

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par :

MEDDOUR Youcef

YAZI Zoubir

Thème:

Etude de raccordement d'un système photovoltaïques au réseau électrique

Soutenu publiquement

Le :08/06/2015

Devant le jury :

M^r benmir abdelkader

MA(A)

Président

UKM Ouargla

Mme Benbouza Naima

MA (A)

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M^{me} Belkebir Amel

MA (A)

Co-Encadreur

UKM Ouargla

M^r Djafour Ahmed

MC (A)

Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire 2014/2015

REMERCEMENTS

Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail .

Nous tenons à remercier nos encadreur M^{me} Naima BENBOUZA et M^{me} Amel BELKBIR d'avoir posé un sujet très intéressant et pour leurs conseils, leur disponibilité et pour nos avoir fait profiter de leurs connaissances et de leurs qualités tant professionnelles qu'humaines.

Nos respectueux remerciements à l'ensemble des membres du jury pour l'intérêt porté sur notre travail.

Nous voudrions témoigner notre reconnaissance à M. Djamel TAIBI. Qu'il trouve ici l'expression de notre gratitude pour l'intérêt qu'il a accordé à notre travail.

Y. Zoulik & M. Youcef

DEDICACES

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.

A tous mes camarades et mes amis en particulier
MEDDOUR Abdessamed, BELBACHA Mohammed
Fouad, LARUI Souleymene.

M. Youcef

DEDICACES

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.

*A tous mes camarades et mes amis en particulier
LAHRECHE Yaakoub , LARUI Souleymene .*

Y. Zoubir

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Qualité de l'énergie électrique	
I.1. Introduction	3
I.2. Qualité de l'énergie électrique	3
I.2.1. Qualité de la tension électrique.....	3
I.2.1.1. Amplitude.....	3
I.2.1.2. Fréquence	4
I.2.1.3. Forme d'onde.....	4
I.2.1.4. Symétrie.....	4
I.2.2. Qualité du courant.....	4
I.3. problèmes de dégradation de la qualité de l'énergie électrique (perturbations électriques).....	5
I.3.1. Creux de tension et coupures brèves.....	6
I.3.1.1. Définition, origine.....	6
I.3.1.2. Impact des creux de tension et des coupures brèves sur les équipements industriels.....	7
I.3.1.3. Effets des creux de tension sur les autres éléments habituels d'une installation industrielle.....	8
I.3.2. Surtensions	8
I.3.2.1. Définition, origine.....	8
I.3.2.2. Conséquences des Surtensions.....	9
I.3.3. Variations de tension.....	10
I.3.3.1. Définition et origine.....	10
I.3.3.2. Conséquences.....	10
I.3.4. variation de la fréquence	10
I.3.4.1. Définition, origine et conséquences.....	10
I.3.5. Déséquilibre.....	11
I.3.5. 1. Définition, origine et Conséquences.....	11
I.3.6. Harmoniques et inter harmoniques	12
I.3.6.1. Définition.....	12
I.3.6.2. Origines des harmoniques	12
I.3.6.3. Grandeurs caractéristiques.....	13
I.3.6.3.1. Grandeur harmonique.....	13
I.3.6.3.2. Rang de l'harmonique.....	13
I.3.6.3.3. Série de Fourier	13
I.3.6.3.4. Expression de la valeur efficace	13
I.3.6.3.5. Taux de distorsion harmonique THD	14
I.3.6.3.6. Spectre d'harmonique.....	14
I.3.6.3.7. Charges linéaires et non linéaires	14
I.3.6.4. Effets des perturbations harmoniques	15
I.3.6.5. Influence des harmoniques sur le facteur de puissance FP.....	16
I.3.7. Réduction de la pollution harmonique	17
I.3.7.1. Absorption sinusoïdale.....	17
I.3.7.2. Ajout d'une inductance de lissage du courant.....	17

Sommaire

I.3.7.3. Transformateur à couplage spécial.....	17
I.3.7.4. Filtres passifs d'harmoniques	18
I.3.7.4.1. Filtre passif résonant.....	19
I.3.7.4.2. Filtre passif amorti.....	19
I.3.7.4.3. Phénomène de l'antirésonance.....	20
I.3.7.5. Filtres actif d'harmoniques.....	20
I.3.7.5.1. Filtre actif parallèle.....	21
I.3.7.5.2. Filtre actif série.....	21
I.3.7.5.3. Combinaison parallèle série actif.....	22
I.3.7. 6. Filtre actif hybride.....	23
I.4. Conclusion.....	23
Chapitre II : production d'énergie photovoltaïque	
II.1. Introduction	24
II.2. Les cellules photovoltaïques	24
II.2. 1. Description de la cellule.....	24
II.2. 2. Principe de fonctionnement	26
II.2. 3. Caractéristiques de la cellule photovoltaïque.....	27
II.2. 3.1. Paramètres d'une cellule PV	29
II.2.3.1.1. Le courant de court-circuit (I_{cc})	29
II.2.3.1.2. Tension de circuit-ouvert (V_{co}).....	29
II.2. 3. 1.3. La puissance maximale.....	29
II.2. 3. 1.4. Facteur de forme FF.....	30
II.2. 3. 1. 5. L'efficacité (rendement) maximale de la conversion.....	30
II.2. 3.2. Influence de l'éclairement	30
II.2. 3.3. Influence de la température.....	31
II.2. 3.4. Influence de l'association série des cellules PV.....	33
II.2. 3.5. Influence de l'association parallèle des cellules PV.....	34
II.2. 3.6. Influence de l'association mixte (Série + Parallèle) des cellules PV....	35
II.3. Les différentes technologies des cellules PV.....	35
II.3.1. Cellules cristallines.....	36
II.3.1.1. La cellule monocristalline.....	36
II.3.1.2. Les cellules poly-cristallines.....	36
II.3.2. Cellules à couches minces.....	36
II.4. Classification d'un système solaire photovoltaïque	36
II.4.1. Système autonome.....	37
II.4.2. Système hybride.....	37
II.4.3. Système PV raccordée au réseau	38
II.5. Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution.....	38
II.5.1. Influence sur le plan de tension.....	38
II.5.2. Influence sur la qualité de l'énergie.....	39
II.5.2.1. Injection d'harmoniques de courant.....	39
II.5.2.2. Injection de courant continu au réseau.....	39

Sommaire

II.5.2.3. Déséquilibre entre phases	39
II.6. Influence du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques	40
II.6.1. Régime de neutre et courants de fuite.....	40
II.6.2. Creux de tension et tenue des systèmes.....	41
II.6.3. Présence de composante continue et d'harmoniques de tension.....	41
II.7. Convertisseur de puissance de système photovoltaïque.....	41
II.7.1. Convertisseur DC/DC pour les systèmes d'énergie solaire.....	41
II.7.1.1. Hacheur dévolteur.....	42
II.7.1.2. Hacheur survolteur.....	44
II.7.1.3. Hacheur dévolteur-survolteur.....	45
II.8. Commande (MPPT) des convertisseurs DC/DC	47
II.8. 1. Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation DC-DC.....	47
II.8. 2. Les méthodes de poursuite de MPP	48
II.8.2.1. Méthodes a contre réaction de tension.....	48
II.8.2.2. Méthodes a contre réaction de courant.....	48
II.8.2.3. Méthodes a contre réaction de puissance	49
II.8.2.3.1. Algorithme perturbation et observation.....	49
II.8.2.3.2. Algorithme incrémentation de la conductance.....	50
II.9. Les onduleurs	51
II.9.1. Structure d'onduleur.....	51
II.9.2. Principe de fonctionnement	52
II.9.2.1. Commande plein onde.....	52
II.9.2.2. Commande MLI.....	52
II.10. Conclusion.....	53
Chapitre III : simulation du système de compensation photovoltaïque	
III.1. Introduction.....	54
III.2. Le Système de Compensation Photovoltaïque proposée	54
III.3. Simulation du générateur PV.....	54
III.3.1. Simulation du générateur (GPV) à éclairement et température constante.....	56
III.3.2. Simulation du générateur (GPV) à éclairement et température variable.....	56
III.3.2.1. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique ($I_{pv} = f(V_{pv})$)	57
III.3.2.2. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique ($P_{pv} = f(V_{pv})$)	57
III.3.2.3. L'influence de la température sur la caractéristique ($I_{pv} = f(V_{pv})$)...	58
III.3.2.4. L'influence de la température sur la caractéristique ($P_{pv} = f(V_{pv})$)	59
III.4. Simulation du system photovoltaïque avec hacheur commandé en MPPT	59

