appelés harmoniques et sont multiples de la fréquence fondamentale [9].

## I.6.2 Taux de distorsion harmoniques

La perturbation harmonique est mesurée à l'aide du taux de distorsion harmonique total, noté THD, que ce soit en tension ou en courant. Ce paramètre quantifie le degré de déformation de l'onde par rapport à une onde sinusoïdale pure [7]. Les taux de distorsion harmonique pour la tension ( $THD_V$ ) et pour le courant ( $THD_I$ ) sont calculés en utilisant les formules spécifiques suivantes :

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

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (I.3)$$

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}(x)} x_h^2}}{x_1} \times 100 \quad (I.4)$$

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

**$X_1$**  : La valeur efficace de la composante fondamentale (du courant ou de la tension).

## I.6.3 Facteur de puissance

Pour un signal sinusoïdal, le facteur de puissance est défini comme étant le quotient de la puissance active  $P$  sur la puissance apparente  $S$ . Lorsque des harmoniques sont présentes, une composante additionnelle nommée puissance déformante  $D$  doit être prise en compte [8]. Cette dernière est calculée selon la relation suivante :

$$D = 3V\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (I.5)$$

Avec :

**$V$**  : la valeur efficace de la tension du réseau électrique.

**$I_n$**  : La valeur efficace du courant de la charge.

**$n$**  : Rang harmonique et  $n \neq 1$ .

Le facteur de puissance est donc égal :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (I.6)$$

En mettant :

$$P = 3 \cdot V \cdot I_1 \cos(\varphi) \quad (I.7)$$

$$Q = 3 \cdot V \cdot I_1 \sin(\varphi) \quad (I.8)$$

### I.6.4 Série de Fourier

Tout signal périodique et déformé  $y(t)$  de période  $T$  peut être décomposé en une somme d'ondes sinusoïdales, ainsi qu'une éventuelle composante continue, grâce à la méthode de décomposition en série développée par le mathématicien Joseph Fourier [10]. Cette décomposition est formulée de la manière suivante :

$$y(t)=Y_0 + \sqrt{2}(Y_1. \sin(\omega t - \varphi_1) + Y_2. \sin(2\omega t - \varphi_2)+ \dots+Y_h. \sin(h\omega t - \varphi_h)) \quad (\text{I.9})$$

Cette expression peut être représentée sous la forme d'une somme :

$$y(t)=Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} Y_h. \sqrt{2}. \sin(h\omega t - \varphi_h) \quad (\text{I.10})$$

Avec :

- $Y_0$ : valeur moyenne ou composante continue du signal  $y(t)$ ,
- $h$  : rang de l'harmonique,
- $Y_h$ : valeur efficace de l'harmonique au rang  $h$ ,
- $\omega$ : pulsation fondamentale ( $2\pi. f = 2\pi. \frac{f}{T}$ ),
- $\varphi_h$ : phase de l'harmonique au rang  $h$

### I-7 Normes et réglementations

Les deux organismes fondamentaux dans le secteur électrotechnique sont la Commission Électrotechnique Internationale (CEI) et l'Institut des Ingénieurs Électriciens et Électroniciens (IEEE). Ces organisations sont à la pointe de la normalisation concernant les perturbations électriques à l'échelle mondiale, bien qu'elles diffèrent dans leurs critères de définition des interactions entre le réseau électrique et les appareils connectés [6].

Le but des normes et régulations établies est de réduire les dysfonctionnements causés par les harmoniques. À cet égard, la CEI et l'IEEE ont établi des seuils pour les courants et tensions harmoniques que les équipements ne doivent pas excéder, à travers une série de normes de compatibilité électromagnétique. À titre illustratif, nous pouvons mentionner :

**La norme CEI 61000-2-2** : Cette norme établit les seuils de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux publics de basse tension, comme illustré dans le

tableau I.2 Son objectif est de protéger les équipements connectés à un réseau de basse tension affecté par des déformations harmoniques.

**Tableau I.2:** Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (norme CEI 61000-2-2)

Rang impairs		Rang impairs		Rang pairs	
Rang	Taux	Rang	Taux	Rang	Taux
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2		0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5				0.2
25	1.5				
	0.2				
	1.3				

**La norme CEI 61000-3-2 :** Cette norme, illustrée dans le tableau I.3, détermine les limites des courants que les équipements peuvent injectés dans le réseau public. Elle s'applique spécifiquement aux appareils domestiques dont le courant par phase ne dépasse pas 16 ampères.

**Tableau I.3:** Limites des composantes harmoniques en courant (Norme CEI 61000-3-2)

Harmoniques impaires		Harmoniques paires	
Rang	Courant harmonique admissible maximale(A)	Rang	Courant harmonique admissible maximale(A)
3	2.30	2	1.08
5	1.014	4	0.43
7	0.77	6	0.3
9	0.40	8	0.23
11	0.33		
13	0.21		
15	0.15		

**La norme IEEE-519 :** La recommandation internationale de l'IEEE, initialement présentée en 1981, a été mise à jour en 2014. Cette recommandation vise à fournir des directives sur la gestion des problèmes associés au contrôle des courants harmoniques et à la compensation de la puissance réactive. Elle s'adresse spécifiquement aux applications de convertisseurs statiques dans les environnements industriels et commerciaux [12].

Elle impose aussi des contraintes sur les tensions et courants harmoniques au point commun de couplage (PCC) afin de garantir le fonctionnement optimal des équipements récepteurs sur d'autres sites. Par exemple, elle spécifie les valeurs maximales admissibles pour chaque tension harmonique individuelle ainsi que le taux de distorsion harmonique (THD) qui ne doit pas être excédé, comme indiqué dans le tableau I.4 [11].

**Tableau I.4:** Limites des tensions harmoniques selon IEEE-519

Tension au jeu de barres	Composante harmonique individuelle maximale	THD maximale
- 69 kV et moins	3.0	5.0
- 115kV à 161 kV	1.5	2.5
- Plus de 161 kV	1.0	1.5

## **I.8 Méthodes de suppression d'harmoniques**

Plusieurs stratégies de filtrage des harmoniques ont été développées pour réduire leur propagation dans le réseau électrique, visant ainsi à optimiser la qualité de l'énergie électrique. Initialement, la méthode traditionnelle et la plus répandue dans l'industrie consistait à utiliser des filtres passifs. Cependant, face aux limites de cette approche, les filtres actifs ont été développés et ont progressivement fait leur entrée sur le marché. Plus récemment, l'adoption des filtres hybrides, qui combinent les technologies des filtres actifs et passifs, a commencé à émerger. Ces filtres hybrides se distinguent par leur capacité à offrir des performances supérieures, combinant efficacement les avantages des deux types de filtres. Malgré ces atouts, leur adoption sur le marché reste encore relativement modeste [13].

### **I.8.1 Filtrage passif**

Ces dispositifs représentent les premières solutions techniques déployées pour l'élimination des harmoniques. Ils se composent d'éléments passifs tels que des inductances, des condensateurs, et des résistances. Typiquement, les filtres harmoniques sont installés en parallèle aux charges qui génèrent des harmoniques, permettant ainsi une réduction efficace de ces perturbations électriques dans le réseau. Cette configuration favorise l'absorption et la neutralisation des harmoniques là où elles sont produites, améliorant ainsi la qualité de l'énergie électrique [13]. On peut classer ces filtres en deux catégories principales : filtre résonnant et filtre amorti.

#### **I.8.1.1 Filtre résonnant**

Le filtre résonnant illustré dans la Figure I.7 est conçu pour offrir une impédance extrêmement faible à sa fréquence de résonance. Ce filtre se caractérise par sa grande sélectivité, le rendant particulièrement efficace pour atténuer de manière significative des harmoniques spécifiques, typiquement ceux de rang 5 et 7 [14].



Figure I.7: structure du filtre résonant

### I.8.1.2 Filtre amorti

Un filtre amorti est composé d'un condensateur en série avec un circuit parallèle d'une inductance et d'une résistance, cette dernière étant connue sous le nom de résistance d'amortissement. Ce type de filtre est privilégié lorsque les exigences de performance ne sont pas particulièrement élevées. Il est fréquemment utilisé comme filtre passe-haut pour éliminer une large gamme de hautes fréquences du spectre, plutôt que des fréquences spécifiques [15]. Ainsi, ce filtre est conçu pour supprimer les fréquences commençant à partir de l'harmonique h11, qui correspond à 550 Hz, éliminant efficacement les harmoniques h11, h13, h17 et h19.

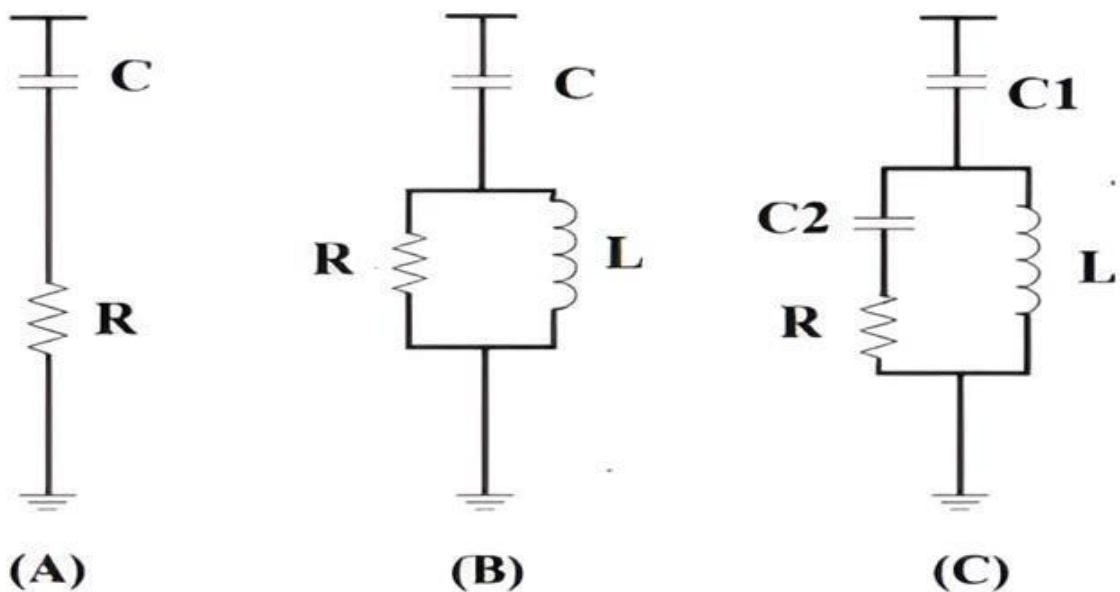


Figure I.8: filtre passif amorti, (A) : 1<sup>er</sup>ordre, (B) : 2<sup>eme</sup>ordre, (C) : 3<sup>eme</sup>ordre



## I.8.2 Filtrage actif

Pour garantir une énergie électrique de qualité aux consommateurs, même dans des conditions opérationnelles fortement perturbées, les filtres actifs sont recommandés comme des solutions efficaces pour purifier les réseaux électriques des perturbations [16].

Le filtre actif est un type de convertisseur en électronique de puissance, généralement sous la forme d'un onduleur commandé soit en courant, soit en tension. Ce dispositif est connecté au réseau électrique via des composants passifs.

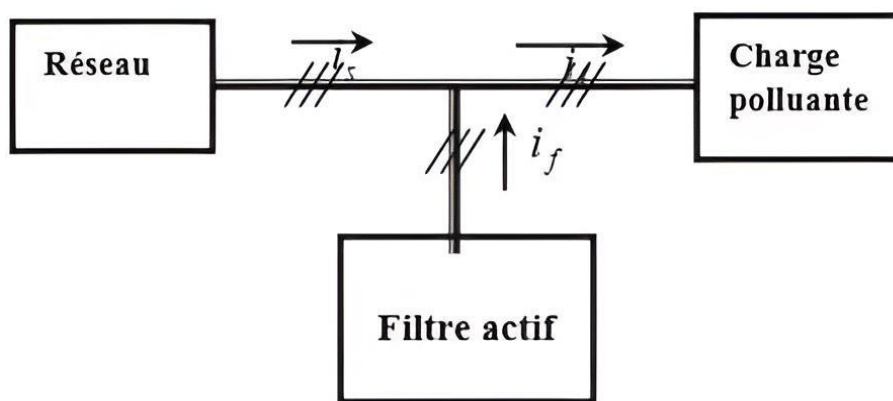


Figure I.9: principe de connexion du filtre actif

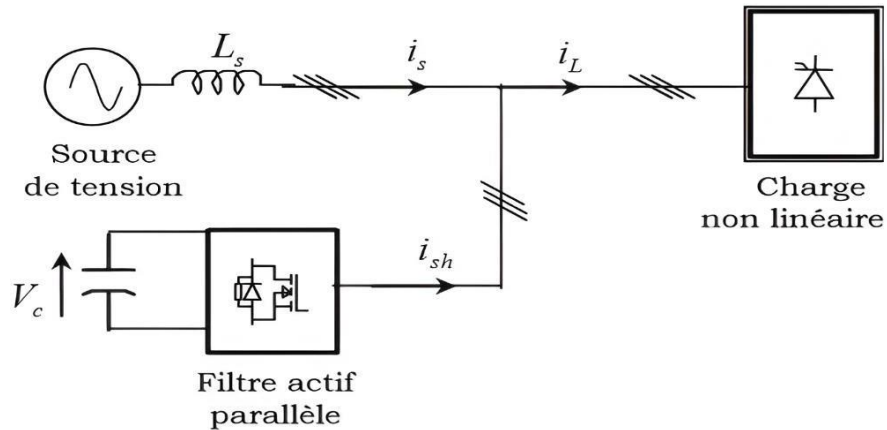
### I.8.2.1 Principe de fonctionnement

La manière dont fonctionne les filtres actifs repose sur la production des courants ou des tensions harmoniques opposés aux perturbations présentes sur le réseau, afin de rétablir un signal sinusoïdal pour le courant ou la tension. Selon leur conception, ces filtres actifs peuvent être connectés au réseau en série (FAS) ou en parallèle (FAP), pour compenser respectivement les tensions ou les courants harmoniques. Ils peuvent également être combinés avec des filtres passifs pour une efficacité accrue dans la neutralisation des harmoniques [16].

### I.8.2.2 Filtre actif parallèle (FAP)

Le filtre actif parallèle, illustré dans la Figure I.10, fonctionne soit comme un générateur de courant, soit comme un générateur de tension. En tant que générateur de courant, il injecte des courants de phase opposée à ceux produits par la charge, permettant ainsi de rendre le courant de source sinusoïdal après compensation. Toutefois, la tension au point de connexion restera sinusoïdale uniquement si la source de tension du réseau ne contient pas d'harmoniques. Le dimensionnement du filtre actif dépend du courant harmonique à fournir. Lorsqu'il agit

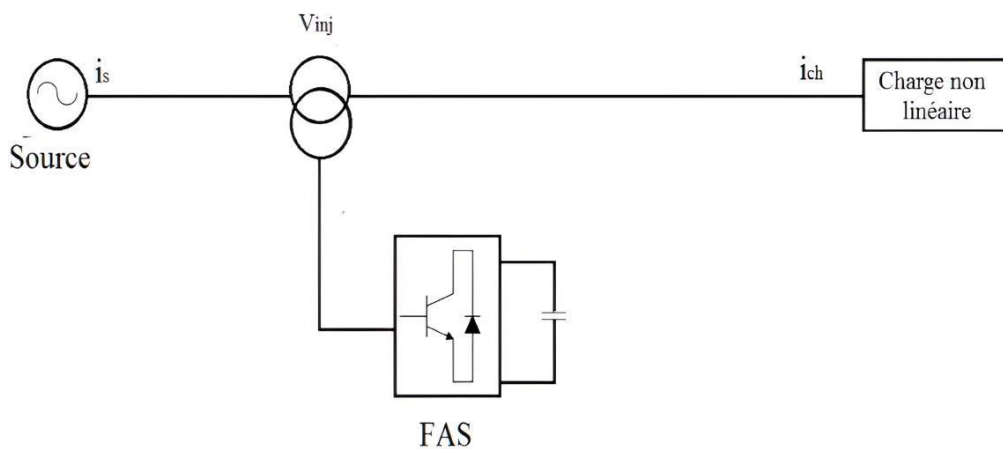
comme compensateur de courants harmoniques, le filtre actif parallèle élimine les harmoniques de courants générés par des charges non linéaires au point de raccordement. En mode compensateur de tension harmonique, il assure que la tension reste sinusoïdale au point de raccordement, indépendamment de la charge et de la qualité de la source de tension [17].



**Figure I.10:** principe de connexion du filtre actif

### I.8.2.3 Filtre actif série

Le rôle principal d'un Filtre Actif Série est d'ajuster l'impédance du réseau pour mieux contrôler les perturbations. Il agit comme une source de tension harmonique, neutralisant ainsi les tensions perturbatrices telles que les creux de tension, les déséquilibres et les harmoniques provenant de la source, ainsi que celles induites par la circulation de courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Cette action permet de stabiliser la tension aux bornes de la charge et de la maintenir sinusoïdale. Toutefois, il est important de noter que le FAS ne compense pas les courants harmoniques consommés par la charge [16].



**Figure I.11:** Montage d'un filtre actif série

### I.8.2.4 Filtre actif série-parallèle

Il s'agit d'une solution de compensation universelle qui repose sur l'utilisation combinée des filtres actifs parallèle et série, comme illustré dans la Figure I.12. Cette configuration est connue sous le nom de Conditionneur de Qualité de Puissance Unifié (UPQC). L'UPQC bénéficie des avantages combinés des filtres actifs parallèle et série. Lorsque le filtre actif série est installé en amont du filtre actif parallèle, il contribue à éliminer les tensions perturbatrices de la source. En position aval, il isole efficacement la charge des perturbations provenant de la source [4].

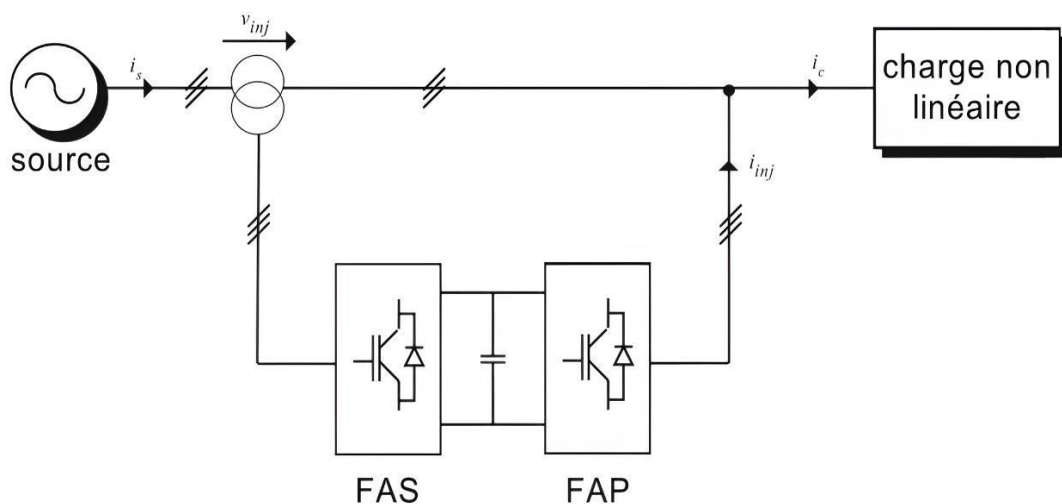


Figure I.12: Combinaisons des filtres actifs série et parallèles

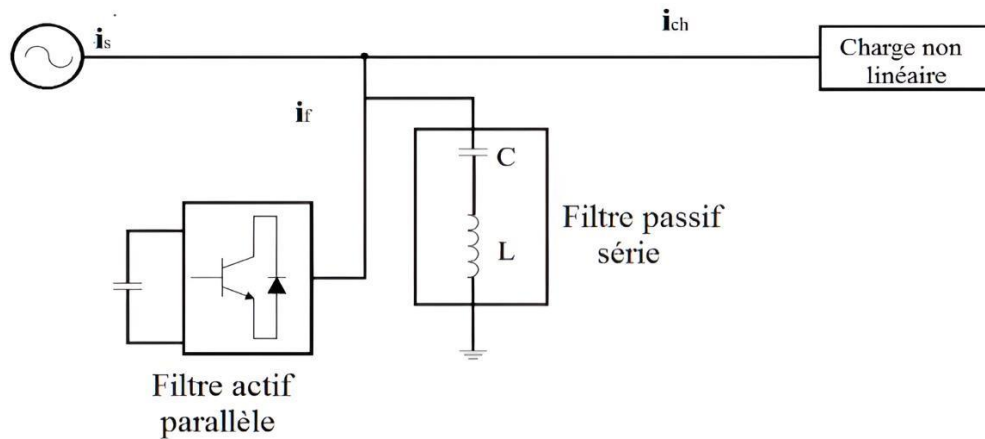
### I.8.3 Filtrage hybride

Le filtre hybride est une configuration qui intègre les avantages à la fois des filtres passifs et des filtres actifs. Cette combinaison en fait une des solutions les plus efficaces pour éliminer les harmoniques de courant dans les réseaux de distribution électrique. L'adoption croissante des filtres actifs hybrides s'explique notamment par les progrès dans les semi-conducteurs de puissance de type MOSFET ou IGBT, qui améliorent leur efficacité et leur réactivité. En outre, d'un point de vue économique, les filtres hybrides sont particulièrement avantageux : ils permettent de diminuer les coûts associés aux filtres actifs, qui représentent souvent un frein à leur déploiement généralisé [16].

#### I.8.3.1 Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Combinaison entre deux filtres actifs et passifs en série, Le filtre passif fonctionne en

offrant une faible impédance à sa fréquence tout en présentant une haute impédance à la fréquence fondamentale. Ce comportement apporte deux bénéfices majeurs. Premièrement, il permet une réduction supplémentaire de la puissance requise pour le filtre actif, étant donné que le courant qui le traverse est moins important. Deuxièmement, cela protège le filtre actif contre d'éventuels courts-circuits Provenant de la charge [16].



**Figure I.13:** Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif

## I-9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons observé que la qualité de l'énergie électrique est impactée par différents types de perturbations telles que les creux de tension, les déséquilibres et les harmoniques. Ces perturbations entraînent une dégradation de la qualité de l'énergie. Pour atténuer les effets de ces perturbations et garantir une bonne qualité d'énergie électrique, il existe des solutions, à la fois traditionnelles et modernes, qui peuvent être mises en œuvre. Les solutions traditionnelles, comme les filtres passifs, montrent leurs limites notamment avec des charges non linéaires et variables. Grâce aux avancées en électronique de puissance et en informatique, la recherche s'est tournée vers de nouvelles solutions, notamment les filtres actifs : série, parallèle et hybride. Dans le chapitre suivant, nous présenterons une étude détaillée du filtre actif parallèle ainsi que ses stratégies de commande.

## Chapitre II

### modélisation du filtre actif parallèle.

## II.1 Introduction

Ayant exploré les diverses perturbations qui affectent le réseau électrique et les solutions de filtration existantes dans le premier chapitre, incluant les filtres actifs et hybride, ce chapitre se focalise sur l'analyse du filtre actif qui contient deux parties (partie puissance et partie commande). Il détaille le fonctionnement du filtre actif qui compense les harmoniques produits par les charges non linéaires pour maintenir un courant sinusoïdal.

Le chapitre aborde ensuite les différentes commandes efficaces utilisées pour réguler l'activité des filtres actifs en évaluant leur efficacité et leur adaptabilité aux variations du réseau électrique, en utilisant la commande par Hystérésis et la commande par Modulation de la Largeur D'impulsion, avec l'identification des courants d'harmoniques par la méthode de référentiel synchrone pour chaque commande. Chaque stratégie sera évaluée selon plusieurs critères, notamment l'efficacité, la complexité de mise en œuvre, et la robustesse.

## II.2 Rôle du filtre actif

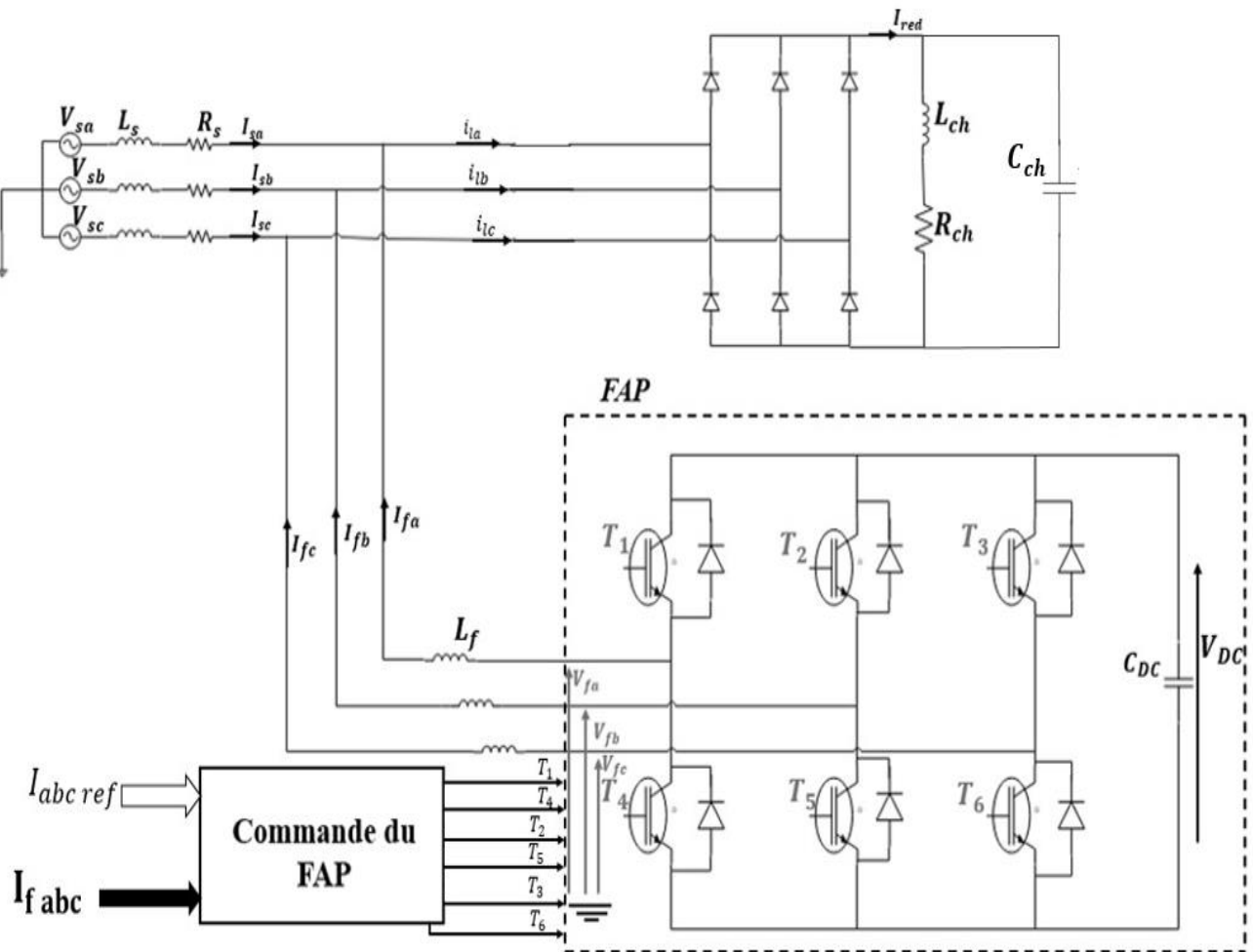
Le filtre actif joue un rôle crucial dans la correction des problèmes de la qualité de l'énergie électrique, il a pour mission de supprimer tous les harmoniques générés par une charge non linéaire. Il y parvient en fournissant des harmoniques de même amplitude mais de phase opposée à ceux produits par la charge. Cela permet de maintenir le courant de la ligne sinusoïdal, correspondant à la composante fondamentale du courant de charge.

