

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Djilali Bounaama Khemis Miliana



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Technologie

**Mémoire du Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de**

Master

En

« Génie Electrique »

Option :

« Electrotechnique industrielle »

Titre :

**Contribution à l'étude de l'association d'une source
Photovoltaïque et d'un filtre actif**

Réalisé par :

HASNI Ismail

EL MOKEDDEM Abdelkadir

Encadré par :

Dr. YOUSFI Abdelkadir

Soutenu publiquement le 25 / 06 / 2018 devant le jury composé de :

Dr. LAYATE. Z: Président

Dr. BENBEKHTI .F : Examinatrice

Année Universitaire : 2017/2018

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier notre DIEU miséricordieux qui nous a donné la volonté, la force et la patience à achever ce travail.

Nos remerciements à nos parents, pour leurs soutiens et leurs encouragements pendant toute la vie et qui continueront à nous aider dans tous les projets de l'avenir. tous les membres de nos familles qui ont participé de près ou de loin à nous encourager et nous aider dans notre projet.

Nous tenons d'abord à remercier Mr, YOUSFI Abdelkader qui nous a suivi en démarrent ce projet et qui n'a pas ménagée son effort pour tenir le bon chemin dans le domaine de recherche, sans lui, ce travail n'aurait pas été ce qu'il est aujourd'hui.

Nous remercions sincèrement tous les enseignants de l'université de Djilali

BOUNAAMA (Khemis Miliana) en particulier de Génie Electrique qui ont participés à notre formation.

DIDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

*Ma chère mère qui est ma source de bonheur et qui
m'a entourée d'amour et de tendresse*

*Mon cher père pour son soutien inlassable et qui s'est
sacrifié pour moi.*

*Sans oublier mes frères et mes sœurs
À tous mes camarades*

ABD AL KADIRE

*Ma chère mère qui est ma source de bonheur
et qui m'a entourée d'amour et de tendresse*

*Mon cher père pour son soutien inlassable et
qui s'est sacrifié pour moi.*

Sans oublier mes frères et mes sœurs

*A tous mes camarades et mes amis en
particulier Meziane ben Taher Meziane Salah
aldine, Mebdoua moussa*

Ce travail présente une étude d'un l'association entre un panneau photovoltaïque et un filtre actif parallèle pour éliminer les pollutions créées par les différentes charges non linéaires. Nous avons utilisé une technologie de contrôle non linéaire pour la commande de ce filtre afin de contrôler puissance active photovoltaïque et de compenser l'énergie réactive et les courants harmoniques des charges non linéaires. Ensuite, nous avons présenté les algorithmes les plus répandus d'identification des grandeurs harmoniques de référence, et on a énuméré les techniques de commande les plus utilisées, notamment celles à base de la MLI. En outre, on présente la technologie photovoltaïque où la méthode d'extraction de l'énergie électrique Un convertisseur élévateur a été utilisé comme interface entre le panneau photovoltaïque et le réseau électrique. Un régulateur (PI) a été utilisé pour la commande de ce convertisseur, et la méthode de MPPT mise en œuvre est de type P&O. Dans une dernière étape, on a évoqué l'association entre un panneau photovoltaïque et un filtre actif parallèle multi niveaux de type NPC afin de remédier aux problèmes liés à la qualité de courant.

Abstract

This work presents a study of the association between a photovoltaic panel and a parallel active filter ,to eliminate the pollution created by the different non-linear loads. We use non-linear control technology to control this filter to control active photovoltaic power and to compensate reactive energy and harmonic currents of non-linear loads. Then we presented the most common algorithms for identifying the harmonic reference quantities, and we listed the most used control techniques, especially those based on MLI. In addition, we present the photovoltaic technology where the method of extraction of electrical energy A supercharger has been used as an interface between the photovoltaic panel and the power grid. A regulator (P1) has been used to control this converter, and the implemented MPPT method is of the P & O type. In a final step, the association between a photovoltaic panel and a parallel active multi-level filter NPC type was noted to address the problems related to the current quality.

ملخص

يقدم هذا العمل دراسة عن العلاقة بين لوحة الطاقة الشمسية و المرشح النشط الموازي ، للقضاء على التلوث الناتج عن الأحمال غير الخطية المختلفة. لقد استخدمنا تقنية التحكم غير الخطية للتحكم في هذا المرشح للتحكم في الطاقة الضوئية النشطة والتعويض عن الطاقة التفاعلية والتيارات التوافقية للأحمال غير الخطية. بعد ذلك ، قدمنا الخوارزميات الأكثر شيوعًا لتحديد الكميات المرجعية التوافقية ، وأدرجنا تقنيات التحكم الأكثر استخدامًا ، لا سيما تلك القائمة على MLI. بالإضافة إلى ذلك ، فإننا نقدم التكنولوجيا الكهروضوئية حيث طريقة استخراج الطاقة الكهربائية وقد استخدم محول دفعة كواجهة بين لوحة الطاقة الضوئية وشبكة الطاقة. تم استخدام وحدة التحكم (P1) للتحكم في هذا المهايئ ، وطريقة MPPT التي تم تنفيذها هي P & O. في خطوة نهائية ، أثبتت العلاقة بين لوحة الخلايا الضوئية ومرشح متعدد المستويات متوازي نشط من نوع NPC من أجل معالجة المشاكل المتعلقة بالجودة الحالية.

Liste des symboles

P : pertes totales par effet Joule

I_h : Le courant harmonique de rang (A)

R : la résistance traversée par le courant

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

ω : Pulsation fondamentale ($2\pi f_l = \frac{2\pi}{T}$)

φ_h : Phase de l'harmonique au rang h

Y_{eff} : Valeur efficace d'une grandeur alternative

THD : le taux de distorsion harmonique :

FP : Facteur de puissance

D : puissance déformée

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur photovoltaïque.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O: Méthode de Perturbation et observation.

DC= CC : Courant Continu.

AC=CA : Courant alternatif.

E: L'éclairement absorbé par la cellule

Liste des symboles

Eref : L'éclairement de référence (1000 w/m²)

Vt : Tension thermique

N : Facteur d'idéalité de la photopile

K : Constant de Boltzmann (1,38.10⁻²³J/K)

q : Charge de l'électron (1,6.10⁻¹⁹C)

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode

I_{PV} : Courant générer par la cellule photovoltaïque

I_{Ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)

I_d : Le courant circulant dans la diode

I_{PV} : Courant générer par la cellule photovoltaïque

I_{Ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)

I_d : Le courant circulant dans la diode

V_{coNs} : la somme des tensions en circuit ouvert de Ns cellules en série.

I_{ccNs} : Courant de court circuit de Ns cellules en série.

I_{ccNP} =: la somme des courants de cout circuit de (NP) cellule en parallèle

V_{coNP} : Tension du circuit ouvert de (Np) cellules en parallèle

Vco : Tension à vide,

P_{max} : c'est la puissance au point de fonctionnement maximal du panneau solaire.

V_{MAX} : c'est la tension de fonctionnement maximal du panneau solaire

Liste des symboles

T_S : Est la période de commutation

K_p et k_i :Coefficients du régulateur (PI).

ξ : Facteur d'amortissement.

ω_n : Pulsation propre du système.

$\omega_c; U_p$: Respectivement la fréquence et l'amplitude de la porteuse ;

$f; U_{refmax}$: Respectivement la fréquence et l'amplitude maximale de la référence.

m : L'indice de modulation

r :Le coefficient de réglage

v_{ab}, v_{bc}, v_{ac} : tension entre phase (v)

v_{an}, v_{bn}, v_{cn} : tension entre phase a, b, c et le neutre (v)

L : inductance totale série vue par le filtre actif (H)

f_p : fréquence de la porteuse triangulaire (H)

V_{dc} : la valeur moyenne de la tension du bus continu du filtre actif (v)

V_s : tension de source (v)

$V_{s\alpha}$: tension dans le repère α - β (v)

$i_{s\alpha}$: courant de phase (A)

i_{α} : courant dans le repère α - β (A)

i_{ch} : Le courant total de la charge.

i_{ch1} : Le courant fondamental absorbé par la charge.

i_h : Le courant harmonique absorbé par la charge. a (A)

q : Puissance réactive instantané (VAR)

$P_{s\alpha}$: puissances instantanées selon les axes α

$P_{s\beta}$: puissances instantanées selon les axes β

Liste des symboles

\bar{p} : Puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant (W)

\bar{q} : Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant (VAR)

MLI : Modulation de largeur d'impulsion

FAP : Filtre actif parallèle

NPC : Neutral Point Clamping (point neutre des sources continues M)

\tilde{p} et \tilde{q} : Puissance alternatives liées à la somme des composantes harmoniques du courant

r : Taux de modulation

m : Indice de modulation

Φ : Déphasage entre le courant et la tension

S: Puissance apparente (VA)

P : Puissance active (W)

Q : Puissance réactive (VAR)

V : la tension instantanée (V)

i : le courant instantané (A)

Fp : Facteur de puissance

Fdis : Facteur de distorsion

Fdép : Facteur de déplacement

C_f : capacité de filtre (F)

L_f : inductance de filtre (H)

Vdc : tension côté continu de l'onduleur (V)

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1: Creux et coupure de tension.	6
Figure I.2: Variation de fréquence.	7
Figure I.3: La fluctuation de la tension	8
Figure I.4: Déséquilibres du système triphasé de tension.	9
Figure I. 5: Déséquilibres du système triphasé de tension.	10
Figure I. 6:Arrangement d'inter-harmoniques et d'infra-harmoniques.....	11
Figure I. 7:Diagramme de Fresnel des puissances	15
Figure I. 8:Alimentation d'une charge non linéaire	16
Figure I. 9: Circuit électrique équivalent d'alimentation d'une charge non linéaire	17
Figure I. 10 :Schéma équivalents pour caractériser la déformation de la tension au point de raccordement.	17
Figure I.11:Filtre résonant.....	23
Figure I.12:Filtre amorti	23
Figure I.13:Montage d'un filtre actif parallèle.	26
Figure I.14:Montage du filtre actif en série.....	27
Figure 15:Combinaison parallèle –série actif (UPQC).	27
Figure 16:filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.....	28
Figure I.17 : filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.....	28
Figure I.18:Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle	29
Figure I.19:Redresseur de tension.	30
Figure I.20:Redresseur du courant.	30

Chapitre II :

Figure II.1:Évolution de la consommation de l'énergie électrique en Algérie	36
Figure II.2:Perspectives d'insertion des énergies renouvelables dans la production nationale	36
Figure II.3: Installation du photovoltaïque en Algérie	37
Figure II.4:Description d'une cellule	39
Figure II.5:Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction	40
Figure I.6: Des cellules photovoltaïques	42
Figure II.7:Schéma équivalent d'une cellule idéale.	43
Figure II.8:Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.....	44

Liste des figures

Figure II.9:Schéma de simulation d'un pv	45
Figure I.10:Bloc d'un PV sur simulink.....	46
Figure II.11:Caractéristique courant tension de Ns cellule en série.....	47
Figure II.12:Caractéristique courant tension de (Np) cellule en parallèle	48
Figure II.13:Module photovoltaïque	49
Figure II.14:Boite de jonction	49
Figure II.15:Panneau photovoltaïque	51
Figure II.16:Exemple de la structure d'un système PV autonome	52
Figure II.17:Système photovoltaïque hybride (PV-éolienne-groupe diesel)	52
Figure II.18:Système photovoltaïque connecté au réseau	53
Figure II.19:Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température.....	54
Figure II.20:Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de la température	55
Figure II.21:Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.....	55
Figure II.22:Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.	56
Figure II.23:Principaux composants d'un GPV (a)Illustration et différenciation entre cellule (PV), module (PV), panneau (PV) et Générateur (PV) (b) Identification des diodes anti retour et des fusibles (c) Identification des diodes BY PASS	57
Figure II.24:Effet de la diode by-pass sur la caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque a) Caractéristique d'un générateur PV lorsque les deux sous-réseaux sont identiques, sans effet des diodes by-pass. b) Caractéristique d'un générateur PV	58
Figure I.25:Symbole d'un convertisseur DC-DC	59
Figure II.26:Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.....	60
Figure II.27:Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur	60
Figure II.28:Schémas équivalents du hacheur dévolteur (A) : K fermé, (B) : ouvert.....	61
Figure II.29:Schéma de principe d'un convertisseur Boost	62
Figure II.30: Schémas équivalents du hacheur survolteur (A) : K fermé, (B) : ouvert.....	62
FigureII.31: Schéma de principe d'un Convertisseur dévolteur-survolteur.....	63
Figure I.32:Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur (A) : K fermé, (B) : ouvert.....	64
Figure II.33:Schéma du régulateur PI	65
Figure II.34:Schéma de la boucle fermée du courant du panneau	66
Figure I.35:Commande du convertisseur Boost	67
Figure II.36:Caractéristique $I=f(V)$ du panneau photovoltaïque	67
Figure I.37:Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC-DC) contrôlé par une commande (PPM) sur charge DC.....	68

Liste des figures

Figure I.38:Schéma de simulation d'un Commande MPPT	69
Figure II.39:Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O)	70
Figure II.40: Schéma de simulation de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P et O).....	71
Chapitre III :	
Figure III.1:schéma de Principe du filtre actif parallèle.....	74
Figure III.2:Schéma de principe des signaux générés par le filtre actif parallèle.	75
Figure III.3:Structure générale du filtre actif parallèle.	76
Figure III.4:Structure onduleur tension.	77
Figure III.5 : Structure d'un onduleur de tension triphasé.	78
Figure III.6:Commande par hystérésis	79
Figure III.7: Principe de commande des courants par MLI	80
Figure III.8:Schéma de principe de l'onduleur monophasé commandé par MLI sinus-triangle	81
Figure III.9:Onduleur de tension deux niveaux et les interrupteurs pouvant le constituer.	82
Figure 10:Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur de tension.	84
Figure III.11:Onduleur de tension trois niveaux et les interrupteurs pouvant le constituer.	85
Figure III.12:Vecteurs tension que peut fournir l'onduleur à 3-niveaux de tension.....	86
Figure III.13::Schéma de principe d'identification des courants harmoniques.	89
Figure 14:Schéma de principe de la méthode séparation des puissances.	91
Chapitre IV	
Figure IV.1: Allure de isa avant filtrage actif.	96
Figure IV.2: Spectre harmonique de isa.....	96
Figure IV.3 :Courant isa déphasé de la tension vsa.	97
Figure IV.4: onduleur de tension deux niveaux alimentent par une source photovoltaïque..	98
Figure IV.5:Schéma de simulation établi sous Matlab-Simulink.....	98
Figure IV.6:Allure de isa après filtrage actif deux niveaux.	99
Figure IV.7:Spectre harmonique de isa.....	99
Figure actif IV.8:Allures de isa et vsa après filtrage.....	100
Figure IV.9:Courant généré par le filtre actif iFAa et sa référence i^*a	101
Figure IV.10:Courants de charge non-linéaire ica, de source isa et celui du filtre actif iFAa.	101
Figure IV.11:Impulsions des 3 interrupteurs supérieurs du filtre actif. (a). Sa. (b). Sb. (c). Sc.	102
Figure IV.12:onduleur de tension deux niveaux alimentent par une source photovoltaïque	103
Figure IV.13:Allure de isa après filtrage actif trois niveaux.....	104
Figure IV.14:Spectre harmonique de isa après filtrage actif trois niveaux.....	105

Liste des figures

Figure IV.15: Courant généré par le filtre actif trois niveaux iFAa poursuivant sa consigne i_a^*	105
Figure IV.16: Courant et tension en phase (côté source).	106
Figure IV.17: Déformations de i_{sa} au niveau des intersections non nulles de i_{ca} et i_{FAa}	106
Figure IV.18: Impulsions des deux interrupteurs supérieurs S_{a1} et S_{a2}	107

Chapitre I

Tableau I.1: Limite des composantes harmoniques en courant. 18

Chapitre II

Tableau II.1: paramètres de simulation.....46

Chapitre III

Tableau III.1: Tensions générées par l'onduleur de tension deux niveaux 83

Tableau 2: Grandeur connue pour chacune des configurations d'un bras de l'onduleur trois niveaux.85

Tableau 3: Etats possibles de l'onduleur NPC à trois niveaux et leur tension..... 87

Chapitre IV

Tableau IV.1: Paramètre de simulation communs aux applications considérées.....93

Tableau IV.2: Paramètre de simulation du FAP par l'algorithme P-Q et onduleurs de tension deux niveaux94

Tableau IV.3: Paramètre de simulation du FAP par l'algorithme P-Q et onduleurs de tension trois niveaux.....95

Table des matières

Remerciement.....	I
Dédicace	II
Résumé.....	IV
Liste des symboles	VII
Liste des figures	XI
Liste des tableaux	XIV
Liste des matières.....	XV
I.Introduction général.....	1
Chapitre I : Problématique des harmoniques, Etat de l'art	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Qualité de l'énergie électrique:	4
I.3 Perturbation des réseaux.....	5
I.3.1 Creux et coupure de tension.....	5
I.3.2 Les fluctuations de la fréquence à 50 Hz.....	6
I.3.3 Fluctuation de tension.....	7
I.3.4 la modification de la forme d'onde de la tension.....	8
I.3.5 Déséquilibres de système triphasé de tension.....	8
I.3.6 Harmoniques.....	9
I.4 Types des harmoniques.....	10
I.4.1 Infra-harmoniques.....	11
I.4.2 Inter-harmoniques.....	11
I.5 Conséquence des harmoniques.....	11
I.6 Effets des harmoniques.....	11
I.6.1 Les effets quasi-instantanés.....	11
I.6.2 Les effets à terme dus aux échauffements.....	12
I.7 Grandeurs et caractéristiques des harmoniques.....	12
I.7.1 Grandeur harmonique.....	13
I.7.2 Rang de l'harmonique.....	13
I.7.3 Valeur efficace d'une grandeur alternative.....	13
I.7.4 le taux de distorsion harmonique.....	13

Table des matières

I.7.5	le facteur de puissance :	14
I.8	Causes de la production des harmoniques	15
I.9	Conséquence des harmoniques.....	15
I.10	Charge non linéaire raccordée au réseau.....	16
I.11	Normes standard en courant et tension harmoniques.....	17
I.12	Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie.....	18
I.13	Solutions traditionnelles :	19
I.13.1	Action sur la structure de l'installation	20
I.13.2	Augmentation de la puissance de court-circuit.....	20
I.13.3	Placement d'une inductance de ligne.....	20
I.13.4	Rééquilibrage des courants du réseau électrique.....	20
I.13.5	Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique.....	20
I.13.6	Compensation de la puissance réactive	21
I.13.7	Les filtres passifs.....	21
I.14	Solutions modernes.....	23
I.14.1	filtrage actif	23
I.14.2	Filtre actif parallèle	24
I.14.3	Filtre actif série.....	24
I.14.4	Combinaison parallèle série actif.....	25
I.14.5	Filtrage hybride.....	26
I.14.6	Les redresseurs à MLI.....	28
I.15	Conclusion	28

Chapitre II : Etude d'un système photovoltaïque

II.1	Introduction :	30
II.2	L'énergie solaire :	30
II.3	Notions préliminaires sur le rayonnement solaire.....	31
II.4	Terminologie « photovoltaïque »	31
II.4.1	Historique :.....	32
II.4.2	les dates importantes :	32
II.5	État du l'énergie photovoltaïque en Algérie.....	33
II.6	Description de la cellule.....	35
II.6.1	Principe de fonctionnement.....	37
I.6.2	Type des cellules photovoltaïques.....	38

Table des matières

II.7 Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque.....	40
II.8 Regroupement des cellules.....	44
II.9 Module photovoltaïque :.....	45
II.9.1 Caractéristiques d'un module	47
II.10 Panneau photovoltaïque :	47
II.11 Générateur photovoltaïque.....	48
II.12 Classification d'un système solaire photovoltaïque.....	48
II.12.1 Système autonome.....	48
II.12.2 Système hybride.....	49
II.12.3 Système PV raccordée au réseau.....	49
II.13Caractéristiques tension-courant et puissance-tension sous différentes conditions climatiques.....	50
II.13.1 Influence de la température.....	50
II.13.2 Influence de l'éclairement.....	52
II.15 Convertisseur de puissance de système photovoltaïque.....	55
II.15.1 Convertisseur DC-DC pour les systèmes d'énergie solaire.....	56
II.16 Commande du convertisseur boost.....	61
II.17 Commande MPPT pour un système photovoltaïque.....	63
II.17.1Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation DC-DC.....	64
II.17.2 Les méthodes de poursuite de MPP.....	64
II.18 Algorithme perturbation et observation :	65
II.19 Avantages et inconvénients d'une installation PV :	67
II.20 Conclusion.....	68

Chapitre III : Etude d'un filtre actif parallèle

III.1 INTRODUCTION.....	70
III.2Principe du filtre actif parallèle:	70
III.3Structure d'un filtre actif parallèle :	72
III.4Structure de l'onduleur de tension :	73
III.5Onduleur de tension triphasé :	74
III.6Principe des onduleurs MLI	75
III.7Commande de l'onduleur.....	75
III.7.1 Commande par hystérésis.....	75
III.7.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	76
III.8Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux.....	77

Table des matières

III.8.1	Structure générale.....	77
III.8.2	Expression des tensions de sortie.....	78
III.9	Modélisation de l'Onduleur triphasé à trois niveaux:	80
III.9.1	Structure générale.....	80
III.9.2	Expression des tensions de sortie.....	81
III.1	Stratégie de commande du filtre actif parallèle.....	83
III.1	Identification des courants harmonique.....	84
III.11.1	Généralités sur les méthodes d'identification.....	84
III.11.2	Méthode des courants.....	84
III.11.3	Méthodes sur les puissances instantanées.....	85
III.1	Conclusion.....	88

Chapitre IV: simulation et interprétation

IV.1	Introduction.....	89
IV.2	Paramètre de simulation.....	89
IV.3	Caractéristiques du courant de source avant filtrage actif.....	90
IV.4	Cas d'un onduleur de tension deux niveaux.....	92
IV.4.1	Paramètre de simulation.....	92
IV.4.2	Circuit de puissance.....	93
IV.4.3	Résultats de simulation.....	93
IV.5	Cas d'un onduleur de tension trois niveaux.....	97
IV.5.1	Paramètre de simulation.....	97
IV.5.2	Circuit de puissance.....	97
IV.5.3	Résultats de simulation.....	98
IV.5.3.1	Courant de source après filtrage actif parallèle.....	98
IV.6	Etudes comparative entre FAP 2 niveaux et FAP 3 niveaux.....	101
IV.7	Conclusion.....	101
	concluion géeneral	103

Références bibliographiques

Références bibliographique.....	105
---------------------------------	-----

I. Introduction générale

La qualité de l'énergie est un concept assez large qui recouvre à la fois la qualité de la fourniture électrique, celle de l'onde de tension et la qualité des courants. L'amélioration de la qualité de l'énergie sur les réseaux de distribution électrique, devient de nos jours, un enjeu important pour les gestionnaires des réseaux que pour les exploitants de l'énergie électrique.

En exploitation normale, la qualité de l'électricité se réduit principalement à la qualité de l'onde de tension délivrée. Lorsque cette tension est présente, les principaux phénomènes pouvant l'affecter sont : les creux de tension de courtes ou longues durées, le flicker, la surtension, le déséquilibre ou les harmoniques. En revanche, la qualité des courants reflète la possibilité des charges à fonctionner sans perturber ni réduire l'efficacité du système de puissance.

Habituellement, la qualité de l'onde de tension fait référence à la mesure du degré de conformité d'une source d'alimentation électrique par rapport à un certain nombre de critères ou de normes à caractère quantitatif et absolu. Les principaux paramètres caractérisant une tension triphasée sont la fréquence, l'amplitude, la forme d'onde qui doit être sinusoïdale et la symétrie du système caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leurs déphasages relatifs. Tout phénomène physique affectant un ou plusieurs de ces paramètres est considéré comme perturbation [1].

L'apparition d'harmoniques dans le réseau électrique, également appelée pollution harmonique, est un phénomène important qui entraîne une distorsion de la qualité de l'énergie, Cette déformation est générée par le recouvrement, sur l'onde de tension fondamentale, des ondes qui sont également sinusoïdales mais de fréquences qui sont multiples de l'onde centrale.

Dans les systèmes triphasés, un récepteur triphasé qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau et provoque des courants excessifs au niveau du neutre. Ces courants excessifs, les harmoniques injectés, la présence de

Introduction générale

puissance réactive, les déséquilibres et autres problèmes générés par ce type de charge conduit à un affaiblissement du rendement global du système et du facteur de puissance. [2]

D'autre part, l'utilisation des énergies renouvelables n'est pas du tout nouvelle. Le changement réside dans les développements dans le domaine industriel. Ainsi que les événements météorologiques récents et imprévus et que la consommation d'énergie dans les pays en développement a fortement augmenté avec la croissance de la population, l'urbanisation et le développement économique. D'autre part les ressources d'énergie conventionnelles ont une durée de vie limitée. En raison de ces problèmes et de la réduction des combustibles fossiles, des alternatives durables doivent être trouvées de plus en plus urgentes. L'énergie photovoltaïque a un rôle important, ce type d'énergie est inépuisable, propre et plus écologique.

Du plus, ils y a plusieurs solutions ont été proposées pour résoudre le problème de la pollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution. Pour faire face à ce problème, la solution classique qui est connue depuis bien long temps consiste à utiliser des filtres passifs. Cette solution est la plus répandue pratiquement, la plus simple et la moins chère. Mais le filtrage passif pose certains problèmes, la conception d'une technologie de filtration moderne appelée filtre actif est due à deux raisons principales.

La première raison est due aux inconvénients inhérents des filtres passifs. Deuxièmement, l'émergence de nouveaux composants semi-conducteurs tels que le transistor dipôle isolé (IGBT). Le but de ces filtres est de générer soit des courants soit une tension électrique qui s'oppose aux harmoniques résultant de charges non linéaires.

Les filtres actifs sont classés en deux types, les filtres actifs séries et les filtres actif parallèles. Les filtres actifs série ont un rôle efficace dans la résolution des problèmes de qualité de l'alimentation liés à la tension. Comme pour le filtre actif parallèle(FAP), efficace pour les problèmes liés à la qualité des courants tels que les harmoniques, la puissance interactive et les pannes de charge, La méthode FAP est basée sur le type d'algorithme de contrôle utilisé pour extraire les courants de référence.

Comme nous avons discuté dans ce travail, on va procéder à l'association entre un panneau

Introduction générale

Photovoltaïque et un filtre actif parallèle afin de remédier les problèmes liés à la qualité de courant.

L'objet de notre travail est étudié un générateur solaire photovoltaïque connecté au réseau de distribution en utilisant un filtre actif parallèle. Pour éliminer les pollutions créées par les différentes charges non linéaires. Nous utilisons une technologie de contrôle non linéaire pour la commande de ce filtre afin de contrôler la puissance active photovoltaïque injectée dans le réseau et de compenser l'énergie réactive et les courants harmoniques des charges non linéaires.

Le travail présenté est rédigé en quatre chapitres principaux qui sont résumés dans ce qui suit

Le premier chapitre, sera consacré aux problématiques des harmoniques, leurs origines, leurs conséquences et la réglementation. Ensuite, les différentes solutions traditionnelles et modernes de filtrage possibles sont présentés : filtrage passif, actif et hybride, on se focalisera ensuite sur le filtrage actif parallèle, l'application qui sert de ligne directrice, en analysant les différents types de filtres et enfin les avantages et les inconvénients.

Le deuxième chapitre, on présentera la technologie photovoltaïque où la méthode d'extraction de l'énergie électrique utilise le convertisseur Boost pour le suivi du point maximum de puissance (MPPT).

Dans le troisième chapitre, nous exposerons la solution de réduction des harmoniques basés sur le filtrage actif parallèle multi niveaux de type NPC .Et évoqué l'association entre un panneau photovoltaïque et un filtre actif parallèle

Enfin, dans le quatrième chapitre nous présenterons, les résultats de simulation avec logiciel Matlab/Simulink sans et avec l'application des méthodes de filtrage avec deux topologie (onduleur deux et trois niveaux)

I.1 Introduction

Depuis quelques années, les mesures de puissance et de la qualité du réseau électrique prennent beaucoup d'importance. Parallèlement, il existe un besoin croissant pour une meilleure qualité et une plus grande fiabilité du réseau électrique. Par conséquent, l'utilisation accrue, dans l'industrie, des systèmes commandés à base d'électronique de puissance provoque de plus en plus des problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques [3], tels que les distorsions harmoniques, les déséquilibres, le papillotement, les coupures brèves, les creux de tension, les surtensions temporaires, les variations de fréquence et de tension, et les surtensions transitoires. En outre, ces perturbations peuvent générer des nuisances, pannes ou des dégâts par l'affectation d'un ou plusieurs paramètres de la tension du réseau électrique suivants: la fréquence, l'amplitude, la symétrie des tensions triphasées et la forme de l'onde [3].

Nous commencerons ce chapitre par un exposé des principaux défauts affectant la tension et le courant du réseau électrique. Nous parlerons également de leurs origines, des conséquences matérielles finalement nous discuterons ensuite des solutions traditionnelles et modernes utilisées pour pallier aux problèmes liés aux perturbations harmoniques.

I.2 Qualité de l'énergie électrique:

La qualité d'énergie est un concept très large qui peut se définir par rapport à la continuité de la fourniture électrique et la forme de la tension disponible [3]. Et de classer les équipements sensibles d'une manière qui convient à l'opération de l'équipement [4].

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant.

Les tensions d'un réseau électrique constituent un système alternatif triphasé, sauf dans des cas à utilisation particulière, les paramètres d'un tel système sont les suivants [5]

- la fréquence
- l'amplitude des trois tensions
- la forme d'onde qui doit être sinusoïdale,
- la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leurs déphasages relatifs

I.3 Perturbation des réseaux

Un récepteur d'énergie est considéré par le distributeur de l'électricité comme une charge perturbatrice s'il absorbe des courants non sinusoïdaux ou déséquilibrés et/ou il échange de l'énergie réactive.

Les courants non sinusoïdaux ou déséquilibrés peuvent déformer ou déséquilibrer les tensions du réseau lorsque son impédance n'est plus négligeable. L'échange de l'énergie réactive réduit la puissance active que les générateurs, les transformateurs ou les lignes peuvent produire ou transmettre [6]

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales

- Les récepteurs linéaires (ou charges linéaires)
- Les récepteurs non-linéaires (ou charges non-linéaires).

Une charge est dite linéaire si, alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal (résistances, capacités et inductances) [7]. Une charge est dite non-linéaire lorsque la relation entre la tension et le courant n'est plus linéaire. Un récepteur alimenté par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant non-sinusoïdal [8]. Cette classe de charges englobe les convertisseurs statiques (gradateurs, redresseurs), les circuits magnétiques saturés, les lampes,etc. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbations [1]

I.3.1 Creux et coupure de tension

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10% et 90% de la tension nominale [9,10] pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes

Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation des réseaux électriques. Ils apparaissent également lors de manœuvre d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs transformateurs, etc).

Une coupure de tension quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale, disparition totale pendant une durée comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves, supérieure à une minute pour les coupures longues. La plus part des appareils électriques admettent une coupure totale

d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. La figure I.1 montre un exemple de creux et de coupure de tension. [9]

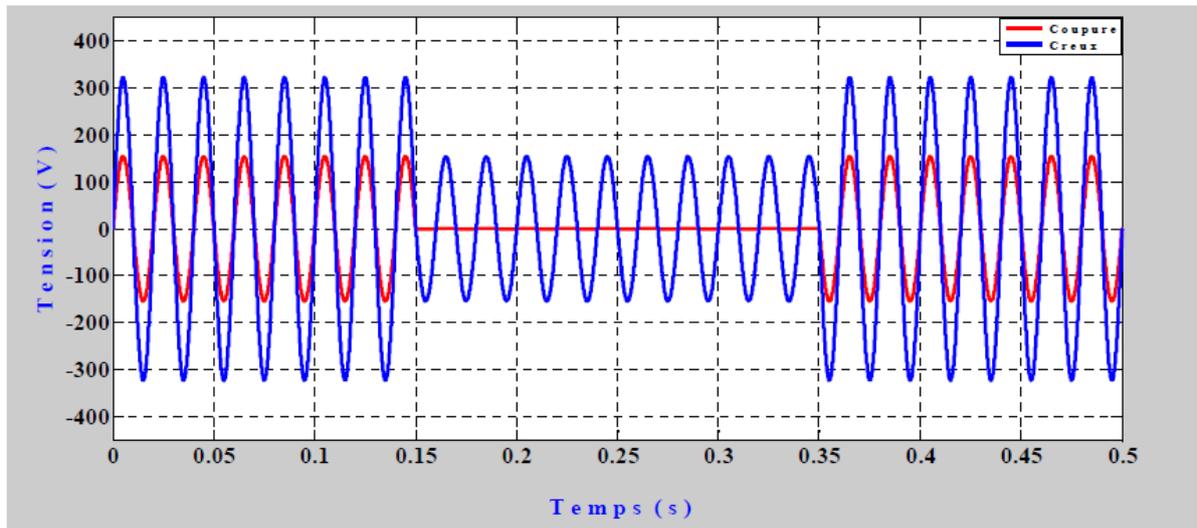


Figure I.1: Creux et coupure de tension [10]

Conséquences: Perturbation ou arrêt du procédé, pertes de données, données erronées, ouverture de contacteurs, verrouillage de variateurs de vitesse, ralentissement ou décrochage des moteurs et extinction de lampes à décharge [11].

I.3.2 Les fluctuations de la fréquence à 50 Hz

Une variation sensible de la fréquence de réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique, comme le montre la figure I.2 .au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles comme dans le cas de certains défauts graves sur les réseaux.

Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50\text{Hz} \pm 1\%$. [9]

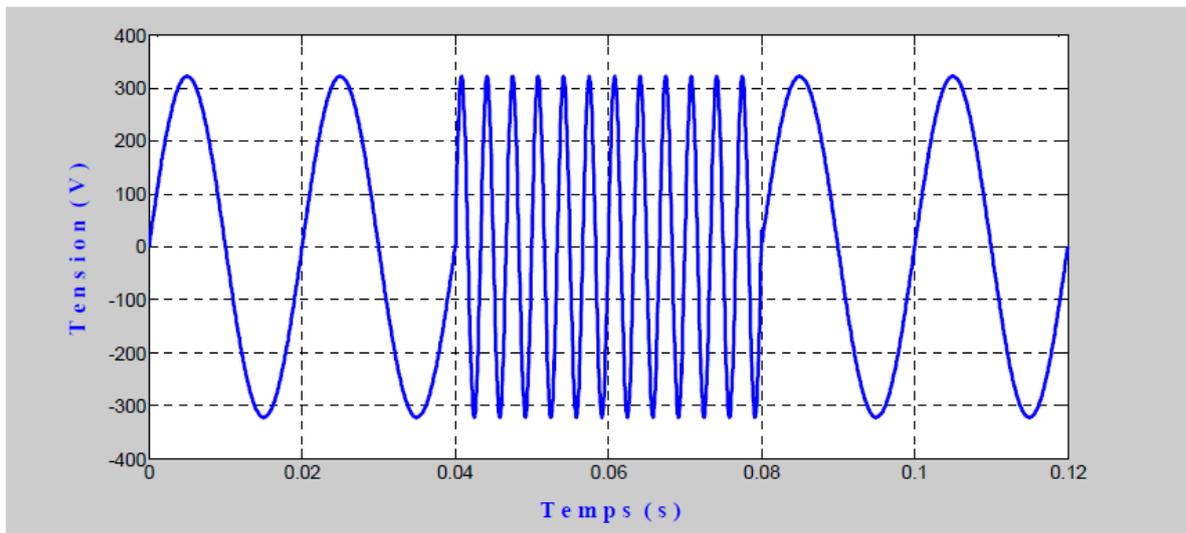


Figure I.2: Variation de fréquence [10]

I.3.3 Fluctuation de tension

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 située dans une bande de 10% et se produisent sur un intervalle de temps de quelque centième de seconde.

Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courant d'appel important. L'origine principale de ce courant et le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder.

Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant un gêne visuel perceptible pour une variation de 1% de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé flicker. Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure I.3. [9]

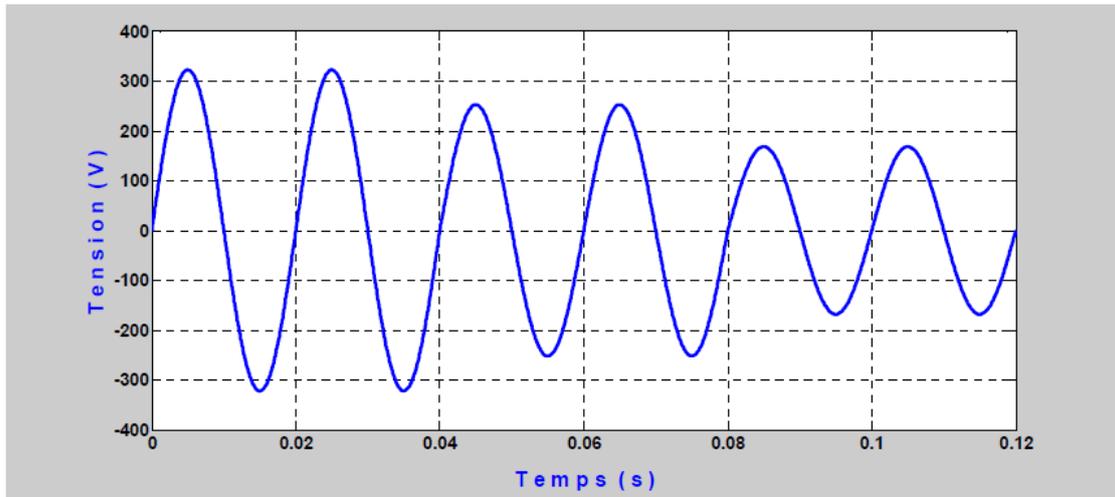


Figure I.3: La fluctuation de la tension [10]

Conséquences : Fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou Flicker) [11].

I.3.4 la modification de la forme d'onde de la tension

Cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à 50 Hz, associée soit à des harmoniques de fréquence multiple entier de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque;

I.3.5 Déséquilibres de système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalés d'un angle 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé comme le montre la figure I.4. Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. [9]

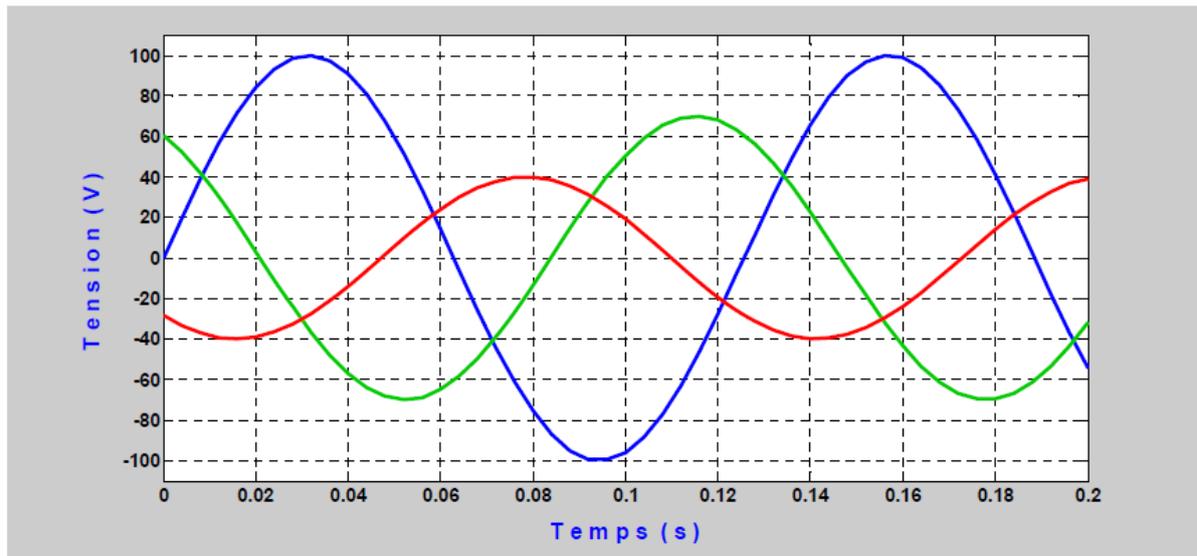


Figure I.4: Déséquilibres du système triphasé de tension [10]

I.3.6 Harmoniques

Les principales sources d'harmoniques sont les dispositifs contenant des éléments qui commutent (les convertisseurs statiques), et les dispositifs à caractéristique tension- courant non linéaire (fours à arc, inductances saturées, transformateurs, machines tournantes, etc.) [12].

Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner de tension harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau [13,11].

a- Déformation du signal périodique :

Un signal déformé est due principalement à la superposition des harmoniques sur la composante fondamentale. Les signaux illustrés sur la figure I.5, montrent l'effet des harmoniques d'ordre 3,5 et 7 sur le fondamental de la tension.

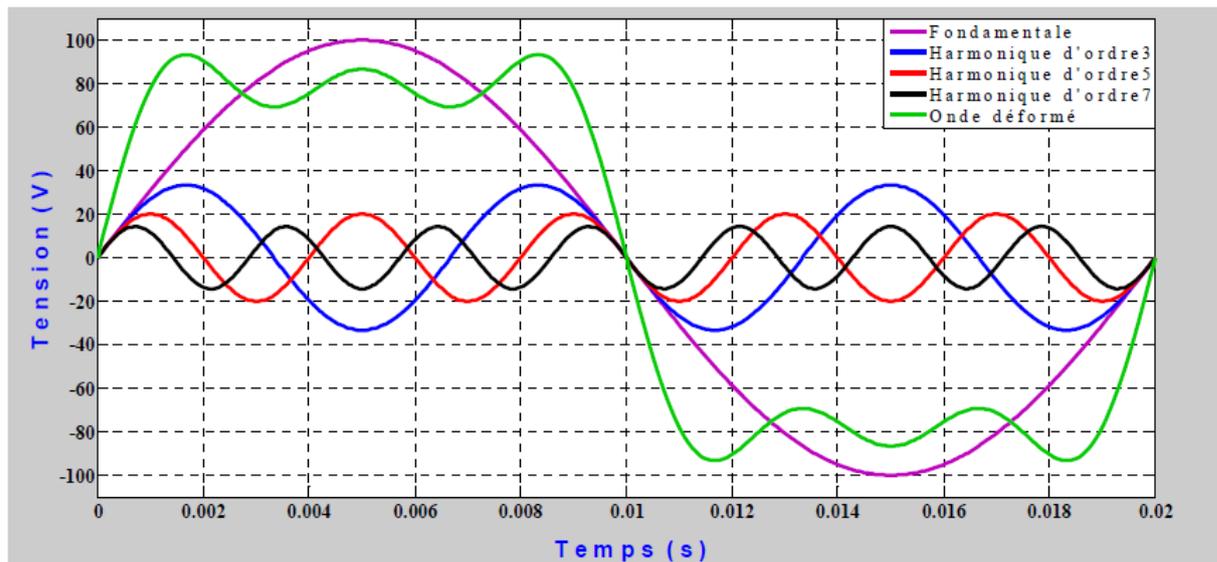


Figure I. 5: Déséquilibres du système triphasé de tension [10]

Conséquences : surcharges (du conducteur de neutre, des sources...), déclenchements inconvenables, vieillissement accéléré et dégradation du rendement [11].

b- Origines des harmoniques :

L'augmentation sensible du niveau de la pollution harmonique du réseau électrique est une conséquence de la prolifération des convertisseurs statiques. En effet, ces convertisseurs sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques. Ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peuvent entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique. [14]

I.4 Types des harmoniques [15].

Les harmoniques se divisent particulièrement par leur ordre ; il existe des harmoniques de type pair ou impair. Les harmoniques d'ordre pair (2, 4, 6, ...) très fréquemment négligeables dans un milieu industriel, ils s'annulent en raison de la symétrie du signal. Ils n'existent qu'en présence d'une composante continue. Par contre, les harmoniques d'ordre impair (3, 5, 7...) sont souvent rencontrés sur un réseau électrique. Dans les cas où il existe des changements périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par certains récepteurs, on remarque qu'il existe d'autres types des composantes harmoniques :

I.4.1 Infra-harmoniques :

Ce sont des composantes sinusoïdales qui sont à des fréquences inférieures à celle du fondamentale : 10 Hz, 20 Hz

I.4.2 Inter-harmoniques :

Ce sont des composantes sinusoïdales qui ne sont pas à des fréquences multiples de celle du fondamentale : 130 Hz, 170 Hz, 220 Hz [15]. L'arrangement des inter-harmoniques et des infra-harmoniques est présenté sur la figure I.6:

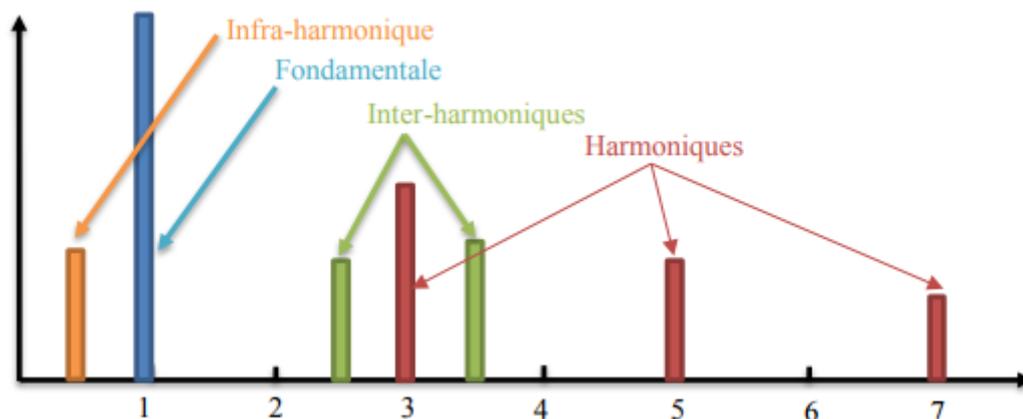


Figure I. 6:Arrangement d'inter-harmoniques et d'infra-harmoniques [15]

I.5 Conséquence des harmoniques

Les courants et les tensions harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie des équipements électriques. Bien que les susceptibilités des différents équipements et appareils électriques, raccordés à un réseau pollué, soient très diversifiés, on distingue deux sortes d'effets possibles [15].

I.6 Effets des harmoniques : On distingue deux sortes d'effets possibles

I.6.1 Les effets quasi-instantanés

- les perturbations concernent principalement des dispositifs de régulation électronique. Les tensions harmoniques peuvent ainsi influencer les liaisons et les équipements « courant faible », entraînant des pertes d'exploitation
- Vibrations, bruits : par les efforts électrodynamiques proportionnels aux courants instantanés en présence, les courants harmoniques généreront des vibrations, des bruits acoustiques, surtout dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances), entraînant dans certains cas leurs destruction.

- La présence des harmoniques sur les signaux provoque le déplacement du passage par zéro et des modifications de la valeur crête de l'onde [3].

I.6.2 Les effets à terme dus aux échauffements

- Echauffement et vieillissement des condensateurs
- Echauffement dû aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs et des câbles.
- Diminution de leur durée de vie par surcharge thermique.

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 [16]

I.7 Grandeurs et caractéristiques des harmoniques

Le signal peut éventuellement contenir une composante continue qui présente la valeur moyenne du signal. Cette décomposition est connue sous le nom de la décomposition en série [18] proposée par le mathématicien Français Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768- 1830). [20]. Cette décomposition s'écrit sous les formes suivantes :

$$Y_h = Y_0 + Y_1\sqrt{2} \sin(2\omega t - \varphi_1) + Y_2\sqrt{2} \sin(2\omega t - \varphi_2) + \dots + Y_h\sqrt{2} \sin(2\omega t - \varphi_h) \quad (\text{EqI.1})$$

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

ω :Pulsation fondamentale ($2\pi f_1 = \frac{2\pi}{T}$)

φ_h : Phase de l'harmonique au rang h

I.7.1 Grandeur harmonique

C'est l'une des composantes sinusoïdales de la variation de la grandeur physique possédant une fréquence multiple de celle de la composante fondamentale L'amplitude de l'harmonique est généralement de quelques pour cent de celle du fondamental [14]

I.7.2 Rang de l'harmonique [14]

C'est le rapport de sa fréquence f_n à celle du fondamental (généralement la fréquence industrielle, 50Hz) :

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (\text{EqI.2})$$

I.7.3 Valeur efficace d'une grandeur alternative [14]

Il y a identité entre l'expression usuelle de cette valeur efficace calculée à partir de l'évolution temporelle de la grandeur alternative ($y(t)$) et l'expression calculée à partir de son contenu harmonique

$$Y_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T Y^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} Y_N^2} \quad (\text{EqI.3})$$

On note qu'en présence d'harmoniques, les appareils de mesure doivent avoir une bande passante élevée (> 1KHz)

I.7.4 le taux de distorsion harmonique

La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique (THD) défini pour la tension ou le courant [21]

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

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (\text{Eq I.4})$$

Avec :

I_1 : Valeur efficace du courant fondamental et I_h du courant harmonique de rang h, Le taux de distorsion harmonique en tension est un paramètre qui sert à évaluer la déformation de la tension et s'exprime sous la forme suivante

$$THD_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{v_h}{v_1}\right)^2} \quad (\text{Eq I.5})$$

Avec :

v_1 Valeur efficace du courant fondamental et v_h du courant harmonique de rang h

I.7.5 le facteur de puissance :

Le facteur de puissance F.P est égal au rapport de la puissance active sur la puissance apparente. Il caractérise le dimensionnement d'un système électrique puisqu'il représente la puissance utile consommée par rapport à la puissance apparente au niveau de la source [20].

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\varphi_h)}{\sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} V_h^2} \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} I_h^2}} \quad (\text{EqI.6})$$

Avec

La puissance apparente S peut être définie par :

$$S = V_{eff} \cdot I_{eff} \quad (\text{EqI.7})$$

$$S = V_{eff} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (\text{EqI.8})$$

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

$$P = 3VI_1 \cos \varphi_1 \quad (\text{EqI.9})$$

$$Q = 3VI_1 \sin \varphi_1 \quad (\text{EqI.10})$$

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

$$D = V_{eff} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{In}^2} \quad (\text{EqI.11})$$

En présence des harmoniques, [9] la puissance apparente est composée de trois parties : active (P), réactive (Q) et déformante (D) comme le montre la relation(I.12)

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{EqI.12})$$

Le facteur de puissance:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{EqI.13})$$

D'après l'équation. I.13, on constate que le facteur de puissance est réduit en raison de la présence des harmoniques et de la consommation de puissance réactive [6].

Le diagramme de Fresnel des puissances est présenté sur la figure I.7

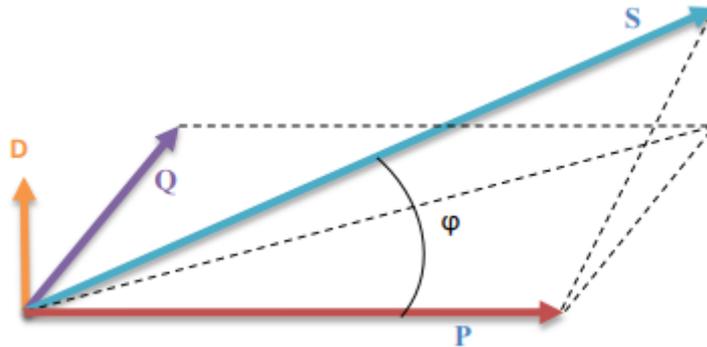


Figure I. 7:Diagramme de Fresnel des puissances [6]

I.8 Causes de la production des harmoniques [22]

La production harmonique est due à l'utilisation d'un grand nombre de charges non linéaires. Les charges non linéaires sont les charges qui n'absorbent pas de courant sinusoïdal même lorsqu'elles sont alimentées par une tension sinusoïdale.

La cause principale de l'existence des harmoniques de tension est l'injection des courants non sinusoïdaux dans le réseau. Différentes sources génératrices des courants harmoniques peuvent être citées :

- Charges commerciales : Alimentations monophasées, éclairage fluorescent, variateurs de vitesse pour HVAC, ascenseurs, etc... ;
- Charges industrielles : Variateurs des courants continus et alternatifs ;
- Charges domestiques : Systèmes informatiques et autres charges électroniques.

I.9 Conséquence des harmoniques

Les courants et les tensions harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie des équipements électriques. Bien que les susceptibilités des différents équipements et appareils électriques, raccordés à un réseau pollué, soient très diversifiés, on distingue deux sortes d'effets possibles [21].

I.10 Charge non linéaire raccordée au réseau

Considérons une source de tension sinusoïdale V_s connectée à une charge non linéaire.

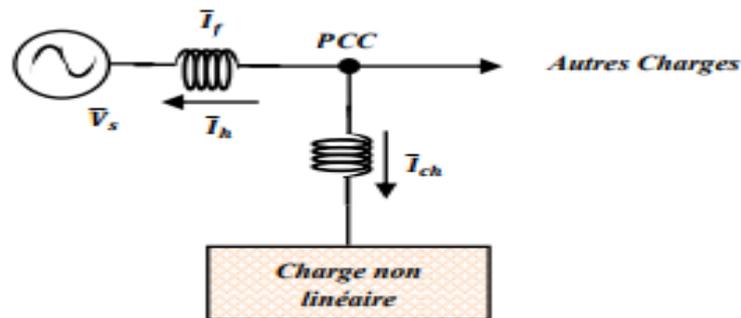


Figure I. 8:Alimentation d'une charge non linéaire [20]

La charge peut être une réactance saturable, une résistance non linéaire, un redresseur comportant une ou plusieurs diodes, ou un montage à interrupteurs mécaniques ou électroniques qui se ferment et s'ouvrent périodiquement.

A cause de non linéarité de la charge, le courant I_{ch} ne sera pas sinusoïdal même si la source de tension est parfaite. Il contient donc une composante fondamentale I_f et des composantes harmoniques I_h . Ces harmoniques de courant circulent dans la source de tension, en même temps qu'ils parcourent la charge [20,21]. En ce qui concerne le réseau électrique, ces courants harmoniques vont engendrer une détérioration de l'onde de tension au point de raccordement de la charge au réseau (P.C.C)

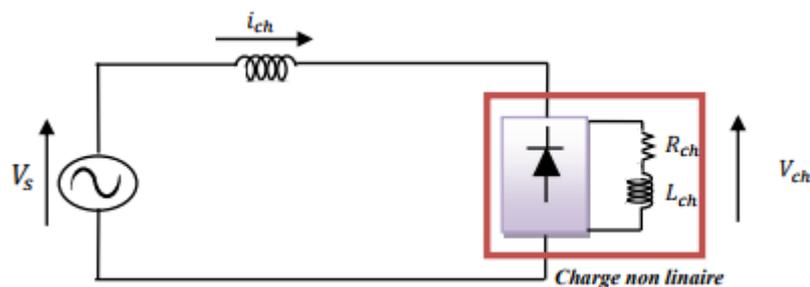


Figure I. 9: Circuit électrique équivalent d'alimentation d'une charge non linéaire [21]

Pour étudier la déformation de la tension du réseau provoquée par le prélèvement de courants distordus, nous représentons la source d'énergie par une f.e.m (V_s) à la fréquence fondamentale mise en série avec une impédance variable avec la fréquence comme le montre la figure I .10 [21]

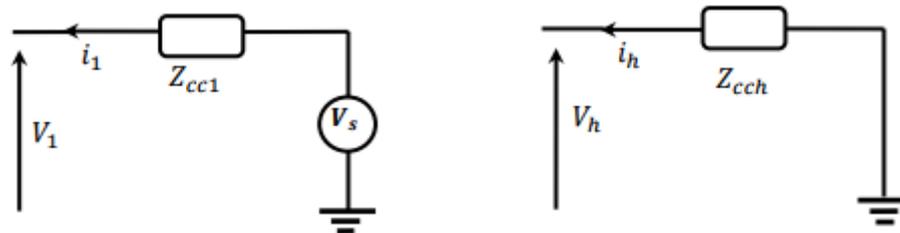


Figure I. 10 : Schéma équivalents pour caractériser la déformation de la tension au point de raccordement [21]

Sur ces schémas, les impédances représentent :

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

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

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

Avec :

$$V_1(t) = V_s - |Z_{cc1}| \cdot I_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \varphi_1 - \varphi_{cc1}) \quad (\text{EqI.14})$$

$$V_h(t) = - \sum_{n=2}^{\infty} |Z_{cch}| \cdot I_h \cdot \sqrt{2} \cdot \sin[(h\omega t + \varphi_h) - \varphi_{cch}] \quad (\text{EqI.15})$$

Où :

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

φ_{cc1} , φ_{cch} :représente l'argument de Z_{cc1} et Z_{cch} respectivement

De l'équation (I.15), on constate que la tension du réseau n'est plus sinusoïdale et est déformée par les courants harmoniques par l'intermédiaire de l'impédance de court circuit.

Pour la rendre sinusoïdale deux solutions sont possibles : modification de l'impédance du réseau ou annuler les harmoniques de courant

I.11 Normes standard en courant et tension harmoniques

Pour limiter l'influence d'une charge polluante sur les autres charges connectées au réseau et en même temps éviter la modification des caractéristiques de ce dernier, les distributeurs d'énergie électrique ont été amenés à émettre des recommandations [23].

La C.E.I. (Commission Electrotechnique Internationale) et l'I.E.E.E (Institute of Electrical and Electronics Engineers) sont les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine de l'électrotechnique. La CEI est un organisme officiel composé de comités nationaux de 63 pays, tandis que l'IEEE est une association professionnelle. Ces deux organismes réalisent la principale activité de normalisation dans le domaine des perturbations électriques au niveau mondial [24].

Au niveau international (CEI), les normes CEI-1000 définissent les niveaux des courants et des tensions harmoniques à respecter. Le tableau. I.1 présente la norme CEI-1000-3-2 qui fixe la limitation des courants injectés dans un réseau public basse tension pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16A. Il s'agit là des appareils du domaine domestique. Aussi, du fait de leur puissance, les équipements industriels sont exclus du champ d'application de cette norme [25]

Tableau I.1: Limite des composantes harmoniques en courant. [24]

Harmonique impaire		Harmonique paire	
rang	Courant harmonique admissible Maximale (A)	rang	Courant harmonique admissible Maximale (A)
3	2.3	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.3
9	0.40	$8 \leq h \leq 40$	$0.23 \cdot 8 / h$
11	0.33		
13	0.21		
$15 \leq h \leq 39$	$0.15 \cdot 15 / h$		

Les limitations en tension harmonique que doivent respecter les clients d'EDF sont :

- pour chaque rang pair, la tension harmonique est limitée à 0,6%.
- pour chaque rang impair, la tension harmonique est limitée à 1%,
- limitation du THD à 1,6%.

Il est d'usage de dire que, dans les installations industrielles, les tensions harmoniques dont le THD est inférieur à 5% ne produisent pas d'effet notable. Entre 5% et 7% on commence à observer des effets, et pour plus de 10% les effets sont quasi certains [9].

En ce qui concerne l'IEEE, la norme IEEE 519 :1992, (recommended practices and requirements for harmonic control in power systems), détermine la procédure pour contrôler les harmoniques présents sur le réseau électrique ainsi que les limites recommandées de la pollution harmonique générée par les clients et de distorsion harmonique totale sur le réseau [26].

I.12 Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie

Le choix de la solution la plus appropriée dépend des caractéristiques de l'offre au niveau du point de connexion, les exigences de la charge et de l'économie. Il existe deux possibilités pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, l'une est appelée conditionnement de la charge qui consiste à rendre les équipements du processus industriel moins sensibles aux problèmes de la qualité de l'énergie, en leur permettant ainsi de les surmonter, l'autre possibilité réside dans l'installation d'un dispositif de conditionnement capable de minimiser ou empêcher les perturbations provenant du réseau on distingue deux type de solution (traditionnelle et moderne) [11].

I.13 Solutions traditionnelles :

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation [27,28 ,29]

I.13.1 Action sur la structure de l'installation [16]

Il est souhaitable d'alimenter un grand pollueur par un transformateur à part, afin de le séparer d'un récepteur sensible. Face à un pollueur moyen il est préférable d'effectuer l'alimentation par des câbles distincts au lieu de les connecter en parallèle. Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles.

I.13.2 Augmentation de la puissance de court-circuit [16]

La puissance harmonique augmente lorsque la puissance de court-circuit diminue si l'on ne prend pas en compte les phénomènes de résonance. La diminution de l'impédance totale en amont de la charge non-linéaire permet de réduire la tension créée par les harmoniques de courant, et donc de diminuer le taux de distorsion harmonique en tension au point de raccordement. En revanche, les courants harmoniques ne sont pas atténués.

I.13.3 Placement d'une inductance de ligne : [16]

Dans le but de limiter la prolifération des effets nocifs dans le réseau, il est possible de limiter les courants harmoniques de certains convertisseurs. Cette solution est utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés. Elle consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux.

I.13.4 Rééquilibrage des courants du réseau électrique [16]

Répartition égale des charges sur les trois phases.

- Compensateur passif, par exemple montage de Steinmetz qui provoque un fort déséquilibre pour les fréquences différentes de 50Hz avec des résonances qu'il faut éviter d'exciter à proximité d'un générateur d'harmonique.

I.13.5 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique : [16] :

L'utilisateur ne souhaite pas résoudre les problèmes de pollution mais seulement le souci de la bonne santé de ses équipements. Cette approche, économiquement très contraignante ne s'applique que pour des nouvelles installations. On procède généralement au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Cette solution n'agit pas sur les harmoniques qui ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur .

I.13.6 Compensation de la puissance réactive [16]

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau, à proximité des charges qui ont un mauvais facteur de puissance pour la compensation locale ou près d'un transformateur d'alimentation pour la compensation globale.

I.13.7 Les filtres passifs

Le filtre passif modifier localement l'impédance du réseau, de façon à dériver les courants harmoniques et à diminuer les tensions harmoniques là où c'est nécessaire. On associe des éléments capacitifs et inductifs de manière à obtenir une résonance série accordée à une fréquence choisie. [30]

Il existe deux classes de filtres passifs (résonant, amorti) permettant de réduire les harmoniques.

I.13.7.1 Filtre résonant

Le filtre résonant est constitué d'un condensateur monté en série avec une inductance. Ces éléments sont placés en dérivation sur l'installation et accordés sur un rang d'harmonique à éliminer. L'impédance de cet ensemble est très faible pour sa fréquence d'accord, et se comporte ainsi comme un court circuit pour l'harmonique considéré, à savoir les deux harmoniques les plus gênantes h_5 et h_7 [30].

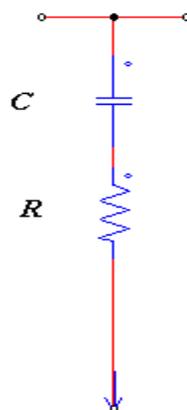


Figure I.11:Filtre résonant [30].

I.13.7.2 Filtre amorti

Un filtre amorti se compose d'une capacité en série avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance appelée résistance d'amortissement. Il est utilisé lorsque les performances demandées ne sont pas trop élevées. On utilise souvent un filtre passe haut pour filtrer simultanément les plus hautes fréquences du spectre et non une fréquence particulière [30]

Donc est conçue pour éliminer une bande de fréquence à partir de l'harmonique h11, qui correspond à la fréquence. Les harmoniques h11, h13, h17 et h19, pratiquement sont éliminés par ce type de filtre.

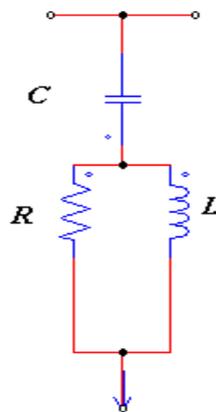


Figure I.12:Filtre amorti [30].

I.13.7.3 Les avantages et les inconvénients des filtres passifs : [19]

Le filtrage passif a déjà largement fait ses preuves dans le milieu industriel grâce à son coût faible, son efficacité et son adaptation pour des réseaux de forte puissance. Cependant Il présente les inconvénients suivants:

- L'impédance du réseau en présence des filtres passif peut faire apparaître des résonances.
- Le filtrage passif peut absorber les courants harmoniques d'autres charges non linéaires et dans ce cas, le filtre passif peut être surchargé.
- Le filtrage passif est peu flexible et, en cas de modifications dans le réseau, il peut avoir du mal à s'adapter aux nouveaux besoins du filtrage
- La conception des filtres passifs doit considérer la tolérance de fabrication et les dérives paramétriques qui apparaissent à l'usage.

Ainsi, avant d'installer un filtre de ce type, une étude détaillée doit être menée afin d'analyser, cas par cas, les risques de résonance et de surcharge

I.14 Solutions modernes

Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs et les redresseurs MLI sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques. En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur. [1]

I.14.1 filtrage actif [1]

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent pas plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. En effet, les méthodes dites "classiques" de filtrage ou de dépollution des réseaux électriques présentent un certain nombre d'inconvénient. Le plus important d'entre eux est sans doute le fait d'être sensible aux évolutions de l'environnement. Ils voient leur efficacité baisser avec les variations des perturbations (variation des fréquences et des amplitudes des harmoniques).

La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveau composant à commutation forcée, comme les transistors bipolaires, les thyristors GTO et les transistors IGBT qui ont permis de réaliser de nouvelles structures qui permettent le contrôle de la forme d'onde de la phase du courant d'entrée. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques. Ainsi le filtrage actif tend à annuler les courants harmoniques en injectant dans la source perturbatrice des courants harmoniques d'amplitudes identiques, mais en opposition de phase à l'aide d'un pont onduleur. A cet effet, une mesure du courant de la charge non linéaire permet de connaître le courant à fournir. Nous citerons les configurations possibles des filtres actifs :

- harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension. Le filtre actif parallèle (FAP) : conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive

- La combinaison parallèle série actif : solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension

Le filtre actif série (FAS): conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.

I.14.2 Filtre actif parallèle

Il est appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution figure I.13. Il est habituellement commandé comme un générateur de courant. Son principe est d'injecter dans le réseau électrique des courants harmoniques I_{inj} égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau I_s soit sinusoïdale et en phase avec la tension simple correspondante. Ainsi, il empêche les courants harmoniques, réactifs et déséquilibrés de circuler à travers l'impédance du réseau. Par conséquent, il améliore le taux de distorsion en courant et en tension [30,31 ,32]

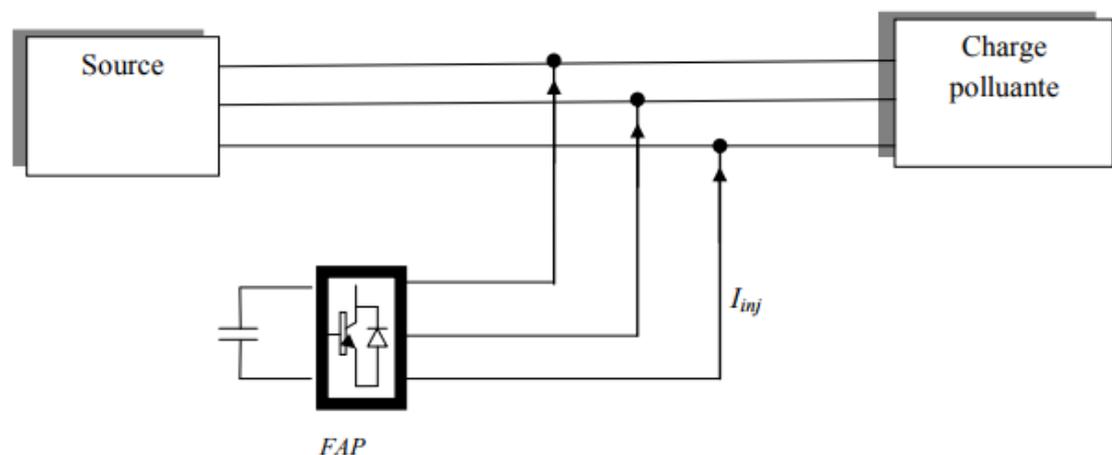


Figure I.13:Montage d'un filtre actif parallèle [31]

I.14.3 Filtre actif série

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau comme le montré la figure. II.14 Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension du réseau est une onde sinusoïdale.