Sommaire

III.4.1. Schéma de simulation	60
III.4.2. Résultat de simulation.....	60
III.5. Simulation globale de système PV en fonctionnement autonome.....	62
III.5.1. Schéma de simulation	62
III.5.2. Résultat de simulation	62
III.6. Simulation global de PV raccordé au réseau.....	64
III.6.1. Modélisation de réseau BT.....	64
III.6.2. Schéma de simulation de réseau.....	65
III.6.3. Le filtre LC	66
III.6.4. Schéma de simulation globale	66
III.6.5. Résultats de simulation le réseau sans filtre.....	68
III.6.6. Résultats de simulation le réseau avec filtre.....	69
III.7. conclusion.....	71
Conclusion générale.....	72

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1 : Creux de tension et coupure brève	7
Figure I.2 : Exemple de Surtension	9
Figure I.3 : Fluctuations de tension	10
Figure I.4 : Variation de fréquence	11
Figure I.5 : déséquilibre du système triphasé de tension	11
Figure I.6 : Exemple d'harmoniques	12
Figure I.7 : Le spectre des harmoniques du courant de charge polluante	14
Figure I.8 : diagramme de Fresnel des puissances	16
Figure I.9 : Raccordement d'un filtre passif	18
Figure I.10 : Structure du filtre passif résonant	19
Figure I.11 : Structure du filtre passif amorti	19
Figure I.12 : Structure du filtre passif parallèle anti-résonant	20
Figure I.13 : Montage du filtre actif parallèle	21
Figure I.14 : Montage du filtre actif en série	22
Figure I.15 : Filtre combiné parallèle-série (UPQC)	22
Figure I.16 : Filtre actif hybride	23

Chapitre II :

Figure II.1 : Description d'une cellule	25
Figure II.2 : Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction	26
Figure I.3 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	27
Figure II.4 : caractéristique I-V	29
Figure II.5 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$	30
Figure II.6 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$	31
Figure II.7 : L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$	32
Figure II.8 : L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$	32
Figure II.9 : Association de N modules solaires en série	33
Figure II.10 : Caractéristique de nombre des modules en série	34
Figure II.11 : Association de N_p modules solaires en parallèle	34
Figure II.12 : Caractéristique de nombre des modules en parallèles	34
Figure II.13 : Association mixte $N_s \times N_p$ modules solaires	35
Figure II.14 : Caractéristique de nombre des modules en série et parallèle	35
Figure II.15 : Différents technologie des cellules PV	36
Figure II.16 : Exemple de la structure d'un système PV autonome	37

Figure II.17 : Exemple de variations de tension sur un réseau BT en fonction de la présence de production PV	39
Figure II.18 : Schéma simplifié du courant de fuite via les capacités des panneaux PV, la Terre et l'onduleur	40
Figure II.19 : Symbole d'un convertisseur DC-DC	42
Figure II.20 : Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur	42
Figure II.21 : Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur	43
Figure II.22 : Schémas équivalents du hacheur dévolteur	43
Figure II.23 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost	44
Figure II.24 : Schémas équivalents du hacheur survolteur	44
Figure II.25 : Schéma de simulation d'un hacheur boost	45
Figure II.26 : Schéma de principe d'un Convertisseur dévolteur-survolteur	46
Figure II.27: Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur	46
Figure II.28: Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC-DC) contrôlé par une commande (PPM) sur charge DC.	48
Figure II.29 : Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O)	49
Figure II.30 : Algorithme incrémental conductance	50
Figure II.31 : Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé	51
Figure II.32 : Structure d'un onduleur triphasée	51
Figure II.33 : Schéma de simulation d'un onduleur triphasée	52
Figure II.34 : Principe de la commande MLI et les impulsions d'un interrupteur	53
Figure II.35 : Schéma de simulation d'une commande MLI	53

Chapitre III :

Figure III.1 : schéma synoptique d'un système photovoltaïque relié au réseau électrique	54
Figure III.2 : Modèle de simulation d'un générateur PV	55
Figure III.3 : Caractéristique (courant-tension) et (puissance-tension) du GPV	56
Figure III.4 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique ($I_{pv} = f(V_{pv})$)	57
Figure III.5 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique ($P_{pv} = f(V_{pv})$)	58
Figure III.6 : Influence de la température sur la caractéristique ($I_{pv} = f(V_{pv})$)	58
Figure III.7 : Influence de la température sur la caractéristique ($P_{pv} = f(V_{pv})$)	59
Figure III.8 : Schéma de simulation d'un PV et un hacheur commandé en MPPT	60
Figure III.9 : Caractéristique $V_{pv} = f(t)$ et $V_s = f(t)$ du haheur boost	60
Figure III.10 : le courant de GPV	61
Figure III.11 : La puissance de module photovoltaïque	61
Figure III.12 : Schéma de simulation globale PV- hacheur boost	62
Figure III.13 : La tension et la puissance d'entrée de l'onduleur	63

Figure III.14 : Le courant d'entrée et la sortie de l'onduleur	63
Figure III.15 : la tension simple et composé de l'onduleur	64
Figure III.16 : Système de tensions triphasé équilibré	64
Figure III.17 : Schéma de simulation de réseau	65
Figure III.18 : Schéma de simulation de filtre	66
Figure III.19 : Schéma de simulation de champ photovoltaïque	67
Figure III.20 : Schéma de simulation global PV raccordé au réseau	67
Figure III.21 : les tensions simple et les courants simple de réseau	68
Figure III.22 : Analyse spectrale de tension et courant de réseau	68
Figure III.23 : : la tension, le courant et la puissance du GPV	69
Figure III.24 : la tension composée, la tension simple et le courant de sortie de l'onduleur	69
Figure III.25 : : les tensions simple et les courants simple de réseau	70
Figure III.26 : Analyse spectrale de tension et courant de réseau	70
Figure III.27 : la puissance active et réactive de réseau	71

Liste des tableaux

Tableau (III.1) : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau MSX-60 dans les conditions standards «CST»	55
--	----

Abréviation utilisée

PV: Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

FF: Facteur de forme.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O: Perturbation et Observation.

DC: Courant Continu (Direct Current).

AC: Courant Alternatif (Alternative Current).

IEEE : institut européen de l'énergie électrique



introduction générale

introduction générale

Au niveau mondial, le marché des systèmes photovoltaïques connaît, depuis plus de **10 ans**, un taux de croissance très élevé, de l'ordre de **30 à 40%** par an. Cette croissance exceptionnelle, due principalement aux systèmes photovoltaïques raccordés au réseau de distribution d'électricité, se traduit bien évidemment par des innovations technologiques et une baisse de coûts des modules photovoltaïques mais aussi à des efforts importants de recherche et développement dans le domaine de l'électronique de puissance.

En effet, les performances techniques et la fiabilité des convertisseurs statiques utilisés pour le raccordement des systèmes photovoltaïques au réseau de distribution d'électricité, sont des paramètres qui peuvent très fortement faire varier la production d'énergie électrique annuelle et donc la rentabilité financière d'un système.

Cependant, le raccordement des systèmes PV au réseau de distribution peut avoir quelques impacts sur les réseaux électriques : impacts sur le changement des flux de puissance (bidirectionnel), sur le plan de tension, sur le plan de protection, sur la qualité de l'énergie ou sur la planification du réseau... D'un autre côté, les caractéristiques, le fonctionnement et les perturbations sur les réseaux de distribution peuvent influencer le fonctionnement des systèmes PV.

Notre objectif dans ce présent travail est l'étude de la qualité de l'énergie des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau électrique système PV, réalisé en trois chapitres et une conclusion générale.

- ✚ **Le chapitre I :** définit le terme « qualité de l'énergie électrique » et présente les principaux types de perturbations ainsi que leurs origines, causes, conséquences et caractéristiques.

- ✚ **Le chapitre II :** présente une description générale sur la production de l'énergie par les systèmes photovoltaïques avec la présentation des convertisseurs **DC/DC** et **AC-AC** utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Nous décrivons ensuite la problématique des harmoniques qui sont liées aux systèmes PV du fait de l'existence des convertisseurs statiques dans la chaîne du système, avec la présentation de leurs origines, leur

caractérisation et leurs conséquences. On termine ce chapitre par la présentation des différentes solutions, traditionnelles et modernes de dépollution harmonique.

✚ **Le chapitre III** : nous présentons la simulation d'un système photovoltaïque raccordé au réseau sous l'environnement Matlab Simulink. Pour obtenir une bonne qualité d'énergie injectée au réseau, il est nécessaire d'introduire un filtre à la sortie de l'onduleur qui aura pour fonction l'élimination des harmoniques et ainsi l'amélioration de la qualité d'énergie injecté au réseau. Ce but sera mis en évidences par l'observation des courbes de simulation de deux essai sans filtre et avec filtre.