Atteindre un courant de ligne parfaitement sinusoïdal s'avère impossible, l'objectif est de s'approcher de la sinusoïde [18].

## II.3 Structure générale d'un filtre actif parallèle

Deux catégories se distinguent dans les filtres actifs parallèles, le filtre actif à structure tension et le filtre actif à structure courant. Pour cette pratique, nous nous intéressons exclusivement sur le filtrage actif parallèle à structure tension.

Comme l'illustre le schéma de notre étude sur la figure II.1, la structure générale du filtre actif parallèle laquelle se compose de deux parties principales : la partie puissance et la partie commande.



**Figure II.1 :** Structure générale d'un FAP triphasé à une charge non-linéaire.

La partie puissance est composée :

- D'un onduleur de tension triphasée
- D'un élément de stockage d'énergie capacitif
- D'un filtre de sortie inductif

La partie commande est composée de :

- La commande de l'onduleur de tension
- La méthode d'identification des courants d'harmoniques
- La régulation de la tension continue

## II.4 La partie puissance

### II.4.1 Onduleur de tension

En cette étude le FAP est un onduleur de tension triphasée a deux niveaux connectés en parallèle au réseau. Le filtre situé entre l'onduleur et le réseau est un filtre inductif avec des spécificités au niveau de son circuit magnétique, son objectif est de générer des courants harmoniques à partir de la différence de tension entre la sortie du pont onduleur et le réseau. Dans ce contexte, l'inductance ( $L_f$ ) joue un rôle crucial dans la commande du courant du filtre, réduire l'amplitude des créneaux de tension au point de raccordement du réseau [19].

Les interrupteurs sont bidirectionnels en courant, composés de semi-conducteurs contrôlés à la fermeture et à l'ouverture (IGBT, thyristors GTO) en antiparallèle avec une diode. L'onduleur de tension est ainsi raccordé à deux types de sources : une source de courant côté alternatif et une source de tension côté continu [19]. Cette configuration impose les conditions suivantes :

- ✓ Un seul interrupteur d'un bras doit conduire pour éviter le court-circuit de la source de tension.
- ✓ Le courant de ligne doit toujours avoir un chemin libre, d'où l'antiparallèle des diodes avec les interrupteurs, pour éviter l'ouverture du circuit de la source de courant.

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la figure II.1 dépendent de l'état des signaux de commande ( $S_a, S_b, S_c$ ), comme il est défini par :

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

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

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

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

$$\begin{bmatrix} V_{fa} - V_{fb} \\ V_{fb} - V_{fc} \\ V_{fc} - V_{fa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_a - S_b \\ S_b - S_c \\ S_c - S_a \end{bmatrix} \cdot V_{dc} \quad (\text{II.1})$$



Si on néglige l'effet de la résistance  $R_s$ , les tensions de sortie de l'onduleur, définies par  $V_{fx}$ ; avec ( $x = \{a, b, c\}$ ), sont référencées par rapport au neutre du réseau et vérifient l'équation suivante :

$$V_{fx} = V_{sx} + L_f \frac{di_{fx}}{dt} - L_s \frac{di_{sx}}{dt} \quad (\text{II.2})$$

Partant du principe que les tensions du réseau sont équilibrées et que la somme des courants du réseau et les courants injectés par l'onduleur sont nulle, on peut écrire :

$$\begin{cases} V_{sa} + V_{sb} + V_{sc} = 0 \\ i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \\ i_{fa} + i_{fb} + i_{fc} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

D'après les équations (2.2) et (2.3) on peut déduire la relation suivante :

$$V_{fa} + V_{fb} + V_{fc} = 0 \quad (\text{II.4})$$

A partir des équations (2.1) et (2.4) on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_a - S_b - S_c \\ -S_a + 2S_b - S_c \\ -S_a - S_b + 2S_c \end{bmatrix} \cdot \frac{V_{dc}}{3} \quad (\text{II.5})$$

Étant donné que les grandeurs  $S_a, S_b$  et  $S_c$  sont binaires, huit commandes distinctes sont possibles, spécifique comme présentés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau II.1:** Etats de commutations possibles.

	$S_b$	$S_c$	$V_{fa}$	$V_{fb}$	$V_{fc}$
0	0	0	0	0	0
1	0	0	$\frac{2}{3} \cdot V_{dc}$	$-\frac{1}{3} \cdot V_{dc}$	$-\frac{1}{3} \cdot V_{dc}$
1	1	0	$\frac{1}{3} \cdot V_{dc}$	$\frac{1}{3} \cdot V_{dc}$	$-\frac{2}{3} \cdot V_{dc}$
0	1	0	$-\frac{1}{3} \cdot V_{dc}$	$\frac{2}{3} \cdot V_{dc}$	$-\frac{1}{3} \cdot V_{dc}$
0	1	1	$-\frac{2}{3} \cdot V_{dc}$	$\frac{1}{3} \cdot V_{dc}$	$\frac{1}{3} \cdot V_{dc}$
0	0	1	$-\frac{1}{3} \cdot V_{dc}$	$-\frac{1}{3} \cdot V_{dc}$	$\frac{2}{3} \cdot V_{dc}$
1	0	1	$\frac{1}{3} \cdot V_{dc}$	$-\frac{2}{3} \cdot V_{dc}$	$\frac{1}{3} \cdot V_{dc}$
1	1	1	0	0	0

### II.4.2 Système de stockage d'énergie capacitif

Pour les puissances de faible à moyennes envergure, le choix le plus judicieux pour le stockage de l'énergie s'oriente vers un condensateur placé du côté continu de l'onduleur qui remplit deux rôles essentiels :

- a) En régime permanent, il maintient la tension du bus continu  $V_{dc}$  quasiment constante avec des faibles oscillations.
- b) Il sert comme élément de stockage d'énergie pour compenser la différence de puissance active entre la charge et la source lors des périodes transitoires.

En régime permanent, la puissance réelle générée par la source est égale à celle imposée par la charge ajoutée à une petite quantité de puissance pour compenser les pertes dans le FAP. Donc, la tension du bus continu peut être maintenue constante à sa référence [20].

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\varepsilon \cdot V_{dc} \cdot \omega_h} \quad (\text{II.6})$$

$C_{dc}$  : Condensateur de stockage.

$I_h$  : Courant harmonique du rang h.

$\varepsilon$  : Le taux d'ondulation admissible.

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

$\omega_h$  : est la pulsation de l'harmonique du rang h

### II.4.3 Filtre de sortie inductif

Le filtre de sortie inductif est un composant passif crucial dans le raccordement de l'onduleur de tension au réseau électrique [19]. Sa conception vise à répondre à deux critères essentiels :

- ❖ Assurer la dynamique du courant,
- ❖ Empêcher les composantes due aux commutations de se propager sur le réseau.

## II.5 La partie commande

L'approche pour commander un filtre actif parallèle triphasé s'appuie sur une structure à deux boucles de contrôle. La première sert à générer les courants de références, que l'onduleur doit injecter au point de raccordement, en parallèle, la deuxième sert à contrôler les courants injectés par l'onduleur afin qu'ils suivent le plus précisément possibles ceux de la référence

[19].

Dans le but d'optimiser les performances du filtrage tout en maintenant une approche de commande simplifiée, deux méthodes de commandes seront appliquées : la commande de courant par Hystérésis, la commande MLI. Avant d'aborder ces deux stratégies, il est nécessaire de décrire l'identification employée pour déterminer les courants harmoniques.

## **II.5.1 Identifications des courants harmoniques**

L'efficacité de la compensation des harmoniques de courant est tributaire de la performance de la méthode d'identification employée. En effet, même un système de commande performant, le filtrage ne sera pas optimal si les courants harmoniques ne sont pas correctement identifiés. C'est pourquoi la littérature propose une multitude de méthodes d'identifications, que l'on peut classer en deux catégories [21].

### **II.5.1.1 Méthodes du domaine fréquentiel**

Elles consistent à employer la transformée de Fourier rapide pour extraire les harmoniques du courant de charge. Elles s'avèrent efficace pour les charges dont le contenu harmonique évolue lentement. Elles offrent l'avantage de cibler chaque harmonique individuellement, permettant ainsi de compenser uniquement les courants harmoniques prépondérants. Cependant, ses inconvénients majeurs c'est qu'elle nécessite des calculs intensifs afin d'identifier les courants harmoniques, ce qui rend ces méthodes peu pratiques lorsque les charges polluantes varient rapidement dans le temps. Pour cette raison, les méthodes basées sur l'analyse fréquentielle sont rarement employées en pratique [21].

### **II.5.1.2 Méthodes du domaine temporel**

Les méthodes d'identification temporel repose sur l'identification des harmoniques de tension ou de courant en temps réel, en séparant le fondamental des harmoniques. Cette technique repose sur des formules algébriques simples à implémenter, ce qui réduit considérablement l'effort de calcul. De plus, elle permet l'identification de tous les harmoniques présents, ce qui en fait un outil précieux pour le calcul du courant de référence [17]. Il existe aussi dans ce domaine plusieurs méthodes d'identifications des courants perturbateurs, parmi ces méthodes on trouve :

- Détection du courant de charge et de compensation du filtre actif.
- Détection du courant de source.

Parmi les différentes méthodes disponibles, la première se révèle être la plus adaptée au filtre actif parallèle installé par le consommateur afin de compenser les courants perturbateurs générés par ses charges polluantes [19].

### II.5.1.2.1 Méthode de référentiel synchrone (SRF)

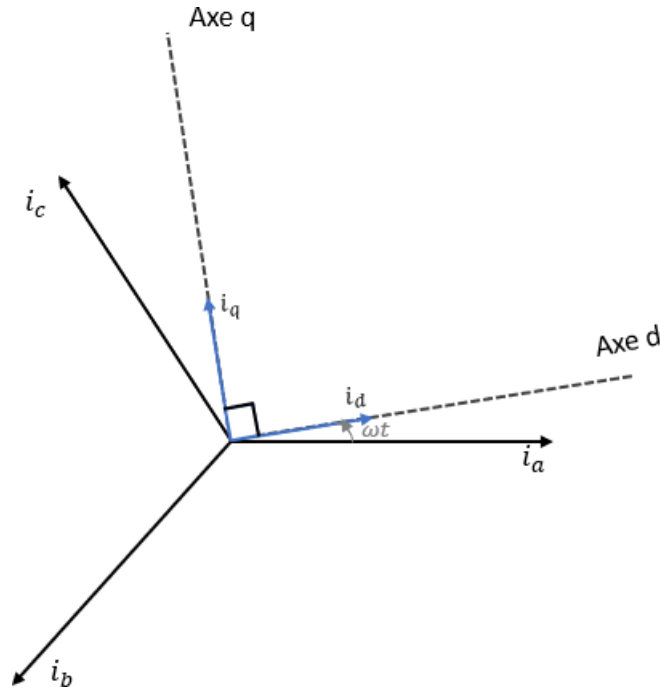
Le principe d'identification sélectif à base de référentiel synchrone (synchronous reference frame) de Park (dq) est basé sur la transformation des systèmes triphasés des courants de charge à un axe diphasé (dq). Dans l'axe d-q, l'harmonique cible devient un signal continu, tandis que les autres harmoniques changent de fréquence. Cette opération permet de séparer cette composante des autres courants grâce à un filtrage simple.

Le concept fondamental de la théorie dq réside dans la transformation vectorielle des signaux d'entrée (les courants de charge dans notre cas), initialement exprimés dans les coordonnées abc (référentiel fixe), vers les coordonnées dq (référentiel tournant à la fréquence fondamentale) via la transformation de Park [17].

Cette méthode repose d'abord sur la transformation des courants de charges triphasées ( $i_{la}, i_{lb}, i_{lc}$ ) à ( $i_d, i_q, i_0$ ) en utilisant la transformation de Park. Les courants  $i_d$  et  $i_q$  peuvent être décomposés en deux composantes distinctes : une composante fondamentale et une composante harmonique. La composante harmonique présente un comportement alternatif, tandis que la composante fondamentale se caractérise par un comportement continu. Ainsi, on peut les exprimer mathématiquement par la relation (II.8). Finalement, on calcule les courants de référence triphasée ( $i_a^*, i_b^*, i_c^*$ ) à partir de cette équation (II.9).

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Le schéma vectoriel de passage du repère (abc) vers le repère (dq) :



**Figure II.2:** Représentation vectorielle de passage de repère (abc) vers le repère (dq)

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_d + \tilde{i}_d \\ \bar{i}_q + \tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (II.8)$$

Avec :

- ✓  $\bar{i}_d, \bar{i}_q$  : Composante continue (fondamentale) de courant de charge dans le repère dq.
- ✓  $\tilde{i}_d, \tilde{i}_q$  : Composante alternative (harmonique) de courant de charge dans le repère dq.

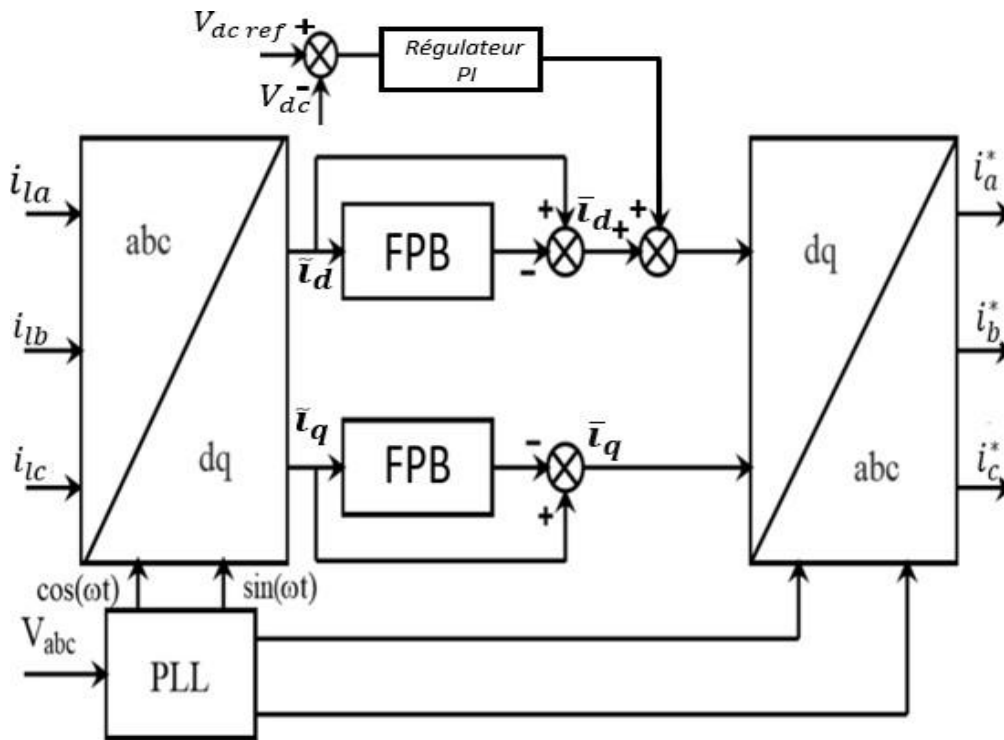
Donc les courants de charge se composent de deux termes. Pour cette étape, le filtre passe-bas (FPB) est utilisé pour séparer les composantes harmoniques  $\tilde{i}_d, \tilde{i}_q$  comme le montre la Figure II.4.

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = 2/3 \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \theta & \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \\ \tilde{i}_o \end{bmatrix} \quad (II.9)$$

$i_a$ : Courant de charge de la phase(a).

$i_b$ : Courant de charge de la phase(b).

$i_c$  : Courant de charge de la phase(c).



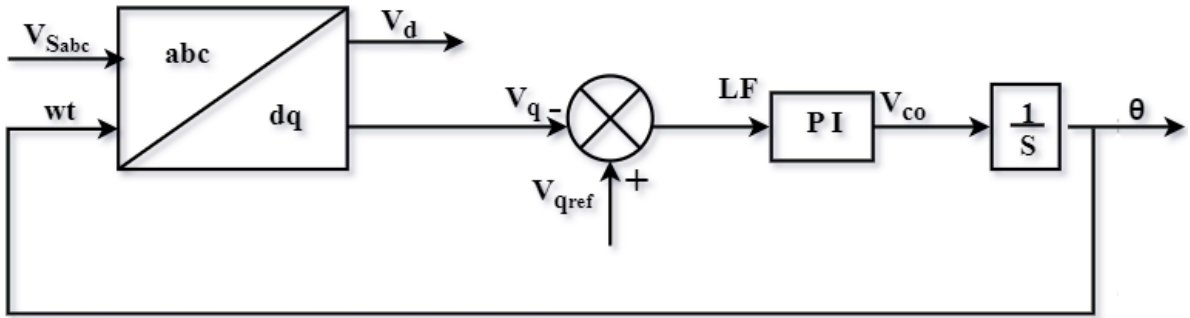
**Figure II.3:** Diagramme de génération des courants de référence par la méthode du référentiel synchrone.

La méthode du référentiel synchrone utilise, dans chaque phase, une boucle à verrouillage de phase (Phase Locked Loop) pour déterminer la position angulaire  $\theta$  du référentiel synchrone dq. Ce référentiel est synchronisé avec les tensions triphasées et tourne à une vitesse constante [5].

#### ❖ Boucle à verrouillage de phase

La boucle à verrouillage de phase (PLL) est un composant essentiel des techniques modernes de commande en électronique de puissance. Elle est utilisée pour extraire les informations relatives à la phase et à la fréquence du signal [7].

Son fonctionnement se base sur la transformation de Park pour passer au repère (d-q), les tensions  $V_{sabc}$  mesurées au point de raccordement du filtre actif parallèle, subissent la transformation de Park dans le repère (d, q). Les tensions ainsi obtenues  $V_{d,q}$  sont exprimés par une rotation, l'angle de cette rotation représente l'angle de la composante directe de tension, il est issu de l'intégration de l'estimation de la pulsation déterminée par le régulateur, ainsi la PLL ne sera verrouillée que lorsque l'angle estimé est égale à l'angle de la tension directe [18].



**Figure 4:** Schéma de la boucle à verrouillage de phase

### II.5.2 Régulation de la tension du bus continu

La tension continue  $V_{dc}$  aux bornes du condensateur de stockage doit être maintenue constante. Les variations de cette tension sont causées par l'échange de puissance active avec le réseau. Il est important de minimiser ces fluctuations pour ne pas dépasser les limites de tension des semi-conducteurs des interrupteurs et pour préserver les performances du filtre actif. Pour assurer une tension continue stable, une régulation de cette tension est nécessaire. Un régulateur PI peut être utilisé à cette effet. En négligeant les pertes au niveau de l'onduleur et du filtre de sortie [22]. La relation entre la puissance absorbée par le condensateur et la tension à ses bornes peut être exprimée par la formule suivante :

$$P_{dc} = \frac{d}{dt} (C_{dc} V_{dc}^2) \quad (\text{II.10})$$

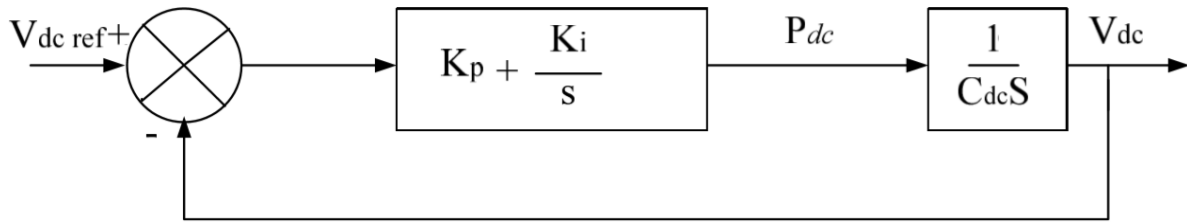
Avec la transformation de Laplace cette équation devient :

$$P_{dc}(s) = C_{dc} V_{dc}^2 s \quad (\text{II.11})$$

La tension aux bornes du condensateur est donnée par :

$$V_{dc}^2(s) = \frac{P_{dc}(s)}{C_{dc} s} \quad (\text{II.12})$$

En basant sur cette relation, et en tenant compte du régulateur PI, la boucle de régulation de la tension continue est schématisée par la figure (II.4). Le choix des paramètres  $k_{pdc}$  et  $k_{idc}$  vise à minimiser le temps de réponse afin de préserver la dynamique du filtre actif.



**Figure II.5:** Schéma de principe de la régulation en boucle fermée de la tension du bus continu.

A partir de cette figure la fonction de transfert en boucle fermée de la régulation est la suivante :

$$FT_{BF} = \frac{1 + \frac{K_p S}{K_i}}{S^2 + 2\frac{K_p}{C_{dc}}S + 2\frac{K_i}{C_{dc}}} \quad (\text{II.13})$$

$$K_i = \frac{1}{2} C_{dc} \omega_c^2 \quad (\text{II.14})$$

$$\omega_c = 2\pi f_c \quad (\text{II.15})$$

$$K_p = \varepsilon \sqrt{2 C_{dc} K_i} \quad (\text{II.16})$$

### II.5.3 Commande de l'onduleur

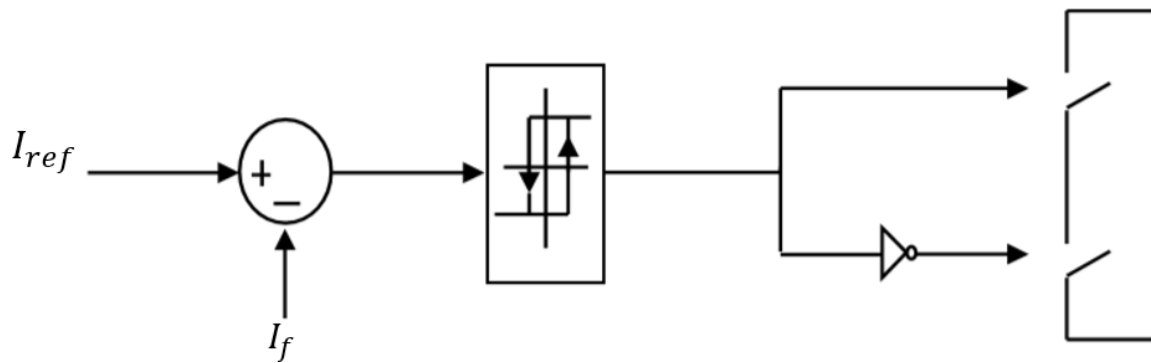
L'objectif de la commande de l'onduleur est de contrôler les courants à la sortie du filtre pour qu'ils suivent leurs références. Le principe repose sur la comparaison entre les courants du filtre actif parallèle et les références, déterminées à partir de diverses méthodes d'extraction des courants harmoniques ainsi que de la tension du condensateur de stockage d'énergie [22].

#### II.5.3.1 Commande par hystérésis

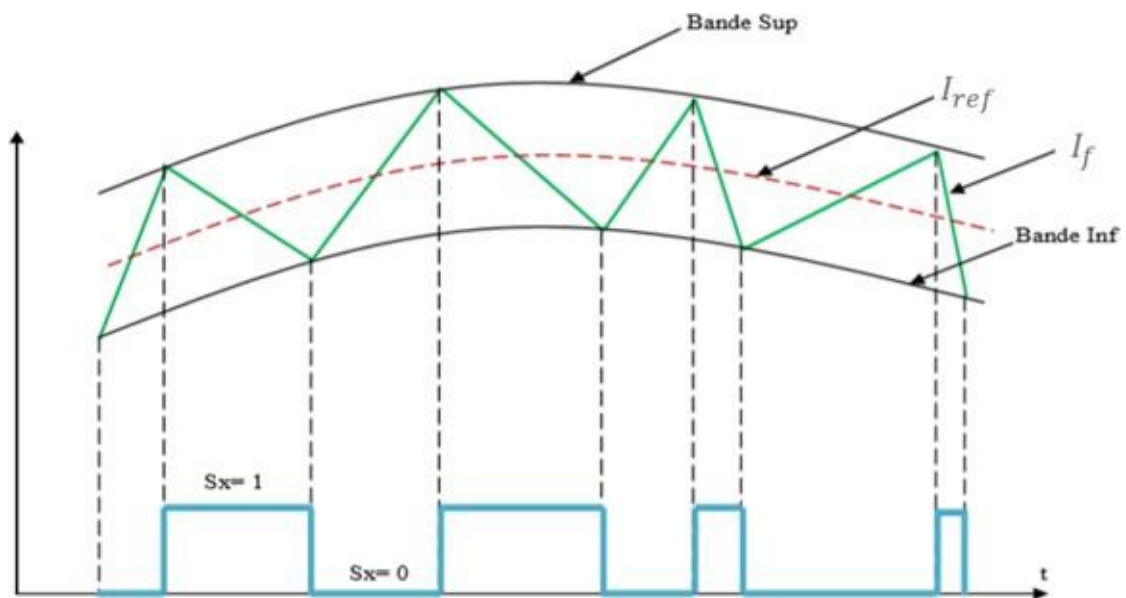
La commande par Hystérésis se caractérise par sa non linéarité et s'appuie sur la comparaison entre le courant de référence et le courant injectés par l'onduleur. Cette différence appelé l'erreur, est ensuite comparée à un seuil prédéfini, nommée bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la limite inférieure ou supérieure de cette bande, un produit des impulsions d'amorçage et de blocage des interrupteurs de l'onduleur est envoyé afin de diminuer ou augmenter le courant en sortie de FAP, et maintenir l'erreur à l'intérieur de la bande. Cette méthode de commande est bien connue pour sa simplicité de mise en œuvre et sa robustesse. Un inconvénient majeur de cette technique de modulation réside dans la fréquence de commutation des interrupteurs, particulièrement irrégulière et incontrôlable, ce qui génère un spectre



d'harmoniques étendu et très perturbé, donc difficilement filtrable [23].



**Figure II.6:** Commande par hystérésis



**Figure II.7:** Comportement d'un contrôleur à Hystérésis

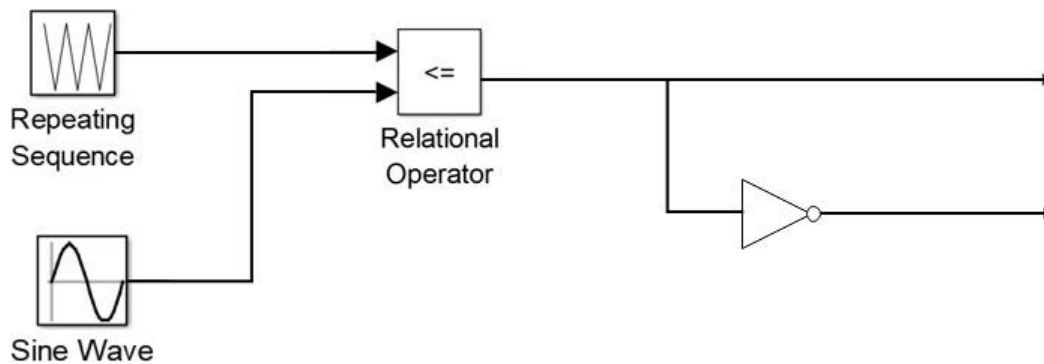
Les ordres de commande des interrupteurs sont générés par la loi de commande suivante :

$$\begin{cases} \text{si } i_f > i_{ref} \Rightarrow S_x = 1 \\ \text{si } i_f < i_{ref} \Rightarrow S_x = 0 \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

### II.5.3.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Cette méthode de commande utilise initialement un régulateur qui établit la tension de référence de l'onduleur en fonction de la différence entre le courant mesuré et sa valeur de référence. Cette tension est ensuite comparée avec un signal triangulaire. Le résultat de cette comparaison génère les signaux de commande pour les interrupteurs [24].

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) se distingue par sa capacité à maîtriser la fréquence de commutation. Elle fonctionne à une fréquence fixe, aisément filtrable en sortie de l'onduleur [22].



**Figure II.8:** Principe de la commande MLI

## II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons mené notre travail sur l'étude du filtre actif parallèle triphasé qui est constitué de deux phases : partie puissance et partie commande.

Dans la première, on a la structure générale du FAP, qui indique essentiellement la partie puissance à savoir l'onduleur de tension, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie.