Il est destiné à protéger les installations qui sont sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibrés) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Cette structure est proche, dans le principe, à des conditionneurs de réseau. Toutefois, cette topologie présente quelques difficultés et inconvénients lors de sa mise en œuvre, elle ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge [30,31, 32]

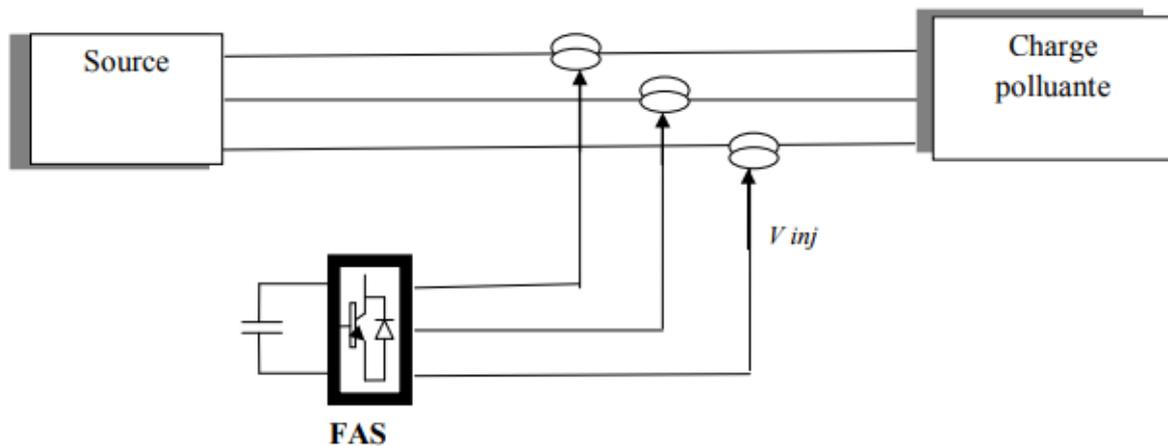


Figure I.14:Montage du filtre actif en série [31].

I.14.4 Combinaison parallèle série actif

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série figure (I.15).Donc, elle possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèles et série. Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle série actif ou en anglais (Unified Power Quality Conditioner(UPQC)). Un filtre actif série placé en amont du filtre actif parallèle, comme il est montré dans la figure II.15, permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices; or s'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée [1,16].

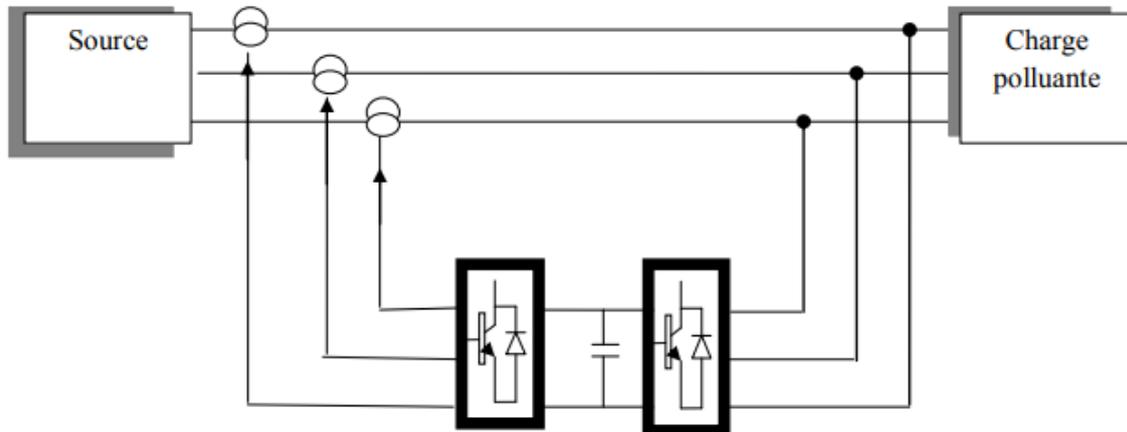


Figure 15:Combinaison parallèle –série actif (UPQC) [31]

I.14.5 Filtrage hybride

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations. Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature [19,33], les plus étudiées étant:

I.14.5.1 Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.

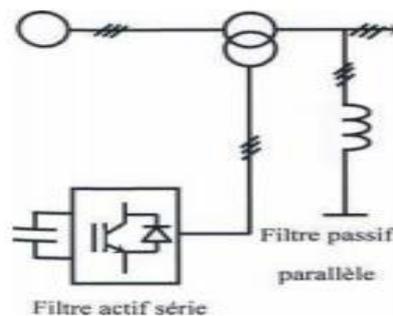


Figure 16:filtre actif série avec des filtres passifs parallèles [33]

Il empêche les courants harmoniques de circuler vers le réseau et les oblige à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences. [19,33]

I.14.5.2 Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.

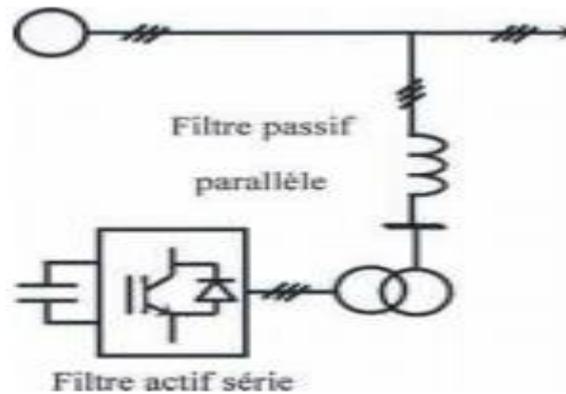


Figure I.17 : filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles [31]

Il a le même principe que la combinaison d'avant avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du FAS car le courant qui le traverse est plus faible. De plus, le FAS est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge. [19,33]

I.14.5.3 Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

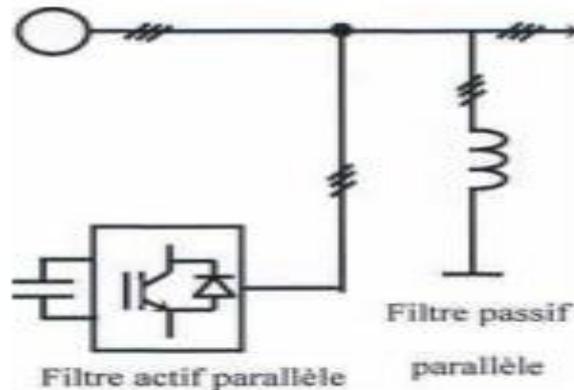


Figure I.18:Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle [33]

Il a le rôle de compenser des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les courants harmoniques hautes y compris ceux créés par le filtre actif parallèle. Ce type déjà été appliqué à la compensation des courants harmonique émis par un cycloconvertisseur de forte puissance. [19,33]

I.14.6 Les redresseurs à MLI

Ce sont des convertisseurs à modulation de largeurs d'impulsions, utilisant des composants à commutation forcée tels que les IGBT ou les thyristors GTO. L'emploi de cette technique permet non seulement une réduction de la perturbation harmonique en prélevant des courants d'allure sinusoïdale mais aussi un contrôle des puissances actives et réactives. [34]

On distingue deux structures, la structure courant et la structure tension. Elles sont développées dans les paragraphes ci-après.

I.14.6.1 Redresseur de tension

Son schéma de principe est présenté sur la figure I.18 Les composantes de puissance disponibles (IGBT, GTO) étant unidirectionnels en courant, le courant I_d le sera également unidirectionnels. La réversibilité en puissance s'effectue par l'inversion de la tension redressée U_d . Le contrôle de la puissance réactive est obtenu par action sur la phase du courant réseau par rapport à la tension.[35]

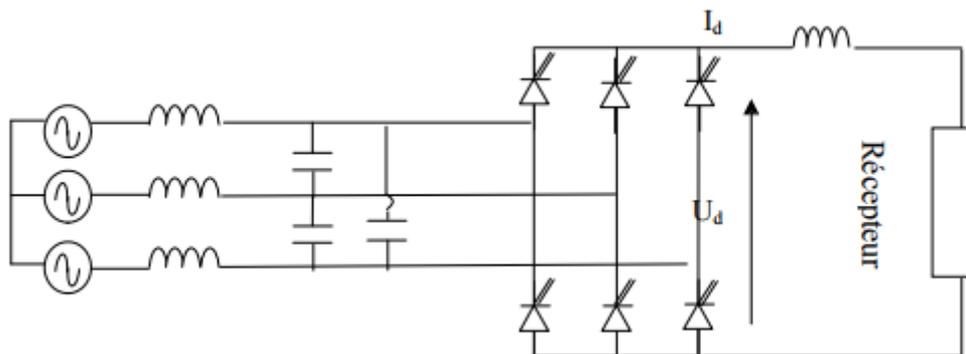


Figure I.19:Redresseur de tension [35]

I.14.6.2 Redresseur du courant

La tension U_d étant unidirectionnelle, la réversibilité de la puissance active est assurée par le courant I_d , qui est bidirectionnel. Le contrôle de la puissance réactive est réalisé par action indirecte sur la phase du fondamental de courant du réseau.

Les inductances L_r servent dans la figure I .19 à découpler le convertisseur de réseau car les deux réseaux alternatifs et continus sont tous deux sources de tension. [5]

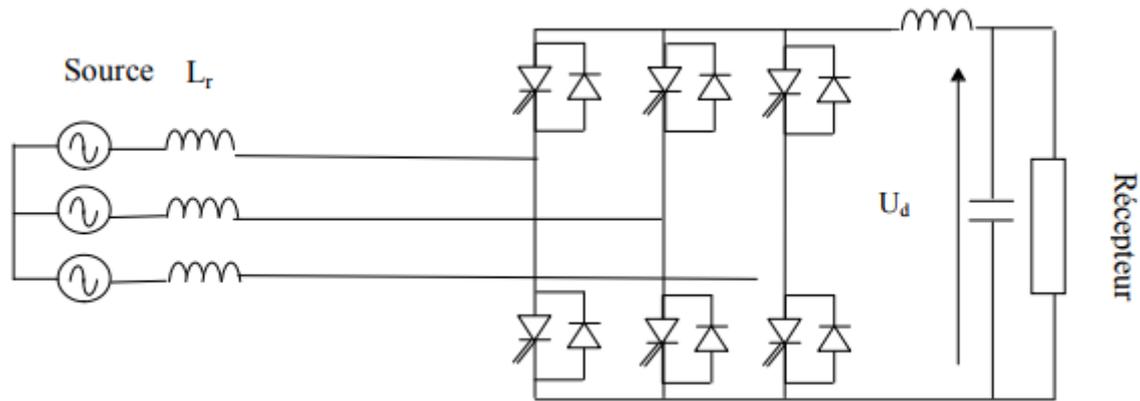


Figure I.20:Redresseur du courant [5]

I.15 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes perturbations affectant les réseaux électriques est les problématiques des harmoniques, les origines des harmoniques. Nous avons exposé les effets, les causes et les conséquences des harmoniques sur le réseau électrique. Ensuite, Pour minimiser ces effets, nous avons introduit différentes solutions traditionnelles et modernes ont été exposées. L'utilisation des filtres actifs se présente comme une meilleure solution pour tous types de perturbations qui apparaissent dans le réseau électrique.

II.1 Introduction :

L'électricité, forme propre de l'énergie par excellence, est aujourd'hui produite, à près de 80 %, à partir de combustibles fossiles (pétrole, gaz,...) ou fissiles (nucléaire), ressources épuisables et polluantes à la fois. Pour un développement durable, les ressources énergétiques renouvelables sont « propres » et inépuisables, donc capables à long terme de satisfaire la majeure partie de nos besoins. [36].

La prise de conscience que les coffres forts de la nature s'épuisent inexorablement est récente, mais les comportements sont longs à modifier. Sauf pour le bois, il faut des millions d'années pour que la nature fabrique des combustibles comme le charbon, le pétrole, ou le gaz naturel. Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse ; leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes : ce sont les énergies de l'avenir [37].

Les cellules photovoltaïques (PV) ouvrent la possibilité de produire de l'électricité directement à partir du rayonnement solaire, sans nécessiter ni pièces mobiles, ni production de chaleur et sans entraîner de pollution atmosphérique, locale ou globale [38]

Ainsi que l'énergie produite est continu donc elle peut être stocké facilement pour l'utilisé une autre fois.

II.2 L'énergie solaire :

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 4 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- L'énergie solaire thermique: qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.
- L'énergie solaire photovoltaïque: qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans

de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [39].

II.3 Notions préliminaires sur le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0.2 μ m) à l'infrarouge lointain (2.5 μ m). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise [40].

Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons, il est nécessaire d'introduire une notion de masse d'air (AM) elle correspond à la longueur relative du parcours à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct. La masse d'air est exprimée un multiple du trajet parcouru en un point au niveau de la mer, le soleil étant directement à l'aplomb [41].

Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales

II.3.1 Rayonnement direct

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère. [42].

II.3.2 Rayonnement diffus :

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère. [42].

II.3.3 Rayonnement réfléchi

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé Albédo (ϵ) $0 \leq \epsilon \leq 1$ [40].

II.3.4 Rayonnement global

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi.

II.4 Terminologie « photovoltaïque »

Le terme « photovoltaïque » vient du grec « phos, photo » qui désigne la lumière et de « voltaïque », mot dérivé du physicien italien Alessandro VOLTA, connu pour ses travaux sur l'électricité. Une cellule photovoltaïque est donc une machine à produire de l'électricité sans mouvement circulaire, sans vapeur d'eau sous pression, sans turbine, sans refroidissement (sauf dans le cas des systèmes à concentration). Dès qu'elle est éclairée par de la lumière, elle se met à fonctionner. [43]

II.4.1 Historique :

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par Antoine Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique

L'énergie photovoltaïque s'est développée dans les années 50 pour l'équipement de vaisseaux spatiaux et le premier a été lancé dans l'espace en 1958. C'était le seul procédé non-nucléaire d'alimenter des satellites en énergie. Les images satellites reçues par votre téléviseur ne vous parviennent que grâce à l'énergie photovoltaïque. Pendant les années 70 et 80, des efforts ont été faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. La croissance de l'industrie fut spectaculaire. Depuis le début des années 80, la quantité de modules photovoltaïques expédiés par an (mesurés en MW-Crêtes) a augmenté et le prix des modules (par Watt-Crête) diminuait au fur et à mesure que le nombre de modules fabriqués augmentait. Bien que le prix se soit quelque peu stabilisé, la quantité de modules photovoltaïques expédiés chaque année continue d'augmenter. [43]

II.4.2 les dates importantes :

- 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque
- 1883 : Frits réalise des cellules solaires de grande surface à base de Se
- 1954 : Des rendements de 6% sont obtenus : Si (Bell Lab, USA) and Cu₂S/CdS (Air Force, USA)
- 1955 : Hoffman électroniques (USA) propose des cellules Si à 2 % de rendement à \$1500/W
- 1958 : Kearns et Calvin ont démontré l'effet photovoltaïque d'une cellule à base de MgPh
- 1970 : Première cellule solaire à hétéro structures GaAs élaborée par Alferov, Andree et al. en URSS
- 1973 : Première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université Delaware, USA ; à base de Cu₂S
- 1980 : La première cellule à base de Cu₂S/CdS délivrant un rendement > 10%
- 1982 : Première unité de production de 1 MW (Californie, USA) avec des cellules Arco Si

- 1985 : Les cellules à base de Si donnent un rendement $> 20\%$ sous le rayonnement solaire
- 1994 : Des rendements $> 30\%$ avec des cellules à concentration multijonctions à base de GaInP/GaAs (NREL, USA)
- 1996 : Les cellules solaires hybrides à colorants atteignent un rendement de 11% (EPFL, Switzerland)
- 1998 : Cellules couches minces Cu(InGa)Se₂ atteignent un rendement de 19% (NREL, US)
- 2002 : Le photovoltaïque installé mondial cumulatif atteint 2000 MW
- 2007 : Cellules solaires organiques en structure tandem avec un rendement de $6,5\%$ (UCSB, USA)
- 2008 : Un rendement homologué de $5,9\%$ sur une surface active de 2 cm^2 obtenu par Heliatek, BASF et l'Institut de photovoltaïque appliquée (IAPP) de l'Université technique de Dresde (Allemagne)
- 2009 : Cellule polymère simple jonction avec un rendement de $6,1\%$ à base de PCDTBT et PC70BM (UCSB, USA)
- Cellule polymère simple jonction avec un rendement de $7,4\%$ à base de PBDTTT-CF et PC70BM (Solarmer Energy Inc., University of California, University of Chicago, USA) [43]

II.5 État du l'énergie photovoltaïque en Algérie

Le monde présente un déficit en énergie électrique devant une demande qui ne cesse de croître de manière exponentielle [45] (Exemple de l'Algérie dans la figure II.1). Avec le coût élevé relatif à la réalisation d'une centrale classique de production d'énergie électrique y compris le réseau de transport, l'énergie photovoltaïque (PV) peut contribuer à résoudre ce problème, par la possibilité de produire une électricité propre, plus accessible et très adaptée à la production décentralisée pour les régions isolées et dotées d'un fort potentiel énergétique solaire. L'objectif de l'Algérie est d'atteindre une contribution des énergies renouvelables de l'ordre de 5% dans le bilan national d'ici à 2015 et 40% à l'horizon 2030 (Figure II.2) à travers les filières, photovoltaïque, thermique solaire et éolienne [44].

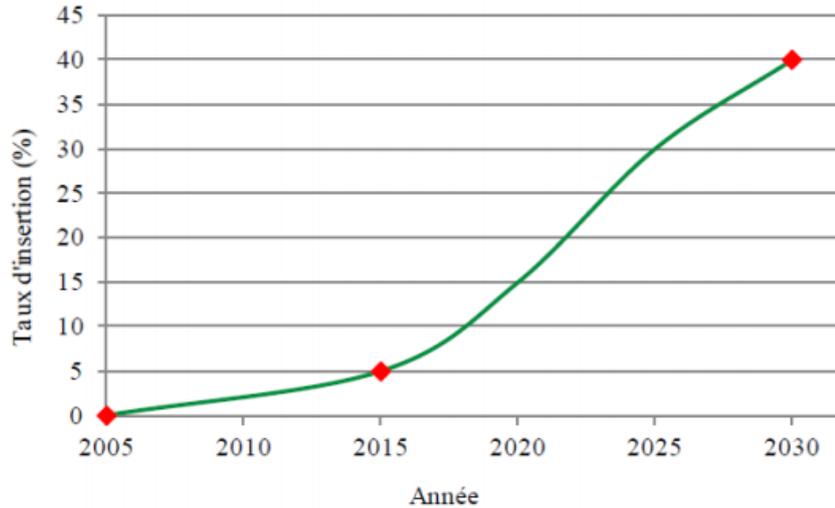


Figure II.1:Évolution de la consommation de l'énergie électrique en Algérie [44].

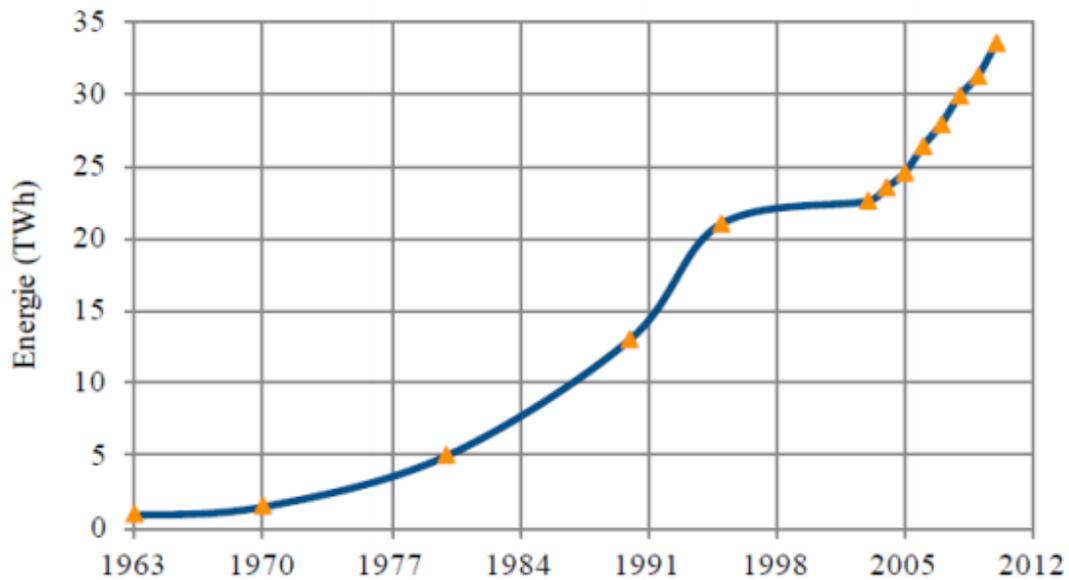


Figure II.2: Perspectives d'insertion des énergies renouvelables dans la production nationale [44]

Les perspectives du secteur de l'énergie en Algérie préconisent l'accroissement de la contribution des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national. La production d'électricité par les énergies renouvelables à l'échelle nationale représente 0,028 % du bilan de production en 2005 [44]. Pour le photovoltaïque, en 2007 le parc solaire en fonctionnement est de 108 installations PV, d'une puissance crête de 453 kWc. À partir de 2007, dans le cadre

de l'électrification rurale, il est prévu l'électrification de 500 foyers par an à raison d'une moyenne de 0,75 kW par foyer [44].

La figure II.3 ci-dessous montre la distribution de l'électrification solaire PV existante et programmée entre 2005 et 2009 [44].

L'avantage d'une production décentralisée est de produire de l'énergie directement sur les sites de consommation pour une alimentation locale. Dans ce cas, l'insertion du PV a un impact sur le développement, l'économie et l'environnement.

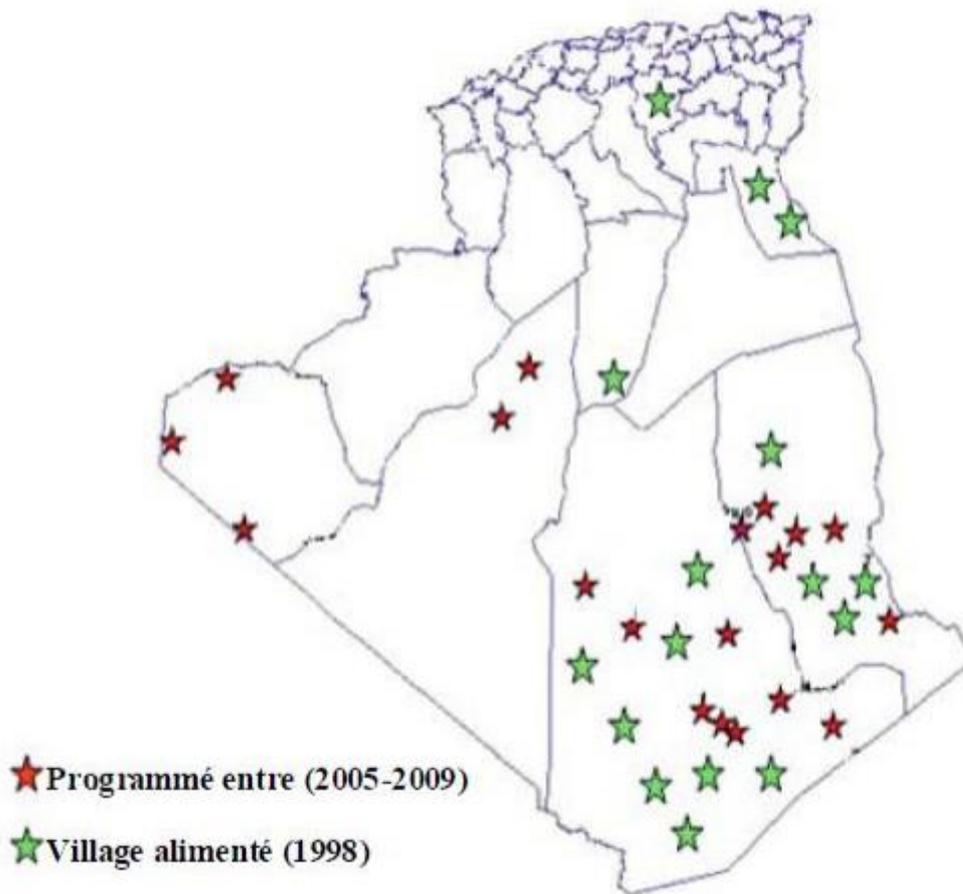


Figure II.3: Installation du photovoltaïque en Algérie [44].

II.6 Description de la cellule

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

Les photopiles ou cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs ayant des propriétés intermédiaires entre conducteurs et isolants.

Le matériau de base est dans la plupart des cas le silicium. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, poly-cristalline ou monocristalline. D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de gallium (AsGa), Tellure de cadmium (CdTe) [45].

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

- Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type "N" (ex : dopage au phosphore).
- Si l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le Silicium, le matériau sera déficitaire en électrons : il sera dit de **type "P"** (ex : dopage au bore).[45]

Une cellule solaire sera obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposées (jonction PN). Au voisinage de la jonction, un champ électrique apparaît provoqué par le déséquilibre de charges. Il va contribuer à drainer les électrons qui auront été détachés par l'énergie des photons (grains de lumière) incidents. Pratiquement, la cellule PV est composée de plusieurs couches minces figure(II.4) à savoir [45]:

- Une couche "antireflet" sur la face avant dont le but est de faciliter au maximum la pénétration d'un maximum de photons à travers la surface de réduire les pertes par réflexion.
- Une grille conductrice avant " collectrice des électrons " qui doit également être liée au silicium et ne pas être sensible à la corrosion.
- Une couche dopée N avec porteurs de charge libres négatifs (électrons).
- Une couche dopée P avec porteurs de charge positifs (trous).
- Une surface de contact conductrice en métal (collectrice des électrons), ayant une bonne conductivité ainsi qu'un bon accrochage sur le silicium [45].

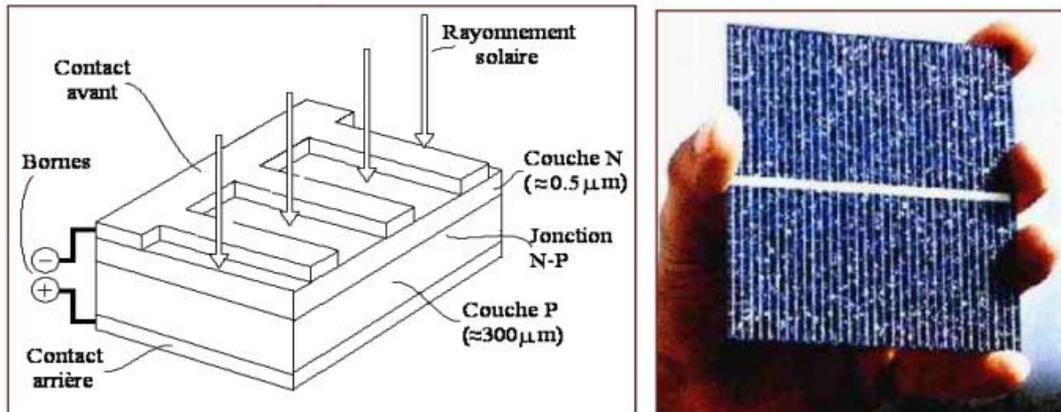


Figure II.4:Description d'une cellule [45]

II.6.1 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement des cellules PV repose sur un effet physique appelé: l'effet photovoltaïque, qui se traduit par la transformation directe de la lumière en électricité (courant continu CC). Son principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie ($h\nu$), si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap de ce semi-conducteur ($E_g = E_C - E_V$) l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron-trou dans différents points de la jonction la Figure (II.5) Donc toute particule minoritaire près de la jonction a une probabilité très forte pour la traverser et la jonction s'oppose uniquement le passage des porteurs majoritaires [45]

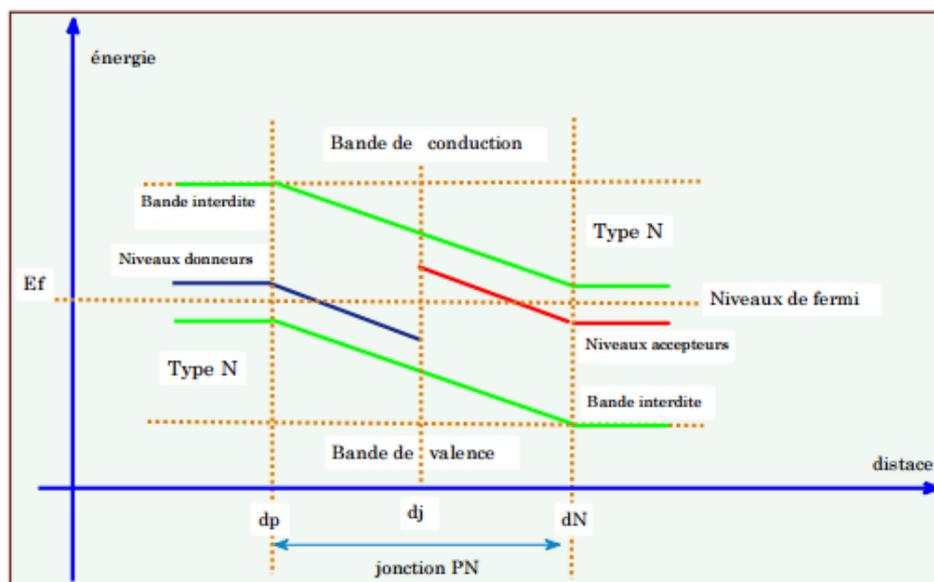


Figure II.5:Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction [45]

Si les photons ont une énergie très supérieure à E_g ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. L'excès d'énergie sera transmis sous forme de phonons au réseau cristallin puis perdu en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction. Si les photons ont une énergie inférieure E_g ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque.[45]

La longueur d'onde correspondant au maximum de photons est de l'ordre de 650 nm - 670nm L'expression qui exprime l'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$E = h * c / \lambda \quad (\text{EqII.6})$$

h : La constante de Planck

λ :La longueur d'onde

c : La vitesse de la lumière

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte value à Albert Einstein le prix Nobel en 1905 [45].

I.6.2 Type des cellules photovoltaïques

Dans cette partie, nous présentons les différentes cellules photovoltaïques en donnant leurs caractéristiques principales selon le type de matériaux utilisés

a- Cellules inorganiques :

- **Cellule silicium**

Le silicium poly cristallin présente une couleur grise. Il est constitué d'une mosaïque de cristaux monocristallins de silicium, d'orientation et de tailles différentes (la figure II.6 .a).

Le silicium monocristallin ainsi obtenu, sous forme de lingots circulaires, est constitué d'un seul type de cristal et présente une couleur uniforme grise (la figure II.6 .b).

Le silicium monocristallin, plus élaboré que le silicium polycristallin, présente un rendement (conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique) supérieure. Sa production demande cependant une plus grande dépense énergétique:[46]

- **Cellules en couches minces :**

D'autres filières sont en cours de développement dans le secteur photovoltaïque inorganique comme les cellules dites de seconde génération composées de couches minces de matériaux inorganiques (la figure II.6 .c).Les matériaux photo actifs les plus utilisés en couche minces sont le silicium amorphe (a-Si), le diséléniure de cuivre indium (CIS), le

tellure de cadmium (CdTe). L'avantage principal des cellules photovoltaïques composées de couches minces de matériaux inorganiques est le faible coût de production par rapport à celui des cellules composées de silicium épais [47]

b- Cellules de Grätzel

La couche active de ces cellules est composée d'une matrice poreuse de **nano-cristallites** d'oxyde métallique semi-conducteur (**TiO₂, ZnO, SnO₂, Nb₂O₅**) recouverte d'une monocouche de colorant (complexe de ruthenium ou de ditetrabutylammonium). En absorbant les photons le colorant va libérer un électron dans la bande de conduction de l'oxyde métallique. Le colorant oxydé va être ensuite réduit par l'électrolyte liquide qui est en général une solution d'iodure (I_2). Ces cellules ont un coût de production un peu plus élevé que les cellules photovoltaïques tout polymère mais les rendements de conversion photoélectriques avoisinent les 10% [47]

c- Cellules organiques :

Les cellules connaissent un développement rapide et leur rendement de conversion ont franchi récemment la barre des 8%. Les matériaux les plus répons dans le domaine du photovoltaïque organique à base de polymères est le mélange poly(**3-hexylthiophene**) (P3HT) le **6,6-phenyl-C61-butyracide méthyle ester(PCBM)** (fig.I.6.d) [48].

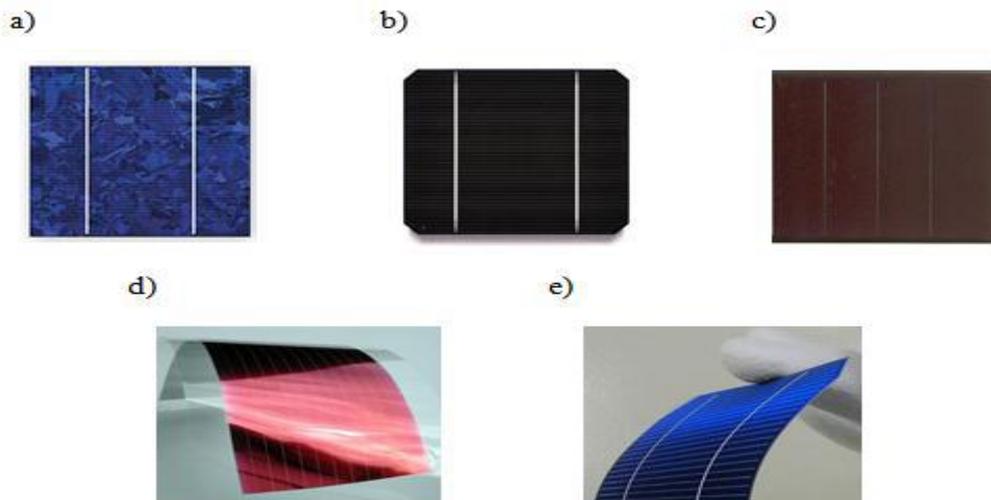


Figure I.6: Des cellules photovoltaïques [47]

d- Cellules hybrides

Les cellules hybrides sont composées d'un semi-conducteur organique et d'un semi-conducteur inorganique comme l'oxyde de titane (TiO₂), l'oxyde de zinc (ZnO) ou le

sélénure de cadmium (CdSe). Le principal avantage de ces cellules par rapport aux cellules organiques est l'absence de 6,6-phenyl-C61-butyric acide méthyl ester (PCBM) ou de fullerène (C60) qui sont les matériaux les plus sensibles à l'oxygène, ce qui permet d'améliorer nettement la stabilité des cellules à l'air ambiant (la figure II.6 .e). De plus ces cellules bénéficient des qualités des matériaux organiques comme la souplesse et la facilité de mise en forme et des qualités des matériaux inorganiques comme les mobilités élevées des charges électriques [47].