✚ En fin, on termine ce mémoire par une conclusion générale.



Chapitre I
Qualité de l'énergie
électrique

I.1. Introduction

La qualité de l'énergie électrique est un terme très répandu dans le domaine scientifique et industriel. Ce concept détermine les paramètres qui définissent les propriétés du produit électricité en conditions normales, en terme de continuité de la fourniture et des caractéristiques de la tension (symétrie, fréquence, amplitude, forme d'onde). Cette vision a pour but de déterminer les caractéristiques de la fourniture électrique afin de limiter son influence sur les différentes charges connectées au réseau, les principales perturbations électriques ainsi que leurs origines, caractéristiques et conséquences [1].

Selon l'**IEEE**, on appelle "**power quality problème**" toute variation dans l'alimentation en puissance électrique, ayant pour conséquence le dysfonctionnement ou l'avarie d'équipements des utilisateurs, telle que : creux de tension, surtension, transitoire, fluctuations de tension harmoniques, déséquilibre... Cependant, tous ces phénomènes affectent essentiellement la tension qui est fournie à l'utilisateur. Si ce dernier n'utilise pas de charge perturbatrice, le courant sera peut-être déformé, mais uniquement d'une manière qui résulte des caractéristiques de la tension fournie. C'est pourquoi on dit parfois que la qualité de l'énergie se réduit à la qualité de la tension (**power quality = voltage quality**) [1].

Ce chapitre définit le terme « qualité de l'énergie électrique », et présente les principales perturbations électriques ainsi que leurs origines, caractéristiques et conséquences.

Nous prenons systématiquement comme base le système triphasé, le monophasé étant considéré comme un cas particulier.

I.2. Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de **la tension** et de **la qualité du courant**. Nous allons donc définir ces deux notions dans la suite de ce paragraphe.

I.2.1. Qualité de la tension électrique

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, qui possède quatre caractéristiques principales : **amplitude, fréquence, forme d'onde** et **symétrie**

I.2.1.1. Amplitude

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Habituellement l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de $\pm 10\%$ autour de la valeur

nominale. Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est une constante. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions. En fonction de la variation de l'amplitude on distingue deux grandes familles de perturbations [3] :

- ✚ Les creux de tension, coupures et surtensions. Ces perturbations se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude. Elles ont pour principale origine des courts-circuits, et peuvent avoir des conséquences importantes pour les équipements électriques.
- ✚ Les variations de tension. Ces perturbations se caractérisent par des variations de l'amplitude de la tension inférieure à **10%** de sa valeur nominale. Elles sont généralement dues à des charges fluctuantes ou des modifications de la configuration du réseau.

I.2.1.2. Fréquence

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de **50** ou **60 Hz** selon le pays [4].

I.2.1.3. Forme d'onde

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à **50Hz** associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à **50 Hz** appelées également harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non périodiques (bruits) [2].

I.2. 1.4. Symétrie

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. Les dissymétries du réseau ne provoquent que de faibles niveaux de déséquilibre de la tension (généralement limités à quelques dixièmes de pourcent). Par contre, certaines charges monophasées (en particulier la traction ferroviaire en courant alternatif) sont la cause de courants déséquilibrés importants et dès lors d'un déséquilibre significatif de la tension [3].

I.2.2. Qualité du courant

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

fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constante, déphasés de $\frac{2\pi}{3}$ radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale [2].

Le terme « **qualité du courant** » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « **la qualité de la tension** ». C'est l'hypothèse que nous ferons dans la suite de ce mémoire, où le terme de « qualité de l'énergie » s'applique uniquement à celle de la tension [2].

I.3. problèmes de dégradation de la qualité de l'énergie électrique (perturbations électriques)

En se basant sur les paramètres caractérisant la tension et énumérés au paragraphe précédent, on distingue quatre familles de perturbations électriques [5] :

- ✚ Les variations de l'amplitude (creux de tensions, coupures brèves et surtensions, flicker).
- ✚ Les fluctuations de la fréquence autour de la fréquence fondamentale.
- ✚ Les modifications de la forme d'onde (harmoniques, inter harmoniques, bruits).
- ✚ La dissymétrie du système triphasé : déséquilibre.

Un autre type de classification des perturbations électriques peut également être élaboré en se basant sur leur durée [5] :

- ✚ Les perturbations transitoires.
- ✚ Les perturbations de courte durée.
- ✚ Les perturbations permanentes.

Les perturbations électriques transitoires ont une durée de moins d'une demi-période fondamentale. Elles ont pour principale origine les manœuvres d'ouverture et de fermeture sur le réseau de transport et de distribution, mais également des phénomènes naturels tels que la foudre [2].

Les perturbations de courte durée sont les creux de tension, les coupures brèves et les surtensions, qui sont généralement provoquées par la présence de courts-circuits. Elles se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude de la tension, et peuvent avoir des conséquences néfastes et coûteuses sur les équipements électriques [3].

Dans la catégorie « **perturbations permanentes** » on retrouve les harmoniques, le bruit, le déséquilibre et les variations de tension et de fréquence. Elles sont généralement provoquées par la présence de charges non linéaires et fluctuantes au sein du réseau électrique. Elles se caractérisent par de faibles variations de l'amplitude, et sont à l'origine d'échauffement, de

pertes supplémentaires, de vieillissement prématuré des équipements électriques et de dysfonctionnements sur certains appareillages de contrôle commande [3].

On peut également remarquer que les origines des perturbations électriques peuvent être classées en deux grandes catégories [3] :

- ✚ Les défauts au sein des réseaux électriques.
- ✚ La présence de charges non linéaires ou fluctuantes.

Enfin, les effets des perturbations électriques peuvent eux aussi être divisés en deux grandes familles:

- ✚ Les effets à court terme (déclenchement des appareils, dégâts matériels, ...).
- ✚ Les effets à long terme (pertes supplémentaires, échauffements, vieillissements).

Parmi les phénomènes perturbateurs, il est important de distinguer les deux grandes catégories :

- ✚ Ceux qui sont dus aux incidents : creux de tension, coupures longues et brèves (Problème de l'immunité des installations sensibles).
- ✚ Ceux qui sont dus aux installations perturbatrices : flicker, (inter)harmoniques, déséquilibre (problème de l'émission des installations perturbatrices).

I.3.1. Creux de tension et coupures brèves

I.3.1.1. Définition, origine

Les creux de tension désignent la diminution de l'amplitude des tensions d'une valeur comprise entre **10%** et **90%** de la valeur nominale pour une durée de **0.5** période jusqu'à **une minute** [6].

Les creux de tension sont associés aux défauts survenus sur le réseau, comme le foudroiement d'une structure du réseau ou le contact d'un arbre avec la ligne. Néanmoins, ils peuvent être causés par des variations brusques des charges connectées au réseau ainsi que par les courants d'appel à la mise sous tension des transformateurs et au démarrage des moteurs [6].

Une coupure brève désigne la diminution de l'amplitude de la tension en bas de **10%** de la valeur nominale pour une durée ne dépassant pas **1 minute**, et peut être généralement causé par un court-circuit survenant sur le réseau. Ce type d'anomalie est caractérisé par sa durée laquelle est fonction du temps de fonctionnement des dispositifs de protection. Les coupures sont parfois précédées par un creux de tension dans le cas d'un défaut survenant sur la source d'alimentation [6].

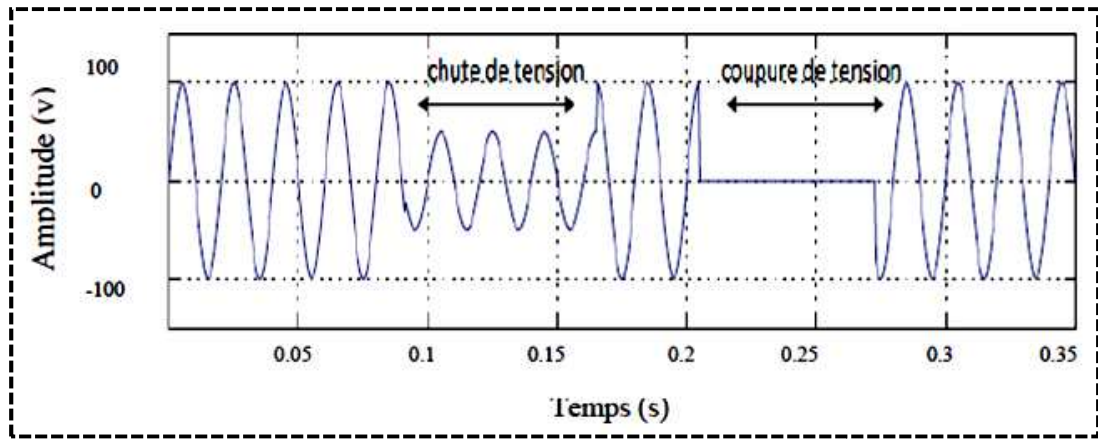


Figure I.1: Creux de tension et coupure brève.