Dans la deuxième partie, sur les méthodes de commande de l'onduleur et les méthodes d'identifications des courants d'harmoniques.

Dans la continuité de notre recherche, on à travailler sur le générateur PV et la commande MPPT.

Chapitre III  
généralité sur le générateur  
Photovoltaïque.

### III.1 Introduction

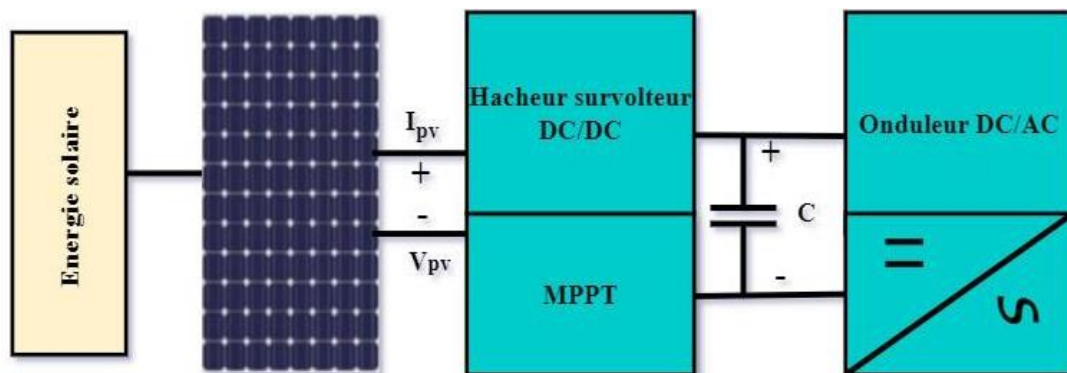
L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique au sein du matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique.

Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. L'association de plusieurs cellules photovoltaïque (PV) en série et en parallèle constitue un générateur photovoltaïque (GPV) présentant une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire, avec un point de puissance maximale (PPM).

Pour bien comprendre ce phénomène, nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur l'effet photovoltaïque, Le principe de la cellule photovoltaïque et leurs différents modèles et les convertisseurs DC/DC, et aussi nous rappelons la commande MPPT et la méthode perturbation et observation (P&O).

### III.2 Le Système Photovoltaïque

Un système photovoltaïque (PV) convertit la lumière du soleil en électricité. Il se compose de plusieurs éléments dont des cellules photovoltaïques, des connexions électriques, une structure de montage mécanique et un dispositif de conversion de l'énergie électrique comme on peut le voir sur le schéma fonctionnel (figure III.1)



*Figure III.1:* Schéma d'un système photovoltaïque

L'électricité produite peut être stockée dans des batteries pour un système autonome ou injectée dans le réseau électrique via un convertisseur DC/AC. Il est avantageux d'intégrer des méthodes de conditionnement pour garantir un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Dans ce contexte, nous utilisons un dispositif spécifique appelé suivi du point

de puissance maximale (MPPT), qui permet de maintenir la production électrique au niveau maximal du générateur.

### **III.3 Les notions générales sur les systèmes photovoltaïques**

#### **III.3.1 Energie solaire photovoltaïque**

Le terme « photovoltaïque » est un mot latin composé de deux concepts « photon » qui signifie lumière et « VOLTA » qui revient au nom d'un physicien italien (Alessandro Volta) qui a choisi d'offrir son nom à l'unité de mesure de la tension électrique. Cette étude qui s'est concentré sur l'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par (ALEXANDR EDMOND BECQUEREL), chercheur qui a démontré qu'il s'agissait d'une transformation directe de la lumière en énergie électrique. Lors de cette démonstration, dans cette époque, cette théorie lancée n'a pas était confirmée par manque d'utilisation pratique de cette découverte. En 1905, Albert EINSTEIN a écrit que : la lumière pouvait entrer à l'intérieur des atomes et que la collision entre les photons et les atomes peut faire sortir des électrons de leurs orbites et ainsi permettre la création d'un courant électrique. Cette conversion se fait en présence de cellules solaires qui nécessitent compréhension étude [25].

#### **III.3.2 L'effet photovoltaïque**

La photopile, qu'on appelle aussi cellule solaire ou photovoltaïque, est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs, on peut la représenter comme une diode plate qui est sensible à la lumière.

La cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique, une cellule comporte deux parties qui sont dopées différemment, couche N présente un excès d'électron périphériques et la couche P présente un déficit d'électrons périphériques, les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel comme le montre la figure (III.2) [26].

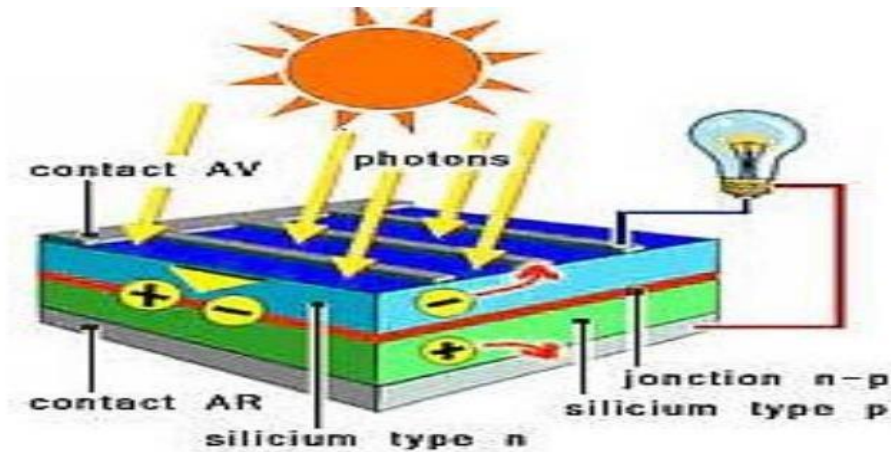


Figure III.2: Schéma explicatif de l'effet photovoltaïque

### III.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque, également connue sous le nom de photopile, constitue l'unité de base d'une installation photovoltaïque. Fabriquée à partir de matériaux semi-conducteurs, elle convertit directement l'énergie lumineuse en énergie électrique [27].

Le fonctionnement de la cellule PV est basé sur un phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque. La Figure (III.3) illustre la structure d'une cellule photovoltaïque [28].

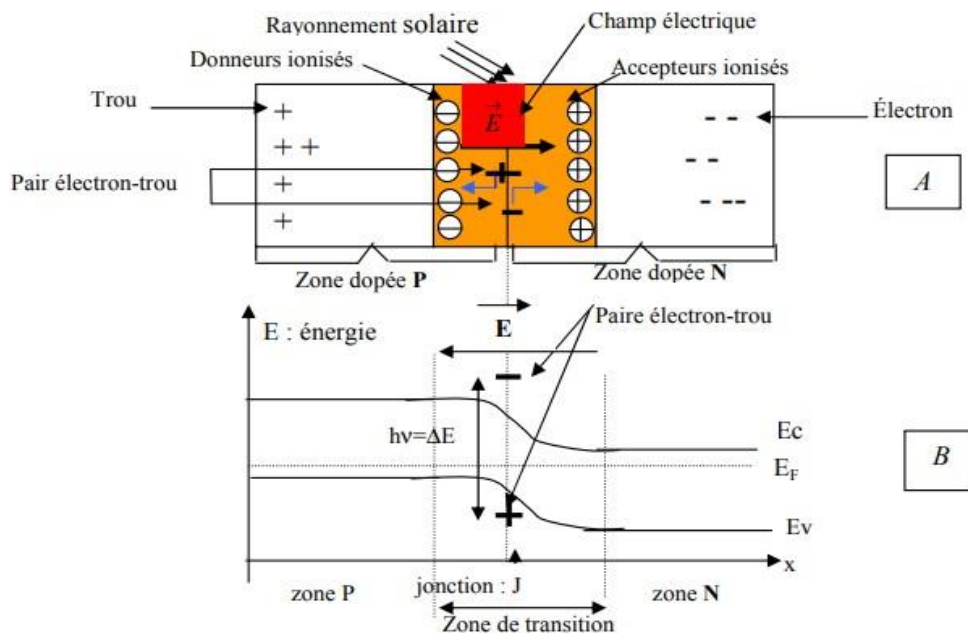


Figure III.3: Structure et principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est fabriquée à partir d'un matériau semi-conducteur, généralement du silicium. Elle se compose de deux couches distinctes : une couche est dopée de manière négative (N) et une couche est dopée de manière positive (P). Cette configuration crée une jonction PN avec une barrière de potentiel, essentielle pour la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique [28].

Lorsqu'ils sont absorbés par le semi-conducteur, les photons transfèrent leur énergie aux atomes du matériau, libérant ainsi des électrons. Cette libération génère des électrons libres (charges négatives) et des trous (charges positives). Cette interaction crée une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel induit un champ électrique ( $E$ ), entraînant ainsi un courant électrique et une différence de potentiel au sein de la cellule photovoltaïque [27] [28].

### III.5 Types des cellules

La plupart des cellules solaires disponibles sur le marché mondial, sont à base de silicium, soit des types mono, poly cristallin ou amorphe. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent [29].

### III.6 Modélisation des cellules photovoltaïques

Dans les travaux scientifiques, il existe différents modèles électriques de la cellule photovoltaïque [30]. Parmi ces modèles on a :

- Modèle idéal
- Modèle à une diode
- Modèle à deux diodes

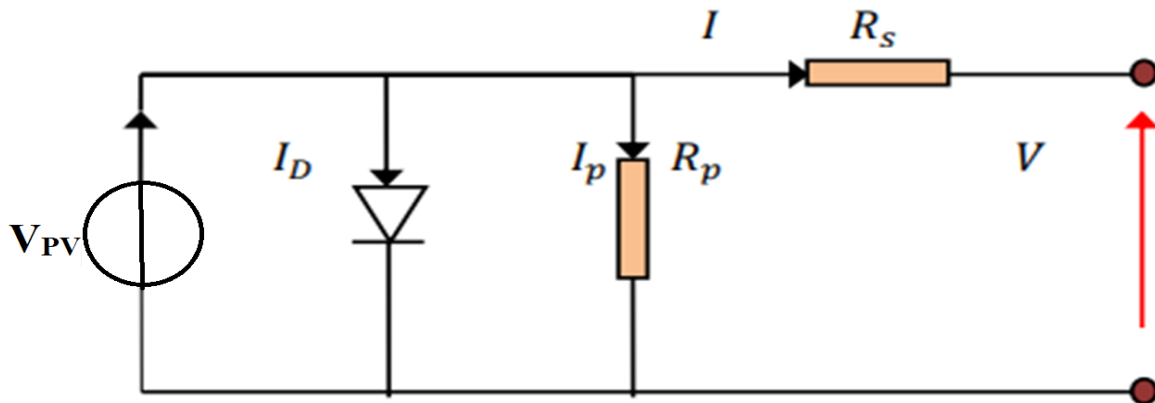
Vu la capacité du modèle à une diode, à représenter avec précision le comportement électrique des cellules solaires en restant relativement simple à mettre en œuvre ainsi que des résistances en série et en parallèle pour prendre en compte les pertes résistives. Cette approche permet de capturer les caractéristiques essentielles des cellules photovoltaïques, telles que la courbe courant-tension ( $I$ - $V$ ) et la courbe puissance-tension ( $P$ - $V$ ), tout en facilitant les calculs et les simulations nécessaires pour la conception et l'optimisation des systèmes photovoltaïques. En outre, le modèle à une diode est suffisamment précis pour la majorité des applications pratiques, offrant un bon compromis entre complexité et exactitude, on a choisi de le développer.

#### III.6.1 Modèle à une diode

Ce modèle tient compte non seulement des pertes en tension exprimée par la résistance série  $R_s$  mais aussi des fuites de courants exprimées par une résistance parallèle  $R_p$

C'est le modèle sur lequel les constructeurs se basent pour fournir les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires. Il est également considéré comme une référence

satisfaisante pour cataloguer typiquement les modules solaires comme illustre dans la figure (III.4)



**Figure III.4:** Circuit équivalent d'une cellule PV –Modèle à une diode

L'équation reliant le courant délivré par une cellule PV et la tension à ses bornes peut être formalisé par un système d'équations résultant des lois de Kirchhoff, est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{RP} \quad \text{III.1}$$

$I$  : courant fourni par la cellule

$I_d$  : courant de jonction

$I_{ph}$  : photo-courant de cellule, dépend de l'intensité de l'irradiation, ce courant correspond également au court-circuit, il est donné par la relation suivante [31].

$$I_{ph} = P_1 * E_s * [1 + P_2(E_s - E_{sref}) + P_3 * (T_j - T_{jref})] \quad \text{III.2}$$

$$I_d = I_s \left[ \exp\left(\frac{q(V_{PV} + R_s I_{PV})}{K * A * N_s * T_j}\right) - 1 \right] \quad \text{III.3}$$

$I_s$  : est le courant de saturation de la diode, il est donné par :

$$I_s = P_4 * T_j^3 * \exp\left(\frac{E_s}{K * T_j}\right) \quad \text{III.4}$$

Avec :

$T_{jref}$ ,  $E_{sref}$  : représente l'éclairement et la température sous conditions STC.

$K$  : constante de Boltzmann ( $K=1.38 * 10^{-23}$  J/K).

$q$  : Charge d'électron =  $1,602 * 10^{-19}$  C



$N_S$  : nombre de cellules en série dans un module.

A : facteur d'idéalité de la diode

$P_1, P_2, P_3, P_4$  : paramètres constantes

Voici l'identification des paramètres du modèle à une diode comme suit [40] :

**Tableau III.1** : les paramètres du modèle à une diode.

$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	A
0.005	$7.27 * 10^{-5}$	$-1.1369 * 10^{-5}$	38.0914	1

$I_{RP}$  : courant traversant  $R_P$ , si  $R_P$  est très grande, il devient très faible et est indépendant de la tension :

$$I_{RP} = \frac{V_D}{R_P} = \frac{V + R_S * I}{R_P} \quad \text{III.5}$$

En utilisant les équations ci-dessus, on peut en déduire l'expression du courant délivré par la cellule photovoltaïque :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{q(V_{PV} + R_S * I_{PV})}{K * A * N_S * T_j} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_S * I}{R_P} \quad \text{III.6}$$

D'après cette modélisation statique d'une cellule photovoltaïque, on constate que la production d'énergie par la cellule est proportionnelle à l'intensité de l'irradiation solaire (G) reçue. De plus, la température influe sur les caractéristiques I-V de la cellule photovoltaïque. [32], c'est ce que nous allons voir dans la suite de notre travail après la simulation.

### III.7 Caractéristiques électriques d'une cellule PV

La relation entre les trois grandeurs, I,  $I_{ph}$  et  $I_d$ , représente la caractéristique courant-tension idéale permettant de déterminer quatre paramètres principaux du fonctionnement des cellules solaires [29] :

- Le courant de court-circuit  $I_{CC}$ .
- La tension en circuit ouvert  $V_{CO}$ .
- Le facteur de qualité A.
- Le facteur de forme FF.

La caractéristique I(V) se divise en trois parties :

- La zone (1) ou la cellule se comporte comme un générateur de courant  $I_{CC}$  proportionnel à l'éclairement.
- La zone (2) ou la cellule se comporte comme un générateur de tension  $V_{CO}$ .
- La zone (3) ou l'impédance interne du générateur varie rapidement.

Comme illustre dans la figure (III.5) :

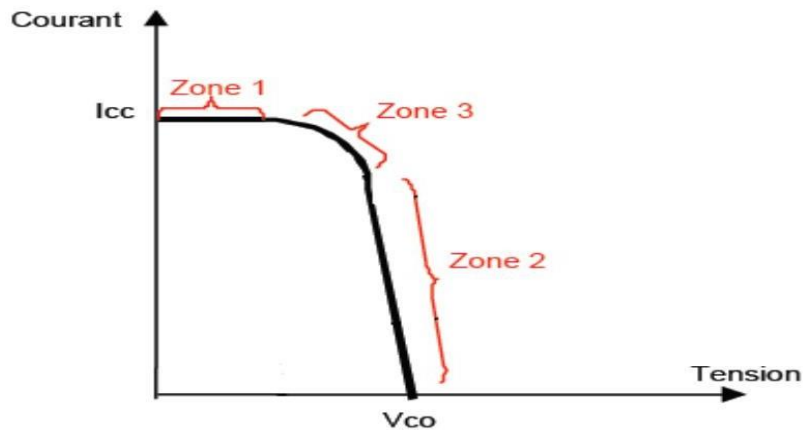


Figure III.5: les différentes zones de la caractéristique I (V) [33].

### III.7.1 La tension à circuit ouvert $V_{CO}$

La tension à circuit ouvert est obtenue lorsque le courant traversant la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Cette tension décroît avec l'augmentation de la température et varie peu en fonction de l'intensité lumineuse. Sa caractéristique  $V_{OC}$  est donnée par la relation suivante :

$$V_{CO}(I = 0) = V_t \log \left( 1 + \frac{I_{SC}}{I_0} \right) \quad \text{III.13}$$

### III.7.2 Le courant de court-circuit $I_{CC}$

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant ( $V = 0$ ) dans le schéma équivalent précédentes). Ce courant augmente linéairement avec l'intensité de l'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs, et de la température. On peut écrire :

$$I_{SC} = I_{ph} \quad \text{III.14}$$

### III.7.3 La Puissance maximale Pmax

Pour une cellule solaire idéale, la puissance électrique maximale Pmax qu'elle peut fournir est égale au produit de sa tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ )<sub>max</sub> par son courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )<sub>MAX</sub>, en l'absence de charge. Et sa relation donnée comme suit :

$$P_{MAX} = V_{max} \times I_{max} \quad \text{III.15}$$

Le produit «  $V_{max} * I_{max}$  » donne la puissance maximale qui représente 80% environ du produit ( $V_{co} I_{sc}$ ).

### III.7.4 Le facteur de forme FF

C'est le rapport entre la puissance maximale ( $P_{max}$ ) que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale) on peut écrire :

$$FF = \frac{V_m * I_m}{V_{co} * I_{sc}} \quad \text{III.16}$$

Le facteur de forme FF est de l'ordre de 70 % pour une cellule de fabrication industrielle [34].

### III.7.5 Rendement énergétique maximum $\eta$

Le rendement des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$ .

$$\eta = \frac{V_m * I_m}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{E * S} = \frac{FF * V_{co} * I_{sc}}{E * S} \quad \text{III.17}$$

Où :

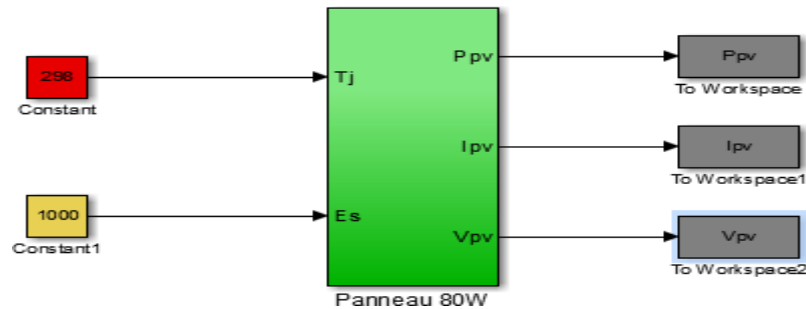
S : Surface de cellule solaire.

E : Flux incident.

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert. [34]

### III.8 Les paramètres qui influent sur les caractéristique PV

Pour étudier les caractéristiques du panneau, on utilise Matlab-Simulink



*Figure III.6* : Le model Matlab du panneau Suntech 80w

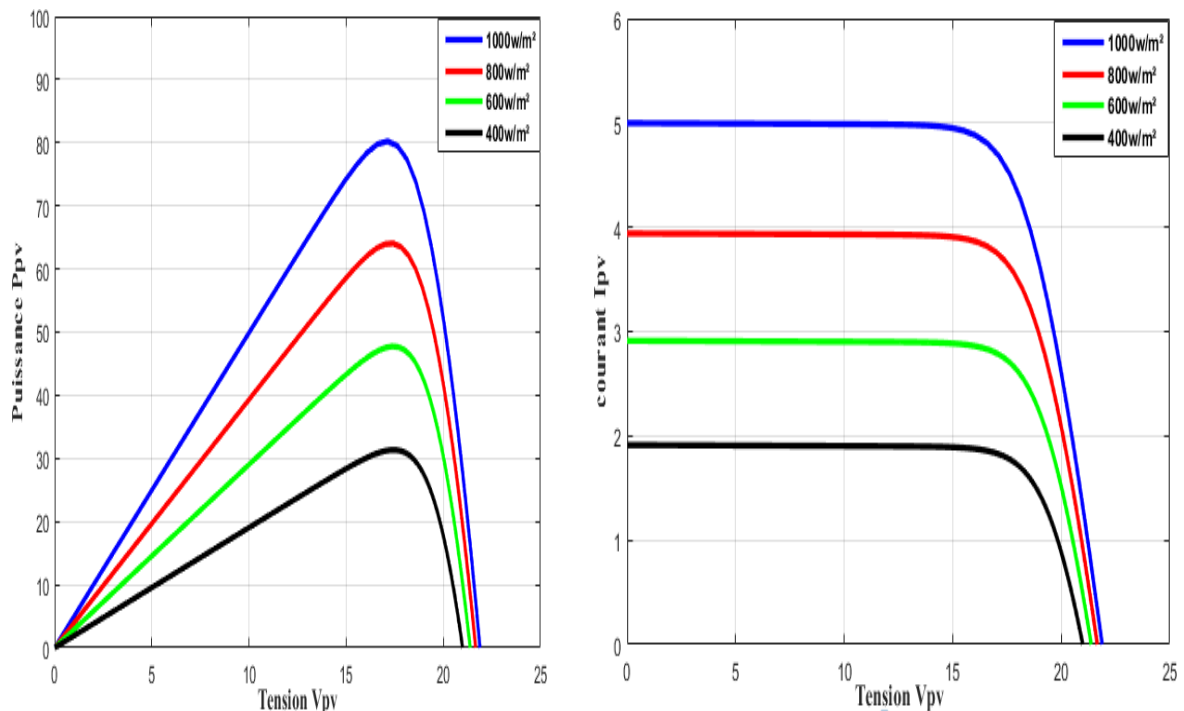
**Tableau III.2** : Fiche technique du module panneau photovoltaïque Suntech 80w

Paramètres	Symboles	Valeurs
Puissance maximale	( $P_{max}$ )	<b>80W</b>
Tension de circuit ouvert	( $V_{CO}$ )	<b>21.6V</b>
Tension de puissance maximale	( $V_{mp}$ )	<b>17.2V</b>
Courant de court-circuit	( $I_{CC}$ )	<b>5A</b>
Courant de puissance maximale	( $I_{Pm}$ )	<b>4.65A</b>

#### III.8.1 Influence de l'éclairement

La figure (III.7) montre les résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension du module photovoltaïque Suntech 80W pour plusieurs intensités de rayonnement solaire à une température constante de 25°C, montrent des tendances importantes. L'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire se traduit généralement par une augmentation du courant de sortie du module tels qu'ils sont directement proportionnels entre eux par contre la tension varie un peu, ce qui entraîne une augmentation de la puissance de sortie maximale. Le point de puissance maximale (MPP) du module se déplace au long de la courbe P-V en fonction de l'intensité du rayonnement solaire. Ces résultats soulignent

l'importance de comprendre comment la luminosité affecte les performances des panneaux solaires pour optimiser leur utilisation dans diverses conditions d'éclairage.



**Figure III.7 :** Simulation de l'influence de l'éclairage sur la puissance et le courant par rapport à la tension du PV sur Matlab

### III.8.2 Influence de la température

La figure (III.8) montre les résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension du module photovoltaïque Suntech 80W pour plusieurs variations de température à une intensité de rayonnement solaire constante de  $1000 \text{ W/m}^2$ , démontrent des tendances importantes. La diminution de la tension de sortie du module avec l'augmentation de la température est observée, conformément aux standards des panneaux solaires, tandis que le courant de sortie augmente légèrement. Cela se traduit par une diminution de la puissance de sortie maximale du module, principalement due à la réduction de la tension de sortie. Le déplacement du point de puissance maximale (MPP) vers des tensions plus basses à mesure que la température augmente est également noté. Ces résultats sont cruciaux pour les concepteurs de systèmes solaires, car ils fournissent des données essentielles pour optimiser les performances des installations photovoltaïques et prendre en compte les variations de température dans leur conception et leur fonctionnement.

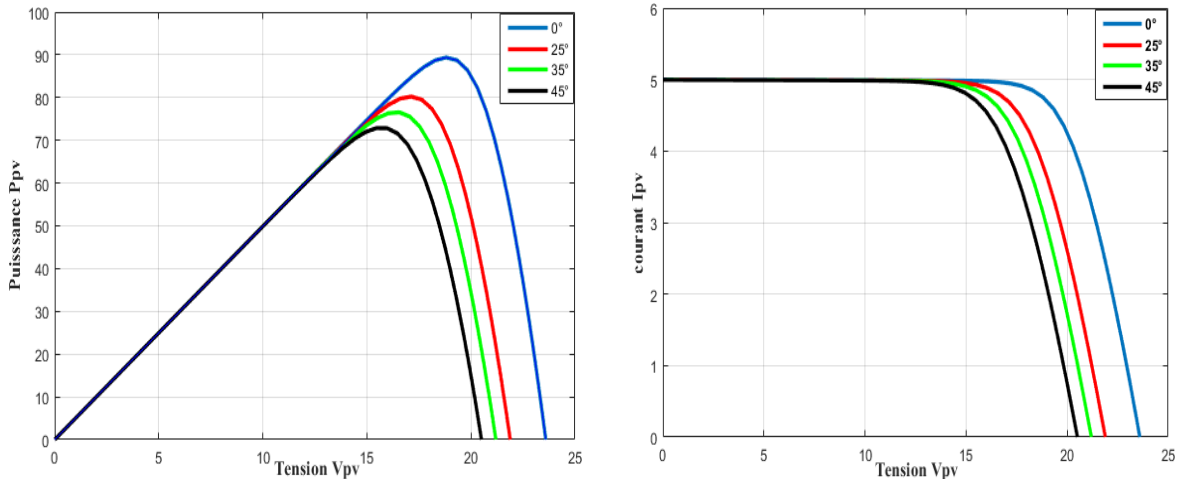


Figure III.8: Simulation de l’influence de la température sur la puissance et le courant par rapport à la tension du PV sur Matlab

### III.9 Assemblage des modules photovoltaïques

L’association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s’additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D’une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c’est l’ampérage qui augmentera [35].

Il existe trois types de l’association.

#### III.9.1 Association en série

L’association en série de  $N_s$  cellules photovoltaïques permet d’augmenter la tension du module photovoltaïque. La tension totale du module est égale à la somme des tensions élémentaires de chaque cellule, tandis que le courant reste égal à celui d’une seule cellule. La figure (III.9) montre la caractéristique résultants ( $I_{SCC}$ ,  $V_{SCO}$ ) obtenue en associant en série (indice s)  $N_s$  cellules identiques ( $I_{CC}$ ,  $V_{CO}$ ) (35).