II.7 Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque

a- Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connectée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant selon (la figure II.6), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire e idéale [49]

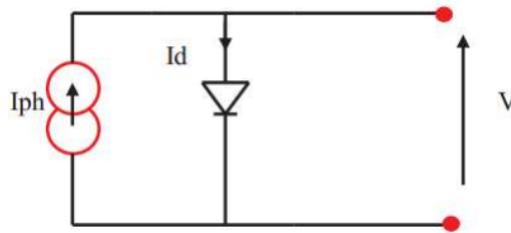


Figure II.7:Schéma équivalent d'une cellule idéale [49]

- Les équations retenues de ce modèle sont

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d \quad (\text{EqII.2})$$

- Le courant I_{ph} est assimilé au courant I_{sc} avec $V_{pv} = 0$, courant de court-circuit obtenu en court ci cuitant la charge.

$$I_{ph} = I_{sc} = \frac{E}{E_{ref}} \quad (\text{EqII.3})$$

E: L'éclairement absorbé par la cellule

E_{ref} : L'éclairement de référence (1000 w/m²)

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{v_t}} - 1 \right) \quad (\text{EqII.4})$$

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode

$$I_T = \frac{NKT}{q} \quad (\text{EqII.5})$$

V_t : Tension thermique

N : Facteur d'idéalité de la photopile

K : Constant de Boltzmann (1,38.10⁻²³J/K)

q : Charge de l'électron (1,6.10⁻¹⁹C)

b- Cas d'une cellule réelle

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la figure (II.8). Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (R_{sh}) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_s) [55]

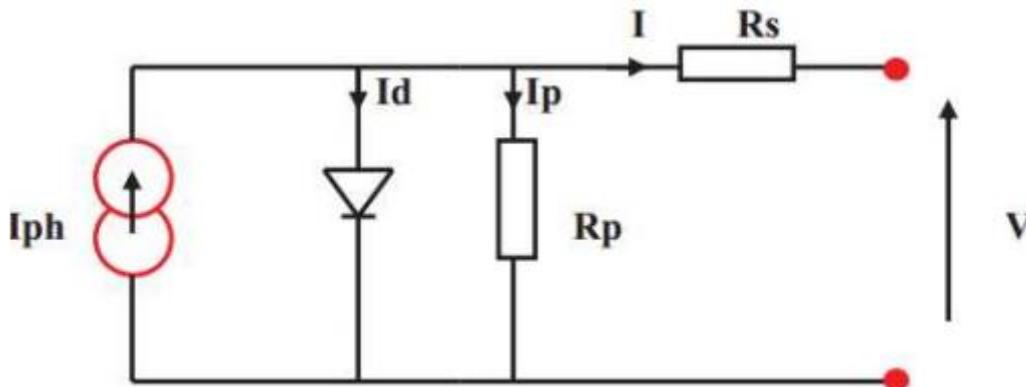


Figure II.8:Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle [55]

Nous avons utilisé le modèle mathématique du module solaire à exponentiel simple.

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d I_p \quad (\text{EqII. 6})$$

I_{PV} : Courant générer par la cellule photovoltaïque

I_{ph} :Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)

I_d :Le courant circulant dans la diode

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (\text{EqII.7})$$

$$I_0 = I_{0r} \left(\left(\frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\left[\frac{E_g}{BK} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right]} - 1 \right) \quad (\text{EqII.8})$$

I_{0r} : est le courant de court- circuit de la cellule à la température de référence T_n et l'éclairement de référence

Chapitre II : Etude d'un système photovoltaïque

T : Température de la jonction des cellules PV [°K]

Tn : Température de référence des cellules PV [°K]

B: facteur d'idéalité de la jonction

Eg : Énergie de gap [ev]

Rs: résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi- conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules

Vpv: La tension de sortie

Ip: Le courant circulant dans la résistance RP

Rp: Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule. Sont calculées par une boucle de programmation

En substituant les équations (II.6 ; II.7) dans l'équation (II.5) le courant IPV devient Donc :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V_{PV} + I_{PV} * R_S}{V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{PV} + I_{PV} * R_S}{R_P} \quad (\text{EqII.9})$$

Pour résoudre cette équation on utilise le block 'Algébriques Contraint' qui est intégré dans la bibliothèque 'Simulink/Math Opération'

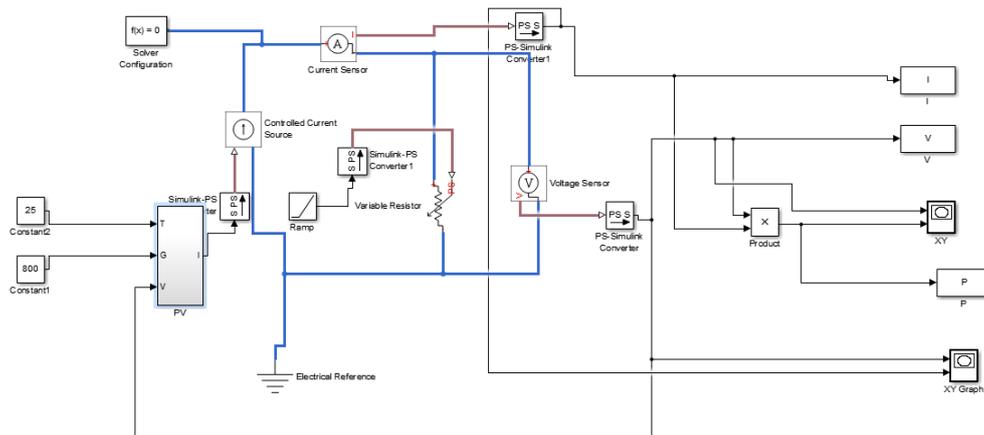


Figure II.9:Schéma de simulation d'un pv

Les paramètres de simulation sont donnés dans le tableau (I-1) et les autres paramètres sont reportés en détails:

Tableau II.1: paramètres de simulation

La tension en circuit ouvert Voc	Voc=32.9
Courant de court circuit	$I_{sc} = 8.21$
facteur d'idéalité de jonction p-n;	a=1.3
bande interdite du semi-conducteur utilisé dans la cellule.	Eg=1.12
Résistance Shunt	$R_{sh} = 415.405$

Tableau II.2: Les données utilisé dans les blocs

Parameters	Valeurs numériques
K	1.38065e-23
Ns	54
q	1.602e-19
Tn	298
Eg	1.12
Rs	0.221
Voc	32.9
I_{sc}	8.21
Ki	0.0032

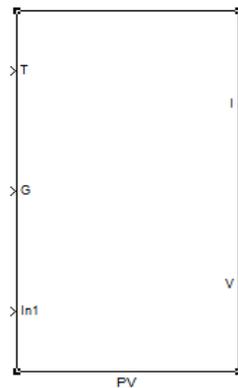


Figure I.10: Bloc d'un PV sur simulink

II.8 Regroupement des cellules

II.8.1 Regroupement en série

Une association de (N_s) cellule en série (figure II.11) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électriques d'une association série de (N_s) cellules [50]

$$V_{coNs} = N_s \times V_{co} \quad (\text{EqII.10})$$

$$I_{cc} = I_C \quad (\text{EqII.11})$$

V_{coNs} : La somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.

I_{ccNs} : Courant de court circuit de N_s cellules en série.

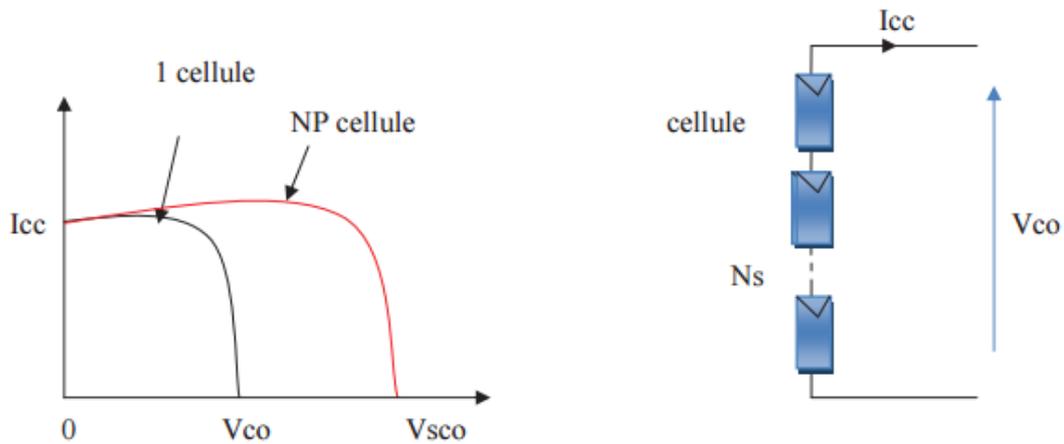


Figure II.11:Caractéristique courant tension de N_s cellule en série [50]

II.8.2 Regroupement en parallèle :

Une association parallèle de (NP) cellule (la figure II.12) est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [51].

$$I_{ccNP} = NP \times I_{sc} \quad (\text{EqII.12})$$

$$V_{co} = V_{coNP} \quad (\text{EqII.13})$$

I_{ccNP} : la somme des courants de cout circuit de (NP) cellule en parallèle

V_{coNP} : Tension du circuit ouvert de (Np) cellules en parallèle

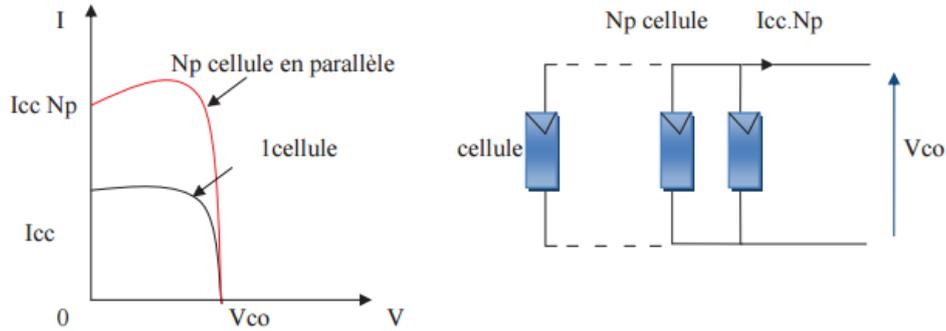


Figure II.12:Caractéristique courant tension de (N_p) cellule en parallèle [50]

II.8.3 Regroupement (série et parallèle)

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous, ce qui peut être généralisé sur une gamme de N_s modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant. Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque [52].

II.9 Module photovoltaïque :

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module (la Figure II.13 -a). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène -vynilacétate) (la Figure II.13 -b) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène [53].

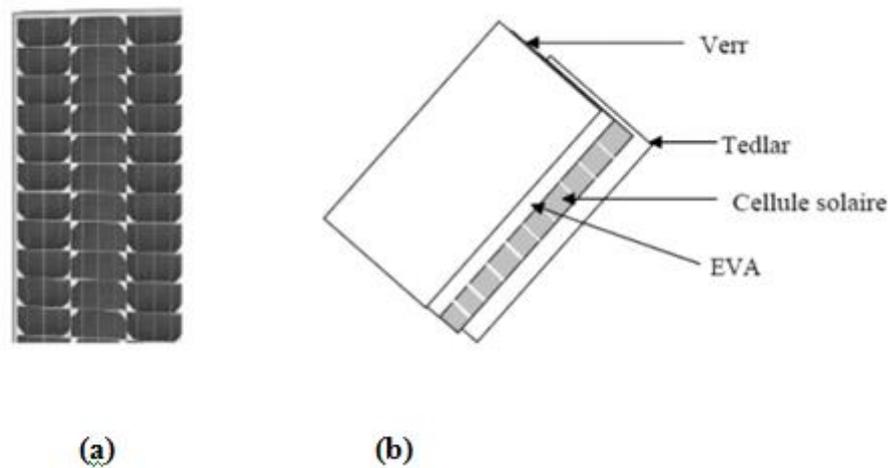


Figure II.13:Module photovoltaïque [53]

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation. A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant 2 diodes antiparallèles(la Figure II.14). Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre [54]



Figure II.14:Boîte de jonction [53]

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques –
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

Les modules en silicium monocristallin (c-si, 64% de marché), poly cristallin ou multi cristallin (xc-Si, 28% du marché) ou silicium amorphe (a-si, 13% du marché), délivrent des tensions normalisées (12, 24, 48) et des puissances entre 10 et 100 Wc (watt-crête : puissance obtenue pour l'ensoleillement maximal) [53]

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, le courant de sortie, et la puissance seront proportionnels à la surface du module. Ils ont une efficacité de conversion (énergie électrique produite/énergie solaire incidente) de l'ordre de 10 à 20% [56]

II.9.1 Caractéristiques d'un module [56]

Les modules sont généralement des parallélépipèdes rectangles rigides minces (quelques centimètres d'épaisseur), dont les caractéristiques suivantes :

- ◆ **La puissance de crête, P_c** : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m²).
- ◆ **La caractéristique $I=f(V)$** : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- ◆ **Tension à vide, V_{co}** : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- ◆ **Courant de court-circuit, I_{cc}** : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- ◆ **Point de fonctionnement optimum, $P_m (V_m, I_m)$** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = V_m \cdot I_m$
- ◆ **Rendement** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- ◆ **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{co} \cdot I_{cc}$.

II.10 Panneau photovoltaïque :

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [40].



Figure II.15: Panneau photovoltaïque [40].

II.11 Générateur photovoltaïque

Le terme générateur photovoltaïque GPV est utilisé pour désigner, selon l'application considérée, un module ou un panneau PV. Toutefois, il peut faire allusion au système PV tout entier. Pour la suite de ce document, on utilisera le terme GPV pour désigner un module ou un panneau PV [57]

II.12 Classification d'un système solaire photovoltaïque

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

- Autonome
- Hybride
- raccordée au réseau

II.12.1 Système autonome

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Comme on le remarque sur (la Figure II.16) qui représente l'exemple d'un système PV autonome, un système de stockage est associé aux générateurs PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de la production. Ce système de stockage représente une part très importante du coût de l'installation, et ces conditions de fonctionnement sont très contraignantes. Par conséquent, des systèmes de gestion de l'énergie ont été développés afin d'optimiser la durée de vie du système de stockage et de réduire les coûts de fonctionnement [58].

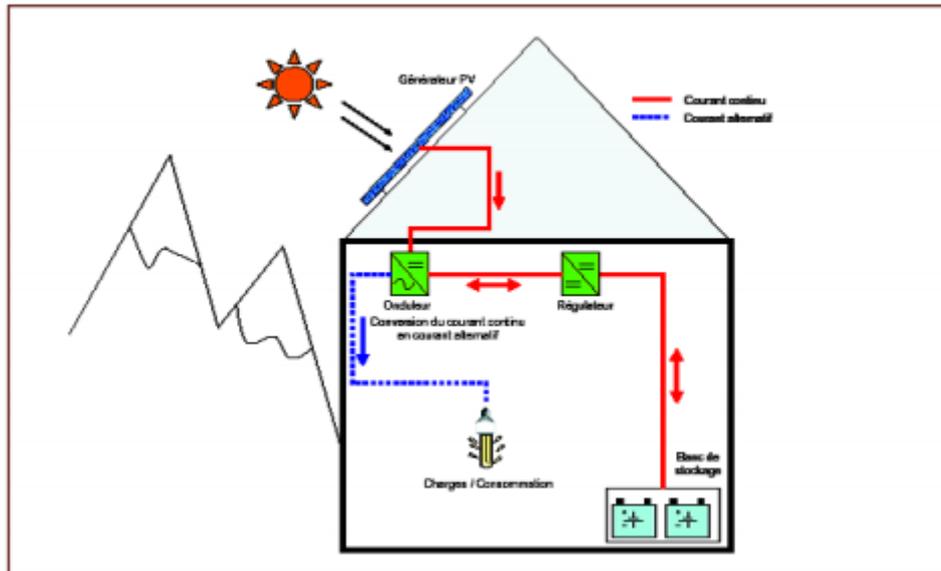


Figure II.16:Exemple de la structure d'un système PV autonome [58]

II.12.2 Système hybride

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée [59].

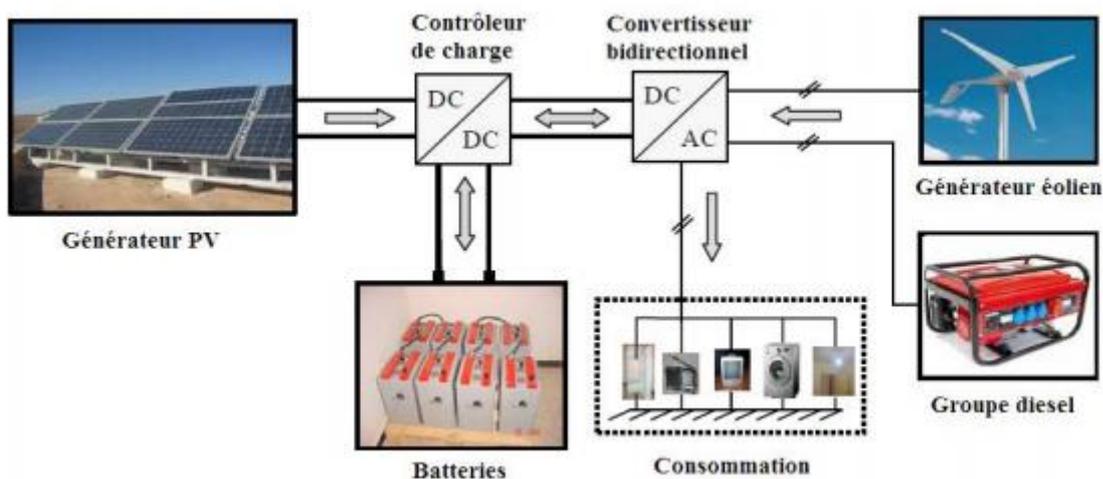


Figure II.17: Système photovoltaïque hybride (PV-éolienne-groupe diesel) [59].

II.12.3 Système PV raccordée au réseau

Une installation PV peut être connectée en parallèle avec le réseau d'électricité. Les panneaux solaires sont connectés en série pour former des « strings », eux même reliés à un onduleur. La tâche de l'onduleur est de transformer le courant continu sortant des panneaux

en courant alternatif. Chaque onduleur est choisi en fonction de la puissance des panneaux et peut accueillir un ou plusieurs strings [45].

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

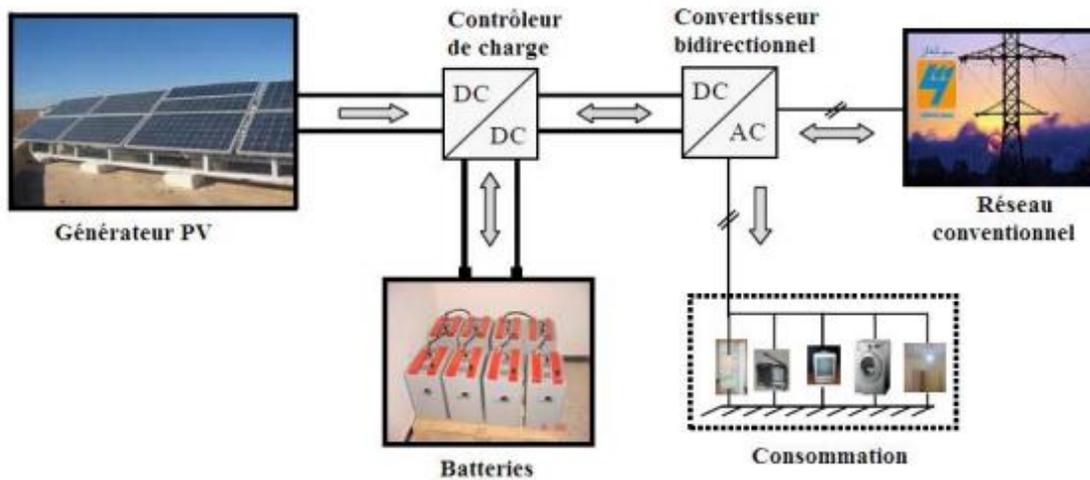


Figure II.18: Système photovoltaïque connecté au réseau [64].

II.13 Caractéristiques tension-courant et puissance-tension sous différentes conditions climatiques

II.13.1 Influence de la température

L'équation de Boltzmann donne $I_{SC} = I_0 \cdot \exp\left(q \cdot \frac{v_0}{kT}\right)$, l'expérience montre que la tension de circuit ouvert d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule [60,61].

Nous offrons ci-dessous les caractéristiques I-V et P-V (figure II.19 et II.20) d'un module photovoltaïque, pour un niveau d'ensoleillement G fixe, et pour différentes températures :

Pour (la figure II.19), on remarque que la valeur du courant électrique est liée à la température, ce qui augmente légèrement l'intensité du courant avec l'augmentation de la température, d'autre part, on remarque la basse tension dans le circuit ouvert. Lorsque la température augmente, elle réduit la tension du circuit ouvert, ce qui s'accompagne d'une diminution de la puissance du générateur photovoltaïque

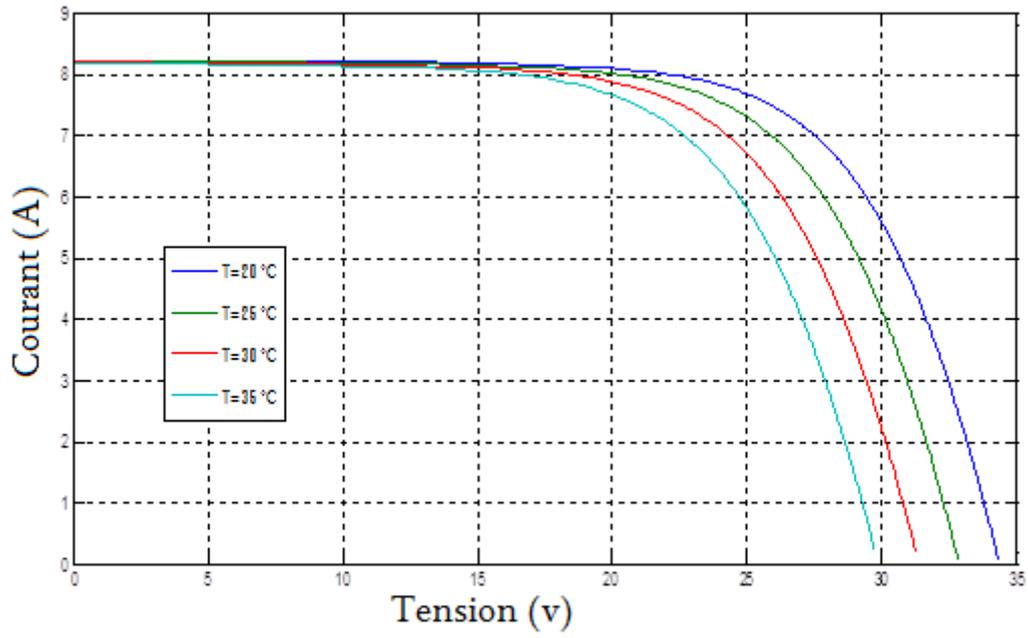


Figure II.19:Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température.

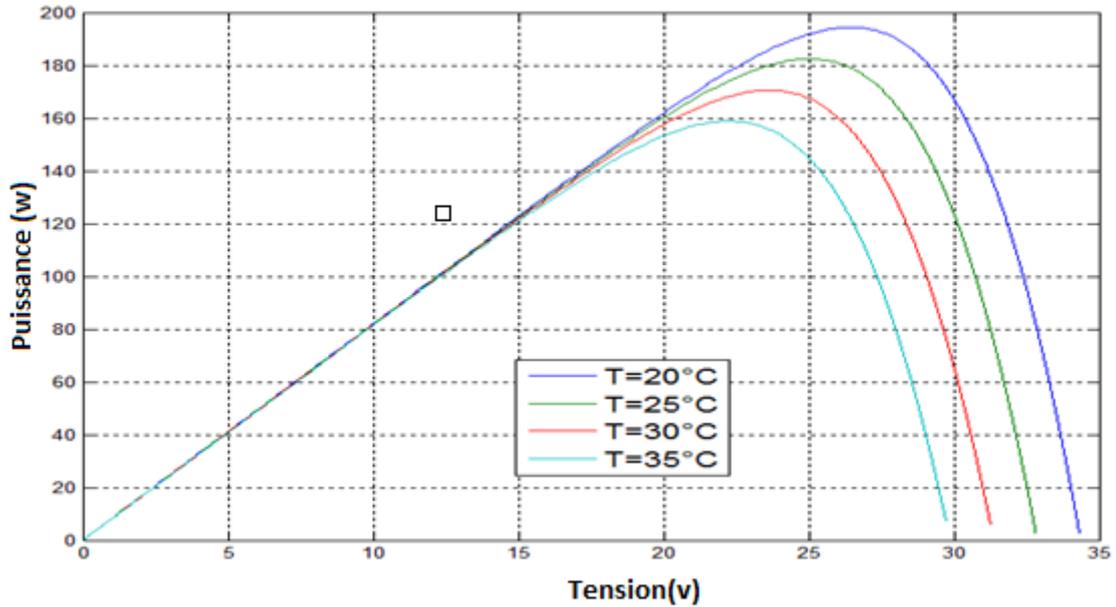


Figure II.20:Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de la température.

II.13.2 Influence de l'éclairement

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure II.21 représente la caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes. Le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement [59].

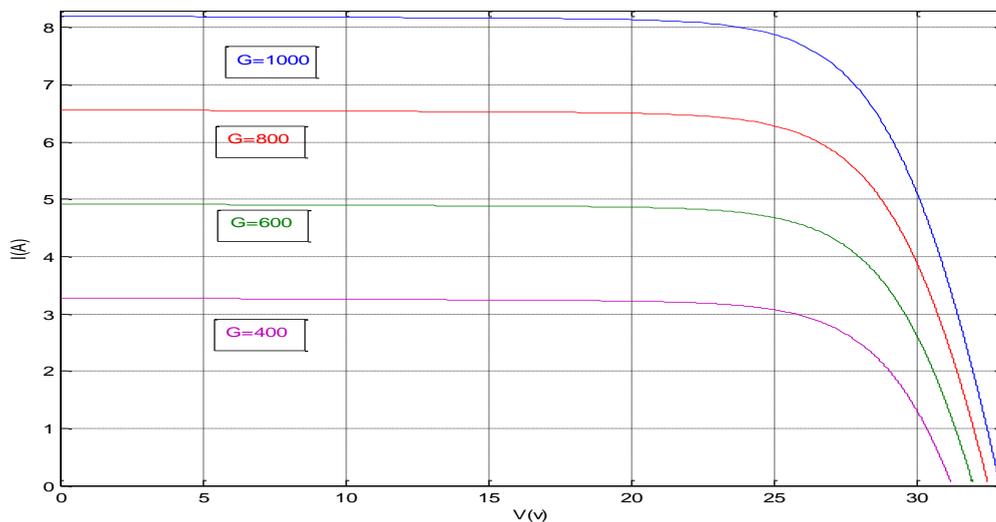


Figure II.21:Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.

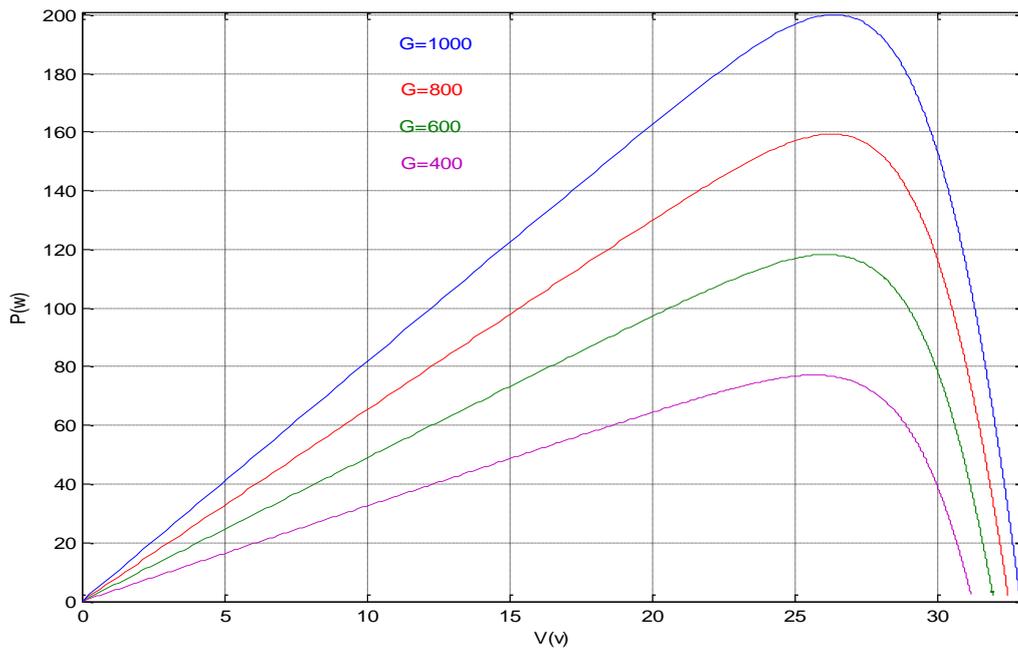


Figure II.22:Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.

La figure II.22 illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P(V)$.

II.14 Le champ photovoltaïque (ou le GPV ou générateur photovoltaïque)

Comme montrée sur. (La figure II.24) le GPV est un assemblage mécanique de panneaux intégrés avec une structure de support, une base et d'autres composants (comme les diodes dites d'anti retour et les diodes dites BY PASS et les fusibles), comme requis, pour former une unité de production de puissance à courant continu.

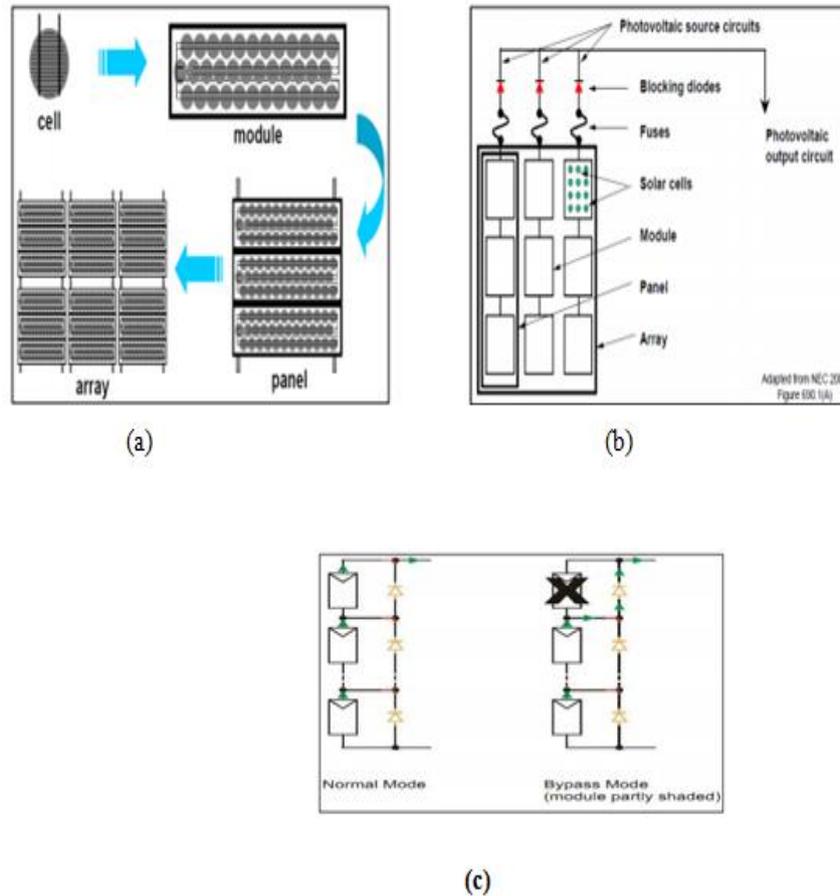


Figure II.23: Principaux composants d'un GPV (a) Illustration et différenciation entre cellule (PV), module (PV), panneau (PV) et Générateur (PV) (b) Identification des diodes anti retour et des fusibles (c) Identification des diodes BY PASS [62]

a- La diode anti-retour

Elle sert à protéger le panneau solaire contre le courant inverse pouvant entrer dans le panneau. Un courant inverse voudrait dire que le panneau solaire se comporte en consommateur au lieu de producteur d'électricité. Or un panneau solaire n'est pas fait pour cela et ce courant inverse peut l'endommager. Dans toute diode il y a une faible chute de tension. Cette chute de tension est de l'ordre de 0,7v pour les diodes à substrat silicium, 0,3 V pour le germanium et les diodes Schottky. (Des diodes qui ont un seuil de tension directe très bas et un temps de commutation très rapide). Il faut choisir le modèle de diode en fonction de la puissance du panneau solaire. Il faut que cette diode résiste au courant maximum pouvant être produit par le panneau I_{cc} (courant court-circuit). Si on ne connaît pas I_{cc} (on peut l'estimer grâce à cette simple formule: [26])

$$I_{max} = \frac{P_{max}}{V_{MAX}} \quad (\text{EqI.14})$$

P_{max} : C'est la puissance au point de fonctionnement maximal du panneau solaire.

V_{MAX} : C'est la tension de fonctionnement maximal du panneau solaire

La diode se place dans le boîtier de raccordement (ou boîtier de jonction) à l'arrière du panneau solaire.

b- La diode BY PASS

La mise en série des cellules peut être dangereuse lorsque l'une d'entre elles se retrouve à l'ombre. Elle va s'échauffer et risque de se détruire. En effet, une cellule "masquée" voit l'intensité qui la traverse diminuer. De ce fait, elle bloque la circulation de l'intensité "normale" produite par les autres modules. La tension aux bornes de cette cellule "masquée" augmente, d'où apparition d'une surchauffe. C'est l'effet d'auto polarisation inverse. Une telle cellule est appelée "Hot spot"[61]

Pour supprimer ce problème et protéger la cellule « masquée », on place des diodes «BY PASS» en antiparallèle sur 18 ou 24 cellules de façon à court-circuiter les cellules ombrées. Pour supprimer ce problème et protéger la cellule « masquée », on place des diodes « BYPASS» en antiparallèle sur 18 ou 24 cellules de façon à court-circuiter les cellules ombrées.