I.3.1.2. Impact des creux de tension et des coupures brèves sur les équipements industriels

Les creux de tension et les coupures brèves sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles. Les conséquences techniques dépendent du type de matériel et sont conditionnées par le type de charge du système [7].

Certains effets sont instantanés ou à court terme. Nous rappelons qu'ils se produisent principalement au niveau [7]:

- ✚ Des contacteurs et relais thermiques : les creux de tension provoquent des manœuvres intempestives des contacteurs et relais.
- ✚ Des convertisseurs: défauts de commutation des onduleurs.
- ✚ Systèmes électroniques analogiques ou numériques: défauts de fonctionnement ou erreurs d'exécution de calculs informatiques.

D'autres effets sont à action différée, principalement au niveau des moteurs. En effet la remontée de tension, constituant l'ultime séquence de tout creux de tension, peut provoquer une surintensité dans les machines tournantes, ceci donne lieu à des sur-échauffements et des efforts électrodynamiques de brèves durées, susceptibles d'engendrer une fatigue du matériel préjudiciable à terme [7].

Enfin, les conséquences des creux de tension et des coupures brèves sont parfois aussi économiques. Ces perturbations peuvent engendrer une perte ou une altération de la production, une détérioration de l'outil de production, une perte de temps pour la remise en état et la remise en route de l'outil de production...

I.3.1.3. Effets des creux de tension sur les autres éléments habituels d'une installation industrielle

✚ Les machines synchrones:

Les effets des creux de tension sur les machines synchrones, sont analogues à ceux évoqués dans le cas des machines à induction (variation du couple électromagnétique et de la vitesse mécanique). [7]

Toutefois, le couple n'étant pas lié au carré de la tension d'alimentation, et en raison de leur forte valeur d'inertie liée à leur puissance généralement importante, les machines synchrones peuvent supporter des creux de tension plus importants que les machines à induction (de l'ordre de **50%** sans décrocher)

✚ Les organes de commande et de protection :(contacteurs, disjoncteurs équipés de bobines à manque de tension...) : [7]

Ils peuvent être sensibles aux creux de tension dont la profondeur dépasse **25%**.

En effet, pour un contacteur classique, il existe une valeur minimale (tension de retombée) en dessous de laquelle les pôles se séparent et transforment un creux ou une coupure brève en une coupure de longue durée allant jusqu'à plusieurs heures.

Les équipements informatiques sont sensibles aux creux de tension de profondes 10% et plus. Les creux de tension dont les caractéristiques sont en dehors de cette zone de tolérance, peuvent provoquer des pertes et des altérations dans la transmission de l'information et donc induire des dysfonctionnements dans les programmes en cours d'exécution.

I.3.2. Surtensions

I.3.2.1. Définition, origine

Les surtensions correspondent à des augmentations de l'amplitude de la tension de **1,1 pu** à **1,8 pu**. Les surtensions sont moins fréquentes que les creux de tension et sont généralement dues à des courts circuits dans les systèmes à neutre isolé qui engendrent à la fois des creux de tension et des surtensions [2].

En cas de court-circuit monophasé dans un tel système, les deux phases non concernées par le défaut peuvent prendre une valeur pouvant aller jusqu'à **1,73 pu**, c'est à dire la tension composée. En cas de court-circuit biphasé, la phase non affectée par le défaut se caractérise par une surtension qui peut aller jusqu'à **1,5 pu** [2].

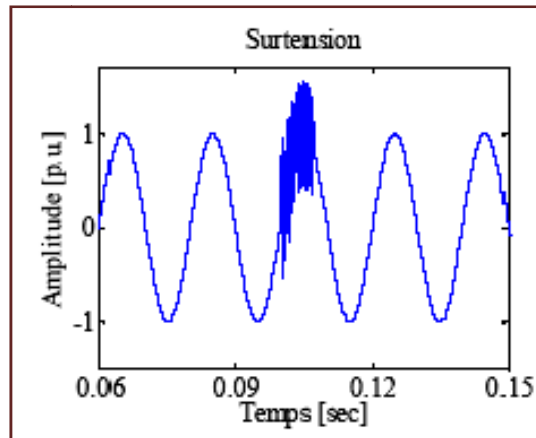


Figure I.2 : Exemple de Surtension

Les surtensions sont de trois natures : [8]

- ✚ Temporaires à fréquence industrielle.
- ✚ De manœuvre.
- ✚ D'origine atmosphérique (foudre).

I.3.2.2. Conséquences des Surtensions :

Leurs conséquences sont très diverses selon le temps d'application, la répétitivité l'amplitude, le mode (commun ou différentiel), la raideur du front de montée et la fréquence[8] :

- ✚ Claquage diélectrique, cause de destruction de matériel sensible (composants électroniques...).
- ✚ Dégradation de matériel par vieillissement (surtensions non destructives mais répétées).
- ✚ Coupure longue entraînée par la destruction de matériel (perte de facturation pour les distributeurs, pertes de production pour les industriels).
- ✚ Perturbations des circuits de contrôle et de communication à courant faible
- ✚ Contraintes électrodynamiques et thermiques (incendie) causées par :
 - La foudre essentiellement.
 - Les surtensions de manœuvre qui sont répétitives et dont la probabilité d'apparition est nettement supérieure à celle de la foudre et de durée plus longue.

I.3.3. Variations de tension

I.3.3.1. Définition et origine

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à **10 %** de la tension nominale et les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude, comme illustré sur la **figure (I.3)** [5] .

Les variations lentes de tension sont causées par la variation lente des charges connectées au réseau.

Les fluctuations de tension sont principalement dues à des charges industrielles rapidement variables comme les machines à souder, les fours à arc, les laminoirs.

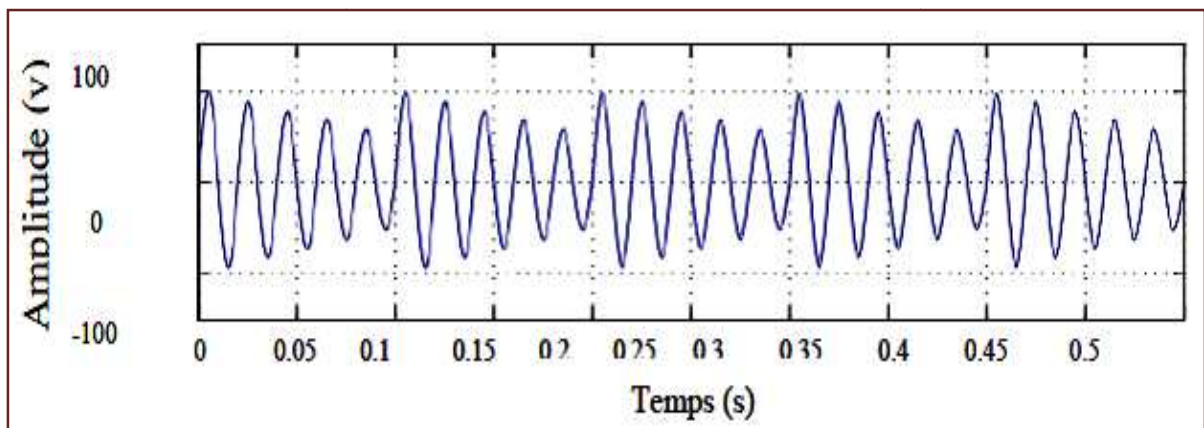


Figure I.3: Fluctuations de tension

I.3.3.2. Conséquences

Comme les fluctuations ont une amplitude qui n'excède pas **$\pm 10\%$** , la plupart des appareils ne sont pas perturbés. Le principal effet des fluctuations de tension est la fluctuation de la luminosité des lampes (**papillotement ou flicker**) [5] .

I.3.4. variation de la fréquence

I.3.4.1. Définition, origine et conséquences

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome (**figure I.4**) Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves

sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50\text{Hz} \pm 1\%$ [3].