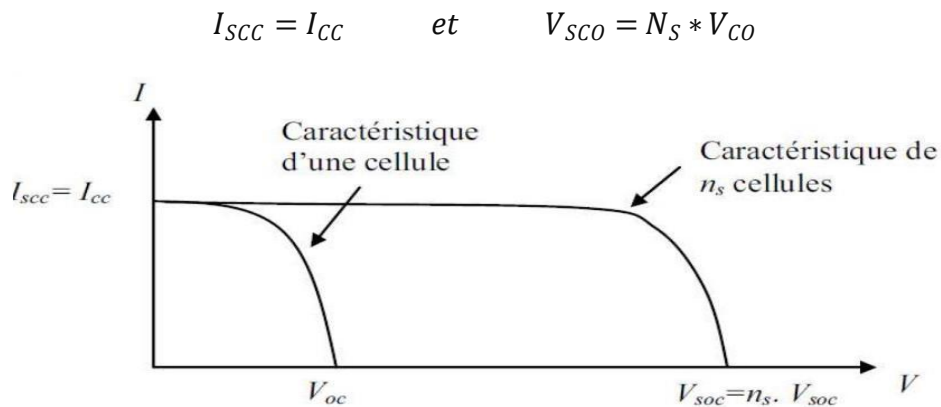


Figure III.9 : caractéristique résultant d’un groupement série de  $N_s$  cellules identiques

### III.9.2 Association en parallèle

Les propriétés des associations de cellules en parallèle sont complémentaires à celles des associations en série. Le regroupement des cellules en parallèle permet d'augmenter le courant de sortie du module, de sorte que le courant résultant est la somme des courants de chaque cellule, tandis que la tension résultante reste égale à celle de chaque cellule individuelle. La figure (III.10) illustre les caractéristiques résultantes ( $I_{PCC}, V_{PCO}$ ) obtenues en associant en parallèle (indice p)  $N_p$  cellules identiques [35].

$$I_{PCC} = N_p * I_{CC} \quad \text{et} \quad V_{PCO} = V_{CO}$$

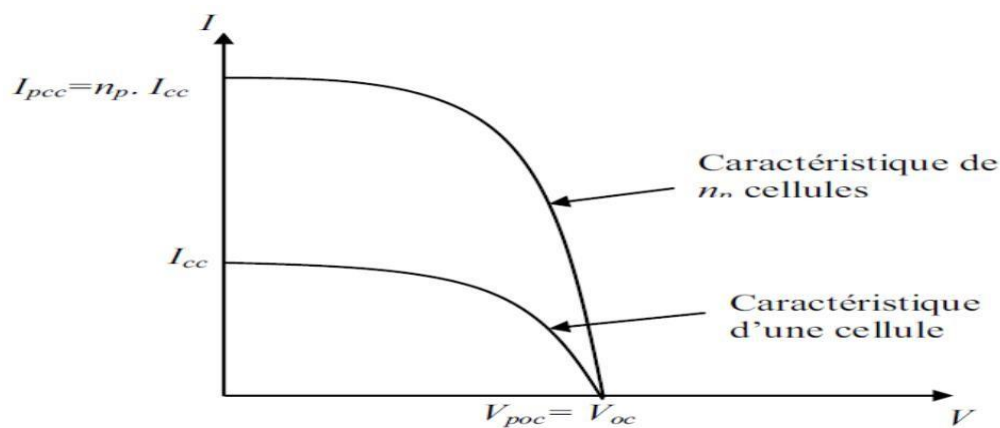


Figure III.10: caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de  $N_p$  cellules identique

### III.9.3 Association mixte des générateurs photovoltaïques

Pour atteindre une puissance significative, il est nécessaire d'associer plusieurs cellules en série et en parallèle, car une seule cellule ne suffit pas pour alimenter une charge DC de la taille d'une station de pompage. Cette interconnexion de modules définit la notion de générateur photovoltaïque (GPV). L'équation relative à un groupement mixte formé par la mise en série  $N_s$  cellules et  $N_p$  parallèle est la suivante [29].

$$I = N_p * I_{PH} - N_p * I_0 \left[ \exp \left( \frac{1}{V_T * A} \left( \frac{V}{N_s} + \frac{R_S * I}{R_P} \right) \right) - 1 \right] - \frac{N_p}{R_S} \left( \frac{V}{N_s} + \frac{R_S * I}{R_P} \right) \quad \text{III.18}$$

La figure (III.11) montre l'influence de groupement mixte sur la puissance et le courant d'un générateur photovoltaïque.

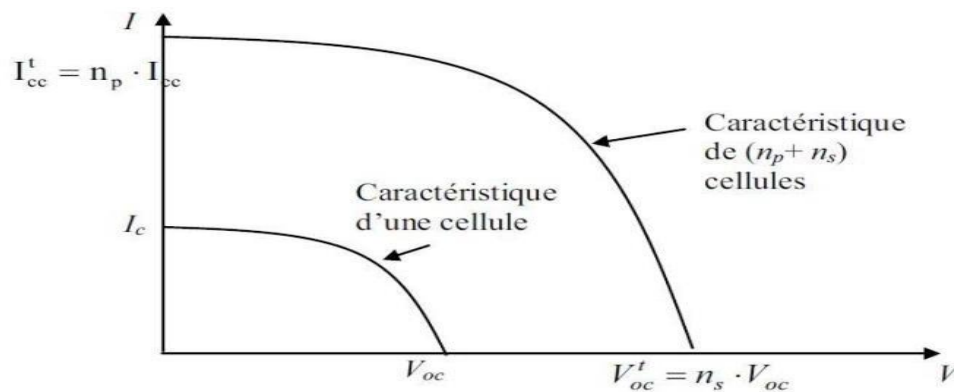


Figure III. 11: Caractéristique résultante d'un groupement mixte de cellules PV identiques.

### III.10 La commande MPPT

Cet étage d'adaptation est souvent réalisé par un convertisseur statique, ce convertisseur en tant que traqueur de point de puissance maximale, ce qu'on appelle : MPPT, il se compose d'un circuit de puissance de topologie DC/DC (hacheur) ou DC/AC (onduleur) selon la nature de la charge, menu d'un circuit de commande où il y' aura un algorithme qui permette à suivre le point de puissance maximale (PPM).

#### III.10.1 Principe de fonctionnement de la commande MPPT

Par définition, une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) associée à un étage intermédiaire DC/DC (hacheur) ou DC/AC (onduleur) d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de manière à produire en permanence sa puissance maximale, quelles que soient les conditions météorologiques (irradiation, température). Cette commande du convertisseur positionne le système au point de fonctionnement optimal ( $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT. La figure (III.12) représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT.



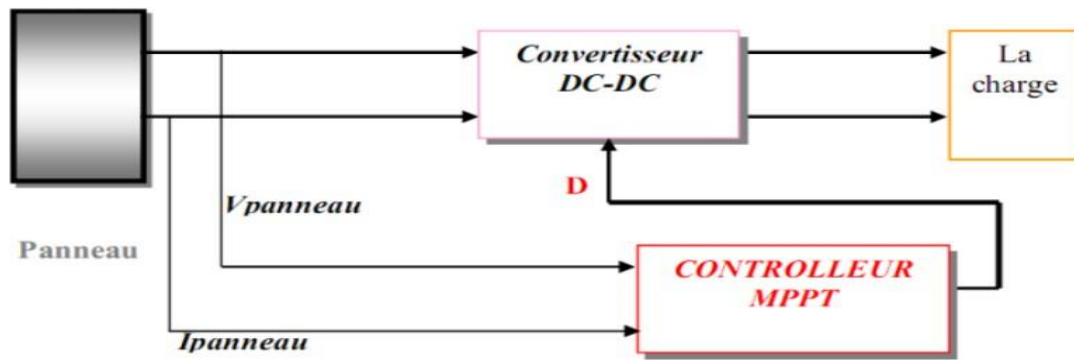


Figure III.12: chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

### III.10.2 Principe de la Recherche du PPM

Ce principe assure que le système sera toujours amené à son optimum de puissance est décrit schématiquement par les figures (III.13, III.14).

Les figures (III.13, III.14) illustre trois cas de perturbation. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

Dans le cas figure (III.13) (a), pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2.

Dans le cas figure (III.13) (b), pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimal grâce à l'action d'une commande.

Enfin dans le dernier cas figure (III.14) La variation du point de fonctionnement peut être causée par des fluctuations de la température de fonctionnement du GPV. Il est donc nécessaire d'ajuster également la commande pour maintenir une performance optimale [40].

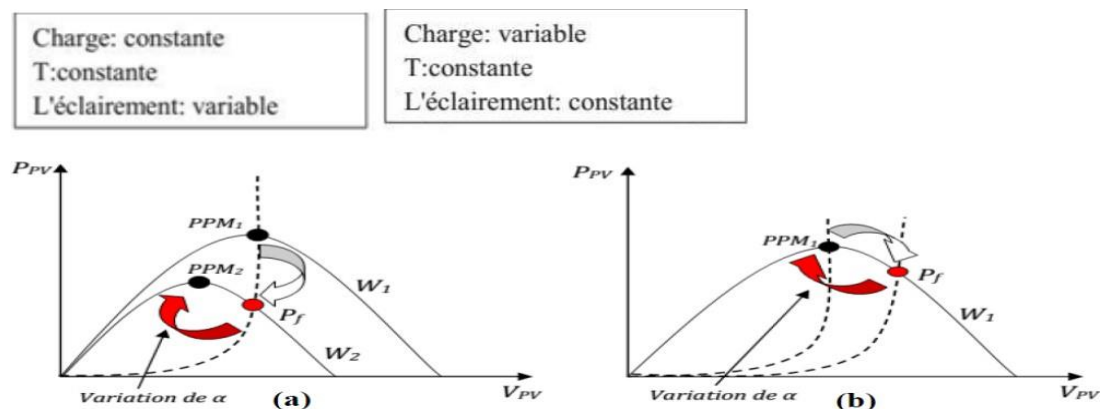
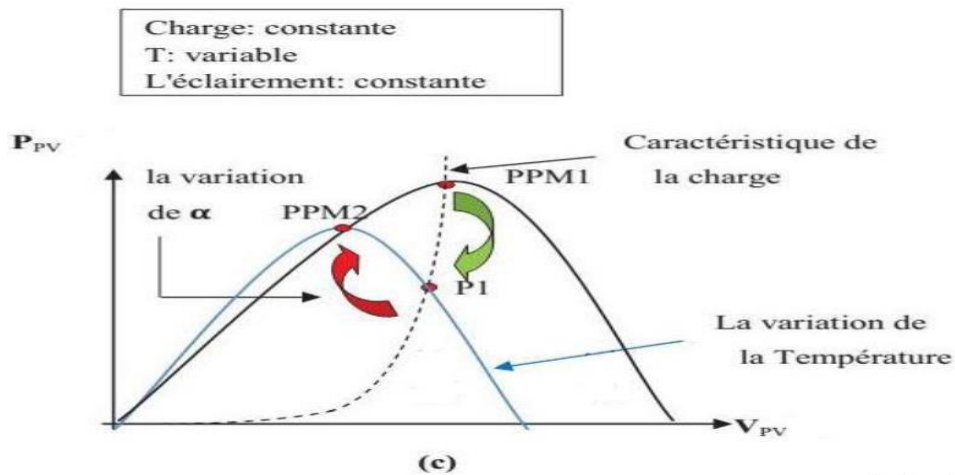


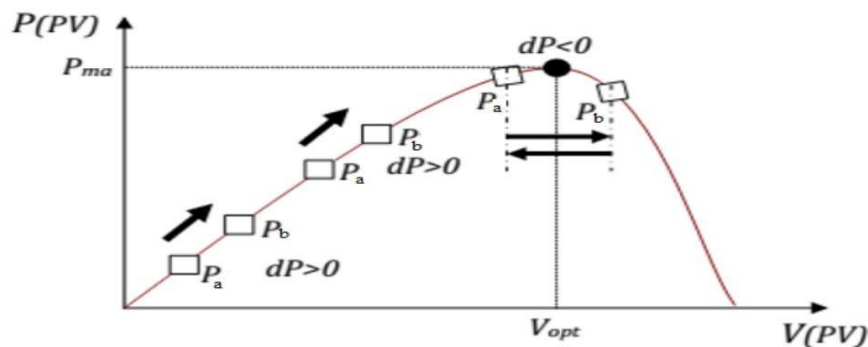
Figure III.13: Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclairement (a) et la charge R (b).



**Figure III.14 :** Fluctuation du PPM avec l'intensité de la température (c).

La comparaison des puissances  $P_a$  et  $P_b$ , mesurées respectivement aux instants (T-1) et (T), permet de rechercher le point de puissance maximale (figure III.15) en ajustant le rapport cyclique  $\alpha$ . Si la dérivée est positive ( $P_a < P_b$ ), cela signifie que nous rapprochons du point de puissance maximale en augmentant  $\alpha$ . Inversement, si la dérivée de la puissance est négative ( $P_a > P_b$ ), cela indique que nous avons dépassé le point de puissance maximale et nous devons diminuer  $\alpha$ .

Une fois  $\alpha$  modifié, on utilise sa nouvelle valeur pour effectuer une nouvelle mesure de  $I_{pv}$  et  $V_{pv}$  afin de calculer la nouvelle puissance.



**Figure III.15:** Présentation de l'organigramme amenant le système à un fonctionnement à Son PPM

**III.10.3 Techniques de commande MPPT Perturbation & Observation (P&O)**

Dans la littérature, divers types d'algorithmes sont proposés pour rechercher le point de puissance maximale (MPPT). Dans ce travail, nous utilisons la méthode Perturbation et Observation (P&O), largement adoptée aujourd'hui pour sa facilité d'implémentation. Cette méthode consiste à perturber légèrement la tension ( $V_{pv}$ ) autour de sa valeur initiale et à analyser la variation de puissance ( $P_{pv}$ ) qui en résulte. Comme illustré à la figure (III.16), si

une augmentation de la tension ( $V_{pv}$ ) entraîne une augmentation de la puissance ( $P_{pv}$ ), le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP. À l'inverse, si la puissance diminue, le point de fonctionnement se situe à droite du MPP. Un raisonnement similaire s'applique lorsque la tension diminue. En analysant les conséquences de ces variations de tension sur la caractéristique ( $P_{pv} / V_{pv}$ ), on peut facilement situer le point de fonctionnement par rapport au MPP et le faire converger vers le maximum de puissance en ajustant de manière appropriée le courant de sortie du module PV [38].

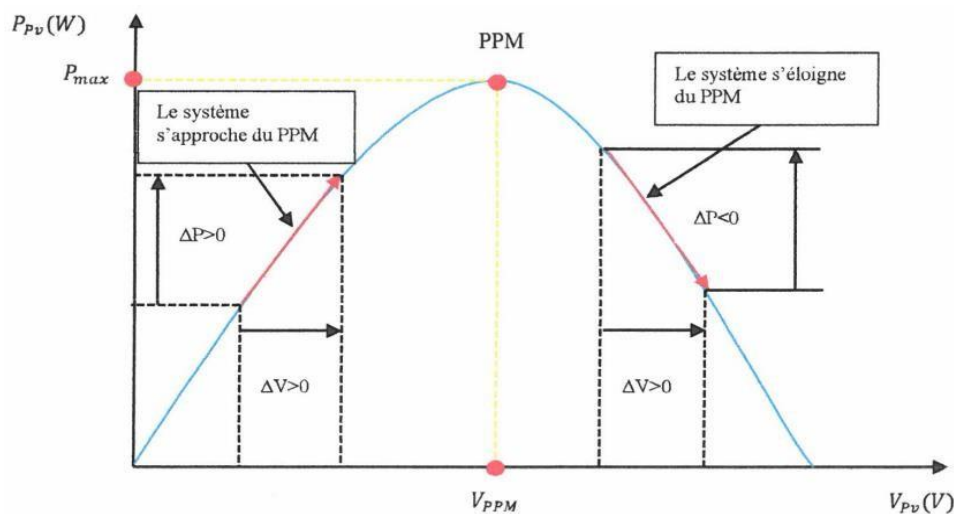
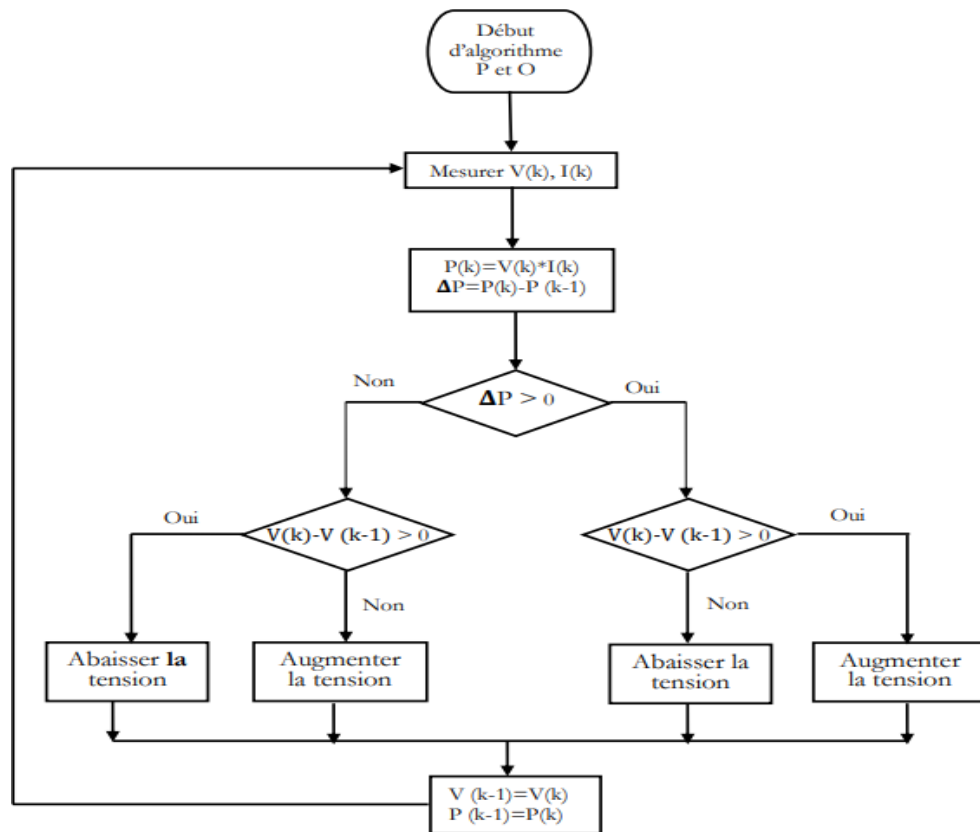


Figure III.16 : schéma du principe de la méthode P&O

### III.10.3.1 Algorithme de Perturbation et Observation

Un l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant. Comme illustre dans la figure (III.17) [38].



**Figure III.16:** organigramme de l'algorithme de perturbation et observation « P&O »

### III.10.3.2 Avantages et inconvénients de la méthode P&O

L'algorithme (P & O) poursuit le PPM est l'un des algorithmes les plus utilisés dans les commandes MPPT en raison de sa simplicité, facilité d'implémentation en numérique et son temps de réponse acceptable avec exigence moins de paramètres à mesure [31]. Cependant elle présente un inconvénient, si une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite on aura une augmentation de la puissance du panneau, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui fait qu'il s'éloigne du vrai point de puissance maximale [35].

## III.11 Adaptation du générateur photovoltaïque

La conception d'un étage d'adaptation permet aujourd'hui de relier aisément un générateur photovoltaïque (GPV) à une charge de type continue (DC), tout en assurant un rendement de conversion très élevé. Ce concept repose sur la modélisation des fonctions basiques idéalisées d'un convertisseur à découpage continu-continu (DC/DC).

### III.11.1 Connexion directe source-charge

L'installation la plus simple que l'on puisse concevoir se compose d'un champ photovoltaïque, formé d'un ou plusieurs modules connectés en série ou en parallèle, et une charge (charge résistive ou batterie) qui utilise directement l'énergie produite. Cette installation ne fournit un effet utile que pendant les périodes ensoleillées et pour des températures bien définies. Le courant fourni à la charge dépend fortement de l'intensité de l'éclairement pour une température donnée et de la nature de la charge [29].

Ce choix est principalement lié à la simplicité, la fiabilité et le faible coût de l'opération (figure III.18). La présence de la diode anti retour est indispensable pour empêcher la circulation d'un courant négatif vers le module PV. L'inconvénient de cette configuration, c'est qu'elle n'offre aucun type de réglage de fonctionnement de la tension de la charge [37].

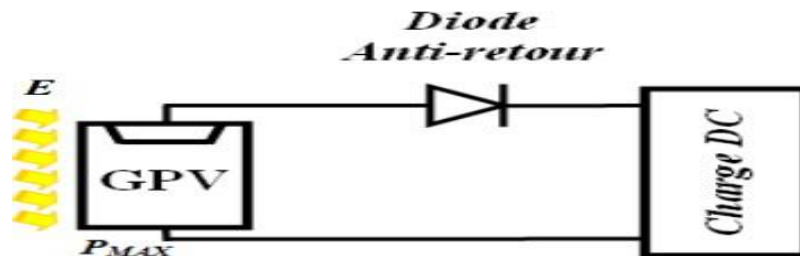


Figure III.17 : connexion directe entre un GPV et une charge.

### III.11.2 Etage d'adaptation entre une source et une charge

Afin d'extraire en permanence la puissance maximale disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, on utilise classiquement une technique consistant à insérer un étage d'adaptation entre le GPV et la charge, comme illustré à la figure (III.14). Cet étage sert d'interface entre les deux éléments et, grâce à une action de contrôle, assure le transfert optimal de puissance. Le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de  $P_{MAX}$  disponible [36].

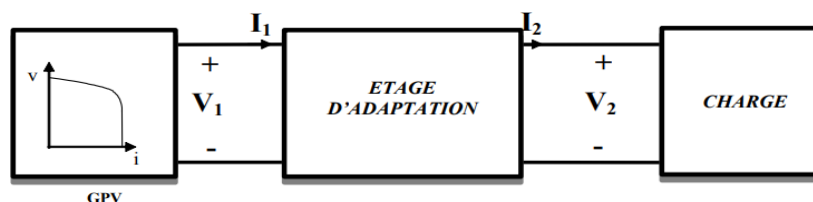


Figure III.18: Etage d'adaptation entre un GPV et une charge

### III.11.3 Convertisseur DC-DC

Pour la conversion de puissance, il est essentiel de maintenir un rendement élevé afin d'éviter la dissipation de l'énergie et les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison, toute la conversion de puissance doit se concentrer autour des composants de stockage d'énergie (inductances et condensateurs) et des commutateurs. Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de puissance à convertir ou à contrôler. Les MOSFETS (transistors à effet de champ métal-oxyde) sont généralement utilisés pour des puissances relativement basses (quelques kW), tandis que les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) sont préférés pour des puissances plus élevées. Les thyristors, quant à eux, sont généralement utilisés et acceptés pour les niveaux de puissance les plus élevés. Principe de convertisseurs élévateur « BOOST » qui utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseur est uniquement constitué d'éléments réactifs (inductances et condensateurs) qui, dans des conditions idéales, ne consomment aucune énergie. C'est pourquoi ils sont caractérisés par un rendement élevé [29].

#### ❖ Le hacheur survolteur (BOOST)

Le convertisseur Boost, également connu sous le nom d'élévateur de tension, est illustré par le schéma de la figure (III.20). Pendant la première phase ( $\alpha T$ ), l'interrupteur (S) est fermé, ce qui permet au courant dans l'inductance de croître progressivement et d'emmagasiner de l'énergie jusqu'à la fin de cette période. Ensuite, l'interrupteur (S) s'ouvre, et l'inductance (L), s'opposant à la diminution du courant ( $I_L$ ), génère une tension additionnelle. Cette tension s'ajoute à la tension de la source et s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D) [39].

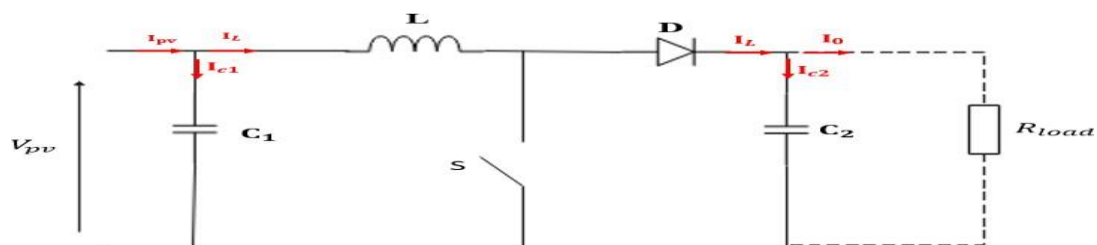


Figure III.19 : Circuit électrique de base du hacheur survolteur.

En utilisant les lois de kirchhoff, on a :

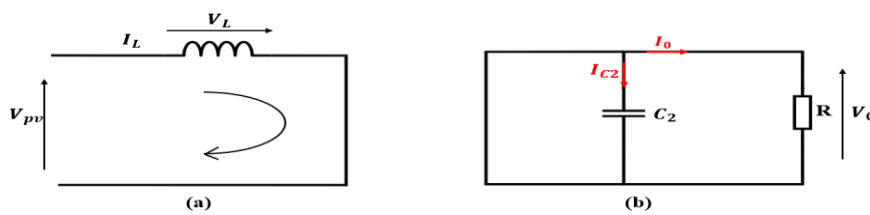
$$I_{PV} = I_L + I_{C1} \quad \text{III.19}$$

$$I_{pv} = I_L + C \frac{dv_{pv}}{dt} \quad \text{III.20}$$

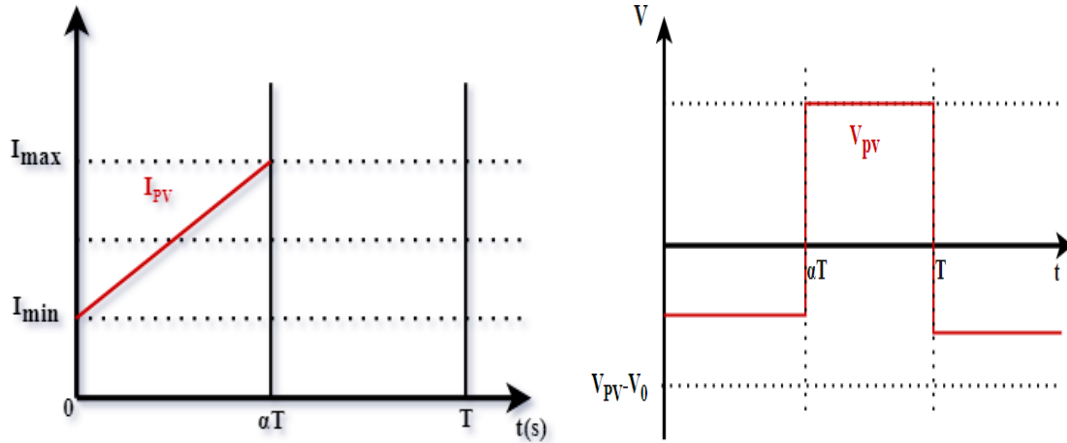
$$\frac{dv_{pv}}{dt} = \frac{1}{C_1} [I_{PV} - I_L] \quad \text{III.21}$$

L'interrupteur S peut ainsi avoir deux états (ON/OFF)

➤ **Phase I** : lorsque l'interrupteur « S » est fermé



**Figure III.20** : schéma électrique du hacheur lorsque l'interrupteur (S) fermé



**Figure III.21** : courbes d'Ondulation de courant Ipv et de tension Vpv

- Dans la maille (a), on a

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad \text{III.22}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} V_{PV} \quad \text{III.23}$$

- Dans la maille (b) on a :

$$I_0 = -C \frac{dv_0}{dt} \quad \text{III.24}$$

$$\frac{dV_0}{dt} = \frac{-1}{C_2 R} I_0 \quad \text{III.25}$$

➤ Phase II : « S » est ouvert

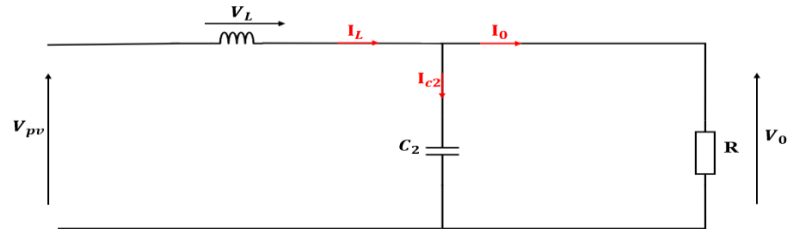


Figure III.22 : schéma électrique du hacheur lorsque l'interrupteur (S) ouvert

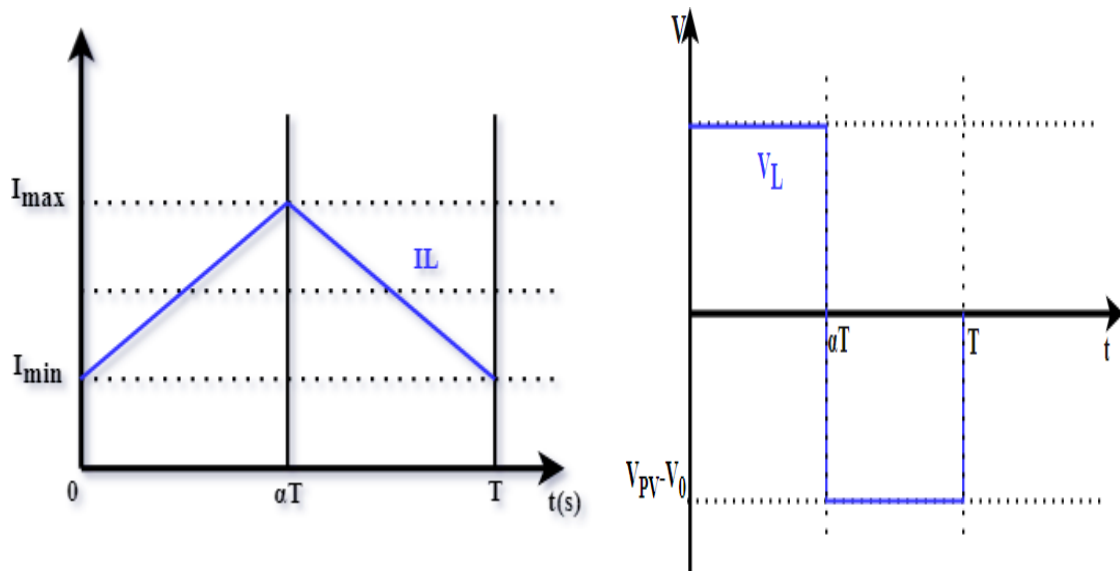


Figure III.23 : courbes d'ondulation de courant  $I_L$  et de tension  $V_L$

Les équations en tension

$$V_{PV} = V_L + V_0 \quad \text{III.26}$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_{PV} - V_0) \quad \text{III.27}$$

Les équations en courant :

$$I_L = I_{C2} + I_0 \quad \text{III.28}$$

Donc 
$$\frac{dV_0}{dt} = \frac{1}{C} (I_L - I_0) \quad \text{III.29}$$



Tableau III.1 : Des équations de courant et de tension obtenues dans les deux phases

Phase I	Phase II
$\frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} V_{PV}$	$\frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_{PV} - V_0)$
$\frac{dV_0}{dt} = \frac{-1}{C_2} I_0$	$\frac{dV_0}{dt} = \frac{1}{C_2} (I_L - I_0)$

### ❖ Modèle moyen du convertisseur boost

$$\begin{cases} \frac{dV_{PV}}{dt} = \frac{1}{C_1} [I_{PV} - I_L] \\ \frac{dV_0}{dt} = \frac{1}{C_2} [(1-D)I_{PV} - I_0] \\ \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} [V_{PV} - (1-D)V_0] \end{cases} \quad \text{III.30}$$

#### ➤ Dimensionnement du convertisseur boost

On cherche à trouver les valeurs minimales des composants passifs du boost ( $C_1$ ,  $C_2$ ,  $L$ ).