- 1 diode : 100 % du module est en BY-PASS
- 2 diodes : 50 % du module est en BY-PASS,
- 3 diodes : 33 % du module est en BY-PASS.

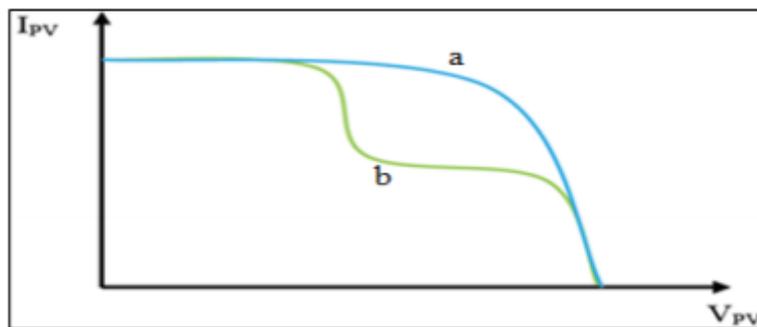


Figure II.24: Effet de la diode by-pass sur la caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque a) Caractéristique d'un générateur PV lorsque les deux sous-réseaux sont identiques, sans effet des diodes by-pass. b) Caractéristique d'un générateur PV[61]

II.15 Convertisseur de puissance de système photovoltaïque

Par convention, des systèmes de conversion photovoltaïques reliés au réseau se composent de convertisseur DC-DC et d'onduleur. Le convertisseur DC-DC est contrôlé pour la poursuite du point de puissance maximum du panneau photovoltaïque et l'onduleur est contrôlé pour produire le courant de telle manière que le courant de système ait une faible

déformation totale d'harmonique et il ait en phase avec la tension de réseau. Cette partie décrit certains convertisseurs d'électronique de puissance et les techniques de commande et de conversion (DC-DC).

II.15.1 Convertisseur DC-DC pour les systèmes d'énergie solaire

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé [63].

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs. Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Les trois configurations de base sont. [63] :

- Convertisseur dévolteur (ou Buck)
- Convertisseur survolteur (ou boost)
- Convertisseur dévolteur- survolteur (Buck-boost)

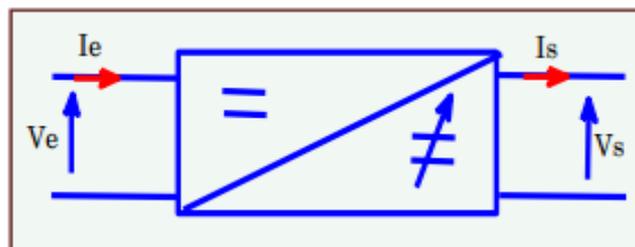


Figure I.25: Symbole d'un convertisseur DC-DC

II.15.1.1 Hacheur dévolteur (Buck)

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur (Buck) ou hacheur série. (La figure II.27) présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion $M = \frac{V_o}{V_i}$ change avec le rapport cyclique du commutateur. Savoir le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle mathématique [63].

Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie

Chapitre II : Etude d'un système photovoltaïque

(la figure II.28) montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur dévolteur dans les deux cas : l'interrupteur fermé pendant d, T_s , et l'interrupteur ouvert pendant $(1 - d)T_s$

T_s : Est la période de commutation qui est égale à $1/f_s$

Le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0, 1]$) figure (II.26).

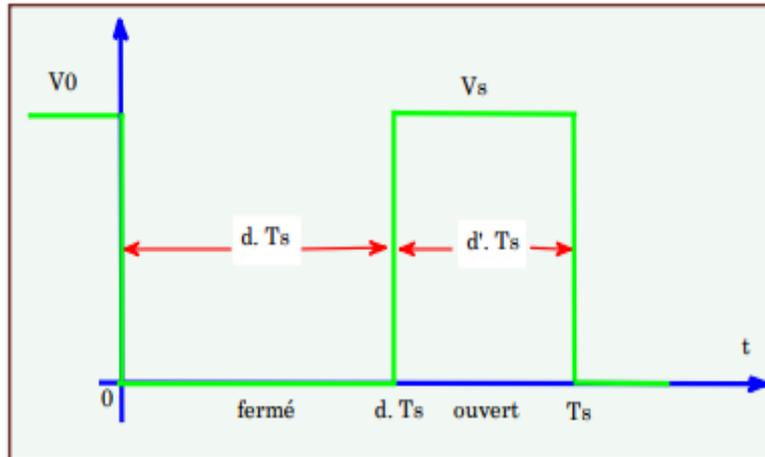


Figure II.26:Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur [63]

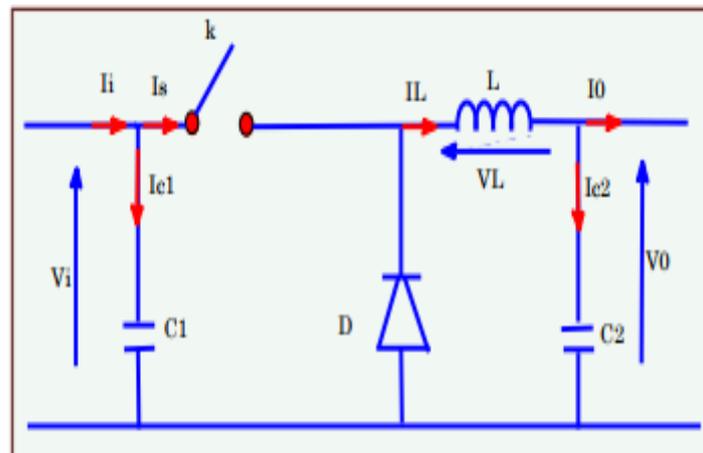


Figure II.27:Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur [63]

En appliquant les lois de Kirchoff sur les deux circuits de la figure (II.28), on obtient les systèmes d'équations suivants :[63]

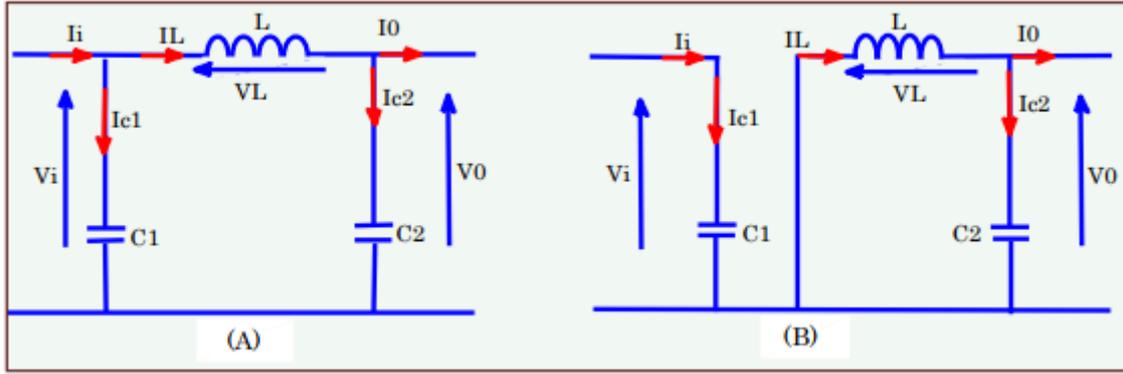


Figure II.28:Schémas équivalents du hacheur dévolteur (A) : K fermé, (B) : ouvert [63]

- Pour la première période d, T_S

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{cases} \quad (\text{EqII.15})$$

- Pour la deuxième période $(1 - d)T_S$:

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = -V_o(t) \end{cases} \quad (\text{EqII.16})$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période, on utilise généralement l'expression suivante [64]

$$\left(\frac{dx}{dt}\right) T_S = \frac{dx}{dt_{dT_S}} dT_S + \frac{dx}{dt_{(1-d)T_S}} (1 - d)T_S \quad (\text{EqII.17})$$

En appliquant la relation (I.16) sur les systèmes d'équations (II.15) et (II.16), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$\begin{cases} C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} T_S = dT_S(i_i - i_L) + (1 - d)T_S i_i \\ c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} T_S = dT_S(i_L - i_o) + (1 - d)T_S(i_L - i_o) \\ L \frac{di_L}{dt} = dT_S(V_i - V_o) + (1 - d)T_S(-V_o) \end{cases} \quad (\text{EqII.18})$$

Après arrangement, on obtient :

$$\begin{cases} i_o(t) = i_L(t) - c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} \\ i_L(t) = \frac{1}{d} (i_i(t) - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt}) \\ V_i(t) = \frac{1}{d} (L \frac{di_L(t)}{dt} + V_o(t)) \end{cases} \quad (\text{EqII.19})$$

II.15.1.2 Hacheur survolteur (Boost)

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (II.29). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [63].

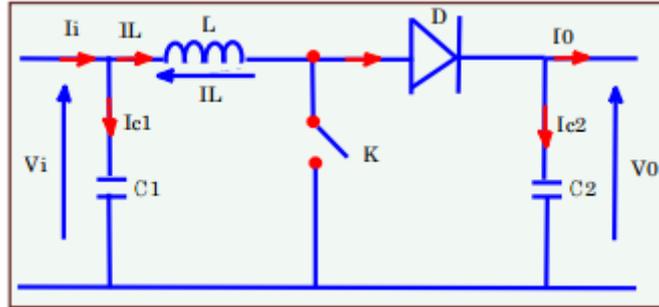


Figure II.29:Schéma de principe d'un convertisseur Boost [63]

Comme pour le convertisseur dévolteur, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (la figure II.30) des deux phases de fonctionnement donne [63] :

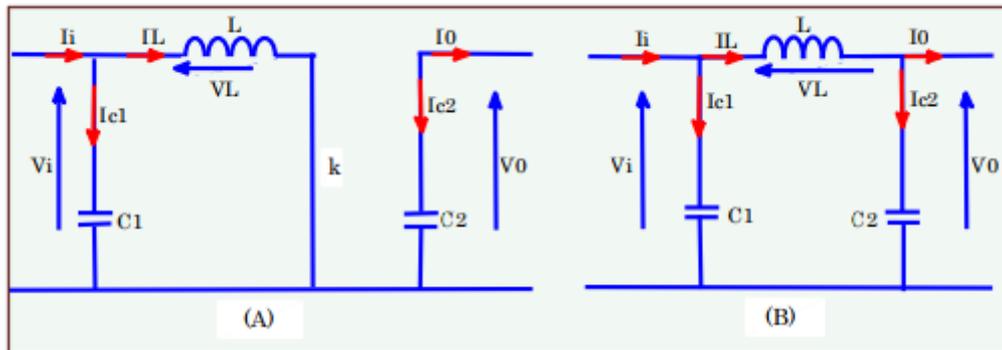


Figure II.30: Schémas équivalents du hacheur survolteur (A) : K fermé, (B) : ouvert [63]

$$\begin{cases} i_{c1} = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2} = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = -V_i(t) \end{cases} \quad (\text{EqII.20})$$

• Pour la deuxième période $(1 - d)T_S$:

$$\begin{cases} i_{c1} = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2} = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \end{cases} \quad (\text{EqII.21})$$

En appliquant la relation(II.16) sur les systèmes d'équations (II.20) et (II.21), Comme pour le convertisseur dévolteur, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur :

$$\begin{cases} i_L = i_i - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ i_o = (1 - d)i_L - C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} \\ V_i = L \frac{di_L}{dt} + (1 - d)V_o \end{cases} \quad (\text{EqII.22})$$

II.15.1.3 Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-boost)

Le convertisseur dévolteur -survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée; son schéma de base est illustre par la figure(II.29) [63]

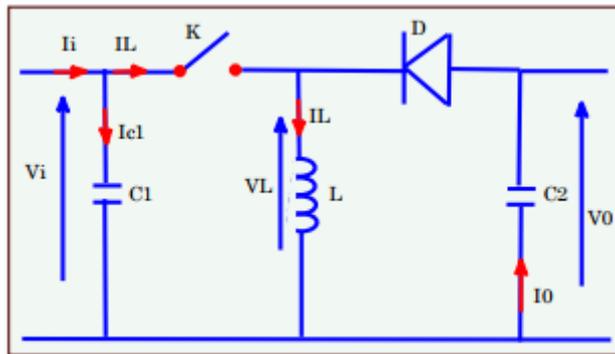


Figure II.31: Schéma de principe d'un Convertisseur dévolteur-survolteur [63]

La figure (II.32) montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur survolteur pour les deux cycles deux fonctionnements.

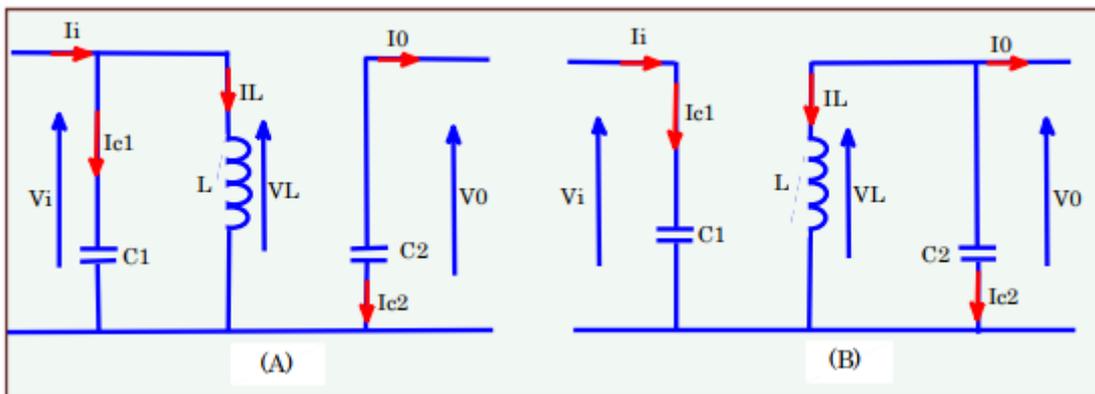


Figure I.32:Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur (A) : K fermé, (B) : ouvert [63]

En appliquant la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur des deux phases de fonctionnement, on obtient.

Quand le rapport cyclique $d > 0.5$ le hacheur Buck-boost fonction comme un hacheur boost et si le rapport cyclique $d < 0.5$ hacheur Buck-boost fonction comme un hacheur Buck [63]

- Pour la première période d, T_S

$$\begin{cases} i_{c1} = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2} = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = V_i(t) \end{cases} \quad (\text{EqII.23})$$

- Pour la deuxième période $(1 - d)T_S$

$$\begin{cases} i_{c1} = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2} = L \frac{di_L(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = -V_0(t) \end{cases} \quad (\text{EqII.24})$$

En appliquant la relation (II.16) sur les systèmes d'équations (II.23) et (II.24), on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur-survolteur :

$$\begin{cases} i_L = \frac{1}{d} (i_i - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt}) \\ i_0 = -(1 - d)i_L - C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} \\ V_i = \frac{1}{d} (-(1 - d)V_0 + L \frac{di_L}{dt}) \end{cases} \quad (\text{EqII.25})$$

Nous avons utilisé dans ce travail convertisseur boost.

II.16 Commande du convertisseur boost [64]

On s'intéressera uniquement à la régulation du courant. Donc, on utilisera l'équation

$$L \frac{di_L}{dt} = -(1 - \sigma)V_C + V_{in} \quad (\text{EqII.26})$$

La commande du convertisseur Boost nécessite la génération d'un courant de référence extrait par l'algorithme MPPT. Ensuite, un régulateur PI agit sur l'erreur entre le courant de référence et le courant du panneau.[65]

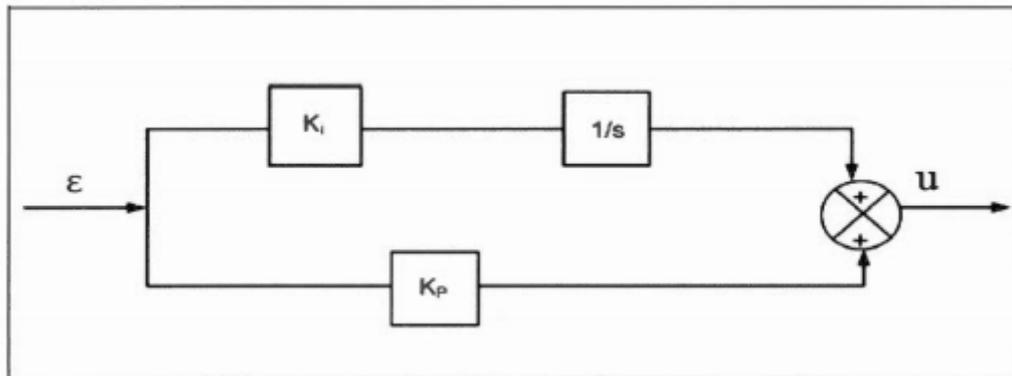


Figure II.33:Schéma du régulateur PI [65]

La fonction de transfert du régulateur PI est :

$$G_i(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (\text{EqII.27})$$

où la sortie correspond à la tension de l'inductance

$$u = L \frac{dI_L}{dt} \quad (\text{EqII.28})$$

En utilisant la transformée de Laplace, on obtient :

$$U = sL I_L \quad (\text{EqII.29})$$

Par conséquent, la fonction de transfert du courant en boucle ouverte, en l'absence du régulateur PI est [64] :

$$G_p = \frac{I_L}{U} = \frac{1}{Ls} \quad (\text{EqII.30})$$

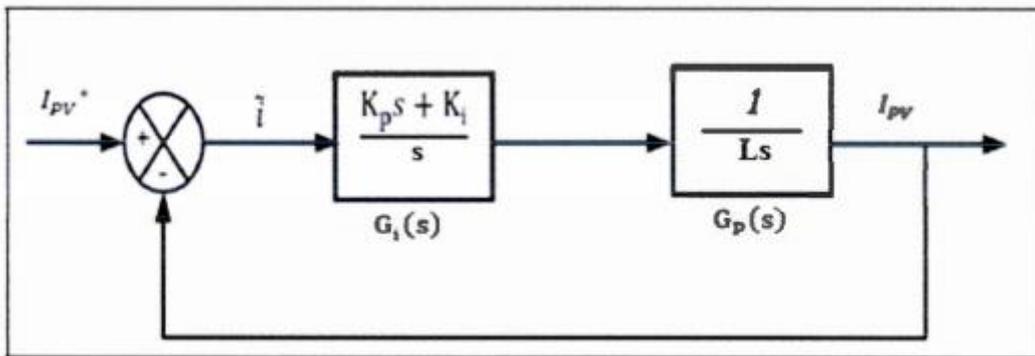


Figure II.34:Schéma de la boucle fermée du courant du panneau [65]

Et la fonction de transfert du courant en boucle fermée est [64]

$$\frac{I_{PV}}{I_{PV}^*} = \frac{\frac{K_p s + k_i}{L}}{s^2 + \frac{K_p s + K_i}{L}} = \frac{\frac{K_p s + k_i}{L}}{s^2 + 2\xi\omega_n + \omega_n^2} \quad (\text{EqII.31})$$

Avec :

I_{PV} et I_{PV}^* : Respectivement le courant du panneau et sa référence.

K_p et k_i : Coefficients du régulateur (PI).

ξ : facteur d'amortissement.

ω_n : Pulsation propre du système.

On a par identification :

$$K_p = 2\xi\omega_n L \quad (\text{EqII.32})$$

Et

$$k_i = L\omega_n^2 \quad (\text{EqII.33})$$

La commande à la sortie du régulateur est donnée par :

$$L \frac{dI_L}{dt} = -(1 - \sigma)V_C + V_{in} = u \quad (\text{EqII.34})$$

$$\sigma = 1 + \frac{u - V_{in}}{V_C} \quad (\text{EqII.35})$$

On utilise alors la modulation PWM du signal de sortie du régulateur afin de générer les impulsions de gâchette pour contrôler l'interrupteur du convertisseur. Le schéma de commande est donné à la Figure II.35.

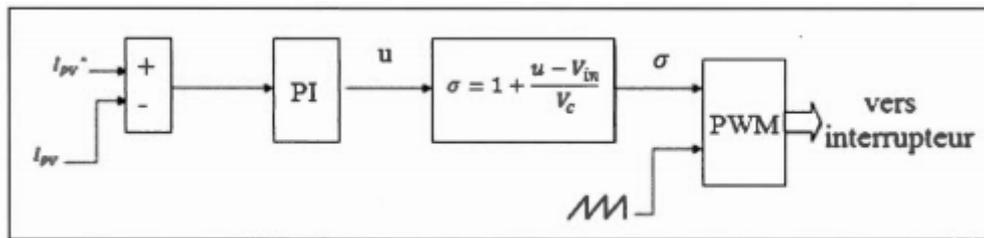


Figure I.35:Commande du convertisseur Boost [65]

II.17 Commande MPPT pour un système photovoltaïque [65].

La production de cette énergie est non linéaire et elle varie en fonction de l'intensité lumineuse et de la température. Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque, PV ne coïncide pas toujours avec le point de puissance (Figure II.36)

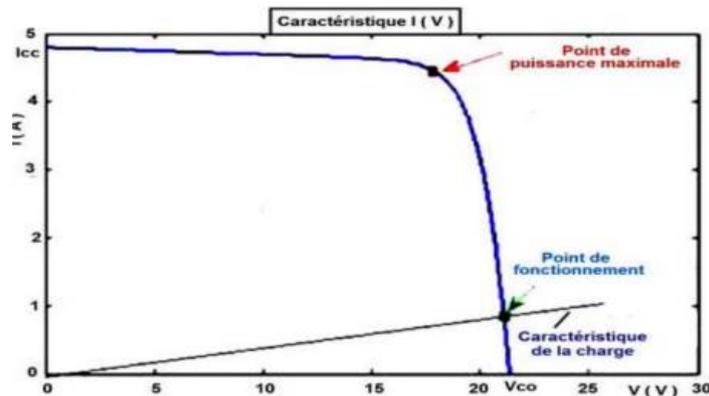


Figure II.36:Caractéristique I=f(V) du panneau photovoltaïque [65]

On utilise alors un mécanisme qui permet la recherche et la poursuite du point de puissance maximale, appelé « maximal power point tracking », (MPPT) afin que la puissance maximale soit générée en permanence [65].

II.17.1 Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation DC-DC

La Figure (II.37) présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation (DC-DC) entre le (GPV) et la charge. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie pour stocker de l'énergie ou une charge qui ne supporte pas les fluctuations de la tension (ballast,...). [65]

Cet étage d'adaptation dispose d'une commande (MPPT) qui permet de rechercher le que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche (MPPT) peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisie et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé.

De nombreuses recherches sur les commandes (MPPT) ont été effectuées afin de trouver un système optimal permettant une recherche du (PPM) selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Les commandes (MPPT) développées, sont toutes basées sur une commande extrême de type Perturbe & Observe, (P&O). [65]

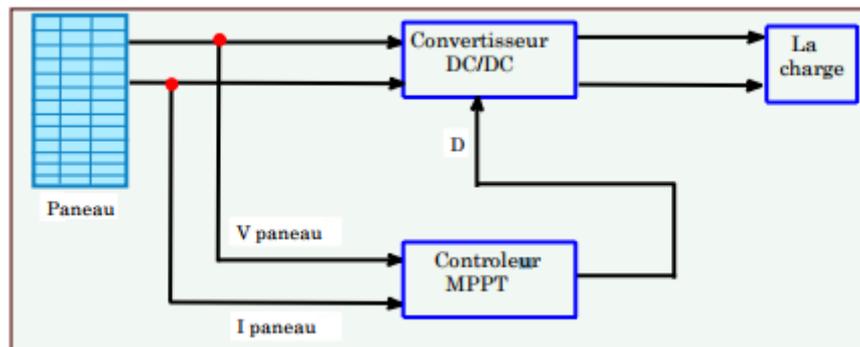


Figure I.37:Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC-DC) contrôlé par une commande (PPM) sur charge DC.[66]

II.17.2 Les méthodes de poursuite de MPP

Il existe de nombreux algorithmes utilisés pour trouver le point de puissance maximale. Idéalement, le suivi de la puissance se fait automatiquement pour s'adapter aux conditions météorologiques variables [65].

II.17.2.1 Méthodes à contre réaction de tension :

Ce genre de mécanismes repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par la comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la PWM de commande afin d'annuler

cette erreur. Selon la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe) on a trois types de méthodes [65] :

- Méthode à tension de référence fixe
- Méthode a tension de référence en fonction de V_{CO}
- Tension de référence extrême (Cellule pilote)

II.17.2.2 Méthodes à contre réaction de courant :

Cette méthode utilise seulement une mesure de courant pour obtenir l'information sur le point opérationnel et actuel du système. Permet de savoir la valeur du courant optimal dans lequel doit fonctionner le panneau pour extraire le maximum de puissance [66].

- Méthode à courant de référence en fonction du courant de court-circuit I_{CO}
- Méthode de maximisation du courant de sortie

II.17.2.3 Méthodes à contre réaction de puissance

Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du panneau pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de puissance générée par les panneaux solaires. Ainsi pour un point donne on fait la recherche dans un certain sens, si on a une au gestation de la puissance du panneau alors on maintien cette direction de recherche, sinon on cherche dans le sens opposé [65]

II.18 Algorithme perturbation et observation :

C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM) le puis utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence, ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC), puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique (D) [65]

Si la valeur de la puissance actuelle $p(k)$ du générateur est supérieure à la valeur précédente $p(k-1)$ alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent. L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P et O) est donné par la Figure (II.39) [65].

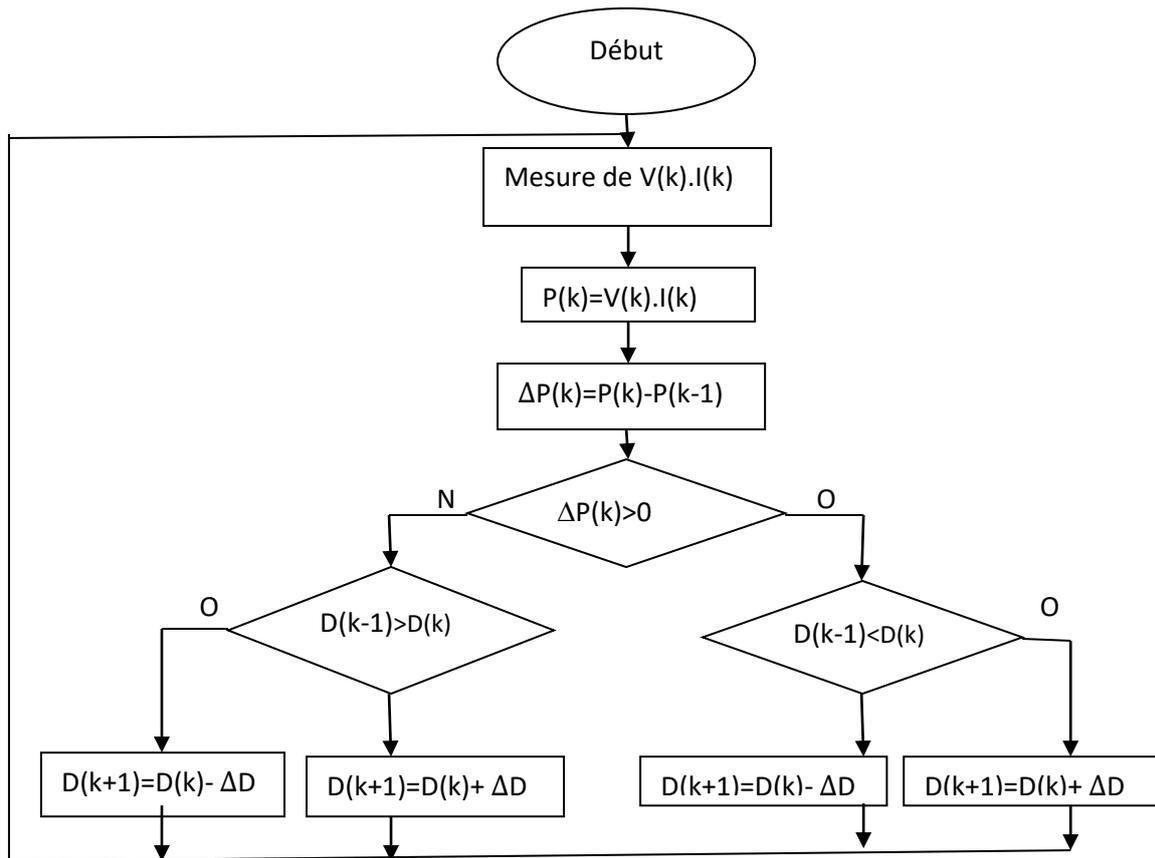


Figure II.38:Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O) [31]

Le contrôleur MPPT utilisé dans ce travail est basé sur une commande de type perturbation et observation.

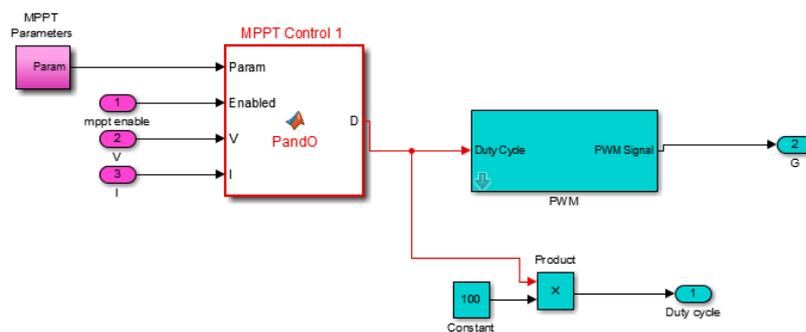


Figure I.39:Schéma de simulation d'un Commande MPPT

II.19 Avantages et inconvénients d'une installation PV :

II.19.1 Avantage :

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage Simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Méga Watt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions. [67]

II.19.2 Inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² pour le BENELUX) avec une limite théorique Pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est Nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux Problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le Fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur [67]

II.20 Conclusion

Dans ce chapitre on s'est consacré à présenter les différents composants d'un système photovoltaïque. On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. et les convertisseurs DC-DC et sur les méthodes de poursuite de point de puissance maximale (MPPT), nous avons donné l'exemple de la méthode de maximisation de puissance de GPV, la P&O.

III.1 INTRODUCTION

Le filtrage actif, comme moyen de compensation des harmoniques, est de plus en plus utilisé pour réaliser des interfaces de dépollution entre les réseaux électriques et les récepteurs polluants. Le rendement économique des filtres actifs est important pour le fournisseur d'énergie qui éprouve à cause des harmoniques des pertes considérables dans les transformateurs et les lignes et de l'interaction entre la source et les charges. Le consommateur est aussi concerné car la pollution harmonique et l'interaction entre les charges provoquent des défaillances du secteur et des récepteurs, et détériorent la productivité. La bonne exploitation d'un filtre actif parallèle est liée de façon significative aux choix des techniques de contrôle applique.

Afin d'avoir la capacité de suivre les variations de courant de référence et la réalisation d'un niveau de performance satisfaisant de filtrage [67][68].

Dans ce chapitre nous allons étudier le filtre actif parallèle. Sa structure a été divisée en deux parties, la partie puissance et la partie contrôle-commande. Dans la partie puissance, on a retrouvé les trois principaux blocs de cette structure : L'onduleur de tension qui est un élément fondamental de ce filtre, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie. La partie contrôle-commande, comporte des blocs pour identifier des courants perturbateurs et la régulation du courant injecté par l'onduleur.

Deux méthodes d'identification sont utilisées : la méthode des courants et la méthode des puissances instantanées. L'objectif de ce chapitre est de comprendre le fonctionnement du filtre actif parallèle.

Le filtre actif est un onduleur de tension à MLI qui traite l'élimination des harmoniques. Il doit donc, absorber des courants éliminant les harmoniques créés par La charge polluante pont redresseur dans notre cas. Cette structure a pour vocation d'éliminer de façon active toute ou une partie des harmoniques de courant. L'utilisation des onduleurs pour filtrage actif, suppose l'emploi de fréquences de découpages très supérieurs aux fréquences harmoniques que l'on veut éliminer. [67][68].

III.2 Principe du filtre actif parallèle:

Ce filtre est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec le réseau, afin que la somme avec ceux-ci soit nulle. On obtient alors des courants sinusoïdaux au niveau du réseau. Il permet donc de

supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de la charge non linéaire.

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

En général, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son impédance totale vis à vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec des performances appréciables. [69]

Donc le filtre actif parallèle doit fournir la puissance déformante et ou la puissance réactive. Ainsi, le réseau fournit uniquement la puissance fondamentale active et ou réactive. Pour cela le circuit de contrôle, en agissant sur les signaux de gâchette des semi-conducteurs (transistors, GTO, IGBT,..), doit imposer la valeur instantanée du du courant débité par l'onduleur ($I_{inj1}, I_{inj2}, I_{inj3},$) de telle sorte que le courant fourni par le réseau ($I_{s1}, I_{s2}, I_{s3},$) soit sinusoïdale et en phase avec la tension du réseau. Dans le cas général, le courant absorbé par la charge comporte une composante active (I_{cha}) une composante réactive (I_{chr}) et une composante harmonique ($\sum I_{chn}$) [69]

Avec :

$$I_{ch} = I_{cha} + I_{chr} + \sum_{i=1}^{\infty} I_{chn} \quad (\text{EqIII.1})$$

Le compensateur actif ne peut absorber ou fournir de la puissance active puisqu'il ne comporte pas de source active. D'après la première loi de Kirchhoff, le courant fourni par la source est égale à :

$$I_s = I_{ch} - I_{inj} \quad (\text{EqIII.2})$$

Source fournit la puissance active absorbée par la charge. Le filtre actif parallèle fournit la puissance réactive et déformante

$$I_s = I_{ch} , I_{inj} = I_{chr} + \sum_{i=1}^{\infty} I_{chn} \quad (\text{EqIII.3})$$

Le filtre actif se compose de deux parties distinctes, partie puissance et la partie commande. La partie puissance est constituée d'un élément de stockage d'énergie, d'un pont onduleur triphasé et d'un filtre de sortie généralement du premier ordre. Pour la partie commande, on a le bloc d'identification des courants de références, le contrôle du courant réseau ainsi que la commande.