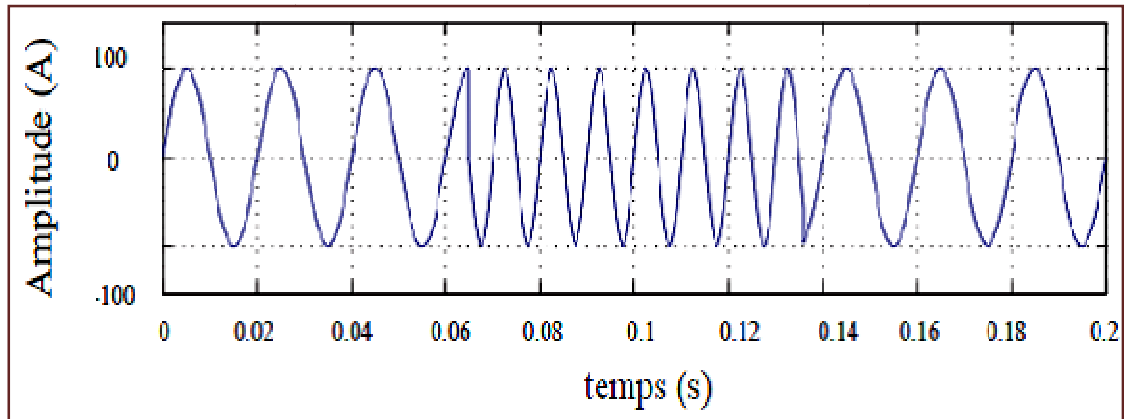


Figure I.4: Variation de fréquence

I.3.5. Déséquilibre

I.3.5. 1. Définition, origine et Conséquences

Un système triphasé est dit équilibré ou asymétrique si les tensions et les courants triphasés ont la même amplitude et présentent un déphasage de 120° les uns par rapport aux autres. Si l'une, au moins, de ces conditions n'est pas remplie, le système est dit déséquilibré ou asymétrique **figure (I.5)** [3].

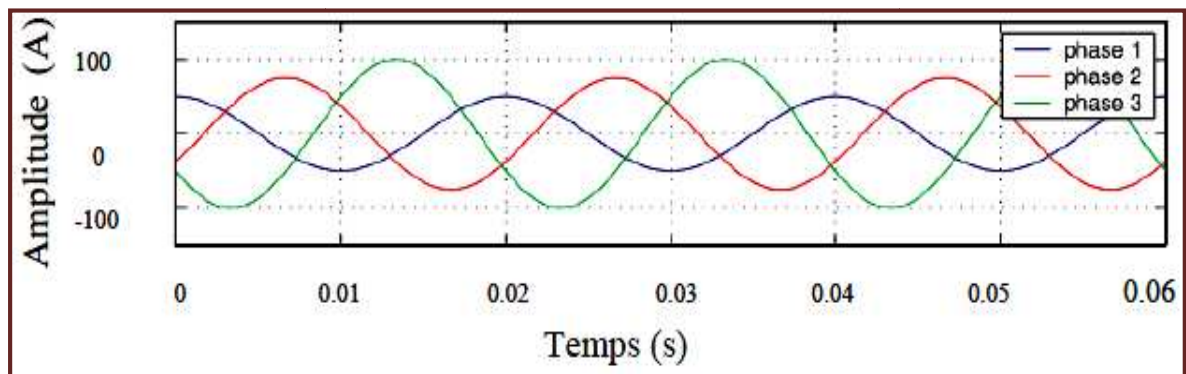


Figure I.5: déséquilibre du système triphasé de tension

Les déséquilibres sont généralement dus à des charges monophasées car dans ce cas les courants absorbés sur les trois phases sont d'amplitude et/ou de phase différente, d'où un déséquilibre des trois tensions. Le déséquilibre des tensions peut également être dû à des charges triphasées, lorsque celles-ci ne sont pas symétriques [3].

On parle d'un déséquilibre d'amplitude lorsque les trois tensions n'ont pas la même valeur efficace, et d'un déséquilibre de phase lorsque le déphasage entre les trois phases

successives n'est pas de 120° . Le niveau de déséquilibre est lié à la fois à la puissance et la localisation des charges perturbatrices, et à la puissance de court-circuit du réseau amont. Le bouclage des réseaux, favorable à l'obtention d'une puissance de court-circuit élevée, permet de diminuer le degré de déséquilibre [3].

Les déséquilibres de tension engendrent des composantes inverses de courant, qui provoquent des couples de freinage parasites et des échauffements dans les moteurs à courant alternatif. Ils peuvent également perturber le fonctionnement des dispositifs à thyristors à commande de phase [3]. .

I.3.6. Harmoniques et inter harmoniques

I.3.6.1. Définition

Un **harmonique** est une composante sinusoïdale d'une onde périodique ou d'une quantité possédant une fréquence qui est multiple entier de fréquence fondamentale (**50 ou 60 Hz**) [2].

Les **inters harmoniques** sont superposés à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. L'apparition des inters harmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle-commande [2].

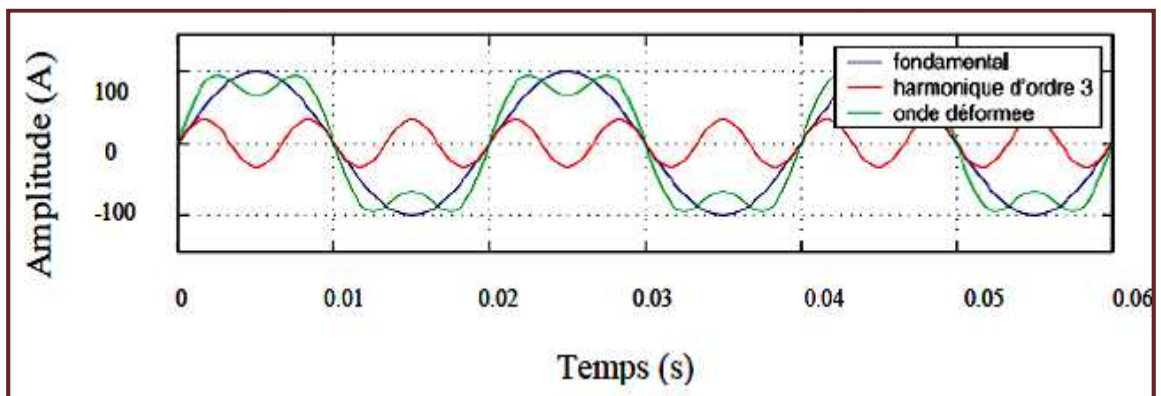


Figure I.6: Exemple d'harmoniques

I.3.6.2. 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 [2].

I.3.6.3. Grandeurs caractéristiques

I.3.6.3. 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.

I.3.6.3. 2. Rang de l'harmonique

C'est le rapport de sa fréquence f_n à celle du fondamental (généralement la fréquence industrielle, **50 ou 60 Hz**) :

$$n = f_n / f_1 \quad (\text{I.1})$$

Par principe, le fondamental f_1 a le rang un.

I.3.6.3. 3. Série de Fourier

Ceci revient à dire que : « tout signaux, périodique de période $T=1/f$, peut se décomposer en une somme infinie de termes sinus et cosinus de fréquences multiples de f ».

Mathématiquement, cela s'écrit :

$$s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nwt + b_n \sin nwt) \quad (\text{I.2})$$

La a_0 valeur représente la valeur moyenne de $s(t)$.

On calcule les coefficients a_n et b_n avec les formules suivantes :

$$a_n = \left(\frac{2}{T}\right) \cdot \int f(t) \cos(nwt) dt \quad \text{et} \quad b_n = \left(\frac{2}{T}\right) \cdot \int f(t) \sin(nwt) dt \quad (\text{I.3})$$

De plus, il existe quelques pré-requis qui permettent de ne pas faire de calculs inutiles :

- ✚ Si la fonction est symétrique par glissement, la valeur a_0 est nulle.
- ✚ Si la fonction est paire, les coefficients b_n sont nuls.
- ✚ Si la fonction est impaire, les coefficients a_n sont nuls.
- ✚ Si la fonction possède une symétrie sur ses deux demi-périodes, les termes d'indice pairs sont nuls.

I.3.6.3. 4. Expression de la valeur efficace

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 :

$$Y_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T Y^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} Y_n^2} \quad (\text{I.4})$$

I.3.6.3.5. Taux de distorsion harmonique THD

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

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n Y_n^2}}{Y_1} * 10 \quad (\text{I.5})$$

Y_1 : La valeur efficace de la composante fondamentale (du courant ou de la tension).

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

I.3.6.3.6. Spectre d'harmonique

C'est la représentation de l'amplitude des harmoniques en fonction de leur rang, la valeur des harmoniques étant généralement exprimée en pourcentage du fondamental par un histogramme **Figure (I.7)**.