$C_1$  : la capacité d'entrée de boost

$C_2$  : la capacité de sortie de boost

$L$  : l'inductance  $L$ (H) de boost

#### • La valeur minimale de l'inductance $L$ (H)

On à 
$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \quad \text{III.31}$$

$$L = \frac{D(1-D)^2 * V_0}{I_{rip} * I_0 * f_s} \quad \text{III.32}$$

D'où on obtient :

$$L_{min} \geq \frac{D(1-D)^2}{I_{rip} * f_s} \quad \text{III.33}$$

$V_0$  : tension de sortie du convertisseur boost

$D$  : correspond au rapport cyclique

$I_{rip}$  : l'ondulation de courant de l'inducteur

$f_s$  : la fréquence de commutation

$I_0$  : courant moyen de sortie du convertisseur boost

- **Choix de la capacité de sortie du boost**

$$I_{C2} = C \frac{dV_0}{dt} \quad \text{III.34}$$

A chaque instant :

$$\begin{cases} \Delta T = DT - 0 \\ \Delta T = \delta V * V_0 \\ I_{C2} = \|I_0\| \end{cases} \quad \text{III.35}$$

$$C_2 = I_{C2} \frac{\Delta T}{\Delta V_0} \quad \text{III.36}$$

$$C_2 = \frac{I_0 * DT_s}{\delta V * R * f_s} \quad \text{III.37}$$

D'où on obtient

$$C_2 \geq \frac{D}{\delta V * R * f_s} \quad \text{III.38}$$

- **Choix de la capacité d'entrée du boost**

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} \quad \text{III.39}$$

A chaque instant

$$I_{C1} = I_{C1} \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad \text{III.40}$$

$$C_1 = \frac{I_{C1} * \Delta T}{\Delta V} \quad \text{III.41}$$

Pour assurer un partage équitable de courant on suppose :

$$I_L = \frac{1}{L} \int_0^{DT} [V_{PV} * dt] \quad \text{III.42}$$

$$I_L = \frac{1}{L} [V_{PV} * t + C] \quad \text{III.43}$$

$$I_L = \frac{1}{L} V_{PV} DT \quad \text{III.44}$$

Donc

$$C_1 = \frac{V_{PV} * D * T_s^2}{L * \delta V * V_{PV}} \quad \text{III.45}$$

$$C_1 \geq \frac{D}{8 * L * \delta V * f_s^2} \quad \text{III.46}$$

### III.12 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a approfondi quelques notions et définitions de base relatives aux systèmes photovoltaïques et particulièrement la source de production d'énergie électrique celle qui est : générateur photovoltaïque, en expliquant brièvement l'origine et le principe physique de l'effet photovoltaïque, ensuite nous avons décrit la modélisation d'une cellule PV et d'un GPV avec présentation les principales caractéristiques du GPV et ces performances.

Le principal défi de cette technique de production d'énergie est de maintenir un rendement optimal du GPV dans diverses conditions météorologiques. Pour avoir un meilleur rendement, nous avons proposé d'ajouter un étage d'adaptation avec une commande de poursuite du point de puissance maximale (MPPT). Cette solution permet d'extraire le maximum de puissance quelques soient les conditions climatiques et d'assurer une parfaite adaptation entre le GPV et la charge.

En effet, cet étage d'adaptation a été réalisé à l'aide d'un convertisseur de puissance DC/DC (hacheur). Dans ce contexte, on a étudié le convertisseur hacheur (Boost) qui permet d'avoir un bon rendement.

## CHAPITRE IV

### Association filtre-PV et résultats de simulation

## IV.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la simulation sous Matlab/Simulink, en utilisant Simpower systèmes, et à l'interprétation des résultats liées à la stratégie de commande du filtre actif. Deux techniques de commande sont étudiées : la commande par Hystérésis et la commande MLI. Afin d'évaluer l'efficacité de ces deux stratégies, la méthode du Référentiel Synchronique (SRF) sera appliquée à chacune d'elle.

La commande par Hystérésis, connue pour sa simplicité et sa rapidité de réponse, permet une régulation précise mais elle peut aussi entraîner des fréquences de commutations variables, ce qui complique le filtrage.

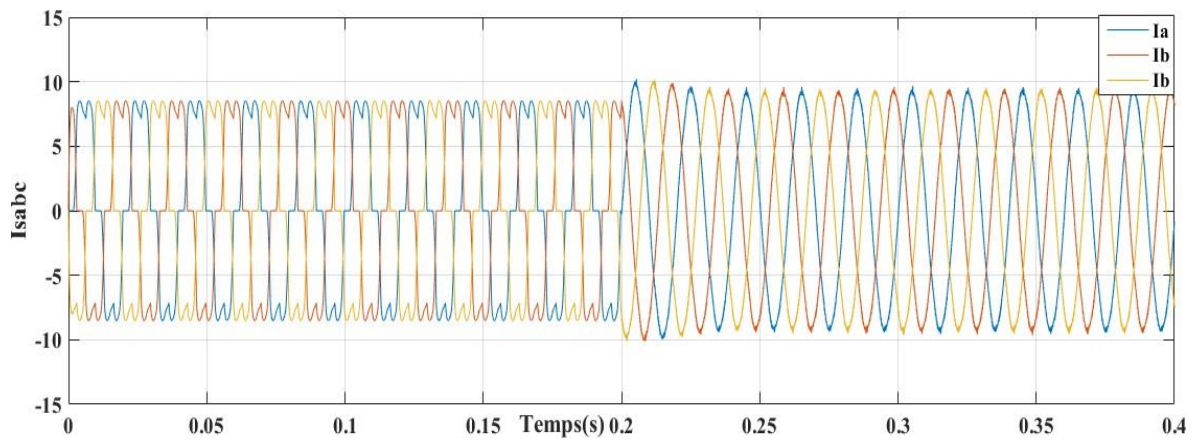
D'autre part la Modulation de Largeur d'Impulsion fonctionne à une fréquence de commutation fixe, ce qui facilite le filtrage et réduit les pertes par commutation. En intégrant la méthode SRF, nous visons à améliorer la précision de la commande et à optimiser la performance de notre filtre.

Les simulations réalisées dans ce chapitre permettent de comparer ces deux stratégies de commande en évaluant leur performance, leur stabilité et la qualité du courant filtré. Les résultats obtenus seront analysés pour déterminer la méthode la plus efficace pour le filtrage du FAP dans divers scénarios de fonctionnement.

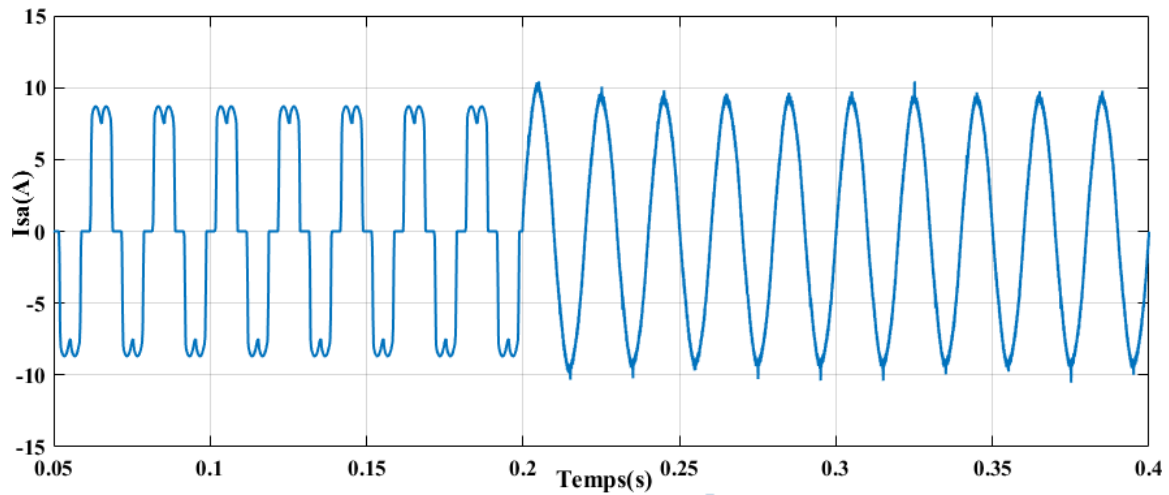
## IV.2 Filtre actif

### IV.2.1 Essaie de la commande Hystérésis avec la méthode SRF

Afin de tester notre filtre actif parallèle, on va le simuler d'abord avec la commande par Hystérésis en identifiant les courants avec la méthode SRF. Les résultats de simulation sont comme suit :

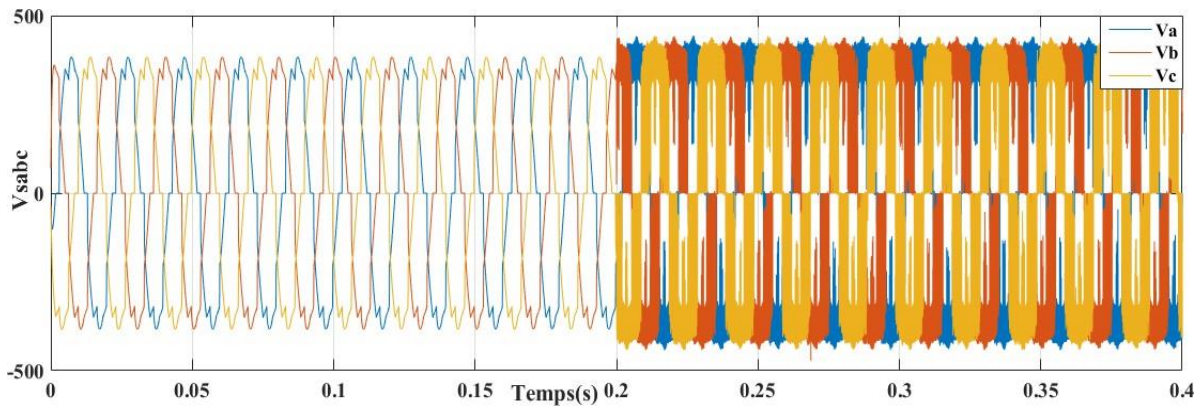


**Figure IV.1 :** Courant de source triphasé avant et après le filtrage a  $t=0.2s$ .



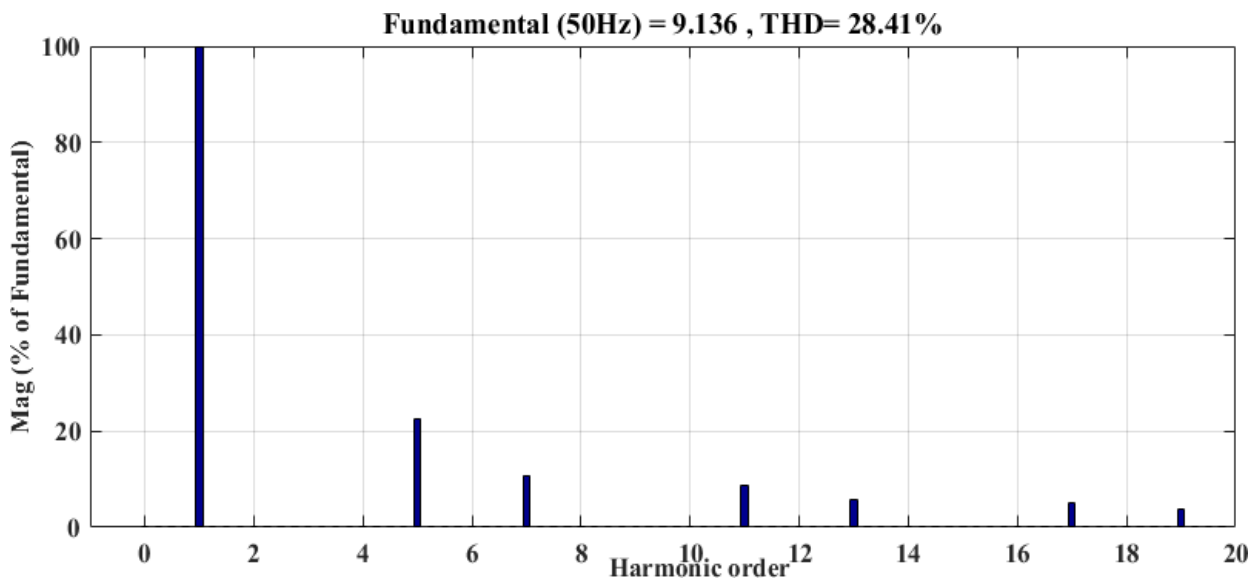
**Figure IV.2:** Courants de source pour la phase (a) avant et après le filtrage.

A  $t=0.2s$  on observe que les harmoniques du courant sont transformées, rendant la forme d'onde du courant de source beaucoup plus lisse et proche de la sinusoïde.



**Figure IV.3:** Tensions de la source triphasé avant et après le filtrage

Avant le filtrage la tension est polluée. A  $t=0.2s$ , le contenu harmonique est considérablement réduit, et la tension devient plus proche d'une sinusoïde parfaite.

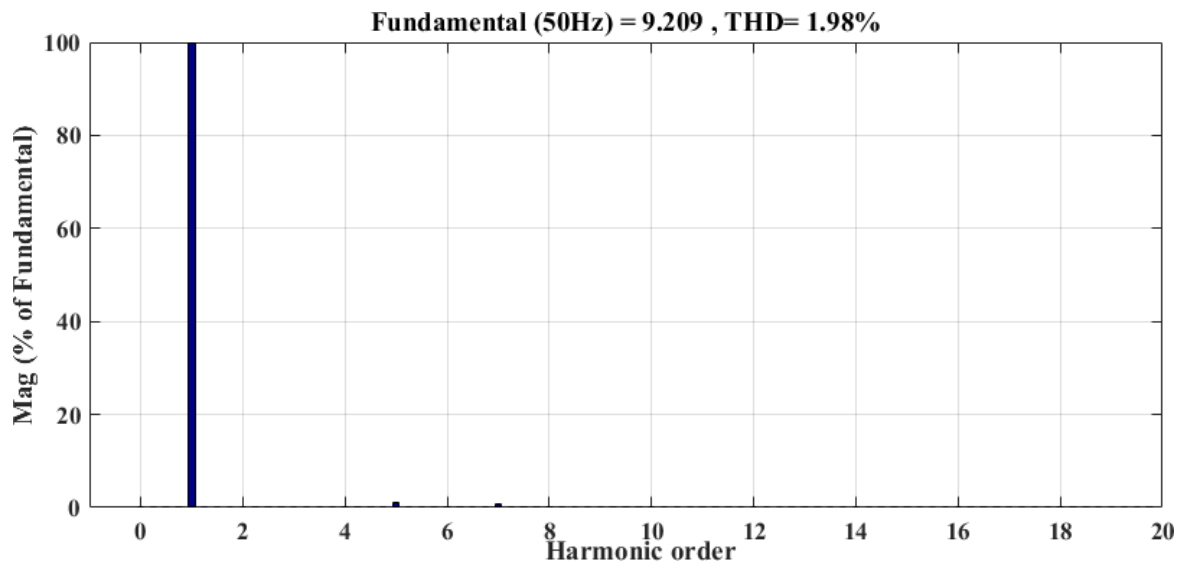


**Figure IV.4:** Spectre d'harmonique du courant de source avant le filtrage.

Cette figure représente le taux de distorsion harmonique du courant de source, qui montre un THD de 28.41% ce qui est relativement élevé et indique une présence significative de composants harmoniques. Ce qui a provoqué des déformations notables sur les formes d'ondes du courant.

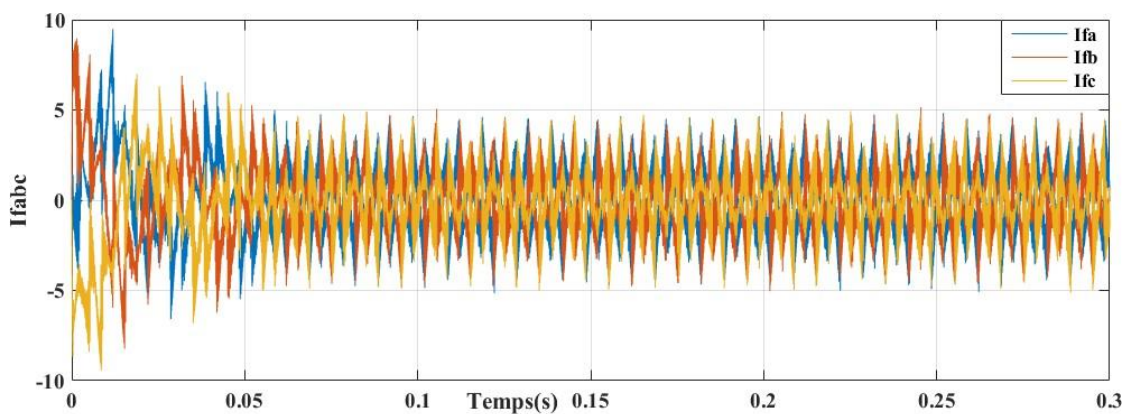
Le courant de la source est très riche en harmonique du rang impair d'ordre 5,7,11, 13,.. Et si nous comparons ce THD avec celui imposé par la norme (IEEE 519), nous constatons qu'il

est très supérieur. Donc ça nécessite d'insérer un filtre actif pour améliorer la qualité de l'énergie électrique.



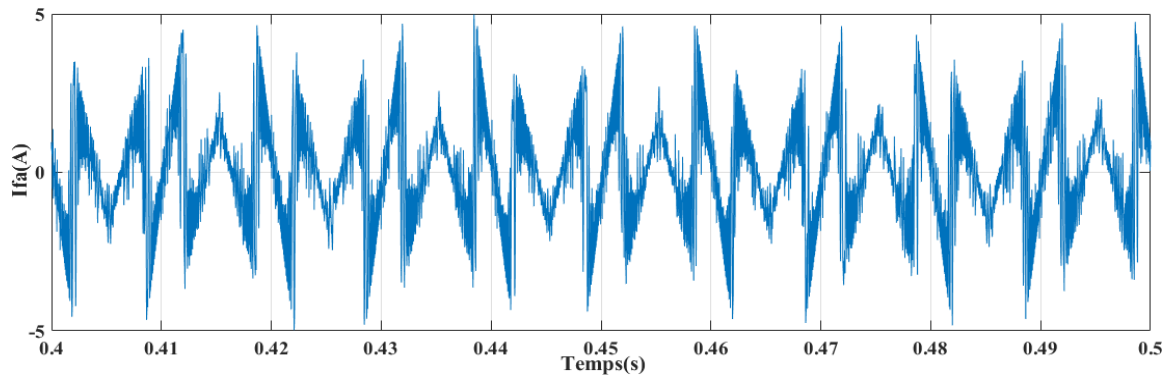
**Figure IV.5:** Spectre harmonique du courant de source après le filtrage.

Cette figure représente le spectre harmonique du courant de source, le THD est réduit de 28.41% à 1.98%, et les composantes harmoniques dans le spectre de fréquence sont considérablement atténuées. Cela démontre l'efficacité du filtre dans la réduction des distorsions harmoniques.



**FigureIV.6:** Courants injectés par le filtre

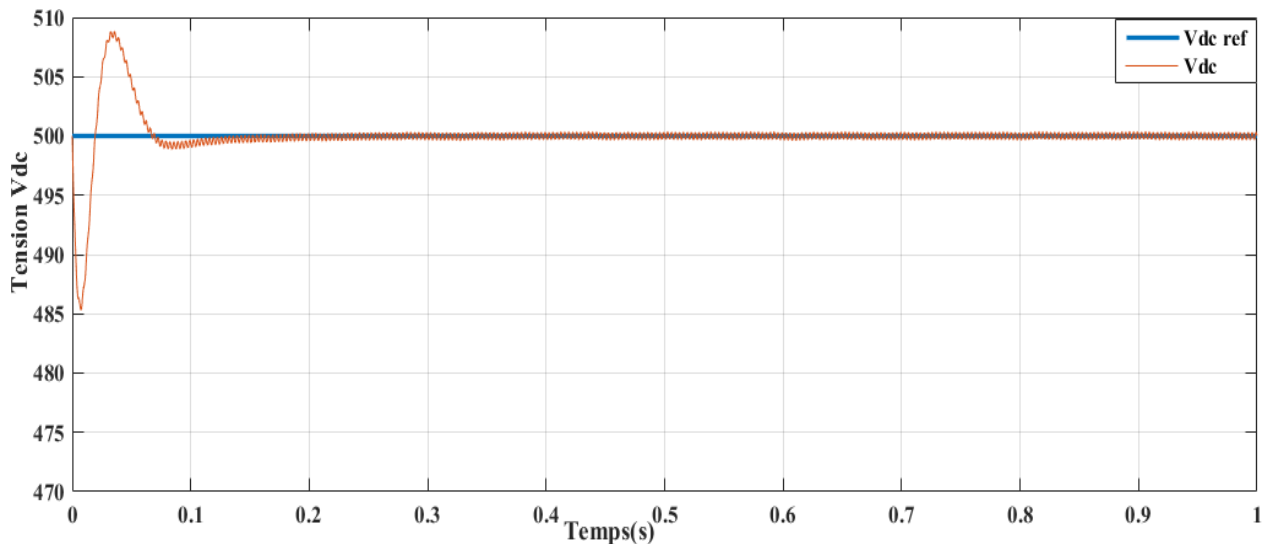




**Figure IV.7:** Courant de phase a injectés par le filtre.

Ces figures montrent les courants injectés par le filtre actif parallèle. Ils sont générés pour suivre les courants de référence et compenser les perturbations harmoniques présentes dans le système.

On remarque que ces courants suivent de manière très précise les courants de référence. Cette correspondance indique que le système de contrôle du filtre actif fonctionne correctement et que notre filtre est capable de réagir rapidement et avec précision aux variations des courants perturbateurs, assurant ainsi une compensation harmonique efficace.

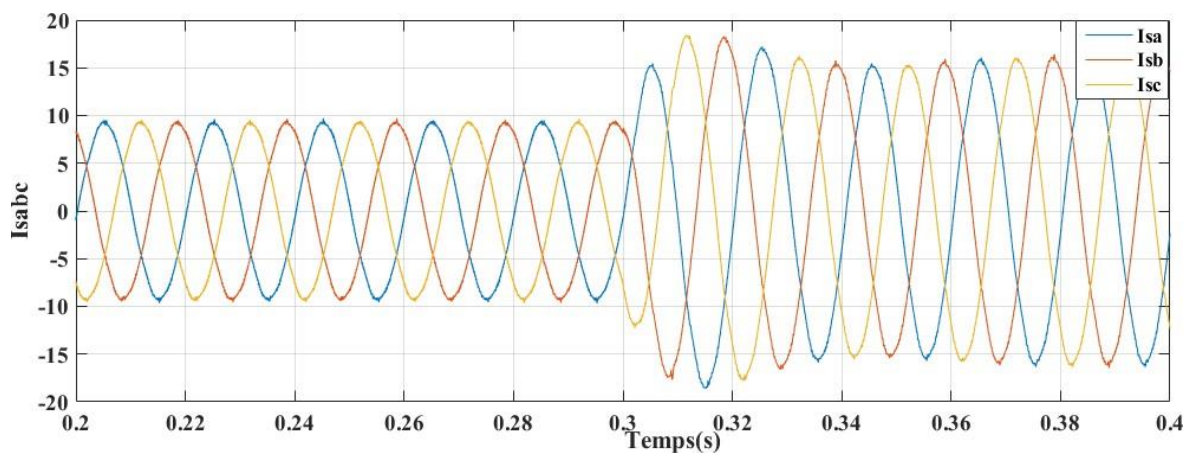


**Figure IV.8:** Tension Vdc après le filtrage.

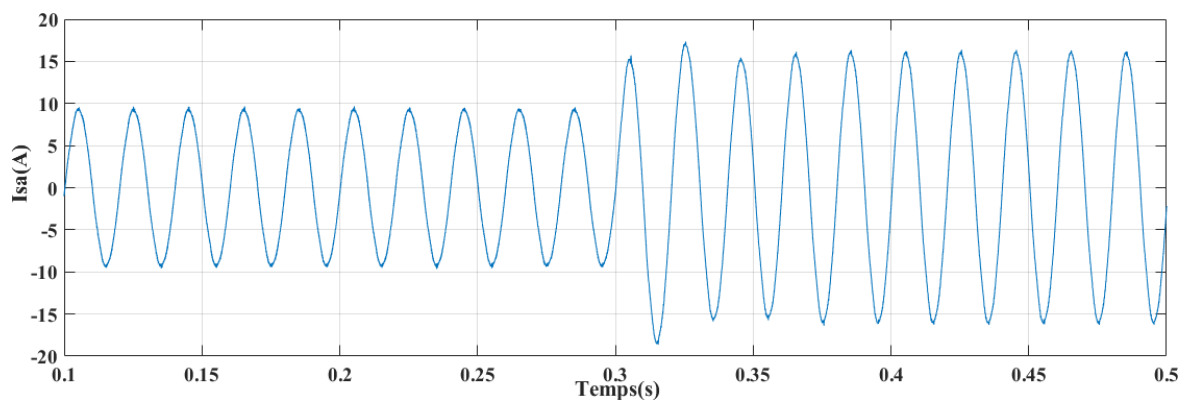
Avant le filtrage, la tension Vdc peut montrer des variations importantes, des oscillations dues à des facteurs transitoires, ces variations sont souvent dues aux perturbations harmoniques. Après le filtrage, elle se stabilise à 500V en suivant la tension Vdc de référence.