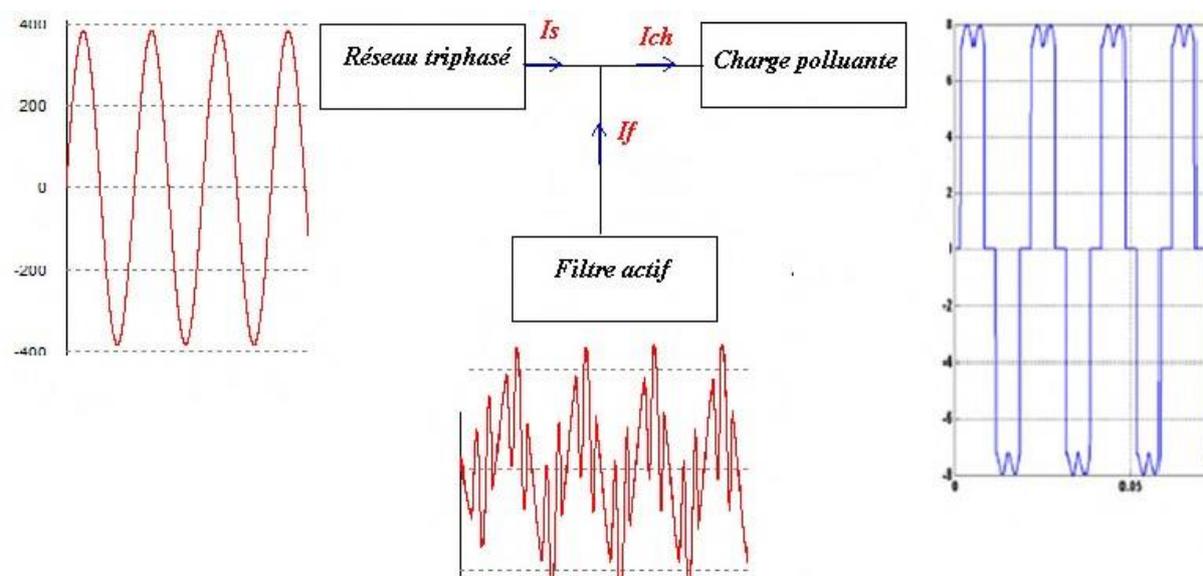


Figure III.1:schéma de Principe du filtre actif parallèle [1]

III.3 Structure d'un filtre actif parallèle :

La structure générale du filtre actif parallèle est présentée dans la figure (III.2) sous la forme de deux blocs : la partie puissance et la partie contrôle-commande.

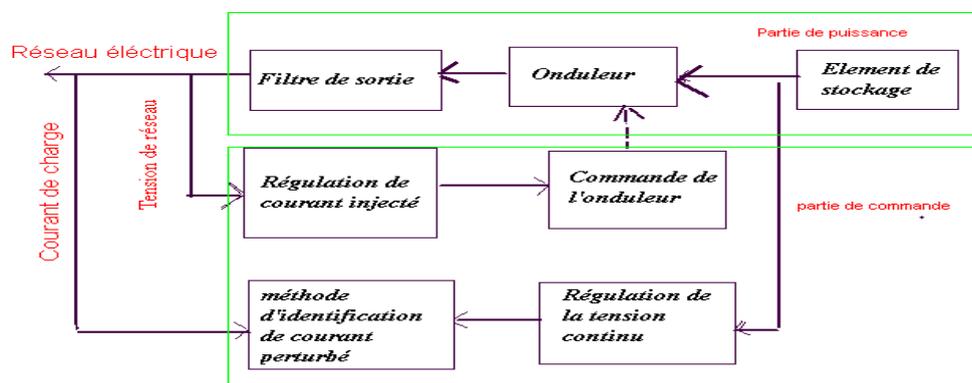


Figure III.2:Structure générale du filtre actif parallèle. [1]

a- La partie puissance :

est constituée :

- ✓ D'un onduleur à base d'interrupteurs de puissance, commandable à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, etc ...) avec des diodes antiparallèle.
- ✓ D'un circuit de stockage d'énergie :

Le stockage de l'énergie peut être par une source de tension continue V_{dc} , ou par un condensateur C_{dc} qui joue le rôle d'une source de tension continue V_{dc} , Le choix des paramètres (V_{dc} et C_{dc}) s'effectue sur la dynamique et sur la qualité de compensation du filtre actif parallèle.

✓ D'un filtre de sortie :

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique, et pour satisfaire les deux critères suivants :

- assurer une bonne dynamique du courant ;
- empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.

b- La partie contrôle-commande

est constituée de:

- ✓ Bloc d'identification des courants perturbateurs ;
- ✓ Bloc de régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension ;

c- Commande de l'onduleur de tension.

Le but de la commande de l'onduleur est le contrôle des courants à la sortie du filtre afin qu'ils suivent leurs références. Le principe est basé sur la comparaison entre les courants de sortie du filtre et leurs références identifiées à partir des différentes méthodes d'identification.

Pour la régulation du courant de l'onduleur : les deux méthodes utilisées sont par hystérésis et à MLI sinus-triangulaire. [1]

III.4 Structure de l'onduleur de tension :

L'onduleur de tension connecté en parallèle au réseau est illustré par la figure(III.3). Le Condensateur C_{dc} joue le rôle d'une source de tension continue.

La tension à ses bornes V_{dc} doit être positive et maintenue quasiment constante. Ses fluctuations doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs, d'autre part pour ne pas dégrader les performances du filtre actif.

L'onduleur de tension est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre. Deux rôles sont dévolus à ce filtre: d'une part transformer les variations de tension V_f en variations de courant, d'autre part filtrer les fréquences de commutation des bras d'onduleur.

Les interrupteurs de l'onduleur sont réversibles en courant. Ils sont constitués de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture en antiparallèle avec une diode [70;71].

.

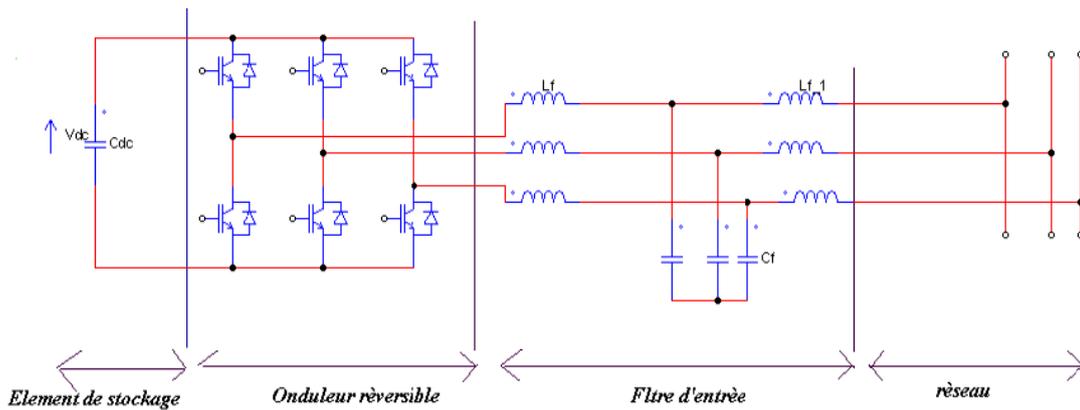


Figure III.3: Structure onduleur tension.

III.5 Onduleur de tension triphasé :

On appelle onduleur de tension, un onduleur alimenté par une source de tension continue, c'est à dire par une source d'impédance interne négligeable; sa tension U n'est pas affectée par la variation du courant i qui la traverse.

La source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie. On peut obtenir la tension triphasée en groupant trois demis ponts monophasés, la figure (III.4) représente un onduleur triphasé de tension Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor et d'une diode en antiparallèle [1 ; 72].

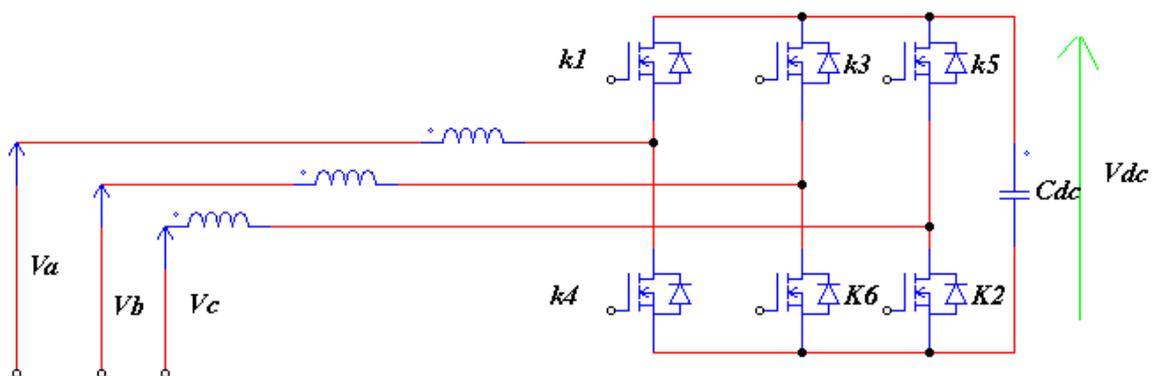


Figure III.4: Structure d'un onduleur de tension triphasé. [74]

III.6 Principe des onduleurs MLI [73]

L'onduleur MLI est constitué des interrupteurs commandable à l'ouverture et à la fermeture comme les semi-conducteurs (GTO, IGBT, ...) connecté en antiparallèle avec une diode.

La tension de sortie se compose de plusieurs créneaux de largeur variables et les instants de commutations sont définis par l'ouverture et la fermeture des interrupteurs, par les intersections de l'onde de référence U_{ref} représentant la tension de sortie recherchée de fréquence f avec l'onde de la porteuse, de fréquence f_p très supérieure à f . (le cas la commande sinus-triangulaire).

- Deux indices caractérisent la commande des interrupteurs
- L'indice de modulation

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{EqIII.4})$$

Avec $m \gg 1$;

- Le coefficient de réglage

$$r = \frac{U_{refmax}}{u_p} \quad (\text{EqIII.5})$$

Avec :

$f_p; U_p$: Respectivement la fréquence et l'amplitude de la porteuse ;

$f; U_{refmax}$: Respectivement la fréquence et l'amplitude maximale de la référence.

III.7 Commande de l'onduleur

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants de référence, à travers les ordres de commande appliqués aux interrupteurs de puissance. Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont :

La commande par hystérésis et la commande par modulation de largeur d'impulsion MLI. [1]

III.7.1 Commande par hystérésis

C'est une commande non-linéaire à fréquence de commutation variable permettant de fixer les ondulations de courants. Cette stratégie de commande assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres.

Le schéma de principe de cette technique de commande est illustré sur la figure (III.6) Son principe consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur (différence entre le courant de référence i_{ref} et le courant du compensateur actif i_c).

Cette erreur est ensuite comparée à un intervalle appelé bande d'hystérésis qui génère la commande des interrupteurs.

La simplicité de sa mise en œuvre est le principal atout de cette technique En revanche, les commutations évoluent librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis. On ne peut pas maîtriser correctement le spectre haute fréquence dû aux fréquences de commutation [32 ; 74].

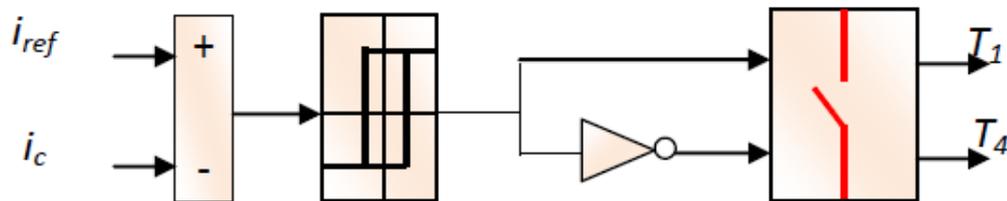


Figure III.5:Commande par hystérésis

III.7.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La commande par modulation de largeur d'impulsion (*MLI*) est la technique de commande la plus utilisée, elle résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur.

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. [11]

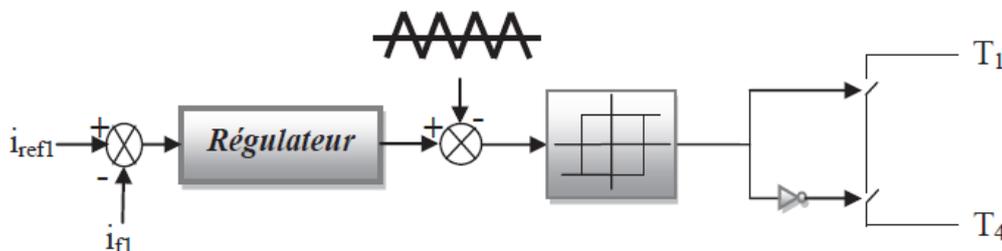


Figure III.6:Principe de commande des courants par MLI

III.7.2.1 Principe de MLI sinus-triangle

Le signal de commande des interrupteurs est généré à partir de la comparaison du signal de référence sinusoïdal (de fréquence $f_o = 1/T_o$) et du signal de modulation triangulaire ou la porteuse (de fréquence $f_d = 1/T_d$) [9].

• Caractéristique

Deux paramètres caractérisent la commande :

- L'indice de modulation $m = f_d/f_o$ avec $m \gg 1$
- Le coefficient de réglage $r = v_{Rmax}/V_{Pmax}$ Généralement reste compris entre 0 et 1 [75].

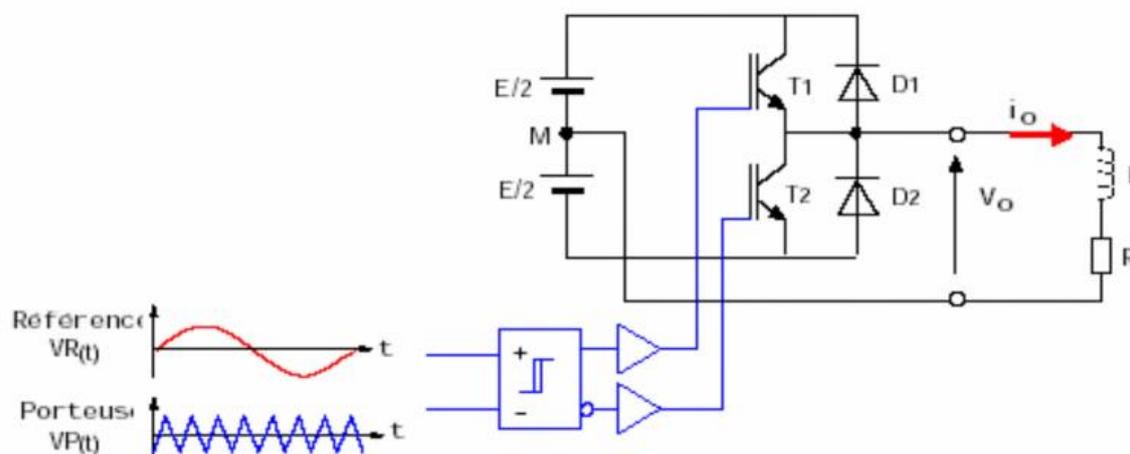


Figure III.7: Schéma de principe de l'onduleur monophasé commandé par MLI sinus-triangle [75].

III.8 Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux

III.8.1 Structure générale

En cas de présence d'un point milieu [76], la structure générale d'un onduleur de tension deux niveaux est représentée la figure (III.8)

L'onduleur triphasé de tension deux niveaux est constitué de 02 interrupteurs par bras. Ces derniers ont la particularité d'être bidirectionnels et entièrement commandables à l'ouverture et à la fermeture. Ils peuvent être soit des *MOSFET* pour les faibles puissances et fréquences très élevées, des *IGBT* pour les grandes puissances et fréquences élevées, ou des *GTO* pour les très grandes puissances et fréquences faibles [68,1].

Pour assurer la circulation du courant dans les deux sens, l'interrupteur doit être placé en antiparallèle avec une diode. [76]

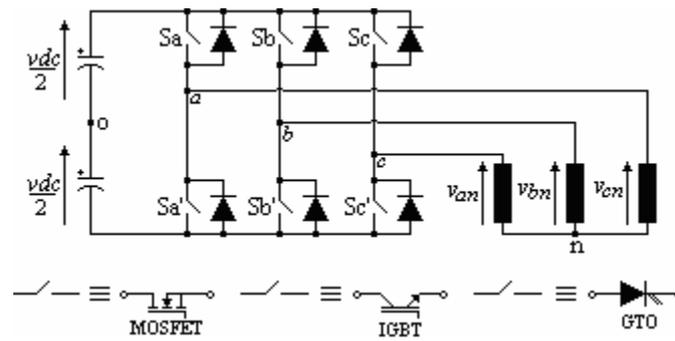


Figure III.8: Onduleur de tension deux niveaux et les interrupteurs pouvant le constituer.

III.8.2 Expression des tensions de sortie

Les deux interrupteurs d'un même bras sont commandés de façon complémentaire.

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs dépendent de l'état des signaux de commande (s_a, s_b, s_c) Comme défini ci-dessous [30]:

$$s_a = \begin{cases} 1 & k_1 \text{ ferme et } k_4 \text{ ouvert} \\ 0 & k_1 \text{ ouvert et } k_4 \text{ ferme} \end{cases} \quad (\text{EqIII.5})$$

$$s_b = \begin{cases} 1 & k_2 \text{ ferme et } k_5 \text{ ouvert} \\ 0 & k_2 \text{ ouvert et } k_5 \text{ ferme} \end{cases} \quad (\text{EqIII.6})$$

$$s_c = \begin{cases} 1 & k_3 \text{ ferme et } k_6 \text{ ouvert} \\ 0 & k_3 \text{ ouvert et } k_6 \text{ ferme} \end{cases} \quad (\text{EqIII.7})$$

Les trois tensions composées à la sortie de l'onduleur sont données par :

$$\begin{bmatrix} v_{fa} & - & v_{fb} \\ v_{fb} & - & v_{fc} \\ v_{fc} & - & v_{fa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_a & - & s_b \\ s_b & - & s_c \\ s_c & - & s_a \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{EqIII.8})$$

Les trois tensions simple de sortie de l'onduleur notées (v_{fa}, v_{fb}, v_{fc}) sont référencées par rapport au neutre du réseau et vérifient les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} - R_f \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} - L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} \quad (\text{EqIII.9})$$

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

$$\begin{cases} v_{sa} + v_{sb} + v_{sc} = 0 \\ i_{fa} + i_{fb} + i_{fc} = 0 \end{cases} \quad (\text{EqIII.10})$$

Chapitre III : Etude filtre actif parallèle

Nous pouvons donc déduire la relation suivante

$$v_{fa} + v_{fb} + v_{fc} = 0 \quad (\text{EqIII.11})$$

A partir des équations (III.5), (III.6), (III.7) et (III.10), nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2s_a & -s_b & -s_c \\ -s_a & 2s_b & -s_c \\ -s_a & -s_b & 2s_c \end{bmatrix} \frac{v_{dc}}{3} \quad (\text{EqIII.12})$$

Puisque les grandeurs (S_a, S_b, S_c peuvent prendre chacune deux valeurs (0 ou 1), on a donc, huit configurations possibles pour les tensions de sortie du filtre actif (v_{fa}, v_{fb}, v_{fc}) référées au neutre n de la source, ceci est montré par le tableau (III.1) ou. A noter que deux vecteurs sont nuls (\vec{v}_0 et \vec{v}_7) et \vec{v}_f , la représentation vectorielle des tensions (v_{fa}, v_{fb} et v_{fc}) fournies par l'onduleur dans le repère orthogonal α, β , [1, 31].

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

N°	S_1	S_2	S_3	v_{fa}	v_{fb}	v_{fc}	\vec{v}_f	
0	0	0	0	0	0	0	$\vec{v}_{f(0)}$	0
1	1	0	0	$\frac{2v_{dc}}{3}$	$\frac{-v_{dc}}{3}$	$\frac{-v_{dc}}{3}$	$\vec{v}_{f(1)}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}$
2	1	1	0	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{-2v_{dc}}{3}$	$\vec{v}_{f(2)}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}e^{j\frac{\pi}{3}}$
3	0	1	0	$\frac{-v_{dc}}{3}$	$\frac{2v_{dc}}{3}$	$\frac{-v_{dc}}{3}$	$\vec{v}_{f(3)}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}e^{j\frac{2\pi}{3}}$
4	0	1	1	$\frac{-2v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\vec{v}_{f(4)}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}e^{-j\pi}$
5	0	0	1	$\frac{-v_{dc}}{3}$	$\frac{-v_{dc}}{3}$	$\frac{2v_{dc}}{3}$	$\vec{v}_{f(5)}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}e^{j\frac{-2\pi}{3}}$
6	1	0	1	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{-2v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\vec{v}_{f(6)}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}e^{j\frac{-\pi}{3}}$
7	1	1	1	0	0	0	$\vec{v}_{f(7)}$	0

Dans le repère (α, β) en considérant \vec{v}_f le vecteur correspondant aux tensions de sortie du filtre actif. Le vecteur \vec{v}_f représente la tension de référence que doit produire l'onduleur. Ceci signifie, que l'onduleur ne peut être capable de fournir des tensions égales aux tensions de référence que si le vecteur formé par ces derniers reste à l'intérieur du polygone présenté dans la figure. III.9. [77,78].

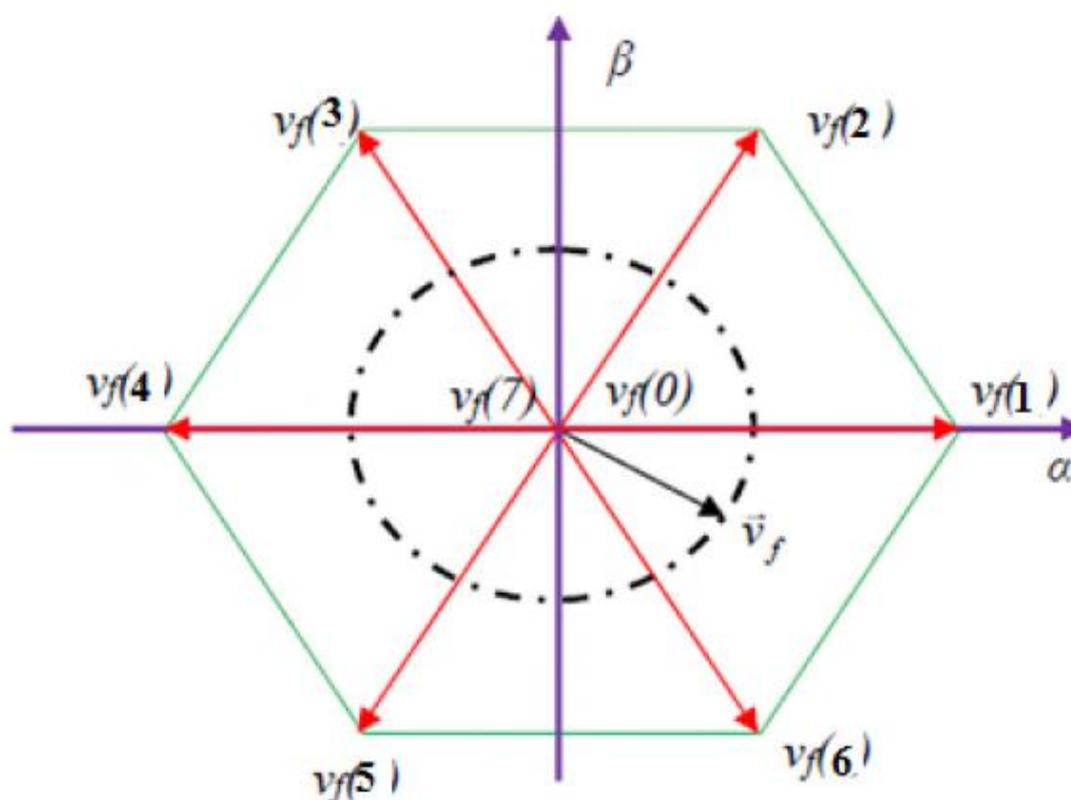


Figure III.9: Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur de tension. [1]

III.9 Modélisation de l'Onduleur triphasé à trois niveaux:

III.9.1 Structure générale

La structure générale d'un onduleur de tension trois niveaux à diodes clampées est présentée dans la figure (III.10), L'onduleur triphasé de tension trois niveaux à diodes clampées est constitué de 04 interrupteurs par bras.

Ces derniers sont, comme pour le cas précédent deux niveaux, bidirectionnels et entièrement commandable à l'ouverture et à la fermeture. En outre, l'onduleur contient 06 diodes clampées au point milieu o du bus continu.

III.9.2 Expression des tensions de sortie

L'onduleur de tension trois niveaux délivre, en sortie, trois niveaux de tensions $E/2$, 0 et $+E/2$.

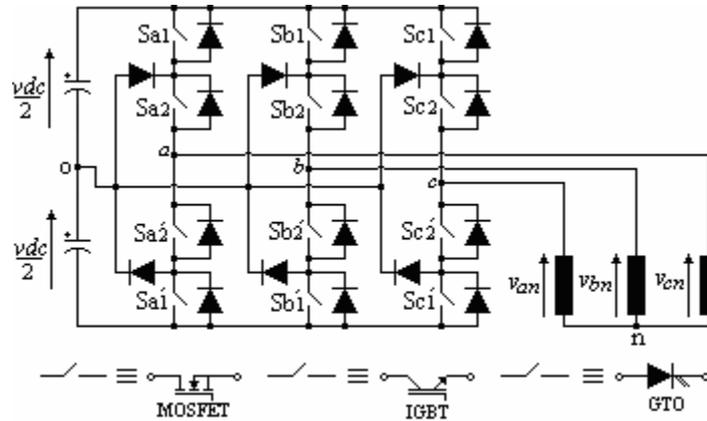


Figure III.10: Onduleur de tension trois niveaux et les interrupteurs pouvant le constituer.

Il faut déterminer les valeurs que peut prendre la tension simple V_{ao} entre la borne (a) de la charge et le point neutre 0. Cette tension est entièrement définie par l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs S_{a1} , S_{a2} , S_{a2}' et S_{a1}' , du bras.

L'onduleur à trois niveaux étant symétrique, l'étude peut se limiter au fonctionnement d'un bras, (où on distingue trois configurations possibles).

On donne ci-dessous le tableau récapitulatif tableau (III.2) représente la tension de sortie V_{ao} d'un onduleur NPC à trois niveaux en fonction de l'état des interrupteurs, la tension au des interrupteurs de puissance n'excède jamais la moitié du bus d'entrée, [79]. Borne a la différence de l'onduleur à deux niveaux, chaque demi-bras de l'onduleur à trois niveaux utilisée non pas un interrupteur bidirectionnel mais deux, ce qui permet d'effectuer une commande décalée, [55].

Tableau 2: Grandeur connue pour chacune des configurations d'un bras de l'onduleur trois niveaux

Etat des interrupteurs				Tension de sortie
S_{a1}	S_{a2}	S_{a2}'	S_{a1}'	
1	1	0	0	$E/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

Chapitre III : Etude filtre actif parallèle

Par la suite, on symbolisera ces différents états par la notation 1, 0 ou -1 correspondant respectivement aux niveaux de tension $E/2$, 0 et $-E/2$.

Ainsi, les transitions de ce bras entre l'état 1 et l'état 0 s'effectuent par commutation entre les interrupteurs S_{a1} et S_{a2}' , avec S_{a2} toujours fermé et S_{a1}' , toujours ouvert. De la même manière, les transitions entre l'état 0 et l'état -1 s'effectuent par commutation entre les interrupteurs S_{a2} et S_{a1}' , avec S_{a1} ouvert et S_{a2}' fermé. Chacun des trois bras de l'onduleur pouvant prendre indépendamment les trois états 1, 0 ou -1, l'ensemble des possibilités pour l'onduleur complet s'élève à 3^3 , soit 27 états. Ceux-ci sont répertoriés dans le tableau (III.3).

L'ensemble des vecteurs tensions délivrées par un onduleur à trois niveaux ainsi que les séquences de niveaux de phase correspondantes sont représentés dans la figure (III.11).

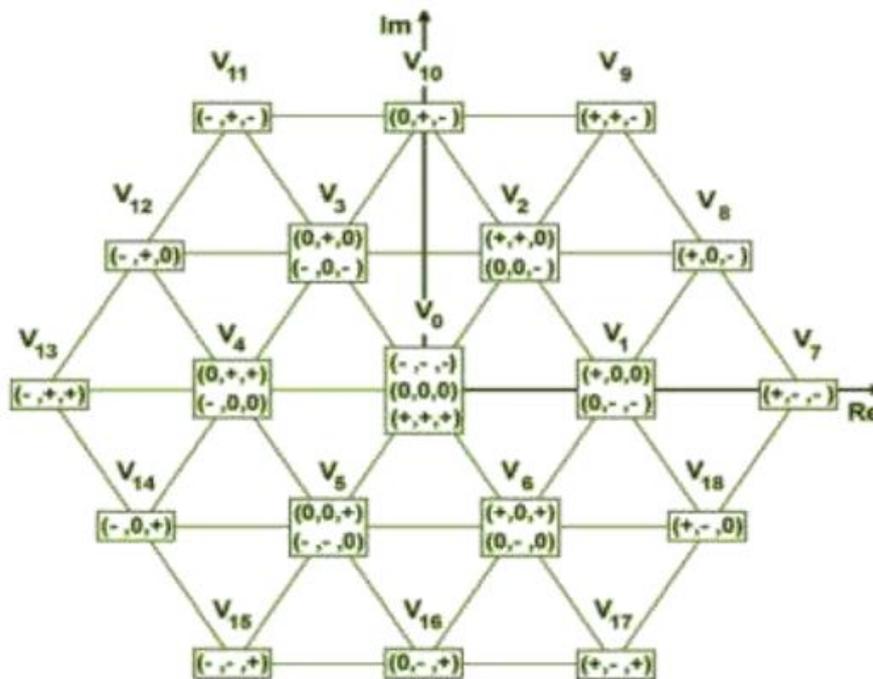


Figure III.11: Vecteurs tensions que peut fournir l'onduleur à 3-niveaux de tension

Tableau 3: Etats possibles de l'onduleur NPC à trois niveaux et leur tension

E tat des bars 1			Tension v/cm	E tat des bars 2			Tension v/cm	E tat des bars 3			Tension v/cm
Bras a	Bras b	Bras c		Bras a	Bras b	Bras c		Bras a	Bras b	Bras C	
1	1	1	$E/2$	0	1	1	$E/3$	-1	1	1	$E/6$
1	1	0	$E/3$	0	1	0	$E/6$	-1	1	0	0
1	1	-1	$E/6$	0	1	-1	0	-1	1	-1	$-E/6$
1	0	1	$E/3$	0	0	1	$E/6$	-1	0	1	0
1	0	0	$E/6$	0	0	0	0	-1	0	0	$-E/6$
1	0	-1	0	0	0	-1	$-E/6$	-1	0	-1	$E/3$
1	-1	1	$E/6$	0	-1	1	0	-1	-1	1	$-E/6$
1	-1	0	0	0	-1	0	$-E/6$	-1	-1	0	$-E/3$
1	-1	-1	$-E/6$	0	-1	-1	$-E/3$	-1	-1	-1	$-E/2$

III.10 Stratégie de commande du filtre actif parallèle

Afin de commander le filtre actif parallèle, nous devons d'abord identifier les courants harmoniques de la charge polluante, qui servent en effet comme références du filtre actif parallèle. Donc, la stratégie de commande du FAP se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs peuvent être utilisées.[80,81]

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

III.11 Identification des courants harmonique

III.11.1 Généralités sur les méthodes d'identification

Plusieurs méthodes d'identification des courants perturbés, ont été développées afin d'améliorer les performances des systèmes de dépollution classique des installations électriques. En général L'identification des composantes harmoniques se fait soit dans l'espace des courants, soit dans l'espace des puissances [1, 9,82] La transformation de fourrier directe est l'une des méthodes les plus anciennes, mais qui nécessite une grande puissance de calcul, afin de réaliser toutes les transformations en temps réel. Pour cela, cette méthode et adaptée aux récepteurs ou les composantes harmoniques évoluent d'une manière lente, elle a pour avantage la capacité de cibler un par un les courants harmoniques qui parcourent le système, par conséquent la possibilité de compenser les composantes les plus prépondérantes.

Deux autres méthodes sont utilisées en temps réel, et qui se basent sur le filtrage des signaux La première est la méthode des puissances instantanées, l'autre est celle de détection synchrone. Les deux méthodes sont fondées sur le principe de la séparation du fondamental des harmoniques par filtrage.

III.11.2 Méthode des courants

Le principe de cette méthode est d'identifier les courants harmoniques à partir du courant total et forcer l'onduleur a injecté des courants harmoniques inverses dans le réseau, Ce qui permet d'éliminer ces harmoniques.

On capte le courant de charge polluante, ce courant est filtré par un filtre passe bande du deuxième ordre, ce qui permet d'éliminer la composante harmonique et ne laisse passer que la composante fondamentale.

Le courant total moins la composante fondamentale donne le courant harmonique. Le courant injecté par l'onduleur est réglé autour de ce courant harmonique de référence. Les deux techniques de régulation : MLI sinus-triangulaire et hystérésis sont utilisées.

Le filtre de sortie Lf est utilisé pour relier l'onduleur au réseau et pour empêcher les composantes de la commutation de se propager sur le réseau. [83]

III.11.2.1 Algorithme de la méthode des courants

Le courant absorbé par la charge est composé de la composante fondamentale et des composantes harmoniques à fréquence multiple de la fréquence fondamentale. [83]

$$i_{ch} = i_{ch1} + \sum_{i=2}^{\infty} i_h \quad (\text{EqIII.13})$$

Avec :

i_{ch} : Le courant total de la charge.

i_{ch1} : Le courant fondamental absorbé par la charge.

i_h : Le courant harmonique absorbé par la charge.

Le filtre passe bande du deuxième ordre a pour but d'extraire la composante fondamentale du courant. La fréquence centrale est choisie égale à la fréquence fondamentale ($f_c=50\text{Hz}$). Cette méthode est caractérisée par la simplicité.



Figure III.12:Schéma de principe d'identification des courants harmoniques. [83]

III.11.3 Méthodes sur les puissances instantanées [84]

La méthode des puissances instantanées n'est applicable que si la tension du réseau est parfaitement sinusoïdale et équilibrée.

La première étape consiste à ramener la tension V_r de la source et le courant i_{ch} de la charge dans le repère α, β en utilisant la transformation de Concordia. Cette transformation permet de passer d'un système triphasé à un système biphasé, ce qui simplifie les expressions mathématiques et réduit le coût d'implantation.