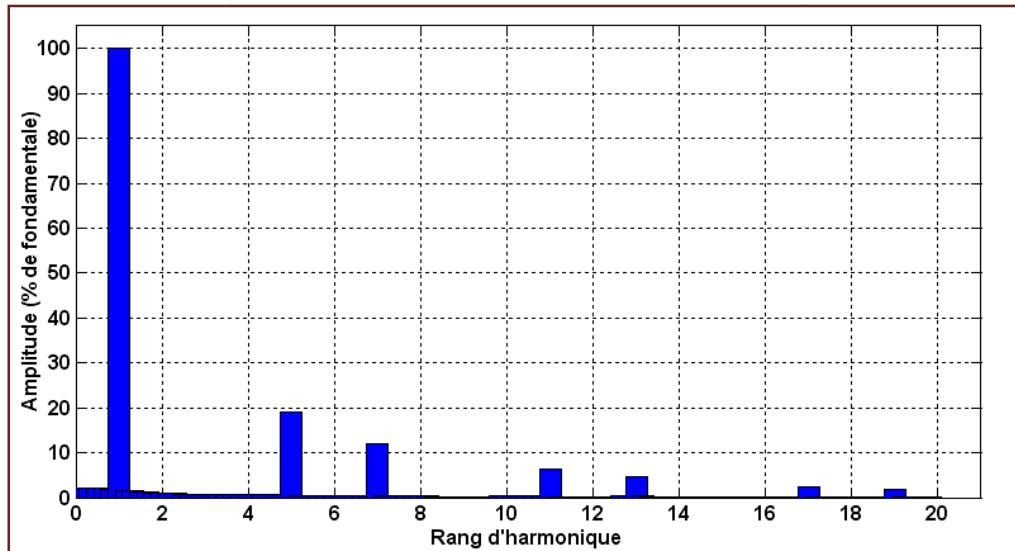


Figure I.7: Le spectre des harmoniques du courant de charge polluante

I.3.6.3.7. Charges linéaires et non linéaires

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales :

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

Une charge est dite **linéaire** si, alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal. Cependant, le courant et la tension peuvent être déphasés. Les charges linéaires couramment utilisées sont constituées de résistances, de capacités et d'inductances [9].

Une charge est dite **non-linéaire** si l'on alimente une charge non linéaire par une tension sinusoïdale, le courant circulant dans cette charge n'est plus sinusoïdal. Ce courant peut être décomposé en une composante fondamentale et des harmoniques [9].

I.3.6.4. Effets des perturbations harmoniques

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités tels que les déformations des formes d'ondes entraînant des dysfonctionnements, l'augmentation des valeurs crêtes créant des claquages de diélectriques ou des valeurs efficaces induisant des échauffements. Les effets de ces perturbations peuvent se classer en deux types [10]:

✚ Les effets instantanés ou à court terme :

- Dysfonctionnements des dispositifs de commande ou de régulation (détection du passage par zéro, ...).
- Pertes de précision dans les appareils de mesure (compteur d'énergie, instrumentation,...).
- Vibrations dans les moteurs électriques alternatifs à cause des couples mécaniques pulsatoires dus aux champs tournants harmoniques.
- Vibrations, bruits acoustiques dans les transformateurs ou les inductances dus aux efforts électrodynamiques proportionnels aux courants harmoniques.
- Vibrations, bruits acoustiques dans les transformateurs ou les inductances dus aux efforts électrodynamiques proportionnels aux courants harmoniques.

✚ Les effets à long terme :

- Échauffements et pertes joules supplémentaires des câbles et des équipement entraînant des déclassements du matériel avec des surdimensionnements.
- Echauffement des condensateurs : l'échauffement est causé par les pertes due au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique, les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques .Ces échauffements peuvent conduire au claquage.
- Surchauffe du neutre. En effet dans un système triphasé équilibré, les tensions sont déphasées de 120° si bien que lorsque les charges sont égales, le courant résultant dans le neutre est nul. Toutefois, si les courants de phases s'annulent, ce n'est pas le cas des courants harmoniques. Ces courants qui sont des multiples impairs de la fréquence du

courant de phase s'ajoutent dans le conducteur neutre. Ainsi le courant résultant dans le neutre représente l'addition des courants harmoniques de rang trois et multiple de trois.

- Risque d'excitation de résonance : Les fréquences de résonance des circuits formés par les inductances du transformateur et les câbles sont normalement élevées. Ce n'est pas le cas lorsque des batteries de condensateurs sont raccordées au réseau pour relever le facteur de puissance. Les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles et coïncider avec celles des harmoniques engendrés par les convertisseurs statiques. Dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques qui peuvent entraîner des destructions.

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 courant de Foucault dans les circuits magnétiques.

I.3.6.5. Influence des harmoniques sur le facteur de puissance FP

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par rapport entre la puissance **P** et puissance apparente **S**. En présence des harmoniques, la puissance apparente **S** est composée de trois parties actives **P**, réactive **Q** et déformante **D**, cette dernière est la puissance provoquée par les courants harmoniques, tel que $\mathbf{I}=\mathbf{I}_f+\mathbf{I}_h$ [9].

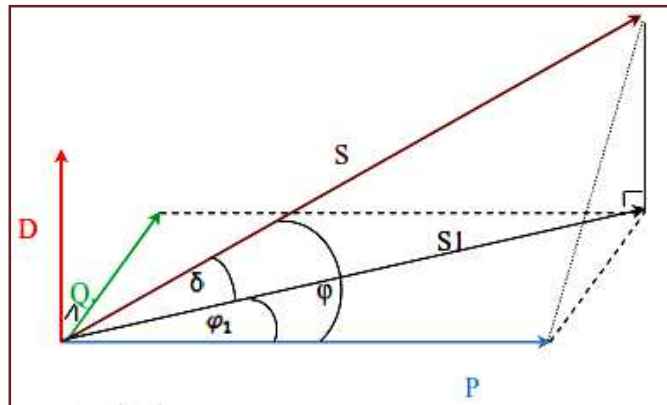


Figure I.8 : diagramme de Fresnel des puissances

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties comme le montre l'équation suivante :

$$s = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{I.6})$$

Où **Q** : la puissance réactive associée au courant fondamental.

D : la puissance déformante due aux harmoniques du courant.

$$\text{Où} \quad P = 3 \cdot U \cdot I_1 \cos(\varphi_1) \quad (\text{I.7})$$

φ_1 : représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension.

$$Q = 3 \cdot U \cdot I_1 \sin(\varphi_1) \quad (\text{I.8})$$

$$\text{Et} \quad D = 3 \cdot U \cdot I_1 \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2} \quad (\text{I.9})$$

Finalement le facteur de puissance f_p est donné par l'expression :

$$f_p = \frac{P}{S} = F_{dit} \cdot \cos(\varphi_1) = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I.10})$$

Où F_{dit} représente le facteur de distorsion. Il vaut **1** lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal et il décroît lorsque la déformation de l'onde s'accroît.

I.3.7. Réduction de la pollution harmonique (compensation des harmoniques)

I.3.7. 1. Absorption sinusoïdale

Le prélèvement sinusoïdal est une technique qui permet aux convertisseurs statiques d'absorber un courant très proche d'une sinusoïde avec un facteur de puissance unitaire. Dans ce cas, ces structures se positionnent dans une stratégie préventive et non curative. Ces techniques de prélèvement sinusoïdal s'appliquent aux structures monophasées et triphasées. Ces convertisseurs propres utilisent la technique **MLI** (Modulation de Largeur d'Impulsions) également appelée **PWM** (Pulse Width Modulation) comme principe de pilotage des interrupteurs commandés [10].

I.3.7. 2. Ajout d'une inductance de lissage du courant

L'ajout d'inductances de lissage en amont des dispositifs polluants est une solution communément utilisée afin d'atténuer les harmoniques de rangs élevés puisque leurs impédances augmentent avec la fréquence. Ces inductances réduisent donc la distorsion de la tension au point de raccordement mais induisent un coût supplémentaire [10].

I.3.7. 3. Transformateur à couplage spécial

Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie aussi petite que possible de l'installation à l'aide de transformateurs à couplage approprié. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport **1/1** à couplage triangle-étoile ou triangle zigzag, empêche la propagation des courants harmoniques de **rang 3** et leurs multiples circulant dans le neutre, ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques [10].

I.3.7. 4. Filtres passifs d'harmoniques :

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Un filtre passif est constitué d'éléments passifs tels que des inductances, des condensateurs et des résistances, qui forment une impédance dont la valeur varie en fonction de la fréquence. On connecte alors le filtre passif en parallèle avec le réseau de manière à absorber un harmonique de courant donné [9].

Si on veut par exemple éliminer le courant harmonique de **rang 5**, on dimensionne alors les éléments passifs de manière à ce que l'impédance équivalente du filtre soit la plus petite possible à la fréquence $5 \times$ fondamental, le courant circulera alors dans l'impédance la plus faible, c'est à dire dans le filtre passif et donc plus dans l'impédance de court-circuit du réseau comme l'illustre la figure (I.9) [9].