- **Essaie avec une charge variable**

Cette simulation est réalisée pour observer l'évolution des courants et des tensions de notre système, avec l'insertion d'une résistance et d'une inductance ( $R_{ch2}=60$  ;  $L_{ch2}=0.001$ ) en parallèle avec celle de la charge non linéaire.

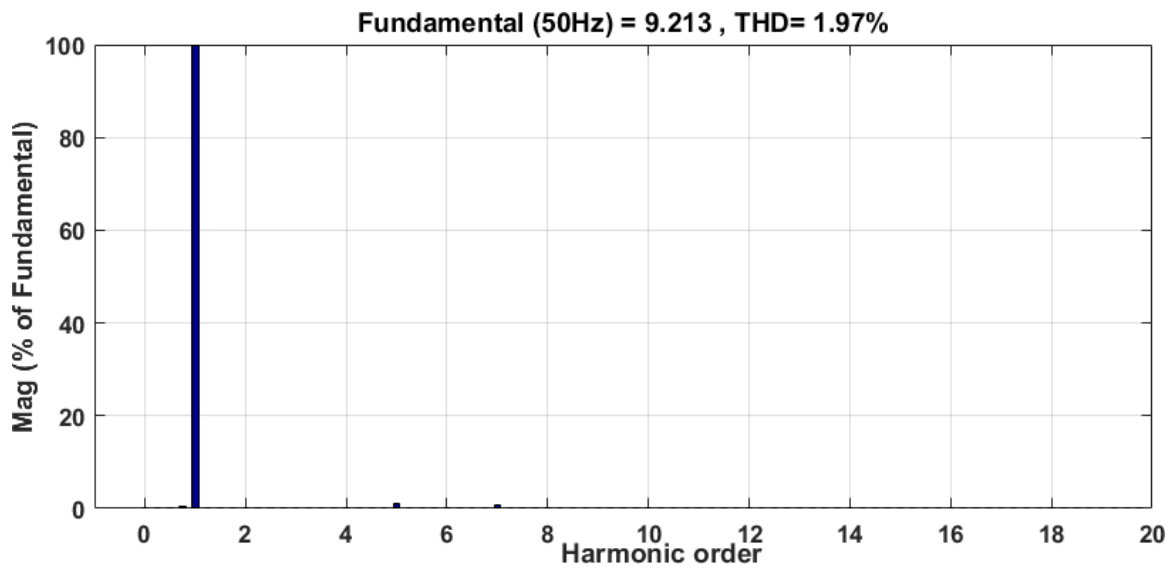


**Figure IV.9:** Courant de source triphasée avant et après l'insertion de la charge variable RL

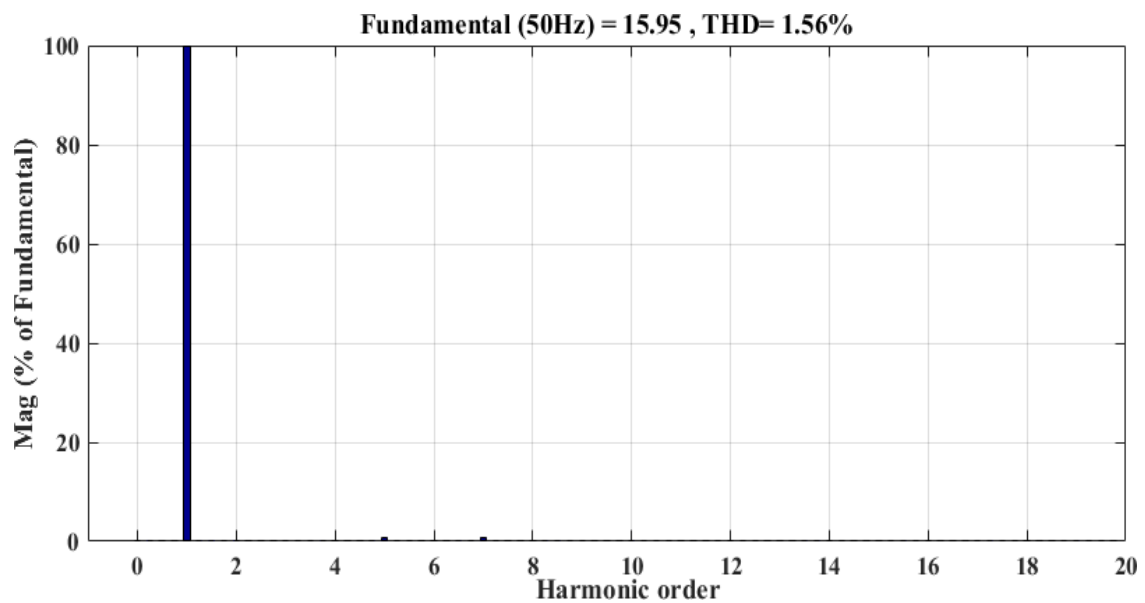


**Figure IV.10:** Courant de source de la phase(a), avant et après l'insertion de la charge variable

D'après ces deux figures on remarque une augmentation légère de la valeur du courant de la source, qui est due à l'insertion de la charge variable. Malgré ça, ces derniers gardent leurs formes d'onde qui est sinusoïdale.

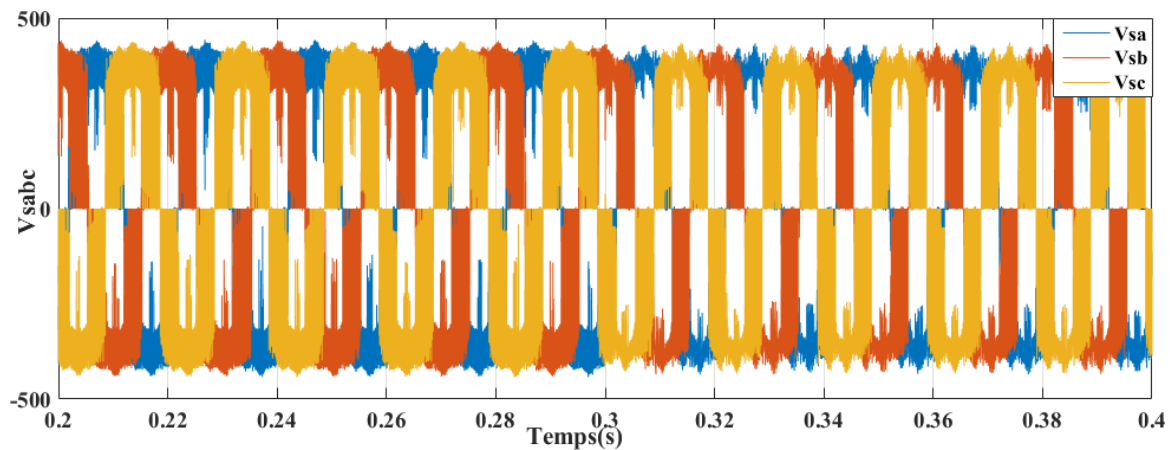


**Figure IV.11:** *Spectre harmonique du courant de source avant l'insertion de la charge variable a  $t=0.2$*



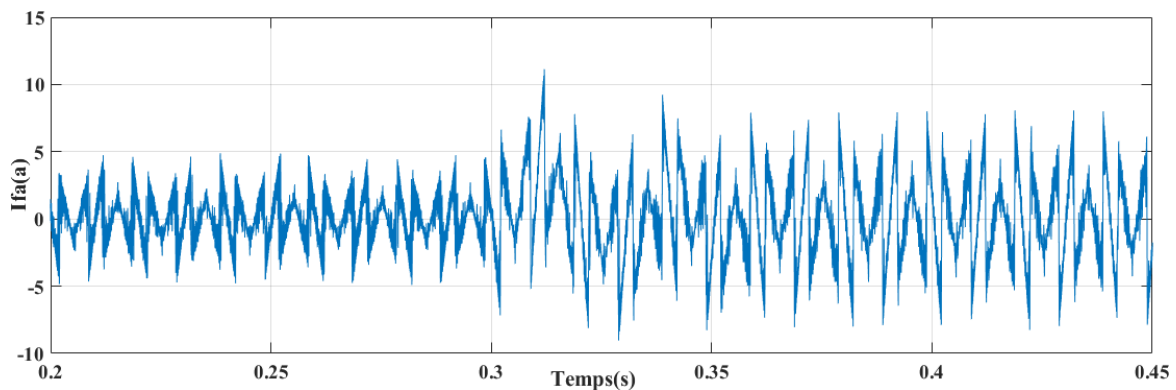
**Figure IV.12:** *Spectre harmonique du courant de source après l'insertion de la charge variable a  $t=0.4$*

La charge linéaire ajoutée a diminué le THD en augmentant le courant. Avec cette augmentation et les nouvelles conditions de la charge la réponse de notre système est améliorée.



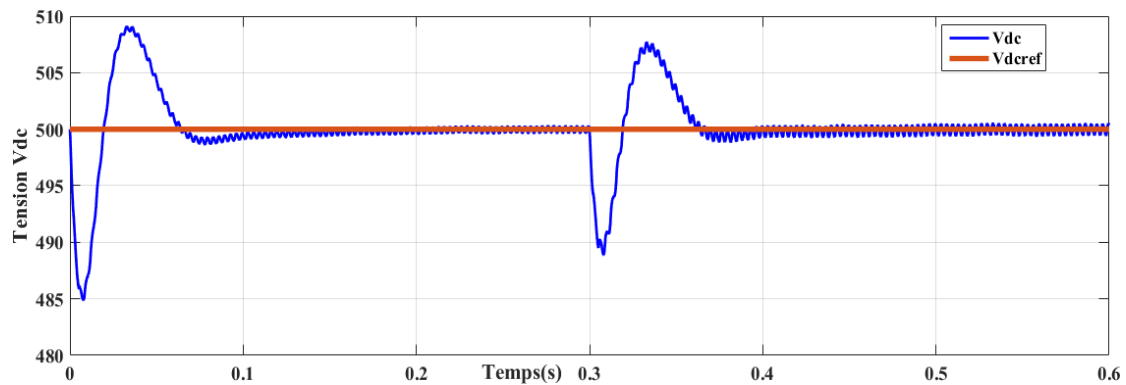
**Figure IV.13:** Tension de la source triphasée avant et après l'insertion de la charge variable

L'insertion de cette charge variable en parallèle avec la charge non linéaire a un impact positif sur la qualité des tensions. Malgré sa diminution insignifiante, les tensions sont équilibrées entre les phases.



**Figure IV.14:** Courant de phase (a) injecté par le filtre

Cette figure illustre le courant injecté par le filtre. On remarque que dès l'insertion de la charge variable il augmente légèrement et stabilise, cela montre la réponse dynamique du filtre.



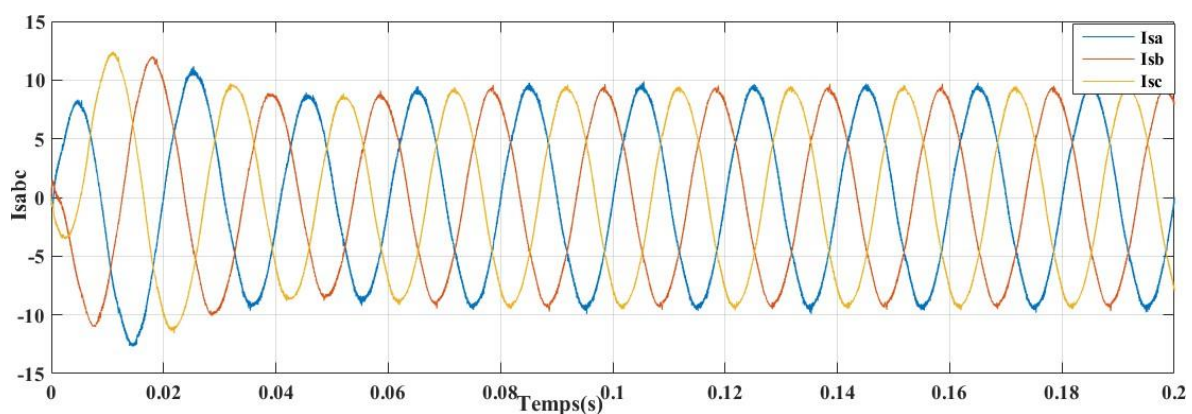
**Figure IV.15:** Tension du bus continue Vdc.

Avant l'insertion de la charge variable le système est en régime permanent. Après l'insertion, a  $t=0.4$  la charge provoque une perturbation caractérisée par une chute rapide de la tension Vdc, suivie d'une oscillation, Et puis elle se stabilise à nouveau et suit Vdc référence.

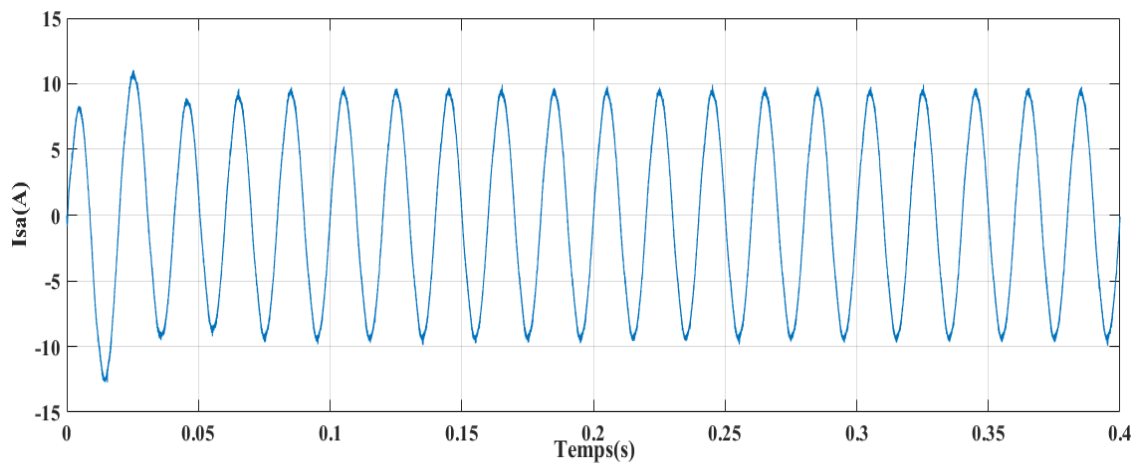
Cela indique que notre système de régulation est performant.

- **Essaie avec un filtre déséquilibré**

Dans ce cas on va essayer avec un filtre de source déséquilibré ( $R_{sa}=0.1$  ;  $L_{sa}=0.001$ ) pour analyser la stabilité de notre système.

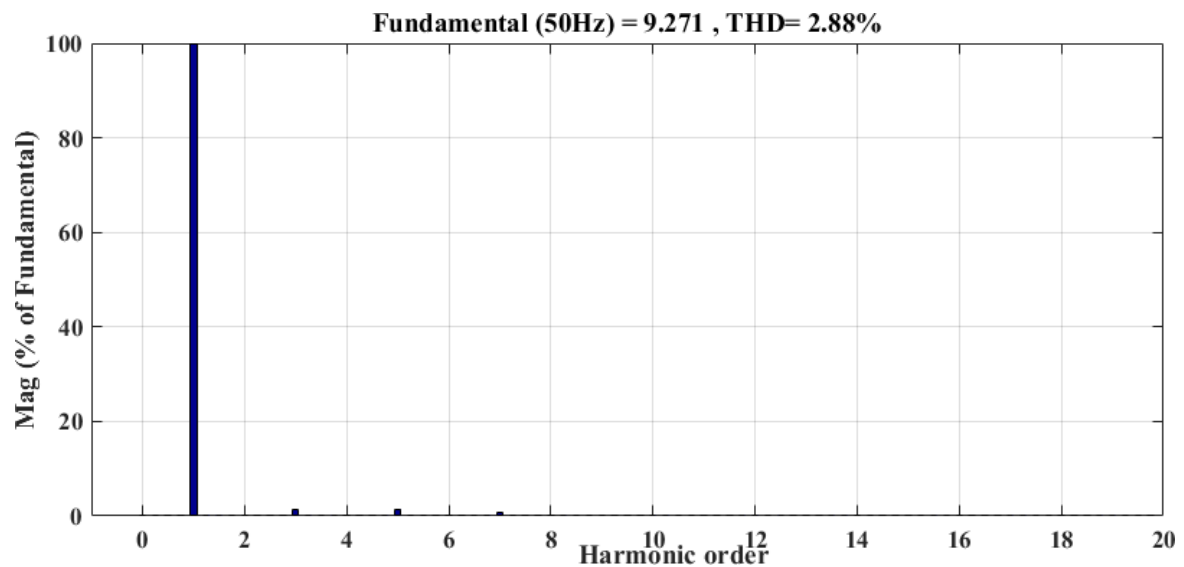


**Figure IV.16:** Courants de source triphasées.



**Figure IV.17:** Courant de source de la phase (a)

Bien que le filtre actif parallèle ne puisse pas totalement éliminer le déséquilibre initial, après  $t=0.05$  il rend le système plus stable.

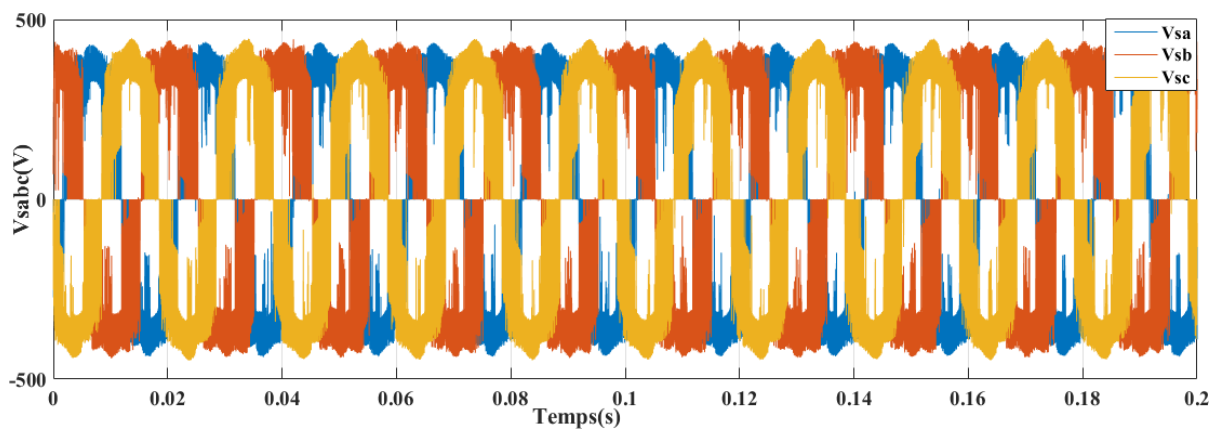


**Figure IV.18:** Spectre harmonique du courant de source.

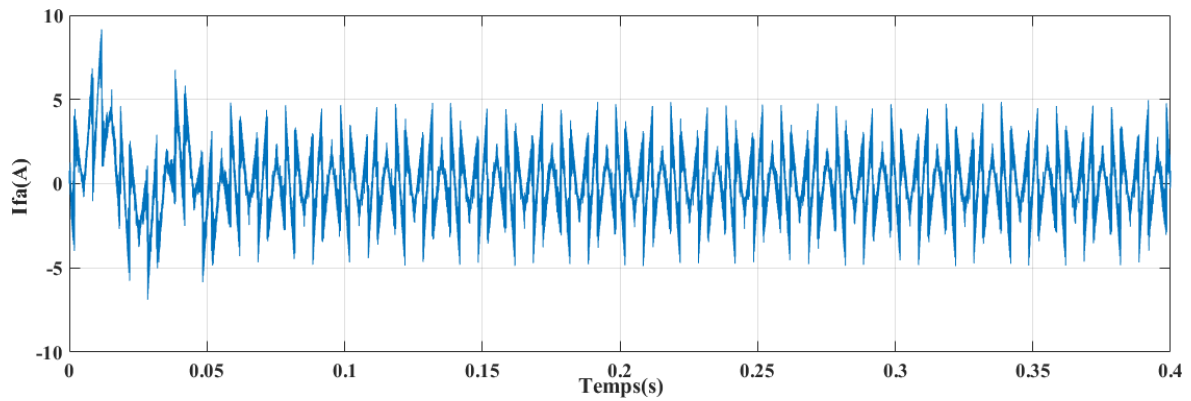
Avec un filtre déséquilibré, notre système n'a pas dépassé les normes imposées sur le THD, cela confirme l'importance de notre filtre avec la commande par hystérésis.

**Tableau IV.1** : THD des trois phases du courant (Hystérésis avec SRH)

SRF avec filtre déséquilibré	THD%
Isa	2.88
Isb	2.49
Isc	2.22

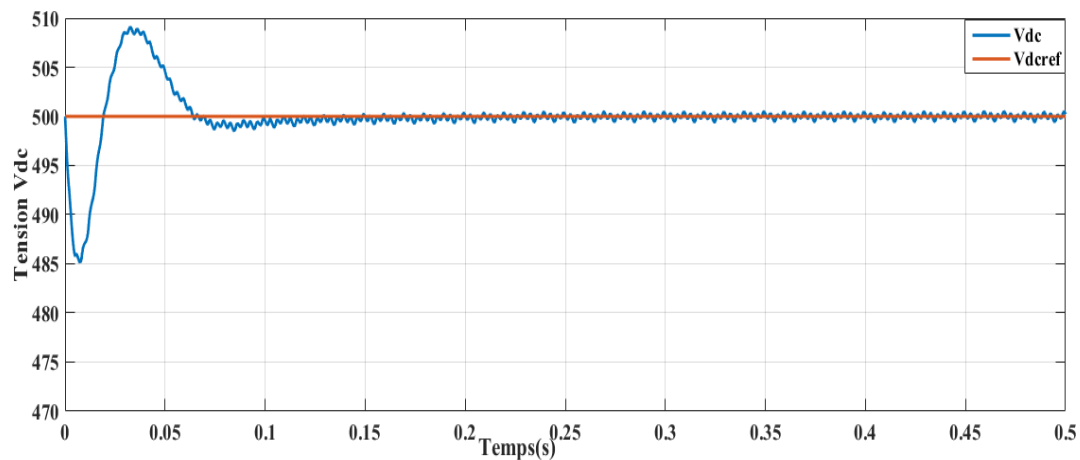
**Figure IV.19:** Tensions de source triphasée  $V_{sabc}$ 

On voit que les tensions sont stables et gardent leurs formes.



**Figure IV.20:** *courant du filtre de phase (a)*

Malgré les fluctuations importantes initiale causées par l'application du filtre déséquilibré, le filtre actif parvient à stabiliser le courant.



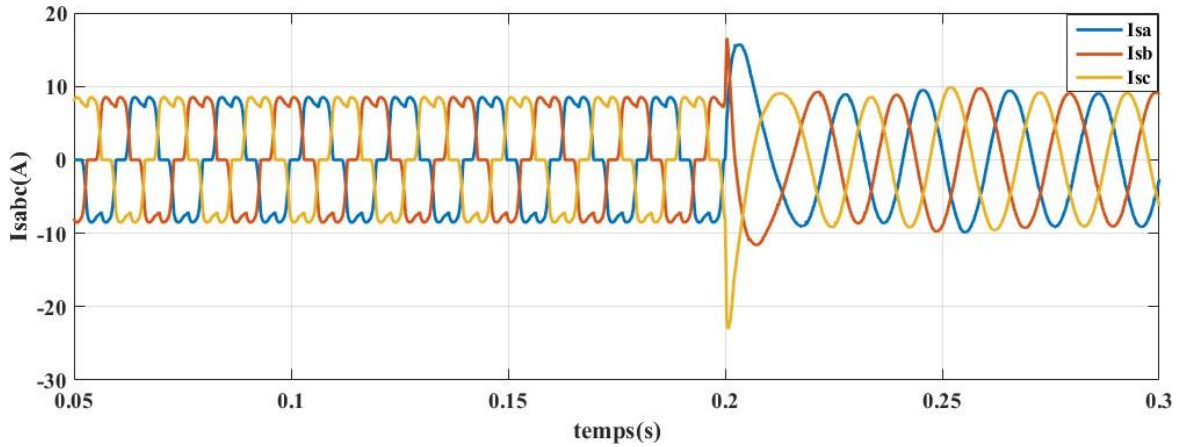
**Figure IV.21:** Tension de bus continu Vdc

Après le régime transitoire, la tension  $V_{dc}$  se stabilise autour de la tension de référence de 500 V. Les oscillations dans le régime permanent sont de faible amplitude, cela montre une bonne régulation de notre régulateur.