Les valeurs instantanées des courants et tensions triphasés peuvent être obtenues dans le plan α - β par les équations suivantes:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{EqIII.14})$$

Avec C_{32} la matrice de transformation développée par Concordia [85] est donnée par:

$$[C_{32}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (\text{EqIII.15})$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (\text{EqIII.16})$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (\text{EqIII.17})$$

Les composante ayant l'indice (0) représentant les composantes homopolaires du système triphasé de courant et de tension, on considère que le réseaux étudié est à neutre isolé et composé de trois fils ce qui empêche la circulation des composantes homopolaires

A partir des équations III.16 et III.17, on calcule les puissances instantanées, active p et réactive q , elles sont données par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{EqIII.18})$$

On peut décomposer les puissances instantanées p et q en deux composantes, les composantes continues liées au fondamental (\bar{p} et \bar{q}) et les composantes alternatives liées aux harmoniques (\tilde{p} et \tilde{q}) Cela peut s'écrire comme suit :

$$P = \bar{p} + \tilde{p} \quad (\text{EqIII.19})$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q}$$

Avec :

\bar{p} : Puissance moyenne liée à la composante fondamentale active du courant .

\bar{q} : Puissance moyenne liée à la composante fondamentale réactive du courant

\tilde{p} et \tilde{q} : Puissance alternatives liées à la somme des composantes harmoniques du courant.

Un filtre de puissance est utilisé afin de séparer la composante de la puissance liée aux harmoniques de la puissance liée au fondamental [1]

Le schéma représente le principe de séparation des puissances et donné par la figure III.13

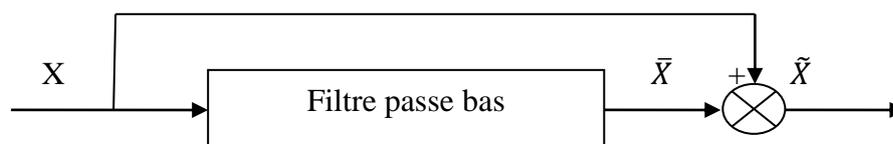


Figure III.13:Schéma de principe de la méthode de séparation des puissances. [1]

La fréquence de coupure du filtre est choisie, selon que la charge soit équilibrée ou déséquilibrée, de manière à ce qu'il puisse bloquer le passage des composantes harmoniques instantanées, et de permettre uniquement le passage des composantes continues représentant les puissances active et réactive à la fréquence fondamentale.

Après avoir séparé les puissances, on calcule les courants perturbateurs dans le repère $\alpha\beta$

En se servant de l'expression (III.19), comme suit [84] :

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 - \tilde{P} \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq III.20})$$

Avec :

$$\Delta = v_\alpha^2 + P_0 \quad (\text{Eq III.21})$$

p_0 : est la puissance active fournie par la boucle de tension nécessaire à la régulation de la tension continue.

La relation (III.20), est utilisée afin de compenser l'ensemble des harmoniques. Cette technique permet aussi d'effectuer de la compensation de l'énergie réactive puisque l'absorption de l'énergie réactive se traduit par une compensation continue selon l'axe q ($\overline{i_q}$) non nulle, le courant du filtre permettant cette compensation est donc :

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq III.22})$$

Et si l'objectif est de compenser la puissance réactive et l'ensemble des harmoniques, on utilise la relation (III.22) :

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 & -\tilde{p} \\ \tilde{q} & -\tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq III.23})$$

Les courants de perturbations triphasées qui représentent les courants identifiant, dite courants de référence $i_{ref\alpha}$ sont donnés par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{ref1} \\ i_{ref2} \\ i_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq III.24})$$

La méthode des puissances instantanées est illustrée par la figure III.14

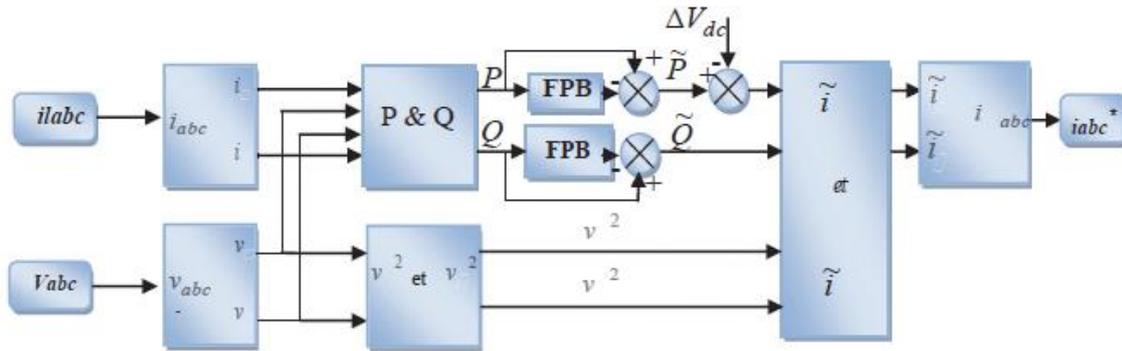


Figure III.14: Principe de la méthode (pq).

III.12 Conclusion

Dans, ce chapitre, nous vous présenté l'étude d'un filtre actif parallèle qui consiste en un onduleur à deux niveaux. Nous avons également présenté certaines méthodes d'identifications des courants harmoniques et nous avons choisi la méthode des courants pour sa simplicité.

Différentes techniques de modulation ont été citées et nous avons retenu la modulation sinus triangulaire pour réaliser notre travail. Dans le chapitre suivant, on effectuera les différentes simulations puis on analysera les résultats obtenus.

IV.1 Introduction

Le but de cette section est voir les résultats de simulation de la méthode de contrôle étudiée dans le chapitre précédent le filtre actif parallèle comme suit :

Dans la première partie de cette section, on montrera l'allure du courant dans la source avant application de toute opération de filtrage, son spectre harmonique contenant les informations sur le THDi et sa position angulaire par rapport à la tension de source, nécessaire pour la détermination de la valeur du facteur de puissance ;

La seconde partie, on consacrée à l'étude de filtre actif parallèle pour deux topologies d'onduleurs de tension, multiniveaux (deux et trois niveaux) ; on y exposera les circuits de puissance et de commande ainsi que le dimensionnement des condensateurs et du filtre de sortie

Et enfin, dans la dernière partie de cette section, on fait la comparaison entre les deux topologies d'onduleurs de tension (deux et trois niveaux).

IV.2 Paramètre de simulation

Nous allons rassembler les paramètres communs aux différents modèles dans le tableau (IV.1) ci-dessous.

Tableau IV.1:Paramètre de simulation communs aux applications considérées.

parametres		Valeur nemurique
Réseau d'alimentation	Tension efficace E_s	230 V
	Fréquence f	50Hz
	Résistance de ligne R_s	0.25 m Ω
	Inductance de ligne L_s	19.4 μ H
Charge non-linéaire (Pont de Graëtz à 6 thyristors)	Angle de retard à l'amorçage α	0°
Charge linéaire (aval à la charge non-linéaire)	Angle de retard à l'amorçage α	6.5 Ω
	Inductance de charge DC Ldc	20 MHz
Inductance de correction	Inductance en amont de la charge polluante LF	1.5 mH

IV.3 Caractéristiques du courant de source avant filtrage actif

Les graphes du courant de source avant application du filtrage actif sont représentés par Les figures IV.1. IV.2et IV.3. Nous avons remarqué une distorsion symétrique du courant *isa* par rapport au point de demi période (figure IV.1), ce qui signifie que de sources est très riche en harmonique de rang $(2K+1, K=2, \dots, 50)$; ceci est confirmé par le spectre de *isa*

La figure IV.2, représentant les 20 premiers harmoniques les plus significatifs, avec un THDi de 20.68% pour une durée d'observation de 0.1 s. par conséquent nous devons améliorer le THD de ce signal, Ou raccorde le filtre actif au réseau..

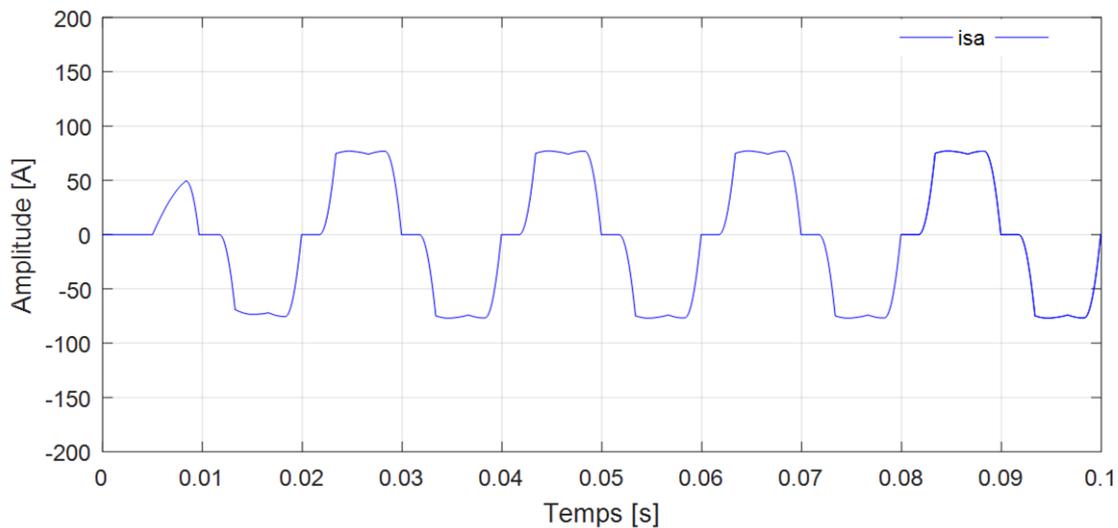


Figure IV.1: Allure de isa avant filtrage actif.

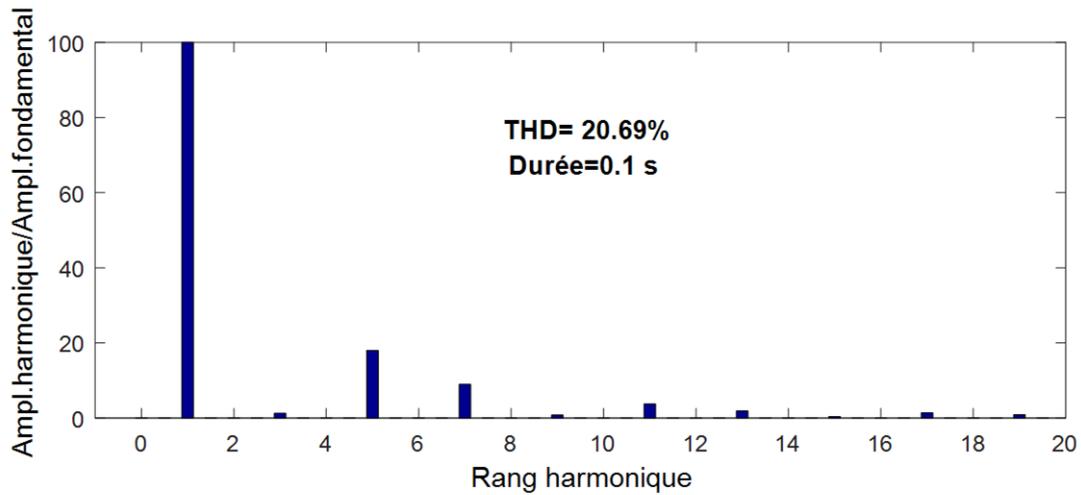


Figure IV.2: Spectre harmonique de isa.

La figure IV.3, représente le courant et la tension de la source. On remarque que la tension n'est pas en phase avec le courant ce qui entraîne une consommation de l'énergie réactive et une dégradation du facteur de puissance

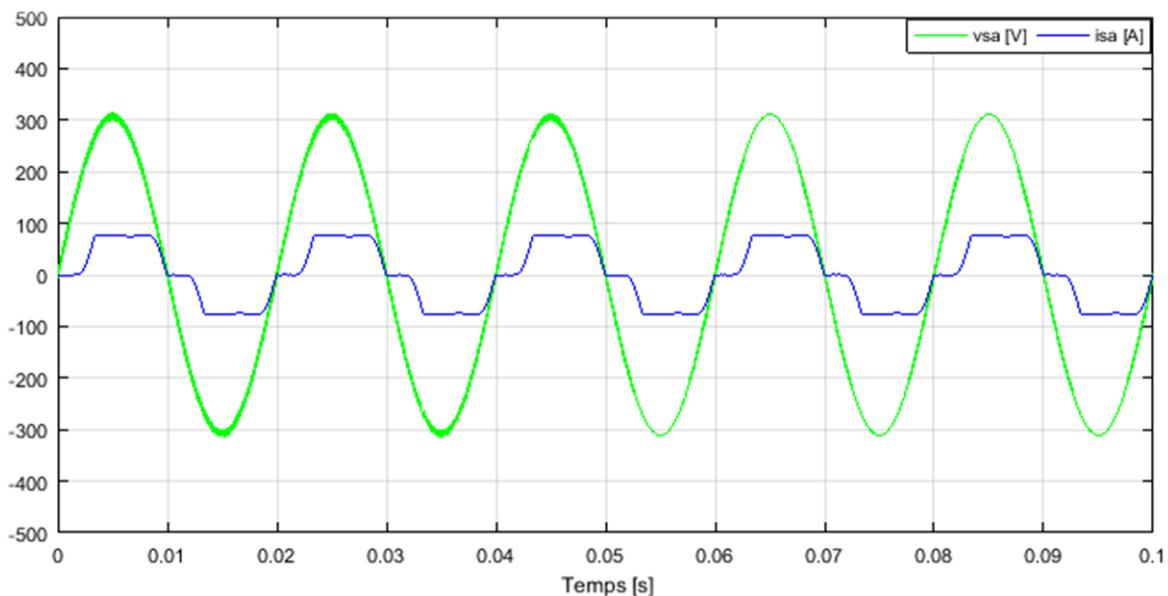


Figure IV.3 : Courant isa déphasé de la tension v_{sa} .

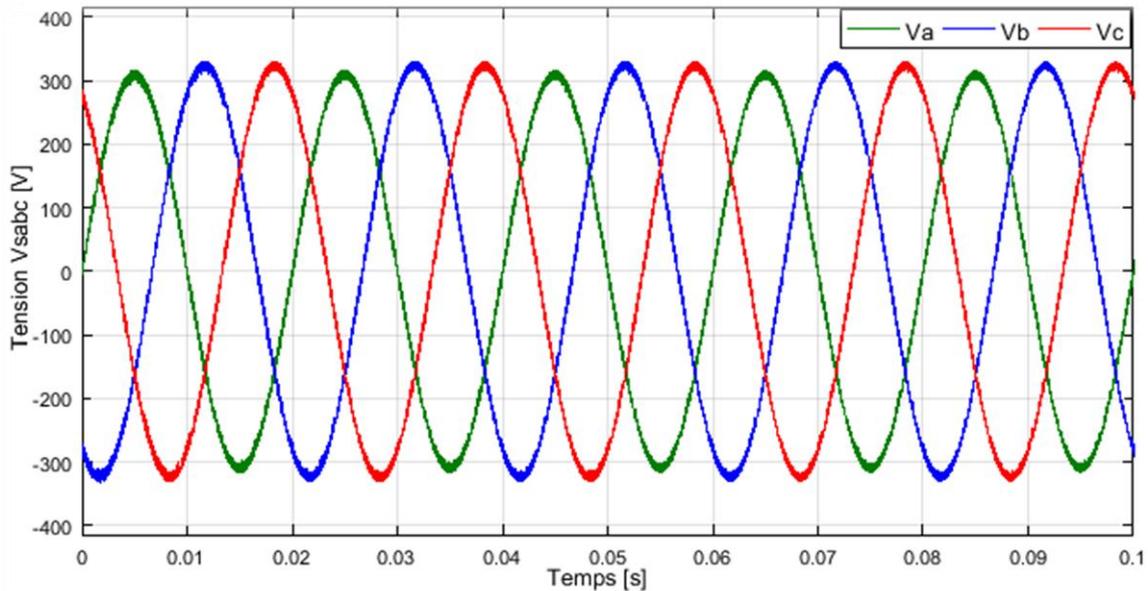


Figure IV.4: Allures des tensions de la source avant compensation.

La figure IV.4, représente les tensions de sortie du filtre actif $vFAa$,

IV.4 Cas d'un onduleur de tension deux niveaux

IV.4.1 Paramètre de simulation

Pour la simulation d'un système régulé avec l'algorithme P-Q et onduleurs de tension deux niveaux

Tableau IV.2: Paramètre de simulation du FAP par l'algorithme P-Q et onduleurs de tension deux niveaux

parametres	Valeur nemurique
Tension du filtre Vc	940 V
Fréquence de commutation (fréquence de la porteuse) f p	10 KHz
Filtre de sortie LFA	1.5 mH
Durée de simulation (ou d'observation) Ts	0.1 s
Inductance en amont de la charge polluante LF	1.5 mH
Inductance de charge DC LC	20 mH
Résistance de charge DC RC	6.5 Ω

IV.4.2 Circuit de puissance

Le circuit de puissance d'un filtre actif parallèle, à base d'un onduleur de tension deux niveaux à IGBT, alimenté par une source photovoltaïque est représenté ci-dessous. La figure IV.5, placée entre un réseau triphasé et une charge non-linéaire polluante

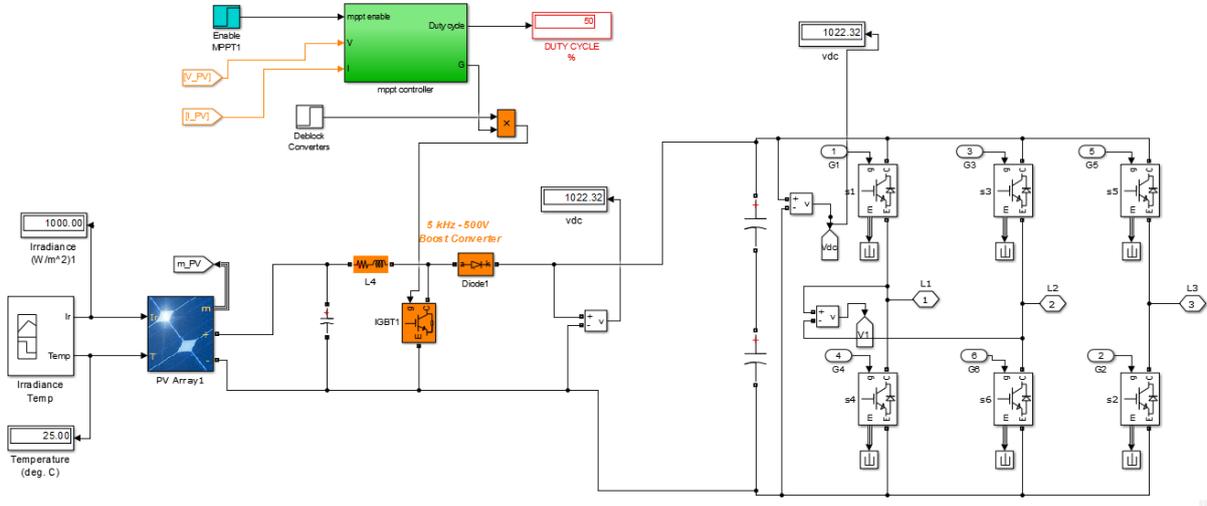


Figure IV.5: onduleur de tension deux niveaux alimentée par une source photovoltaïque

Le modèle établi sous *Matlab-Simulink* est illustré dans la Figure IV.6

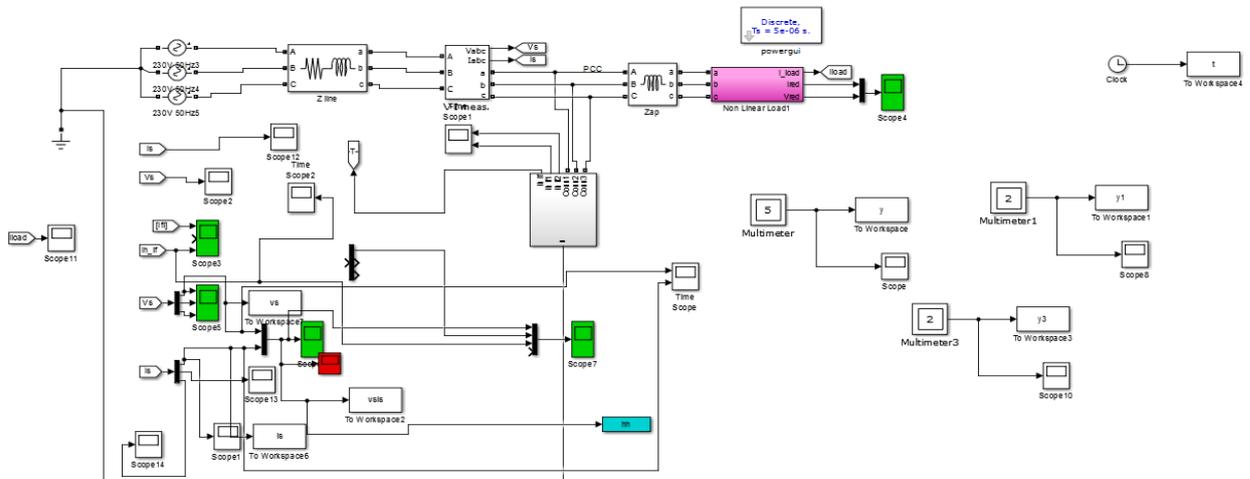


Figure IV.6: Schéma de simulation établi sous *Matlab-Simulink*

IV.4.3 Résultats de simulation

IV.4.3.1 Courant de source après le filtrage

On enregistre une nette amélioration dans l'allure de i_{sa} , après l'utilisation du filtre actif parallèle. Comme illustré par (La figure IV.7). Donc, i_{sa} a été dépollué à un niveau

Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats

meilleur que le niveau précédent, ceci est conforté par le spectre harmonique de la (La figure IV.8). avec un THD de 3.76 % durant 0.1 s.

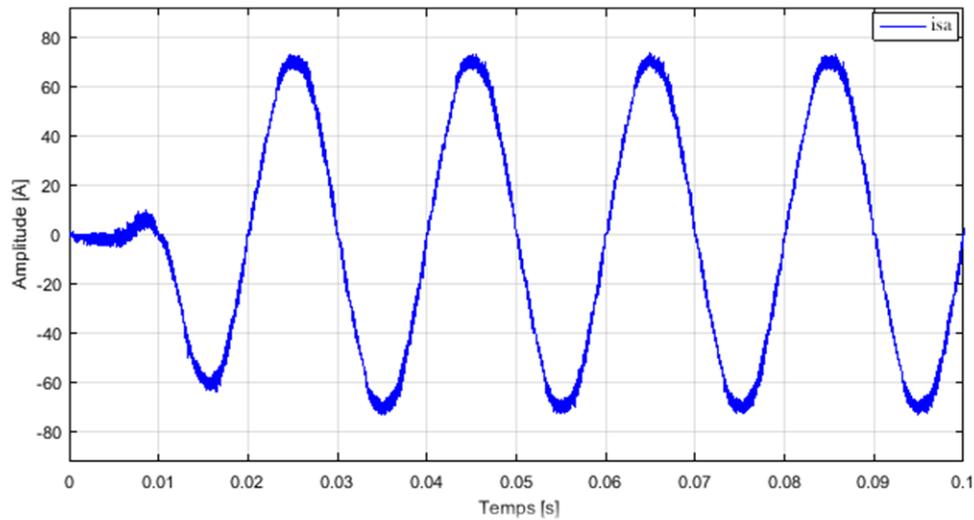


Figure IV.7:Allure de isa après filtrage actif deux niveaux.

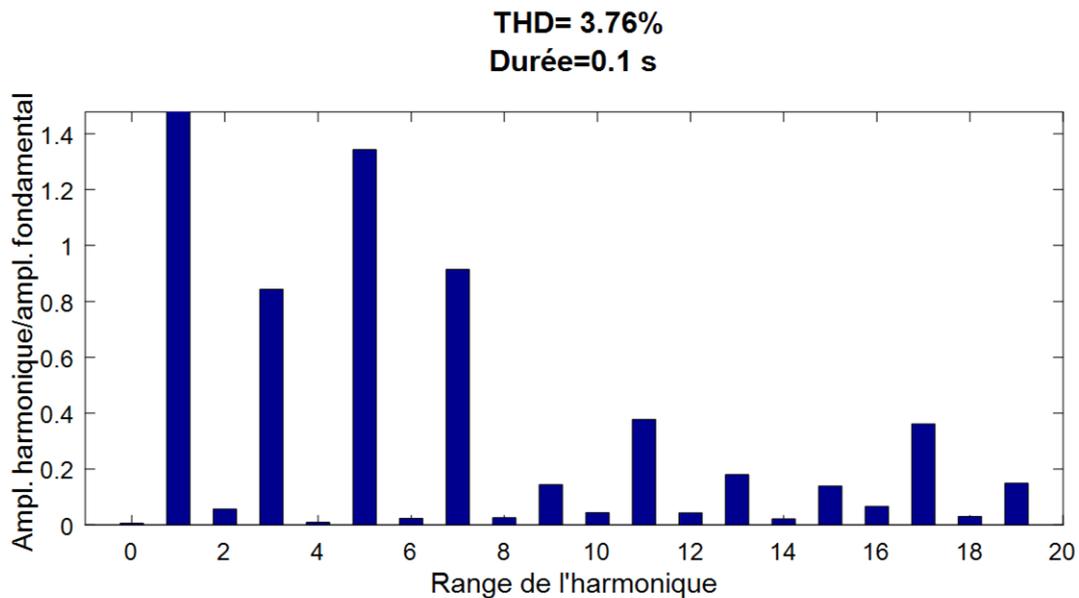


Figure IV.8:Spectre harmonique de isa.

La figure IV.9 représente l'allure du courant et de la tension de la source. On remarque que le courant est pratiquement en phase avec la tension, d'où un facteur de puissance unitaire.

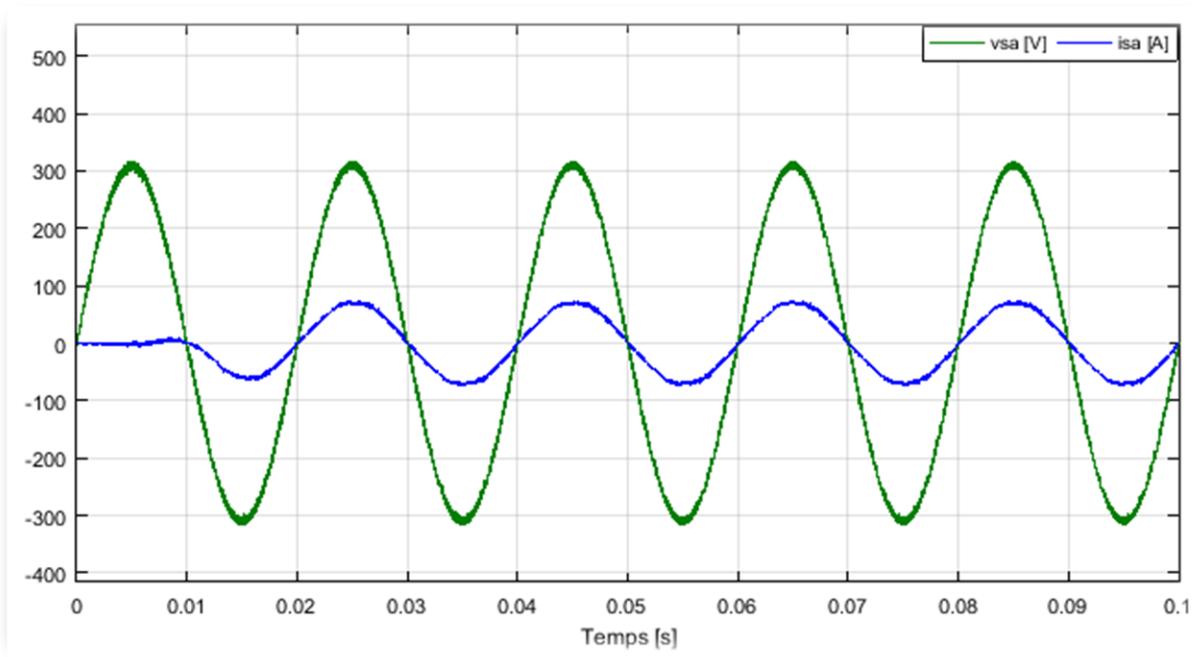


Figure actif IV.9:Allures de isa et vsa après filtrage

En plus la figure IV.10. représente l'allure Courant généré par le filtre actif i_{FAa} et sa référence i^*a On remarque que le is_a ait récupéré son allure sinusoïdale nous ;rassure que le filtre actif a généré un courant $iFAa$ qui suit bien sa référence ii^*a ,

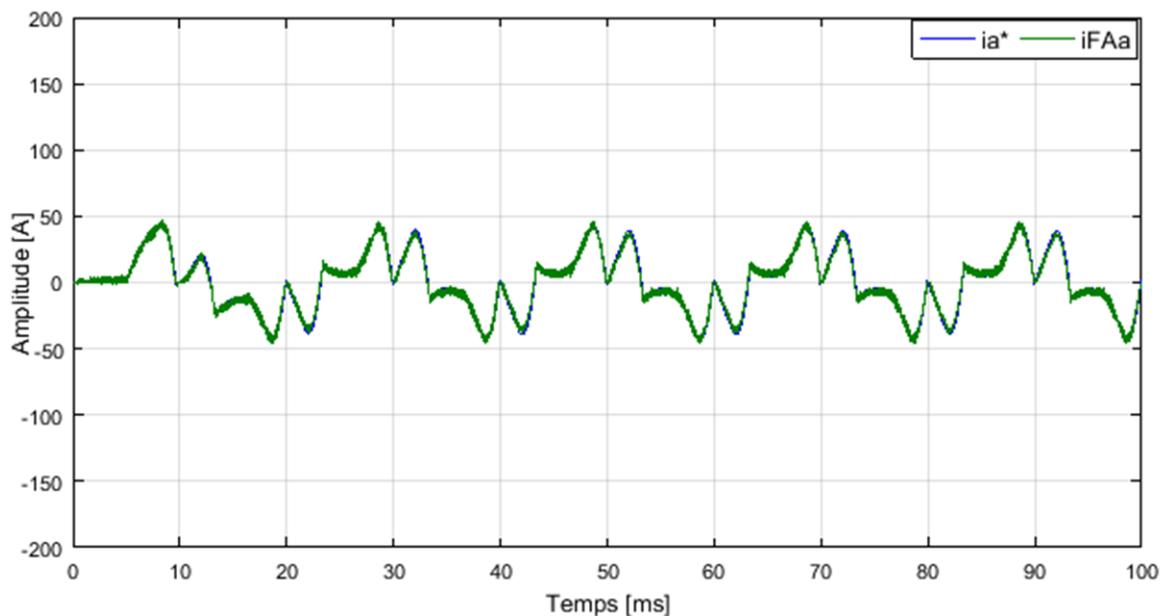


Figure IV.10:Courant généré par le filtre actif i_{FAa} et sa référence i^*a .

D'après la figure IV.11 nous remarquons des déformations dans l'onde du courant de source. Ces dernières se situent spécialement au niveau des intersections de ica (courant absorbé par la charge non linéaire) avec i_{FAa} pour des valeurs non nulles de ces deux

Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats

courants *c.-à-d.* Lorsque i_{FAa} change de sens de progression (montée→ descente ou descente→ montée),

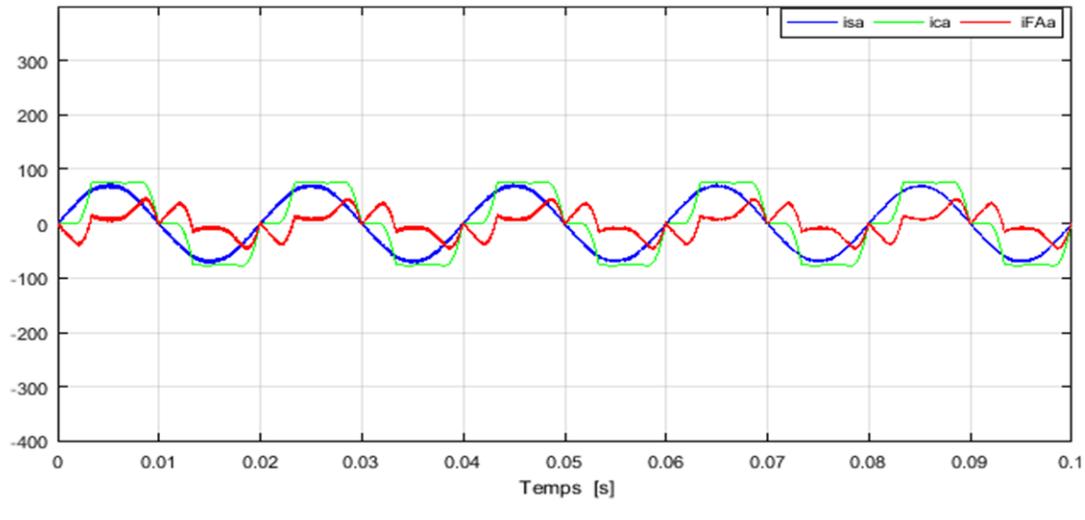


Figure IV.11: Courants de charge non-linéaire ica, de source isa et celui du filtre actif iFAa.