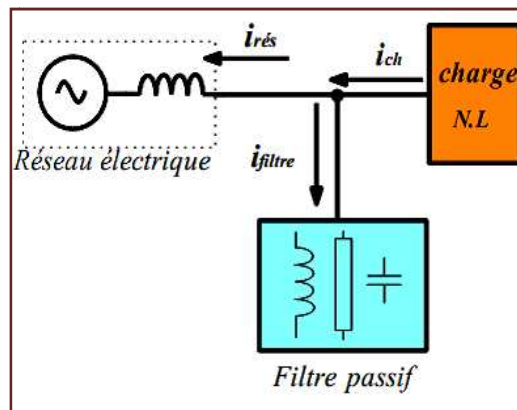


Figure I.9: Raccordement d'un filtre passif

Equation des courants :

$$i_{ch} = i_{fondamental} + i_{h_5} + i_{h_7} + i_{h_{-11}} + i_{h_{-13}} + \dots \quad (I.11)$$

$$i_{filtre} = i_{h_5} \quad (I.12)$$

$$i_{ch} = i_{fondamental} + i_{h_7} + i_{h_{-11}} + i_{h_{-13}} + \dots \quad (I.13)$$

Cette solution est la plus simple et la moins chère mais sans doute, elle n'est pas la plus efficace. L'efficacité de ces filtres se trouve dégradée par la présence de certains facteurs [9] :

- ✚ Insuffisante habilité à couvrir une large bande de fréquence qui nécessite l'installation de plusieurs filtres.
- ✚ Naissance de résonances séries et parallèles avec le réseau qui conduit à l'amplification de tout harmonique à fréquence voisine de celle de la résonance.

- ✚ La forte dépendance de l'impédance et de la fréquence du réseau.
- ✚ Equipements volumineux.

I.3.7. 4. 1. Filtre passif résonant

C'est un filtre sélectif constitué d'une résistance, d'un condensateur et d'une bobine en série, comme décrit sur la **figure I.10**, son impédance équivalente est [10] :

$$Z_{eq}(\omega) = \frac{1-LC\omega^2+jRC\omega}{j\omega} \quad (\text{I.14})$$

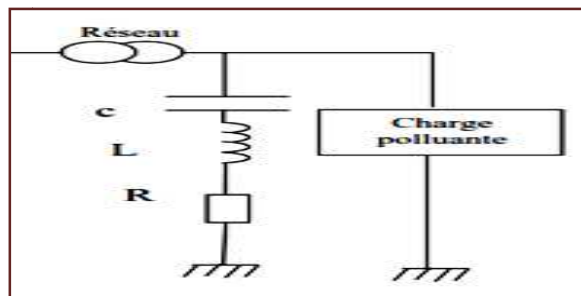


Figure I.10 : Structure du filtre passif résonant

Ce type de filtre est caractérisé par l'emplacement de trois filtres, deux pour les harmoniques d'ordre inférieurs et un filtre pour les harmoniques d'ordre supérieurs, c'est-à-dire pour un pont triphasé nous avons besoin d'un filtre passe bas pour le cinquième et l'autre pour le septième harmonique et d'un filtre passe haut pour tous les harmoniques au-delà de 11^{ème}.

I.3.7. 4. 2. Filtre passif amorti

C'est un filtre passe haut constitué d'une inductance en parallèle avec une résistance, le tout en série avec un condensateur comme décrit sur la **figure (I.11)** Son impédance équivalente est :

$$Z_{eq}(\omega) = \frac{1-LC\omega^2+j\frac{L}{R}\omega}{\frac{L}{R}C\omega^2+jC\omega} \quad (\text{I.15})$$

Ce type n'est efficace que si le rang d'harmonique à éliminer est suffisamment élevé (à partir de $h=13$) [10].

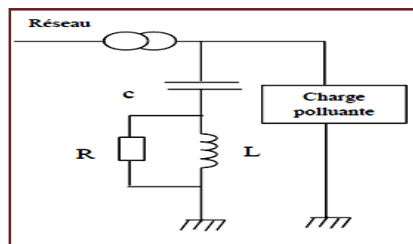


Figure I.11 : Structure du filtre passif amorti

I.3.7. 4. 3. Phénomène de l'antirésonance

Le phénomène de l'antirésonance **figure (I.12)** se rencontre dans les réseaux électriques quelque soit leur niveau de tension. L'impédance vue par le réseau et le filtre passif résonant est :

$$Z_{eq}(\omega) = jLs\omega \frac{1-LC\omega^2+jRC\omega}{1-(L+Ls)C\omega^2+jRC\omega} \quad (\text{I.16})$$

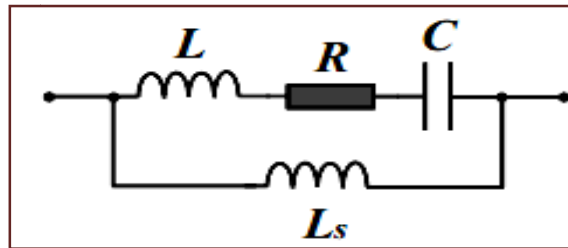


Figure I.12 : Structure du filtre passif parallèle anti-résonant

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

I.3.7. 5. Filtres actif d'harmoniques

Les inconvénients inévitables aux filtres passifs et l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors **GTO** et les Transistors **IGBT**, ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtres appelée filtres actifs de puissance (**A. P. F.**)

Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau soient rendus sinusoïdaux et parfois avec un facteur de puissance unitaire. Le filtre actif est connecté en série, en parallèle, en combinant ces deux dernières structures ensemble ou associé avec des filtres passifs en fonction des grandeurs électriques harmoniques (courants ou tensions) à compenser.

Nous citerons configurations possibles des filtres actifs [9]:

- ✚ Le filtre actif parallèle (**FAP**) : conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.
- ✚ Le filtre actif série (**FAS**): conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.
- ✚ La combinaison parallèle série actif (**UPQC**) : solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

Les avantages de ces filtres actifs par rapport aux filtres passifs sont les suivants :

- ✚ Le volume physique du filtre est plus réduit.
- ✚ La capacité de filtrage est supérieure.
- ✚ La flexibilité et adaptabilité sont très supérieures.

Pourtant, ils présentent quelques inconvénients.

- ✚ Leur coût élevé a limité leur implantation dans l'industrie.
- ✚ Les pertes sont plus élevées.

I.3.7. 5. 1. Filtre actif parallèle

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 [11].

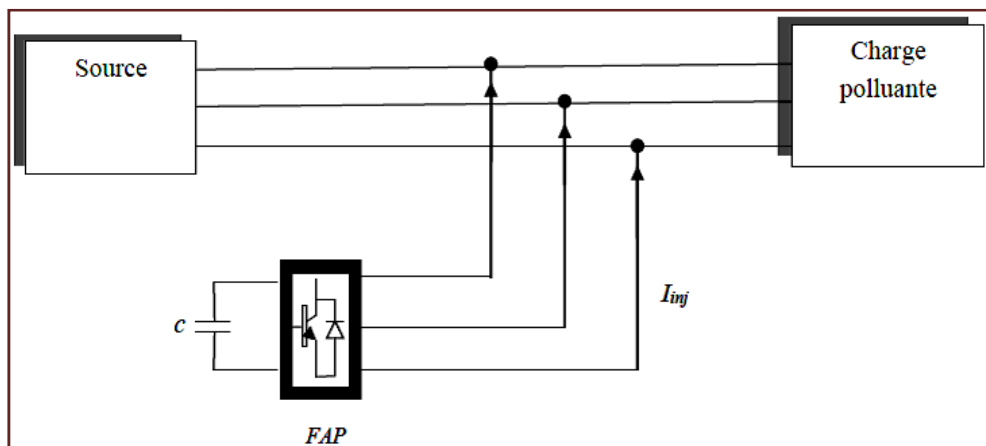


Figure I.13 : Montage du filtre actif parallèle

I.3.7. 5. 2. Filtre actif série

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau le montré la **figure (I.14)**. Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension 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, 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 [11].