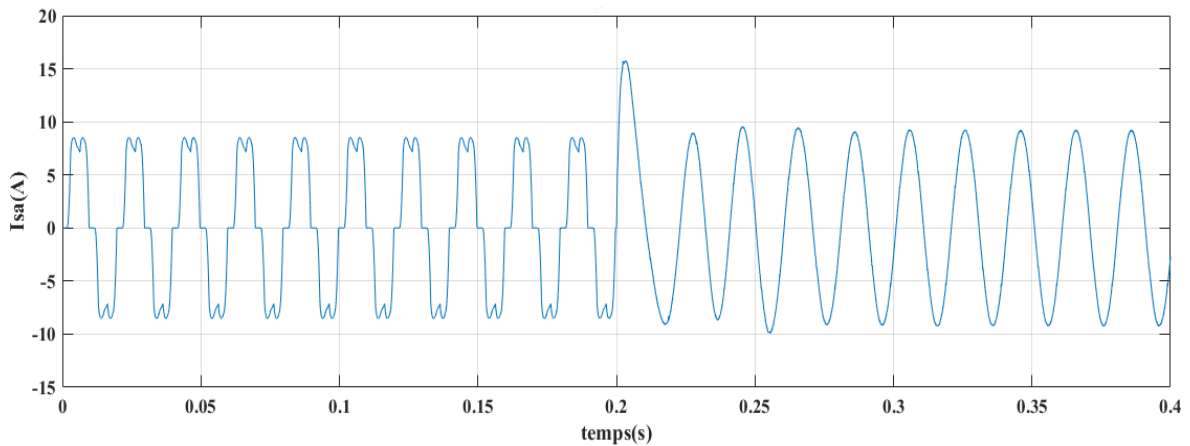


### IV.2.2 Essaie de la commande MLI avec la méthode SRF

Dans ce cas on va essayer la commande MLI avec la méthode de référentiel synchrone pour l'identification des courants d'harmoniques. On obtient ces résultats :

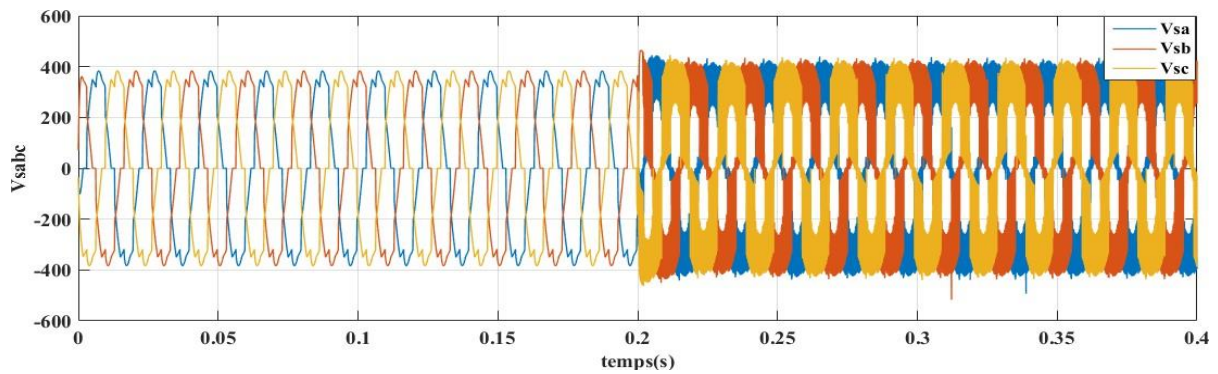


**Figure IV.22:** courant de source triphasé avant et après filtrage (à t=0.2s après filtrage)



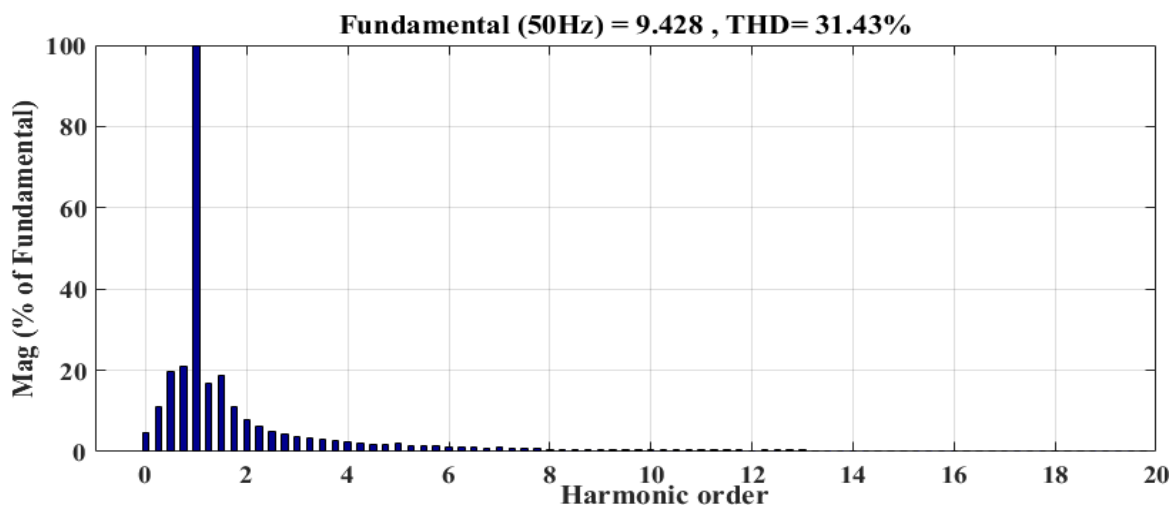
**Figure IV.23:** courant de source phase (a) avant et après filtrage (à t=0.2 après filtre)

Comme le montre les figures (23 et 24), à l'instant  $t = 0,2s$ , lors de la mise en service du FAP (connexion au système), On observe que les harmoniques du courant sont transformées, rendant la forme d'onde du courant de source beaucoup plus lisse et proche de la sinusoïde.

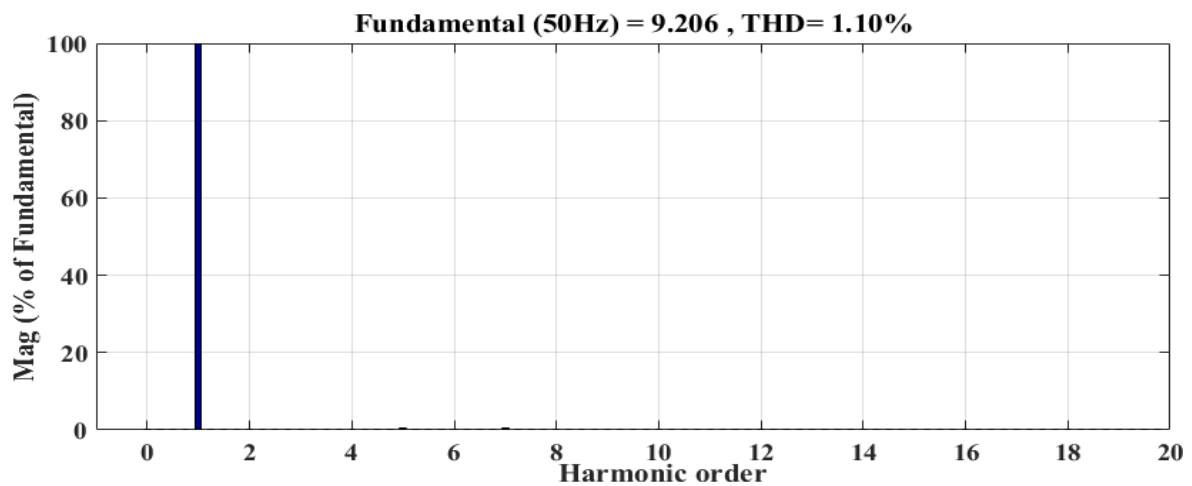


**Figure IV.24:** les tensions de source avant et après filtrage (à  $t=0.2$  après filtrage)

Nous pouvons constater que dès la mise en service de filtre actif parallèle, les tensions de source deviennent parfaitement en phase

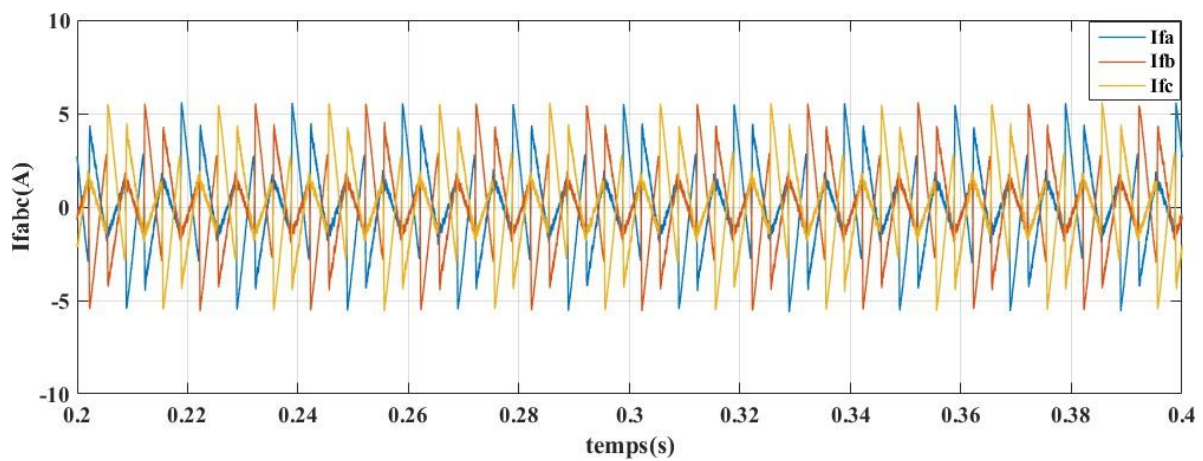


**Figure IV.25:** spectre d'harmonique du courant de source avant le filtrage

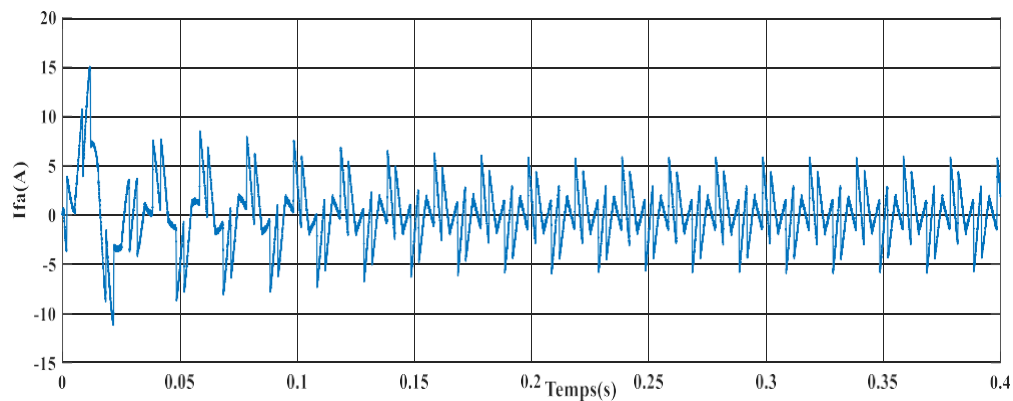


**Figure IV.26:** spectre harmonique du courant de source après le filtrage.

Les figures (IV.27) montre le spectre harmonique du courant de source avant et après filtrage. On observe que le THD est amélioré, passant de 31.43 % à 1,10 %, ce qui démontre l'efficacité du FAP.

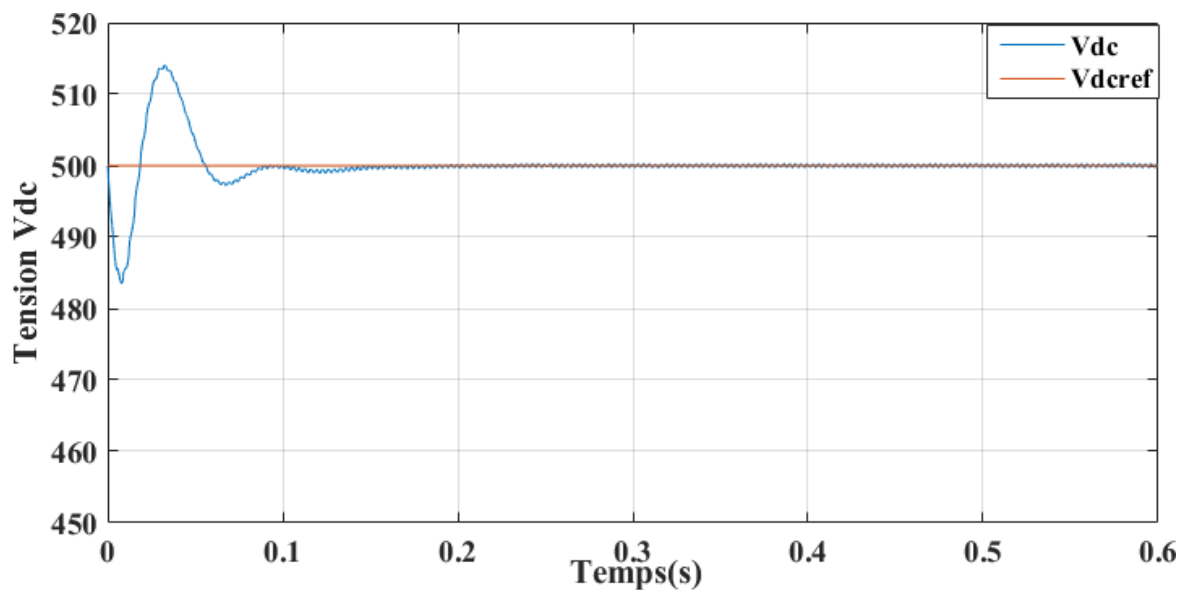


**Figure IV.27:** courant injecté par le filtre



**Figure IV.28:** courant injecté par le filtre

On remarque qu'une fois le filtre actif parallèle mis en service, il commence à injecter les courants ( $I_{fabc}$ ) dans le réseau ce qui permet au courant de source de devenir pratiquement sinusoïdale (figure  $I_{sabc}$ ) à  $t=0.2s$ , et permet de réduire considérablement le contenu harmonique du courant source.

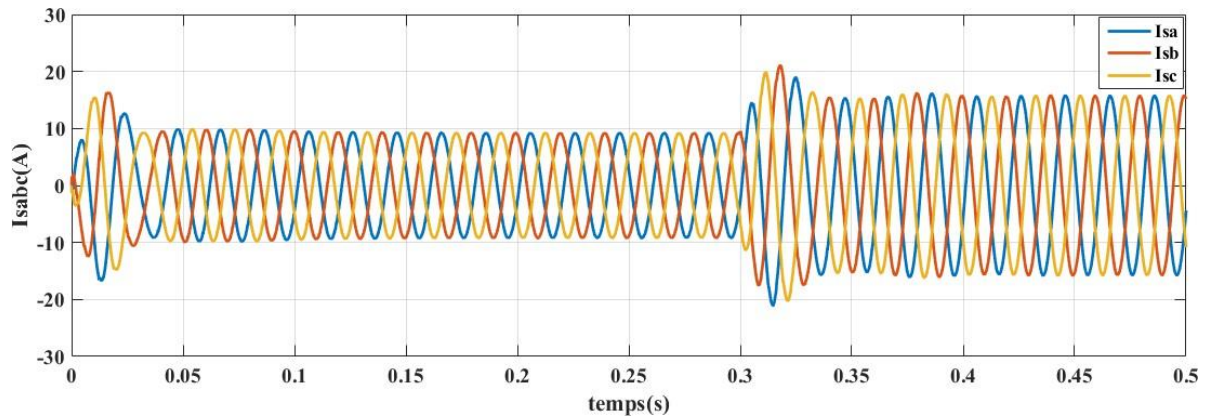


**Figure IV.29:** tension du bus continu avec tension de référence

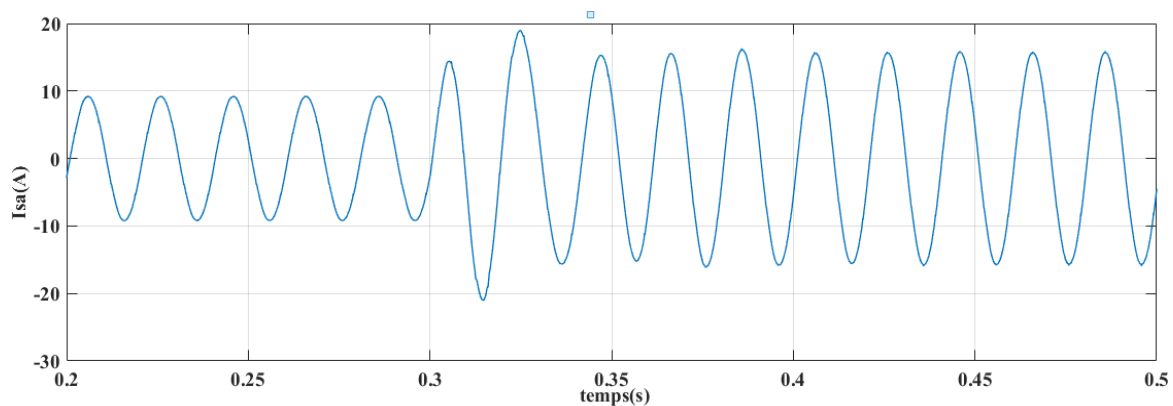
La figure (IV.30) montre que la tension aux bornes du condensateur est maintenue constante et suit parfaitement sa référence de 500 V ( $V_{dcref}$ ).

- **Essaie avec une charge variable**

On observe l'évolution des courants et des tensions de notre système, avec l'insertion d'une résistance et d'une inductance ( $R_{ch2}=0.1$  ;  $L_{ch2}=0.001$ ) en parallèle avec celle de la charge non linéaire.

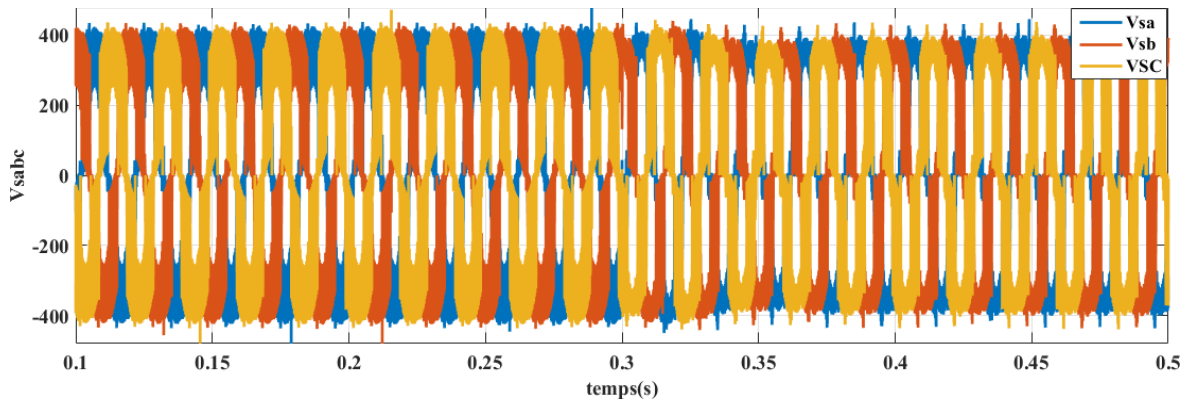


**Figure IV.30:** les courant de source triphasé sont et avec charge variable.



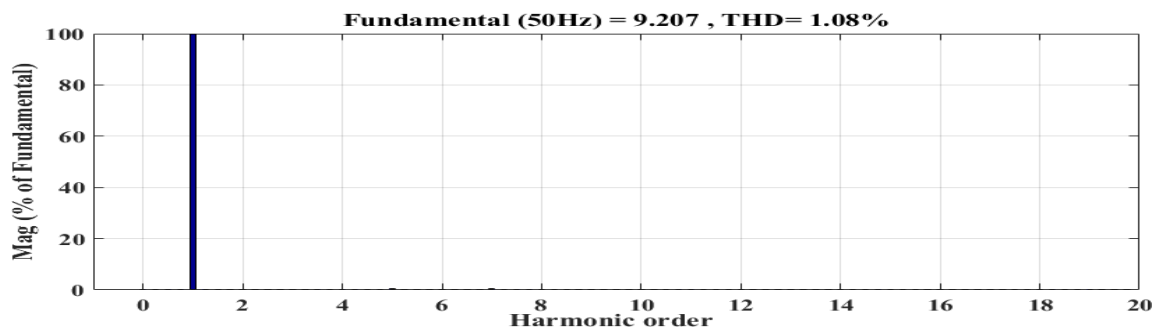
**Figure IV.31:** courant de source phase (a) sont et avec charge variable

On observe dans les figures (31 et 32) une variation significative après 0,3 s, illustrant la réponse du système à la perturbation. Juste après les courants sont symétriques et sinusoïdaux, indiquant un système équilibré et une adaptation de notre filtre malgré l'insertion de la charge variable.

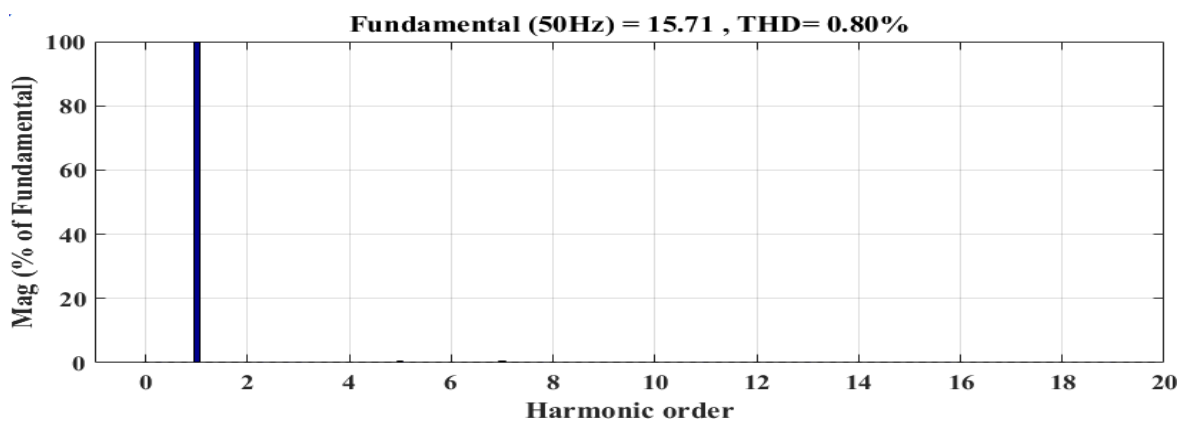


**Figure IV.32:** les tensions de source avec charge variable

On remarque que Les tensions montrent une perturbation notable autour de 0,3 s, suivie d'un retour à un état stable. Cela illustre l'impact de la variation de charge sur les tensions de source et la robustesse du système.

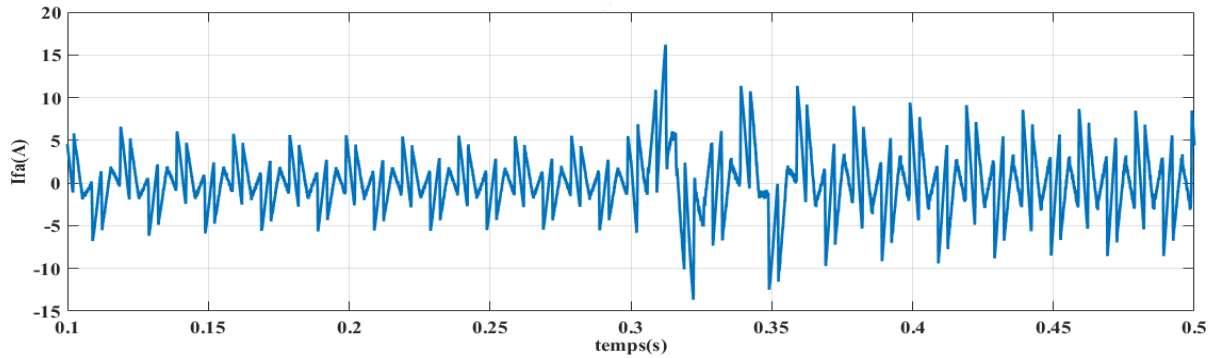


**Figure IV.33:** spectre d'harmonique du courant sont charge variable



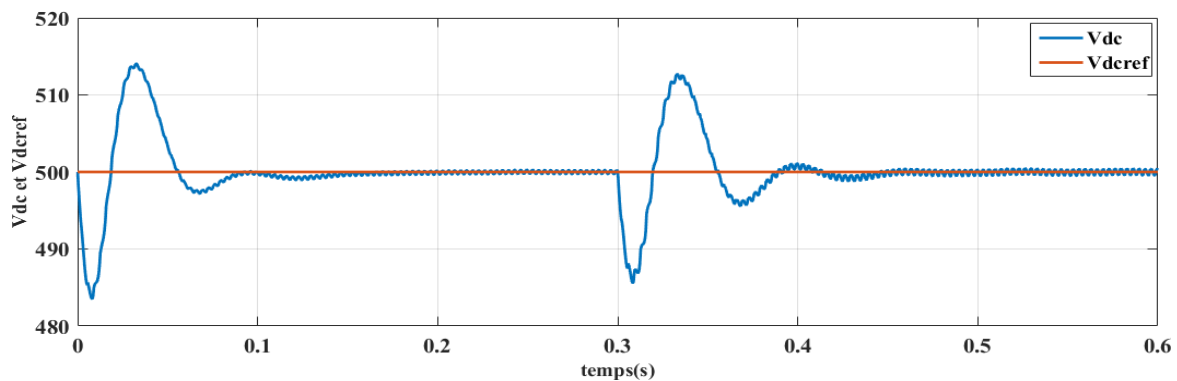
**Figure IV.34:** spectre d'harmonique du courant avec charge variable

A partir de ces deux figures (34 et 35) Spectre harmonique du courant sous charge variable. La première figure montre un fondamental de 9,207 avec un THD de 1,08 %, tandis que la deuxième montre un fondamental de 15,71 avec un THD de 0,80 %. La diminution du THD indique une amélioration de la qualité du courant malgré les variations de charge.



**Figure IV.35:** courant du filtre de phase (a) injecté par le filtre avec charge variable

On remarque que le courant du filtre de phase (a) subit une augmentation à l'instant de variation de la charge avec la conservation de leurs formes initiales

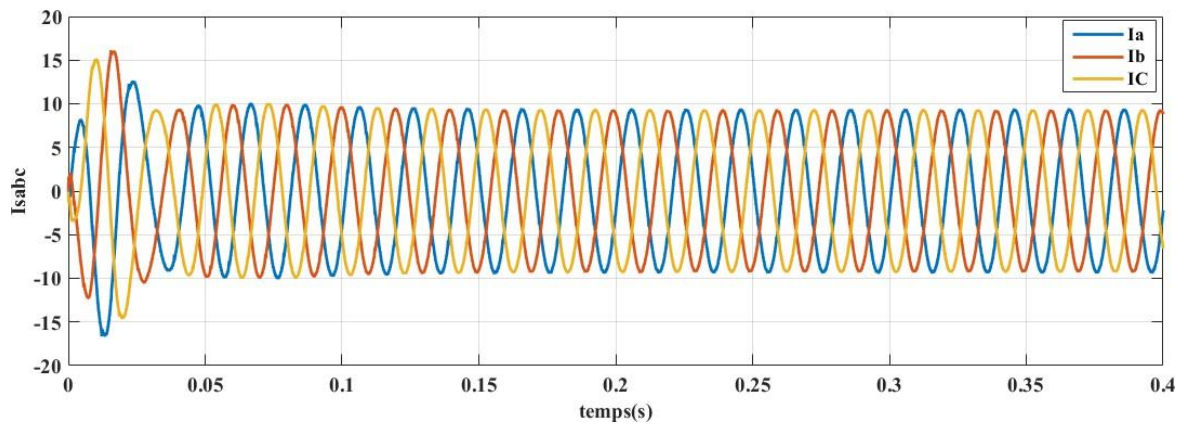


**Figure IV.36:** tension du bus continu avec charge variable

On remarque que la tension  $V_{dc}$  aux bornes du condensateur, elle suit parfaitement sa valeur de référence avant et après la variation de la charge

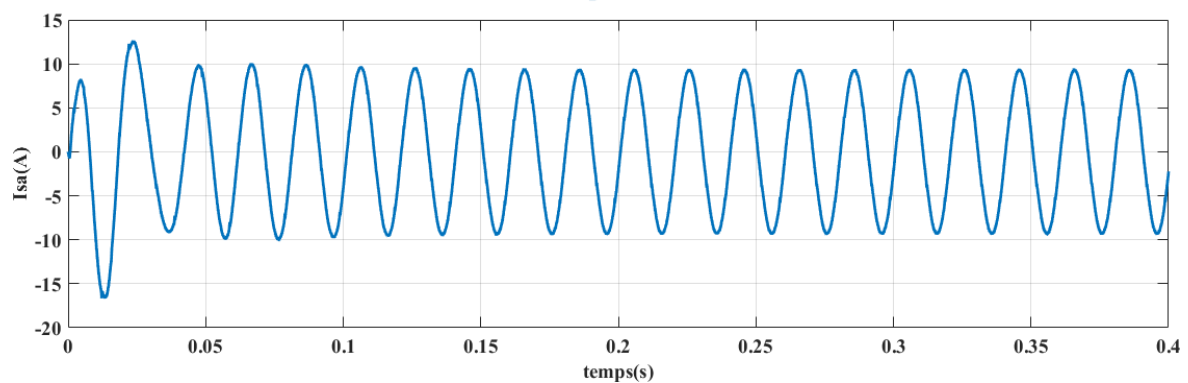
- **Essaie avec filtre de source déséquilibré**

On essaye avec un filtre de source déséquilibré ( $R_s=0.1$  ;  $L_s=0.001$ ) aussi pour analyser la stabilité de notre système.



**Figure IV.37:** les courant de source triphasé sont et avec filtre de source déséquilibré

Cette figure montre les courants triphasés avant et après l'application du filtre de source déséquilibré. Les courants initiaux présentent un déséquilibre significatif, tandis qu'après le filtrage, les oscillations sont réduites et les courants deviennent plus équilibrés.