En ce qui concerne l'effet, de la MLI sur le gain en commutation, on constate dans la figure IV.12 (a),(b),(c) représentant les impulsions des trois interrupteurs supérieurs des trois bras du filtre actif (Sa, Sb, Sc), que chaque période de fonctionnement contient un tiers (1/3) où les interrupteurs ne changent pas d'état. Par conséquent, de moindres pertes par commutation peuvent être attendues

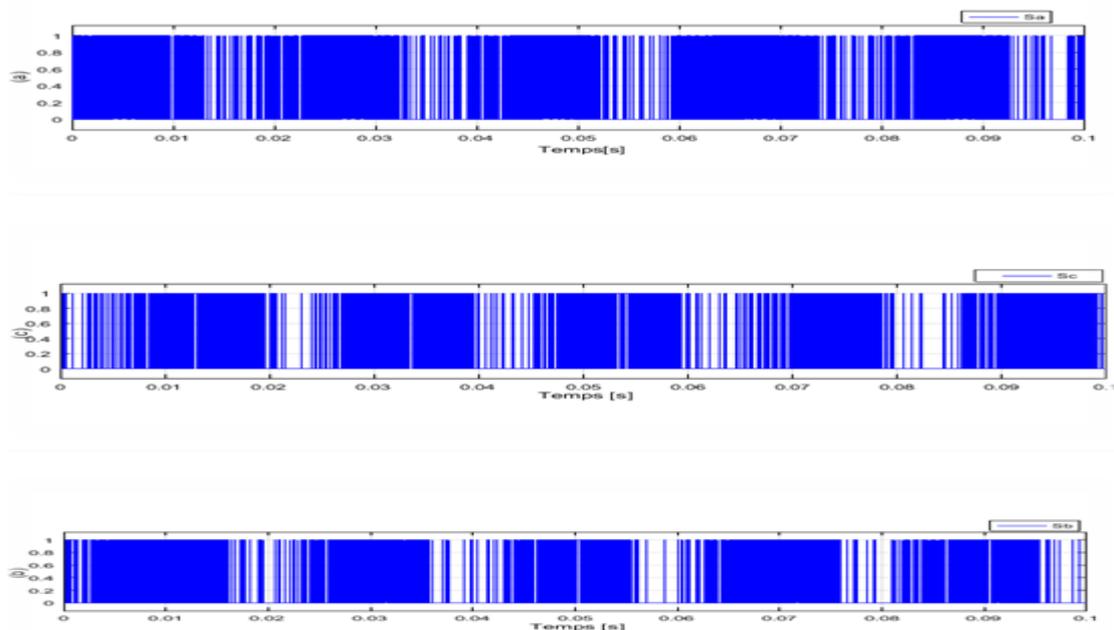


Figure IV.12: Impulsions des 3 interrupteurs supérieurs du filtre actif. (a). Sa. (b). Sb. (c). Sc.

IV.5 Cas d'un onduleur de tension trois niveaux

IV.5.1 Paramètre de simulation

Pour la simulation d'un système régulé avec l'algorithme P-Q et onduleurs de tension deux niveaux

Tableau IV.3: Paramètre de simulation du FAP par l'algorithme P-Q et onduleurs de tension trois niveaux

parametres	Valeur nemurique
Tension du filtre Vc	940 V
Fréquence de commutation (fréquence de la porteuse) f p	10 KHz
Filtre de sortie LFA	1.5 mH
Durée de simulation (ou d'observation) Ts	0.1 s
Inductance en amont de la charge polluante LF	1.5 .5 mH
Inductance de charge DC LC	20.5 mH
Résistance de charge DC RC	6.5 Ω

IV.5.2 Circuit de puissance

Le circuit de puissance d'un filtre actif parallèle, à base d'un onduleur de tension trois niveaux à IGBT, alimenté par une source photovoltaïque est représenté ci-dessous la figure IV.13, placé entre un réseau triphasé et une charge non-linéaire polluante. C'est un filtre actif à base de l'onduleur de tension trois niveaux étudié dans le *Chap. III. III.9.1* Le modèle établi sous *Matlab-Simulink* est le même que celui montré dans la figure.

La seule différence réside au niveau de:

L'onduleur de tension qui fut remplacé par un onduleur trois niveaux,

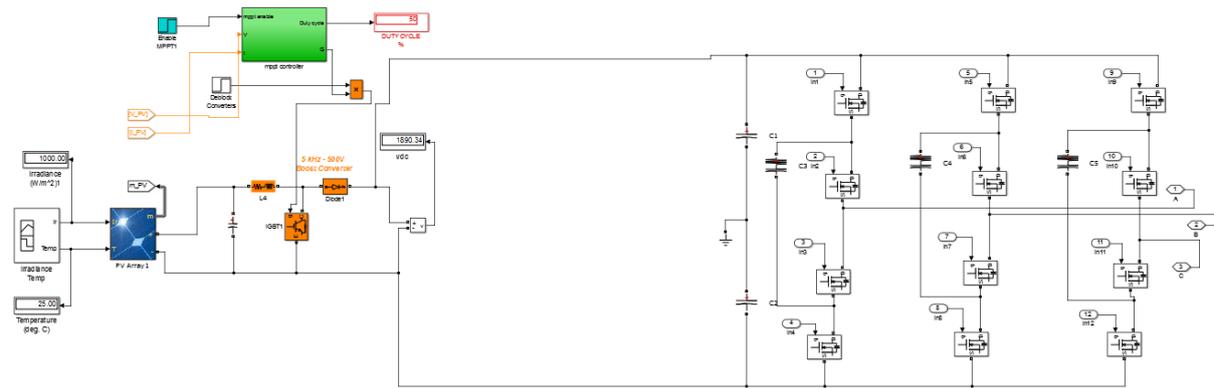


Figure IV.13: onduleur de tension trois niveaux alimenté par une source photovoltaïque

IV.5.3 Résultats de simulation

IV.5.3.1 Courant de source après filtrage actif parallèle

Le courant a récupéré son allure sinusoidale, après l'application du filtre actif parallèle trois niveaux, comme indiqué donne la figure IV.14

La figure IV.15 représente l'analyse spectrale sur les 20 premiers harmoniques donne le spectre avec un THD de 1.92 % pour une durée d'observation de 0.1 s.

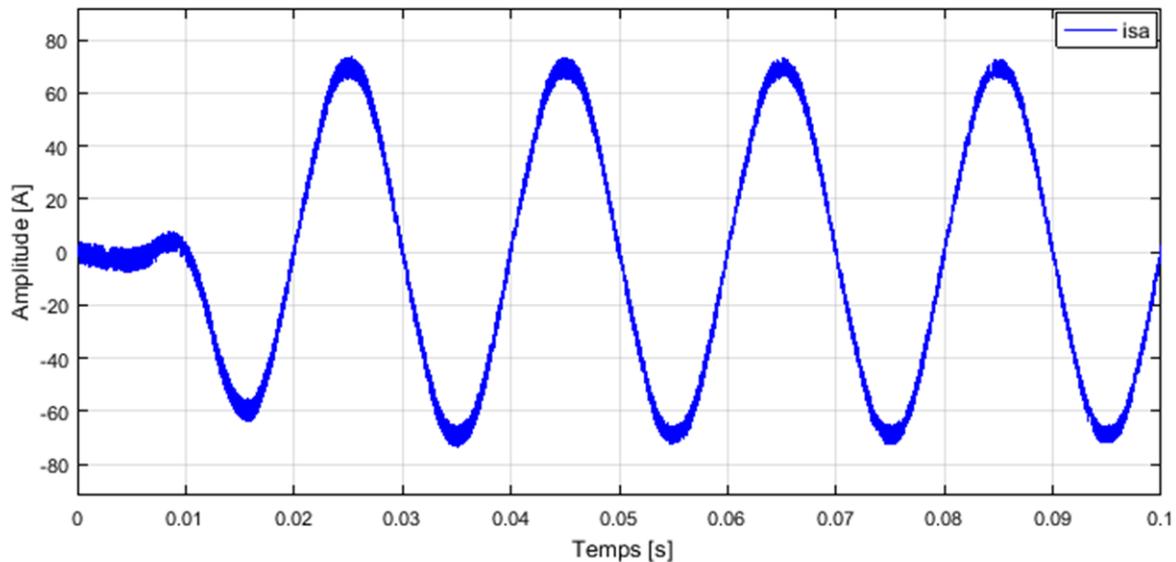


Figure IV.14: Allure de isa après filtrage actif trois niveaux.

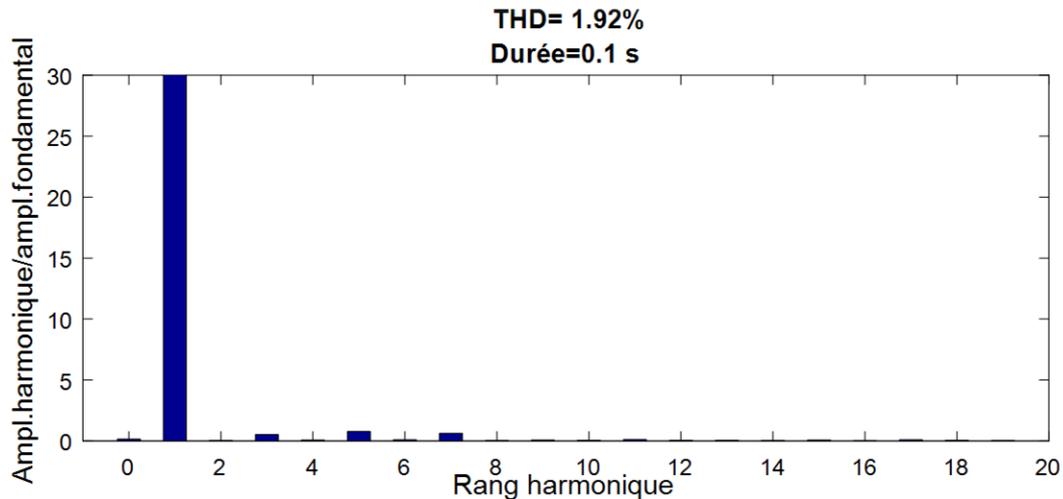


Figure IV.15: Spectre harmonique de isa après filtrage actif trois niveaux.

Le circuit de commande paraît assez convaincant dans la mesure où le courant généré par le filtre actif évolue autour de sa consigne, comme illustré dans la figure IV.16.

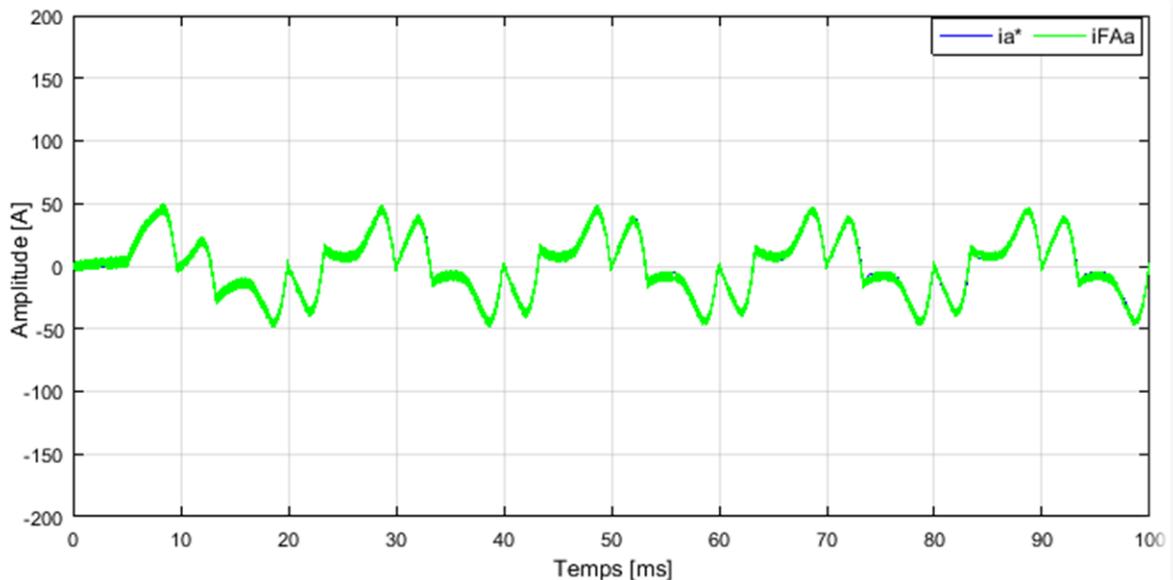


Figure IV.16: Courant généré par le filtre actif trois niveaux *iFAa* poursuivant sa consigne *ia**.

La figure IV.17, représente le courant et la tension de source en phase, indiquent le courant est pratiquement en phase avec la tension, d'où un facteur de puissance unitaire.

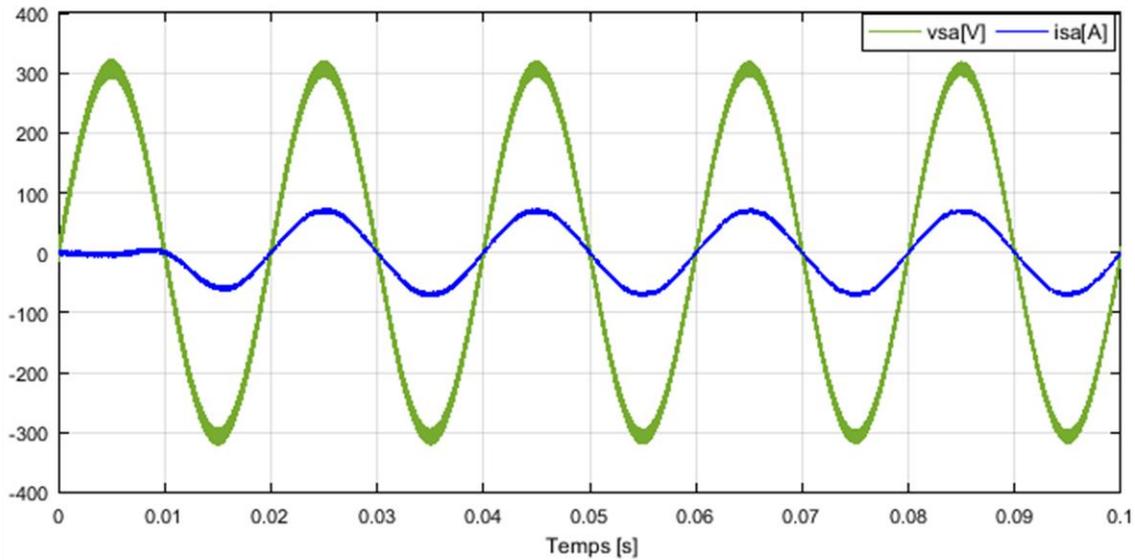


Figure IV.17: Courant et tension en phase (côté source).

De même que pour le cas deux niveaux, les déformations dans la forme de isa se situent dans les points d'intersection non nulles de ica et $iFAa$, comme on peut le voir dans la figure IV.18

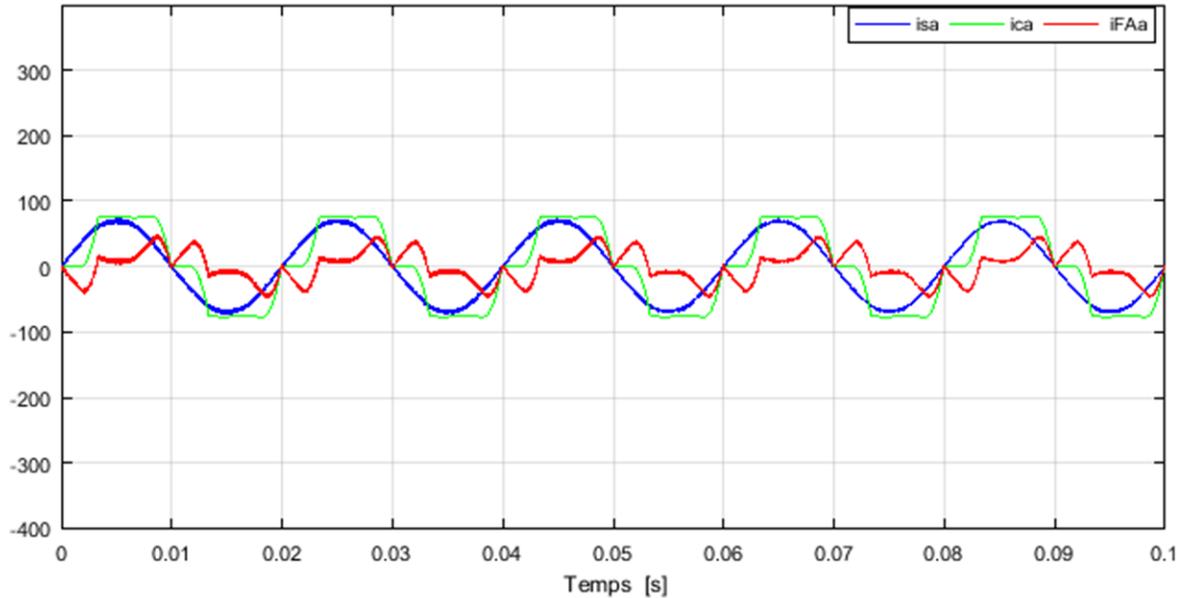


Figure IV.18: Déformations de isa au niveau des intersections non nulles de ica et $iFAa$.

La figure IV.19, représente les impulsions des deux interrupteurs supérieurs du 1^{er} bras de l'onduleur, on voit difficilement un tiers de période sans commutation.

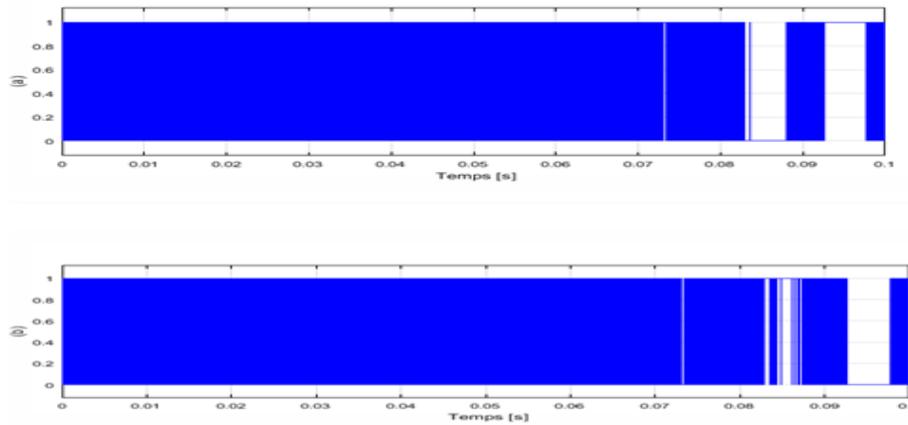


Figure IV.19: Impulsions des deux interrupteurs supérieurs Sa1 et Sa2.

IV.6 Etudes comparative entre FAP 2 niveaux et FAP 3 niveaux

Tableau IV.4: Table de comparaison entre les THD d'onduleur de tension deux niveaux et onduleur de tension trois niveaux

onduleur	THD avant filtre	THD après filtre
2 niveaux	20.69%	3.76%
3niveaux	20.69%	1.92%

Le tableau (IV.4) nous montre évidemment que l'augmentation du nombre de niveaux de l'onduleur diminue le taux de distorsion d'harmoniques.

D'autre part, en comparant les courbes de la figure IV.7 et la figure IV.14 qui représentant le courant de source obtenu respectivement par les filtres actifs parallèles deux et trois niveaux. On trouve quelques différences en faveur du filtre actif trois niveaux avec un THD de 1.92 % en 0.1 s (la figure IV.15) par contre un THD de 3.76 % en 0.1s pour le cas d'un onduleur deux niveaux de la figure IV.8. On peut même conclure que l'augmentation du nombre de niveaux de l'onduleur a un impact significatif sur la qualité de la filtration par rapport à la situation à deux niveaux

IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié deux filtres actifs parallèles alimentés par une source photovoltaïque.

- Le premier FAP est à base d'un onduleur de tension deux niveaux,
- Le second est à base d'un onduleur de tension trois niveaux,

Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats

Après avoir discuté et exploité les différents résultats obtenus par les Deux filtres actifs parallèles, on est passé à une étude comparatives, entre filtres actifs parallèles deux et trois niveaux.

La conclusion à tirer des simulations est que l'augmentation du nombre de niveaux de l'onduleur diminue le taux de distorsion d'harmoniques.

Conclusion générale

Dans ce projet de recherche, nous avons présenté une étude avec simulation d'une association entre un panneau photovoltaïque et un filtre actif parallèle afin de remédier les problèmes liés à la qualité de courant. Et propose des solutions de dépollution des réseaux électriques. Les filtres actifs parallèles représentent une solution efficace pour compenser les harmoniques résultant des charges de type source pour les courants harmoniques. Pour ce faire, nous avons structuré le contenu de notre travail en quatre chapitres.

Dans le premiers chapitres, nous vous présenté les problématique des harmoniques, leurs origines, leurs conséquences et leur réglementation. Et l'ensemble du matériel électrique ainsi que les différentes méthodes de dépollution proposées dans littérature (les méthodes Traditionnelles et d'autres modernes).

Puis en deuxième chapitre, on présente la technologie photovoltaïque où la méthode d'extraction de l'énergie électrique. Un convertisseur élévateur a été utilisé comme interface entre le panneau photovoltaïque et le réseau électrique. Un régulateur (PI) a été utilisé pour la commande de ce convertisseur, et la méthode de MPPT mise en œuvre est de type P&O.

Dans le troisième chapitre, nous avons évoqué l'association entre un panneau photovoltaïque et un filtre actif parallèle multi niveaux de type NPC afin de remédier aux problèmes liés à la qualité de courant.

Finalement, dans le quatrième chapitre nous présentons, les résultats de simulation avec logiciel Matlab/Simulink sans et avec l'application des méthodes de filtrage avec deux topologie (onduleur deux et trois niveaux). Après avoir discuté et exploité les différents

Conclusion générale

résultats obtenus par les Deux filtres actifs parallèles, on est passé à une étude comparatives, entre filtres actifs parallèles deux et trois niveaux.

Bibliographie

Bibliographie

[1] **Alali Mohamed Alaa Edin**, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques », Thèse de Doctorat en génie électrique, Université Louis Pasteur ULP, (France) 2002

[2] **BENNAIDJA Tarek** « *Filtrage actif pour les réseaux déséquilibrés et distordus.* », Mémoire de Magister en génie électrique, université ferhat abbas – setif-1- ufas (algerie) trasbourg, 18 Novembre 2011.

[3] **S. R. DZONDE NAOUSSI**, « Implantation de réseaux neuromimétiques sur cible FPGA-application à l'intégration d'un système de filtrage actif », Thèse de doctorat, Université de S

[4] **H. Kouara**, « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension » mémoire de magister, UNIVERSITE de Batna 08/02/2006.

[5] **A. KOUZOU**, « Compensation Active Des Perturbations Dans Un Réseau Basse Tension », Mémoire de magister, Université M'HAMED BOUGARA – BOUMARDAS 2004

[6] **M. MGRAOUI**, « Validation De Techniques De Commande D'un Filtre Actif Parallèle », Mémoire présenté à l'école de technologie supérieure, Université de Québec, Montréal, le 17/09/2007..

[7] **N. Belhaouchet**, « 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, Université Ferhat Abbas – Sétif 06/07/2011.

[8] **N.D. HAMOUDA**, « Etude Comparative des Techniques de Filtrage des Harmoniques de Courant », Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas – Sétif, 12/07/2010

[9] **Omeiri.Amar**, "Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant "Thèse Doctorat. Université Annaba 2007.

[10] **G. Desquilbet**, C. Foucher, P. Fauquembergue, "Statistical analysis of voltage dips", Notes EDF, 96NR00 102, 1995.

Bibliographie

- [11] **NEKKAR Djamel**, "Contribution à l'étude des stratégies de commande des filtres actifs triphasés " ,Mémoire de magister .Université de Souk-Ahras 2013_2014.
- [12] **V .Ignatova**," Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique Application aux creux de tension et à la pollution harmonique " , Thèse Doctorat. Université de Grenoble 2006.
- [13] **C. Fetha**," Analyse et amélioration de l'indice de la non-symétrie de tension dans la qualité de l'énergie électrique", Thèse Doctorat. Université de Batna 2006.
- [14] **Cour master II**,"Principes de Compensation des harmoniques".
- [15] **B. 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 Soutenue," Thèse de doctorat, Université de Ferhat Abbas, Setif 1, 2011.
- [16] **D. Ouldabdeslam**, « 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, Décembre 2005.
- [17] **B. Gattal**," Méthode d'analyse des perturbations électriques dans la qualité de l'énergie électrique en utilisant des nouvelles techniques pour l'application aux creux de tension",Mémoire de Magister. Université de Batna 2012.
- [18] **A.Arora**, "Solutions innovatrices pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique", Revue Qualité De L'énergie Electrique ABB3/1998. [03].
- [19] **S.A. Tadjer**, « Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque GPV », Mémoire de magister, Université M'hamedBougara – Boumardas 2008.
- [20] **A.Chaoui**, « Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires », Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif, Octobre 2010.
- [21] **A.Bouafia**, « Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs à MLI » Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif, Octobre 2010.
- [22] Contribution à la Commande Directe de Puissance Dédiée au Filtrage Actif, Associé à une Source Photovoltaïque, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra.

Bibliographie

- [23] **SahliAbdeslem**, « Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau », Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas – Sétif, 2012.
- [24] **R. Boubakeur**, « Commande d'un convertisseur multicellulaire pour une application de filtrage actif » mémoire de magister, Université Ferhat Abbas - Sétif(UFAS) –24/06/2012.
- [25] **M. M. Abdusalam**, « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, Mai 2008.
- [26] **I. E. Otadui**, « Sur les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique : application à la qualité de l'énergie », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Septembre 2003.
- [27] **B. SZABADOS**, «Répercussions sur le réseau électrique de l'alimentation des convertisseurs de grande puissance », RGE, Vol. 12, pp. 791-796,1984.
- [28] **A.ELMITWALLY et A.S.ABDELKADER**, «Neural network Controlled three – phase Four Wire shunt active power filter ».Generation ,IEE Proceedings on transmission and Distribution , vol.147.n0 2.p.87-92,2000.
- [29] **S. SAAD et L. ZELLOUMA**, « Fuzzy logic controller for three-level shunt active filter compensating harmonics and reactive power », ELSEVIER, Electric Power Systems Research Vol.79, pp.1337–1341,2009.
- [30] **Laid. Zellouma**, " filtrage actif parallèle des harmoniques du courant génères par un pont redresseur triphasé non commandé ",Mémoire de magister. Université Annaba 2006.
- [31] **H. AKAGI**, « Active Harmonie Filters », IEEE, vol. 93, n°12, p. 2128-2141, 2005.
- [32] **A.HAMIDI**, « contribution à l'Etude du filtre hybrides de puissance Utilisé pour améliore la qualité de l'énergie dans les réseau électrique de distribution » Thèse de doctorat ,Ecole de technologie supérieure –Québec, canada ,2010.
- [33] **A.HAMIDI,S.RAHMANI and K.AI-HADAD**,« fellow ,A New Hybrid Series Active filter configuration to composte voltage sag , swell ,voltage and currant harmonics and

Bibliographie

Reactive power »,IEEE International symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009)Seoul Olympic Parktel, Seoul , Korea,2009.

[34] **S .BOUGUERRA et I.BOURENNANE**, « filtrage actifs parallèles des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive ». mémoire d'ingénieur d'état en génie électrotechnique, Université de m'sila,2007.

[35]**N.GHASSOULI et N.RAOUACHE**, «Application du filtrage actif parallèle sur une charge dynamique non linéaire», mémoire d'ingénieur d'état en génie électrotechnique Université de m'sila, 2007.

[36] **B.Multon**, "Production d'énergie électrique par sources renouvelables", Techniques de l'Ingénieur Traité, D 4005.

[37] **M. Djarallah**, "Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique", Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2008.

[38] **Madani Malika**, "réalisation des couches antireflets dans les cellules solaire a couches minces", thèse de magister, université de Tlemcen, 2006

[39] **BelakehalSoltane**, "Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables", thèse de Doctorat, université de Constantine, 10/06/2010

[40] **Belhadj Mohammed**, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome", Mémoire de Magister, université de Bechar, 2008

[41] **Metri Noura**, "élaboration de module π -conjuguées à base de triphénylamine pour la réalisation de dispositifs photovoltaïques hybrides sensibles", thèse de Doctorat, 30/09/2011

[42] **M. Capderou**, "Atlas Solaire de L'Algérie", Tomel,2, OPU 1983.

[43] **Dang Minh Trung**, "élaboration de cellules solaire photovoltaïque à base de polymères conjugués, études des systèmes", thèse de Doctorat, université de Bordeaux 26/11/2009

[44] **Smaïl SEMAOUI**, « Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'alimentation des maisons individuelles dans les zones du sud Algérien », Thèse de doctorat, soutenue le 26 Avril 2014, Université HADJ LAKHDAR Batna.

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

Bibliographie

- [46] **Y. Pankow**, «Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension application au générateur photovoltaïque », thèse de Doctorat, centre nationale de recherche technologique de lille, 2004.
- [47] **Florent Monestier**, "Amélioration de l'absorption photonique dans les cellules photovoltaïques organiques", thèse de Doctorat, Université de Marseille, 10/04/2008
- [48]**Gernigon Véronique**, "Utilisation de copolymères à blocs dans les cellules solaires organiques morphologie, transport de charges et conversion photovoltaïque", thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, 04/01/2012.
- [49] **M. Z. F.Z. Zerhoun**, "Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique," revue des energies renouvelables, vol. 11 , no. N°1, p. 41–49, 2008.
- [50] **S. PETIBON**, 'Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques', université de Toulouse, 2009.
- [51] **L. ABBASSEN**, ' Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque' Mémoire de magister, université mouloud Mammeri Tiziouzzo, 2011.
- [52] **H. BELGHITRI et H**, ' Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque' mémoire de magister, 2009.
- [53]**T. Fogelman**, « Système photovoltaïque pour les pays en déventement », manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'énergie, (AFME), 1982.
- [54] **C .Bernard, J .Chauvin, D .Lebrun, J. F .Muraz, P. Stassi**, « Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'Observatoire Pierre Auger » 2006.
- [55] **A.Guen**, « Contribution à l'étude des systèmes de télécommunications mobiles » Thèse de Magiste
- [56] **www.solarelectricpower.org**.
- [57] **H.Boukli**, ' Conception et Réalisation d'un Générateur Photovoltaïque Muni D'un Convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique ' Mémoire de Magister Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen 2010/2011.

Bibliographie

[58] **W. Boucheritte**, « Convertisseurs multi niveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau », Mémoire de Magistère, Université de Biskra

[59] **L. ZAROUR**, ' Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque- éolien hors réseau', Thèse Magister université de constantine, 2007.

[60] **Z. Bendjellouli**, ' Contribution a la modélisation d'une cellule solaire', Mémoire de magister université de bachar, 2009.

[61] <http://www.civicsolar.com/forum/9824/what-bypass-diode> (consulté en avril 2012).

[62] **N. Abouchabana**, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT » Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.

[63] **Hua, C., & Shen, C.** (1998, May). Study of maximum power tracking techniques and control of DC/DC converters for photovoltaic power system. In Power Electronics Specialists Conference, 1998. PESC 98 Record. 29th Annual IEEE (Vol. 1, pp. 86- 93). IEEE.

[64] **M. Azab**, « A New Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Systems », International Journal of Electrical and Electronics Engineering, Vol. 3, N°11, 2009.

[65]. **S. Khaled**, « Etude et réalisation d'un hacheur de Tracking du Point de Puissance Maximale (MPPT) a contre réaction de tension », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2003.

[66] **I. Bendjamaa**, 'Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque 'Mémoire de Magister Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen 2011/2012

[67] **C. Xie Donghua, X. Shaojun**, « *Review of the control strategies applied to active power filters* », Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. Proceedings of the IEEE International Conference on, pp.666-670, Vol.2, April 2004.

[68] **N.H. Mendalek**, « *Qualité de l'onde électrique et moyens de mitigation* », Thèse doctorat, Ecole de technologie supérieure, Université du Québec 2003.

[69] **B. SAMIR**, « Filtrage actif parallèle des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive », Thèse ingénieur d'état en génie électrique Université Msila 2007.

[70] **Thierry Gouraud**, « Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique », Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes, 7

Bibliographie

Janvier 1997. de Doctorat de l'Université de Louis Pasteur – Strasbourg, 12 Septembre 2002.

[71] **C. Lott, O. Lapiere, H. Pouliquen et S. Saadate**, « Filtrage actif des harmoniques en courant et en tension des réseaux électriques: modélisation, simulation numérique et expérimentation », Dec1997, PP.2433-2457.

[72] **Z. Laid, B.-S. Salem**, « Etude et réalisation d'un onduleur monophasé utilisant la technique PWM à base " MOSFET" », Mémoire d'ingénieur de l'Université de Biskra, 2004.

[73] : **BOUKADOUM Aziz**, << Contribution à l'étude des stratégies d'identification Harmoniques et de commande basées sur les techniques avancées pour les compensateurs actifs des réseaux électriques >> thèse de doctorat, université badjimokhtarannaba ,2015.

[74] **Zabihi, S. and F. Zare** ,*Active Power Filters with Unipolar Pulse Width Modulation to Reduce Switching Losses*. International Conférence on Power System Technology (PowerCon), p.1 - 5. 2006.

[75] **P. Ladoux, G. Ollé**, « Compensateur d'harmoniques et de puissance réactive », Publication RESELEC 2002.

[76] **G.Grellet&G.Clerc**, "Actionneurs Electriques:Principes, Modèles Commandes", Chapitre 9, pp. 217–221, 2ème tirage, Ed. Eyrolles, Paris 2000.

[77] **M. Routimo, M. Salo, H. Tuusa**, " Comparison of voltage-source and current source shunt active power filters", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no.2, pp. 636-643, March 2007.

[78] **S. Karim**, « 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, Janvier 2009.

[79]: **B. Fléche, D. Delagnes**, «énergie solaire photovoltaïque», STI ELT juin 2007.

[80] **H. Akagi**, « New trends in active filters for power conditioning », IEEE Trans. On Industry applications, vol. 32, No. 6, pp. 1312-1322, November/December 1996.

[81] **H. Akagi**, « Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems », IEEE Trans. on power delivery, vol. 12, No. 1, pp. 354-363, January 1997.

[82] **KEBIRI SAMIA**, <<modélisation et simulation d un filtre actif multi niveaux >> thèse magistrale, université mouloud Mammeri, tizi_ ouzou, 2009.

[83] **Boucif Abdelmalek** «Filtrage actif d'un réseau Électrique», Mémoire de Fin d'Etudes

Bibliographie

Université Mohamed Khider Biskra, 2013 / 2014.

] [84] **GHADBANE Ismail**, <<Etude Et Réalisation D'un Filtre Actif Parallèle En Utilisant Différentes Stratégies De Contrôle >>, thèse de Doctorat, Université Mohamed **Khider** – **Biskra**, 2016.

[85] **J. Lesenne, F. Notelet, & G. Segulier**, “Introduction à l'électrotechnique approfondie”, Chapitre 4, pp. 53–73, Ed. Technique & Documentation, Paris, 1981.