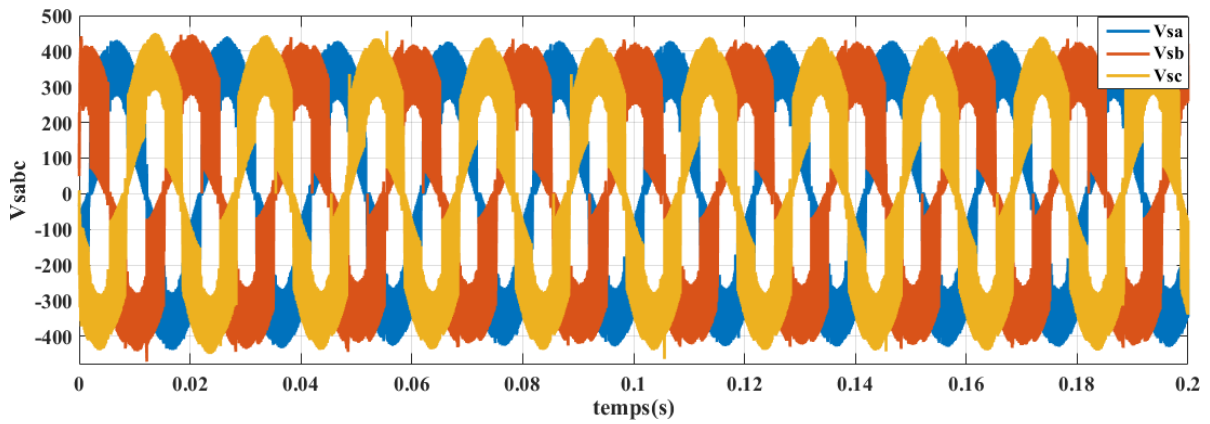


**Figure IV.38:** Courant de source phase (a) sont et avec filtre de source déséquilibré

On observe que le courant déséquilibré initial est stabilisé après l'application du filtre, réduisant les oscillations et améliorant la régularité du signal.

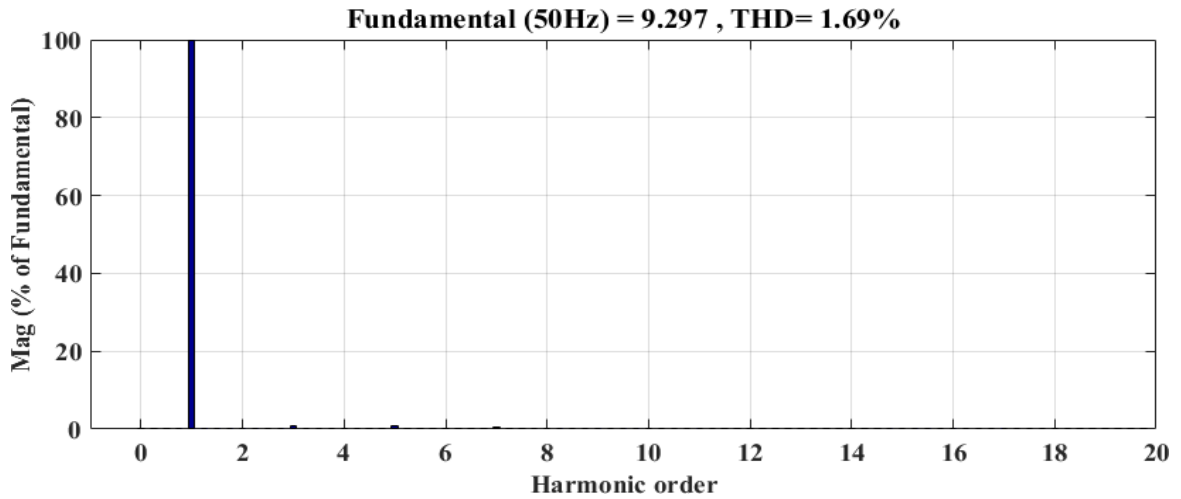
Ces résultats démontrent l'efficacité du filtre dans la réduction des déséquilibres et la stabilisation des courants dans un système triphasé.





**Figure IV.39 :** les tensions de source avec filtre de source déséquilibré

On observe que les tensions sont équilibrées malgré le filtre de source est déséquilibré.

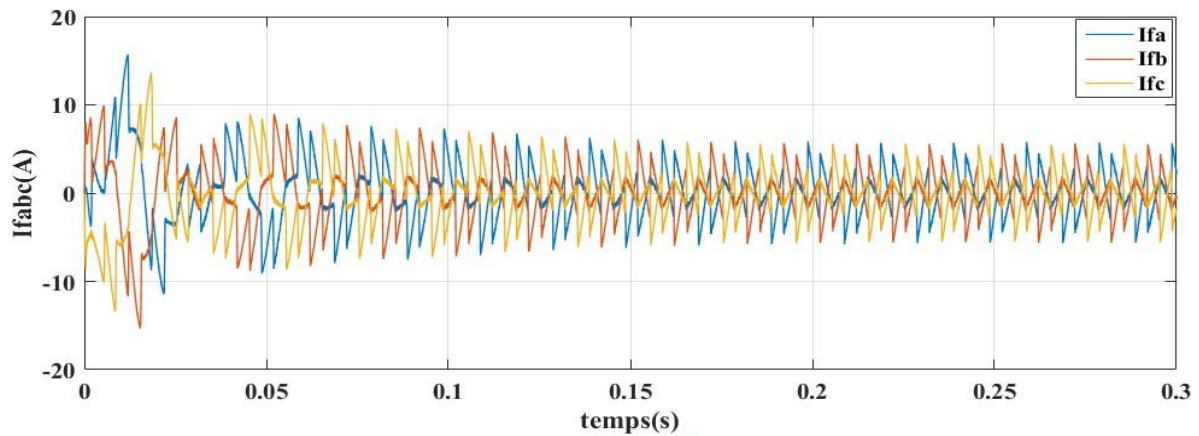


**Figure IV.40:** Spectre d’harmonique du courant avec filtre de source déséquilibré

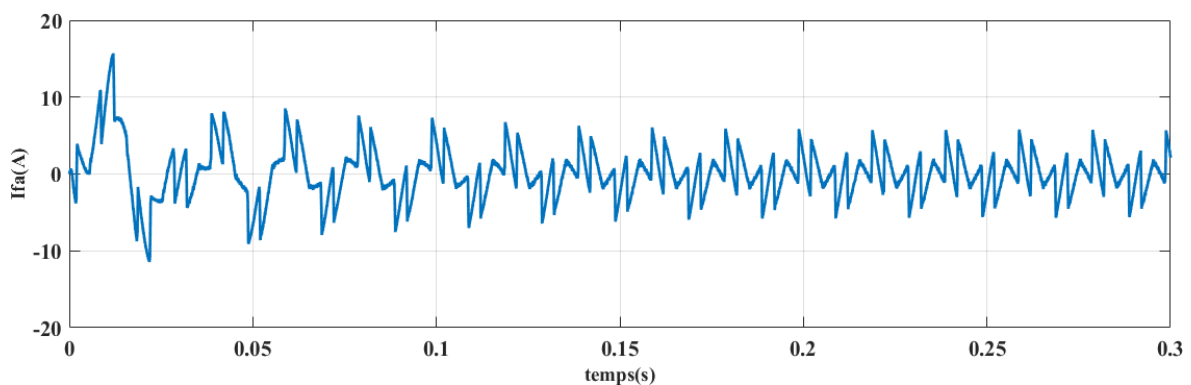
**Tableau IV.2 :** THD des trois phases du courant (MLI avec SRH).

SRF avec filtre déséquilibré	THD%
Isa	1.69
Isb	1.42
Isc	1.42

On remarque, à partir de L'application du filtre de source déséquilibré, que THD a gardé la valeur imposée par la Norme IEEE 519.

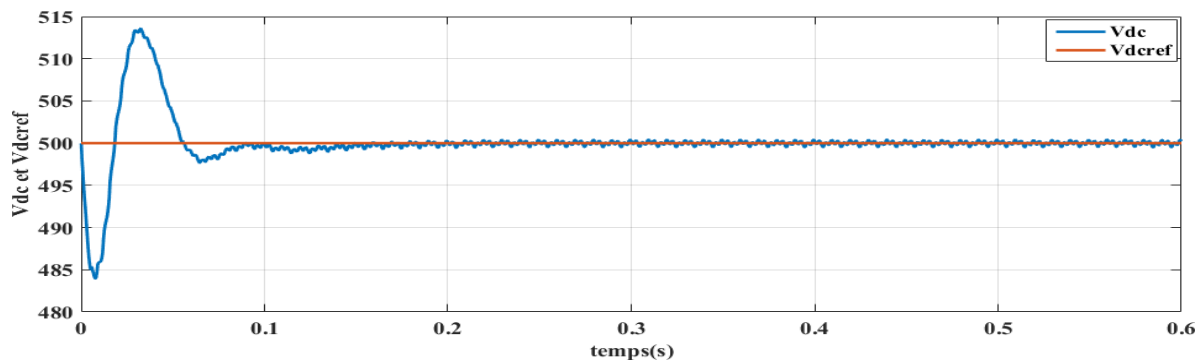


**Figure IV.41 :** les courants du filtre injectent par le filtre avec filtre de source déséquilibré



**Figure IV.42 :** courant du filtre de phase (a) injecte par le filtre avec filtre de source déséquilibré

On remarque dans les deux figures (42 et 43) qu'au début le courant est déséquilibré (filtre de source déséquilibré) et présente des oscillations importantes. Après le courant devient plus stable et équilibré, ce qui montre l'efficacité du filtre pour stabiliser le courant dans un système électrique triphasé.



**Figure IV.43 :** tension du bus continu avec filtre de source déséquilibré

On remarque que la tension aux bornes du condensateur est maintenue constante et suit parfaitement sa référence de 500 V ( $V_{dcref}$ ) malgré le déséquilibre de filtre de source RL.

### IV.3 Etude comparative entre les deux commandes (Hystérésis et MLI) avec la méthode SRF

Suite aux essais qu'on a fait avec les deux commandes en identifiant les courants avec la méthode SRF, nous présentons un tableau comparatif basé sur le taux d'harmoniques du courant de source obtenu dans les différentes conditions.

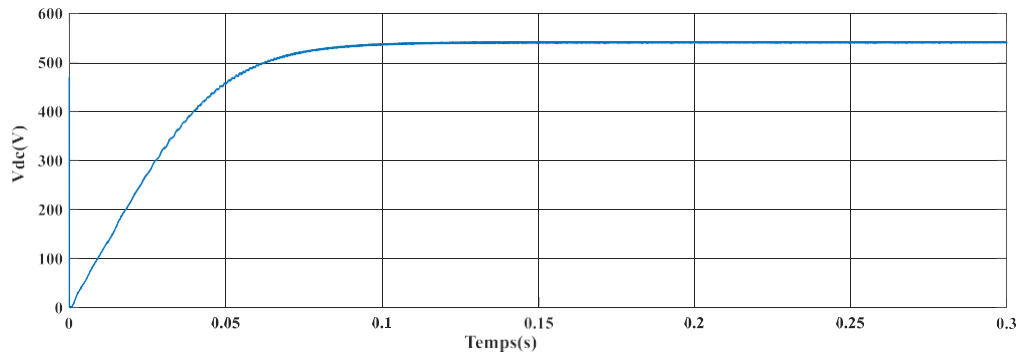
**Tableau IV.3:** Tableau du courant de source pour les deux méthodes.

SRF	MLI	Hystérésis
Les conditions normales	1.1 %	1.98%
Charge variable	0.8 %	1.56 %
Filtre de source déséquilibré	1.69 %	2.88 %

D'après les résultats de simulation obtenus dans ce tableau, on constate que le filtre actif parallèle avec les deux commandes permet de réduire les contenus harmoniques du courant de source après le filtrage. Il est traduit par le THD qui doit être inférieure à 5% confirmant la norme IEEE-519. Par ailleurs, la commande MLI a de meilleurs résultats par rapport à celui que nous avons obtenu avec la commande Hystérésis.

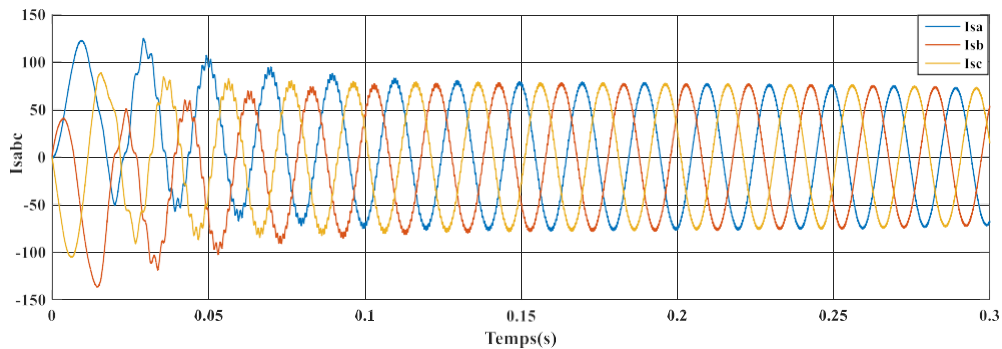
#### IV.4 Filtre-PV

D'après les résultats précédents, on a pu constater que la commande MLI a donné de meilleurs résultats. En l'occurrence, on va connecter notre générateur photovoltaïque commandé par MPPT à notre actif parallèle commandé par MLI, à travers un hacheur élévateur (Boost), en gardant le même montage et on obtient ces résultats.



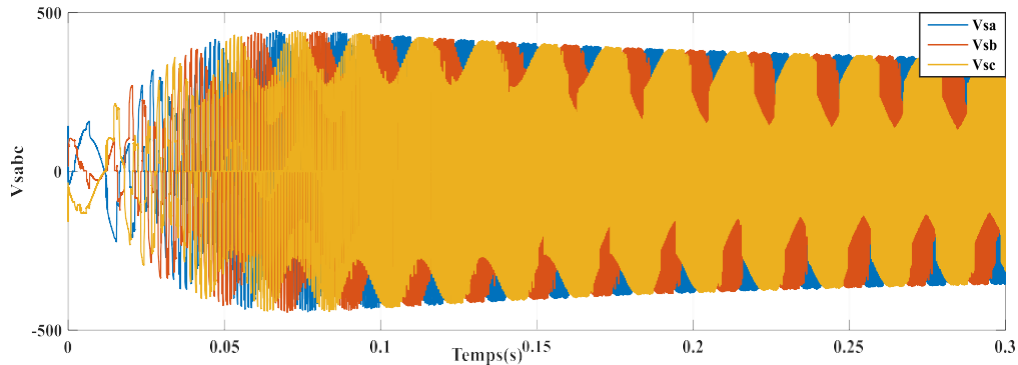
**Figure IV.44:** Tension  $V_{dc}$  après association du panneau.

On remarque que la tension de sortie de l'hacheur  $V_{dc}$  se stabilise à 520 V et dépasse le régime transitoire.



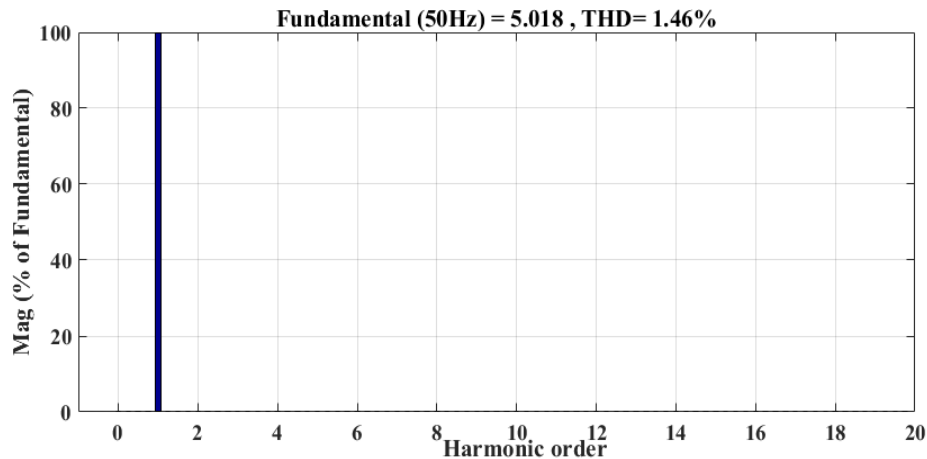
**Figure IV.45:** Courants de source triphasé.

Les courants illustrés sur cette figure se stabilise après la perturbation au début, et dépasse le régime transitoire.



**Figure IV.46 :** Tensions de source Vsabc

On voit que les tensions sont perturbées au début. A l'instant  $t=0.2$  elle commence à stabiliser.



## IV.5 Conclusion :

L'étude effectuée dans ce chapitre a été dédiée à la simulation des deux commandes, à savoir la commande MLI et la commande par Hystérésis, en utilisant la méthode de Référentiel Synchrone. L'objectif principal était de comparer ces deux techniques de commande en termes de THD, de robustesse et de stabilité. Suite à l'avisement, la commande MLI a montré une meilleure performance en matière de la réduction du THD, et malgré l'association du panneau, ça n'a pas affecté le courant et le THD est dans les normes. Ce qui la rend particulièrement adaptée à notre filtre actif parallèle.

# **Conclusion générale**

Ce travail a été consacré à l'étude et la conception d'un filtre actif dédié aux énergies renouvelables afin d'améliorer la qualité de l'énergie électrique.

Dans le premier chapitre nous avons exploré les perturbations du réseau électriques, telles que les harmoniques, nous avons donné la définition harmonique, leurs origines et leurs effets instantanée et à termes, ainsi que les méthodes de suppressions des harmoniques.

Le deuxième est sacré à l'étude du FAP qui contient deux parties, partie puissance et partie commande, on a expliqué les deux commandes : la commande par MLI et par Hystérésis. La méthode de référentiel synchrone a été choisie pour identifier les courants perturbateurs.

Dans le troisième chapitre on a approfondi les notions de base du générateur photovoltaïques. Il a abordé l'origine et le principe physique de l'effet photovoltaïque, ainsi que la modélisation d'une cellule PV et d'un GPV. Nous avons également présenté les principales caractéristiques et performances du GPV. Un défi majeur de cette technique est de maintenir un rendement optimal dans diverses conditions météorologiques. Pour améliorer le rendement, un étage d'adaptation avec une commande de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) a été proposé. Cette solution permet d'extraire le maximum de puissance quelles que soient les conditions climatiques et d'assurer une adaptation optimale entre le GPV et la charge. Cet étage d'adaptation utilise un hacheur boost, pour garantir un bon rendement.

Dans le dernier, on a simulé et comparé les deux techniques de commande pour un filtre actif parallèle, à savoir la commande MLI et la commande par Hystérésis, en utilisant la méthode de Référentiel Synchrone, et on a associé le panneau photovoltaïque a notre filtre actif parallèle à travers le hacheur. Les résultats ont montré que la commande MLI offre une meilleure performance en termes de réduction du THD et aux variations de charge et aux perturbations la rendant particulièrement adaptée à notre application.

En guise de perspectives, on prévoit d'améliorer notre technique de commande appliquée au système Filtre-PV et la tester dans différentes conditions.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] BOUAFIA Abdelouahab « Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance : application aux redresseurs a MLI », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif –(UFAS).
- [2] BACHA Seddik « méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique », Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, le 20 Octobre 2006.
- [3] SARIR Noureddine « Commande Intelligente d'une Éolienne Connectée au Réseau Électrique -Application des Filtres Actifs- », Thèse de doctorat, Université d'Ibn khaldoun – Tiaret.
- [4] OULD-ABDESLAM Djaffar « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension », Thèse de doctorat, Université de haute-alsace 8 décembre 2005.
- [5] ABDELFETTAH Boussaid « filtrage actif des harmoniques dans les réseaux électriques. Contribution à l'amélioration de l'énergie électrique », Thèse de doctorat, Université des frères mentouri-Constantine, Janvier 2017.
- [6] OMEIRI Amar « Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant », Thèse de doctorat, Université de Annaba,2007.
- [7] ALLOUI Nada « Contribution à l'amélioration de la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques en utilisant les Filtres Hybrides », Thèse de doctorat, Université de Batna 2, Octobre 2017.
- [8] KAMIL Mohammed et NOUIRI Salih « Commandes non linéaires d'un filtre actif parallèle », Mémoire d'Ingénieur. Université de M'sila, 2010.
- [9] Guide de l'installation électriques 2010 collection technique.
- [10] ABDELMADJID Chaoui « Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires », Thèse de doctorat, UFAS, Octobre 2010.
- [11] MUSTAPHA Sarra « Contribution à l'étude des filtres actifs hybrides », Thèse de doctorat, UFAS.
- [12] DELLAHI Mostapha « Suppression des courants harmoniques à base des filtres actifs



triphasés à quatre files ».

[13] AMAIA Lopez « Commandes avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la montée en tension », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.

[14] SEYED-HAMID Shahalami « Filtrage hybride des perturbations harmoniques produites par des systèmes d'entraînement asynchrone à vitesse variable », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy-I.

[15] ZELLOUMA Laid « Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé », Thèse de doctorat.

[16] MOHAMED MOUFTAH Abdusalam « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I

[17] CHELLI Zoubir « Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique », Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba.

[18] KEBIRI Samia « Modélisation et simulation d'un filtre actif multiniveaux », Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.

[19] LAKHDARI Abdelkader « Contribution à la commande du flux d'énergie dans les smart grids », Thèse de doctorat, UFAS.

[20] SAHLI Abdeslam « Filtrage actif et contrôle de puissance : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau », Thèse de doctorat, UFAS.

[21] KARIMI Shahram « Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage "FPGA in the loop" : application au filtre actif parallèle », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy-I.

[22] GHADBANE Ismail « Commande d'un Filtre Actif Triphasé Parallèle Par Différents Régulateurs », Mémoire de Magister, Université Mohamed Kheider – Biskra

[23] BELAOUCHET Nouri « Fonctionnement à Fréquence de Commutation Constante des Convertisseurs de Puissance en Utilisant des Techniques de Commande Avancées Application : Amélioration de la Qualité de l'Energie », Thèse de doctorat, UFAS.

[24] YOUSFI Abdelkader « Amélioration de la qualité de l'énergie électrique en utilisant un onduleur de tension a cinq niveaux », Thèse de doctorat, Université Hassiba Benbouali de Chlef.

- [25] C.Zidani, F.Benyarou , B.Benyoucef « Simulations de la position apparente du soleil et estimation des énergies solaires incidents sur un capteur plan photovoltaïque (Algérie) », Revue énergies renouvelables, Vol.6, pp.69-76, 2003.
- [26] BOUCHAKOUR Abdelhak « Modélisation et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque », Thèse doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès 2018.
- [27] S. Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse III, France, 2009.
- [28] S. NAOUAL « modélisation et extraction automatique des Paramètres d' un générateur », Mémoire de Magister, Département d'électrotechnique, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [29] DEBILI Narimene, « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage photovoltaïque », Mémoire de magister, Université Constantine I, 2010.
- [30] M.L.Louazane « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla », Mémoire de Magister, Université El Hadj Lakhdar-Batna 16/06/2008.
- [31] GHEBBACHE Mohammed « Stratégies de commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique dans le but d'optimiser la qualité de l'énergie », Mémoire représenté à l'université du Québec à Trois-Rivières.
- [32] DARIGA Meekhun « Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonome pour l'application aéronautique Micro et nanotechnologies/Microélectronique », INSA de Toulouse, 2010. Français. (NNT : ). (tel-00554679).
- [33] HELALI Kamelia « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque (Etude Comparative) », Mémoire de magister en electrotechnique , Université Moulooud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [34] MAKHLOUFI Salim « contribution à l'optimisation des installations photovoltaïques par des commandes intelligentes », Thèse de doctorat, Université hadj Lakhdar Batna.
- [35] F. Slama « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », Mémoire de Magister en Électrotechnique, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2018.
- [36] ANGEL Cid Pastor « Conception et réalisation des modules photovoltaïques électrotechniques », Thèse présentée en vue de l'obtention de grade de Docteur de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.
- [37] Cédric CABAL « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à

la conversion photovoltaïque », Thèse doctorat de l'Université Toulouse III Paul Sabatier.

[38] S.Abada « Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur Sepic » Université Laval, Québec Canada, Faculté des Sciences.

[39] Mme.OBEIDI « Commande des hacheurs MPPT par logique floue », Ecole Nationale Polytechnique, Mémoire de Magister, 2006.

[40] S.AISSOU « Caractérisation et optimisation de puissance des systèmes photovoltaïque », Thèse de doctorat, université A.Mira-Bejaia, mai 2016.

## Résumé

Le problème de la pollution harmonique dans les réseaux électriques devient de plus en plus préoccupant avec l'augmentation de l'usage des charges non-linéaires. Ce travail présente une étude et une conception d'un filtre actif parallèle dédié aux énergies renouvelables, en mettant l'accent sur la qualité de l'énergie électrique. La recherche inclut l'origine des harmoniques et les normes telles que CEI 61000-2-2, CEI 61000-3-2 et IEEE-519, ainsi que les méthodes de suppression des harmoniques.

Le rôle du filtre actif est crucial, et sa structure générale ainsi que la régulation de la tension du bus continu sont étudiées. Les méthodes du domaine fréquentiel et temporel, ainsi que la méthode de référentiel synchrone (SRF), sont utilisées pour identifier et contrôler les courants harmoniques. La généralité sur les générateurs photovoltaïques, la modélisation des cellules photovoltaïques, les caractéristiques électriques des cellules PV et les paramètres influençant ces caractéristiques sont également abordés. L'assemblage des modules photovoltaïques et l'utilisation de la commande MPPT avec perturbation et observation sont détaillés pour l'adaptation du générateur photovoltaïque.

L'étude comprend aussi l'essai de la commande hystérésis avec la méthode SRF et la commande MLI avec la méthode SRF, suivie d'une étude comparative entre ces deux commandes. Les simulations et analyses sont réalisées en utilisant Matlab Simulink avec Power System.

## Mots clés

THD, Filtre Actif Parallèle, qualité de l'énergie électrique, harmoniques, normes CEI 61000-2-2, CEI 61000-3-2, IEEE-519, commande MPPT, méthode SRF, Matlab Simulink, Power System.

## Agzul

Ugur n usuḡu n tmes deg yiḡedwan n trisiti yettnerni s waḡas ḡuḡa s tmerna n useqdec n ḡḡawsiwin ur nelli ara d ḡizeḡzawin. Leḡdic-a yesbanay-d tazrawt d usnulfu n yiwen n ufilter asertan amsadur yettwawehhan i tezmert yettwasnernan, s usersi n t-id-yesmektayen s ḡyara n tezmert n trisiti. Tazrawt-a tella deg-s lasel n yiharmoniken d lqanun am IEC 61000-2-2, IEC 61000-3-2 d IEEE-519, am wakken ḡayen tignatin n usḡulfu n yiharmoniyeḡ. Tamlilt n ufilter asertan d tin yesean azal ameqqran, d lebni-ines amatu am wakken ḡayen d aselkem n tezmert n tkemmelt n ḡbuciḡant ḡḡwayran. Tiwtilin n uswir d wakud, am wakken ḡayen Tazrawt n ukatar n uskasi (SRF), ḡḡwaseḡdacen i ussenḡed d uḡḡar n yiḡedwan iharmoniyeḡ. Isalan imaynuten yeḡ yigensaten n ḡfukt, amudel n ḡzeywa Tafukt, tiskanin n trisiti n ḡzeywa n PV d yiferdisen yetḡaḡsan ḡḡwameslayen-d ḡayen yeḡ ḡḡawsiwin-a. Assmad n yimuḡan n ḡfukt d Aseqdec n uḡḡar n MPPT s usḡufsu d uḡezzeb ḡḡwafehmen i adaptasi n ḡmzduḡt n ḡfukt. Tazrawt-a tella-d ḡayen deg-s tesleḡt n uḡḡar n ḡḡemla n usḡulfu s tarrayt n SRF d Aḡḡar n MLI s tarrayt n SRF, sdeffir-s tezmert n usḡerdec ḡar sin-a lewḡayat. Tismiḡin d tesleḡin ḡḡwaxedment s useqdec n Matlab Simulink s Anagraḡ n Tezmert.

## Awalen n tsarut :

THD, Filtre Actif Parallèle, qualité de l'énergie électrique, harmoniques, normes CEI 61000-2-2, CEI 61000-3-2, IEEE-519, commande MPPT, méthode SRF, Matlab Simulink, Power System.