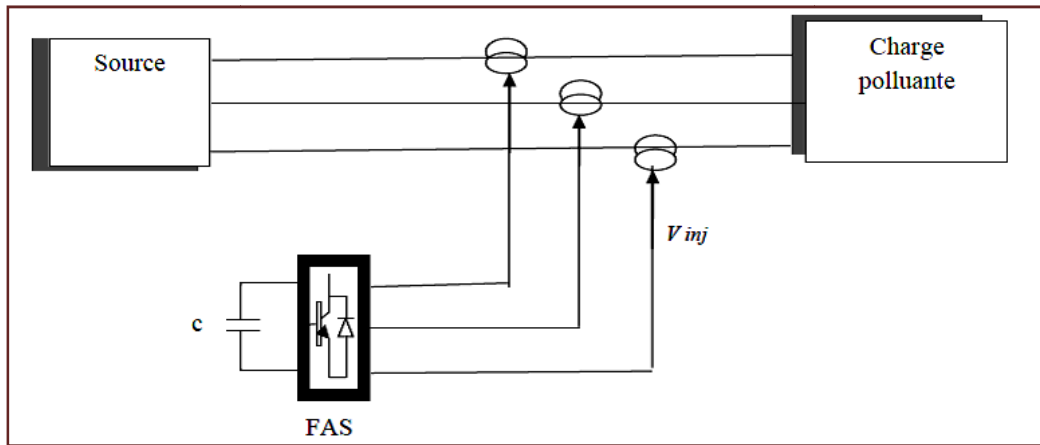


Figure I.14 : Montage du filtre actif en série

I.3.7. 5. 3. 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) [9].

Un filtre actif série placé en amont du filtre actif parallèle, comme il est montré ci-dessous, 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.

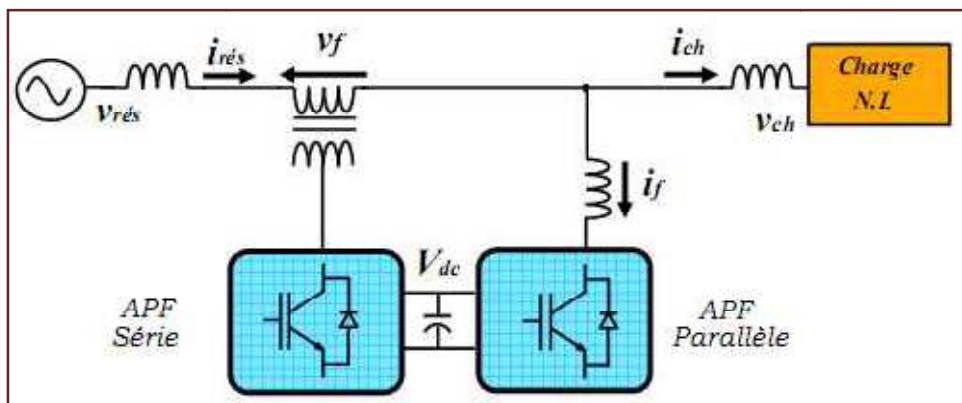


Figure I.15. Filtre combiné parallèle-série (UPQC)

I.3.7. 6. Filtre actif hybride

Connecté avec ou sans transformateurs au réseau, le filtre actif hybride **figure (I.16)** est constitué d'un filtre passif connecté directement en série avec le filtre actif, ce qui entraîne une diminution de la tension du bus continu comparativement à celle d'un filtre actif pur et une réduction du dimensionnement du filtre hybride. En plus, le filtre passif évite les oscillations dues à la commutation (HF) car il présente une haute impédance à cette fréquence [9].

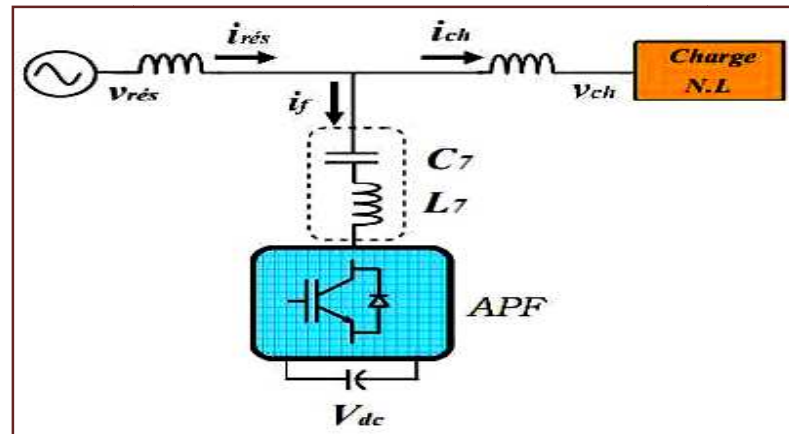



Figure I.16 : Filtre actif hybride

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le concept qualité de l'énergie électrique et on a donné les définitions des principales perturbations affectant le réseau comme les creux de tension, les harmoniques et la non symétrie (déséquilibre). Ces perturbations ont des conséquences différentes selon le contexte économique et le domaine d'application: de l'inconfort à la perte de l'outil de production, à la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements, voire même à la mise en danger des personnes. Une idée sur les filtres de compensation a été donnée.

Dans le chapitre suivant nous allons présenter les centrales photovoltaïques raccordées au réseau et les perturbations liées à ces systèmes.



Chapitre II
Production de l'énergie
Photovoltaïque

II.1. Introduction

Depuis plusieurs années, l'être humain a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil. La plupart des utilisations sont directement liées à la vie de tous les jours comme dans les diverses applications de séchage et chauffage autant artisanales qu'industrielles ou bien dans des phénomènes de réactions chimiques comme la photosynthèse. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface de la terre malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère. Cette énergie est de l'ordre de **1000 W/m²** dans les zones tempérées et atteint **1400 W/m²** dans les zones où l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou chargée d'eau [9].

Sachant que le l'intensité du flux solaire reçu au niveau du sol dépend de :

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

Ce chapitre présente une introduction au système photovoltaïque, il a pour but d'expliquer le principe de fonctionnement de ce système. Nous décrirons ensuite, une étude préliminaire des convertisseurs utilisés dans les systèmes photovoltaïques et leurs modèles mathématiques, et leur commande basée sur les algorithmes de maximisation.

II.2. Les cellules photovoltaïques

II.2. 1. Description de la cellule

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

Les photopiles ou **cellules photovoltaïques** sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs ayant des propriétés intermédiaires entre conducteurs et isolants. Le matériau de base est dans la plupart des cas le **silicium**. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, poly-cristalline ou monocristalline. D'autres matériaux sont utilisables : **Arséniure de gallium (AsGa)**, **Tellurure de cadmium (CdTe)**. [12]

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

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

Une cellule solaire sera obtenue en constituant une jonction de 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.1)** à savoir :

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

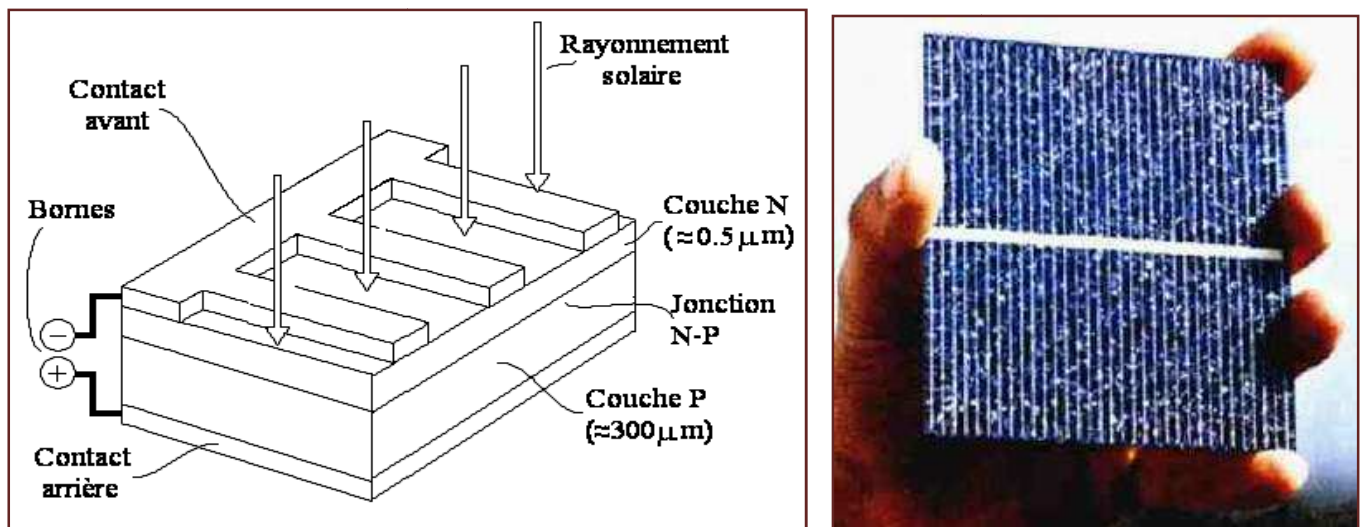


Figure II.1 : Description d'une cellule

II.2. 2. 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 **Figure (II.2)**.

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. [12]

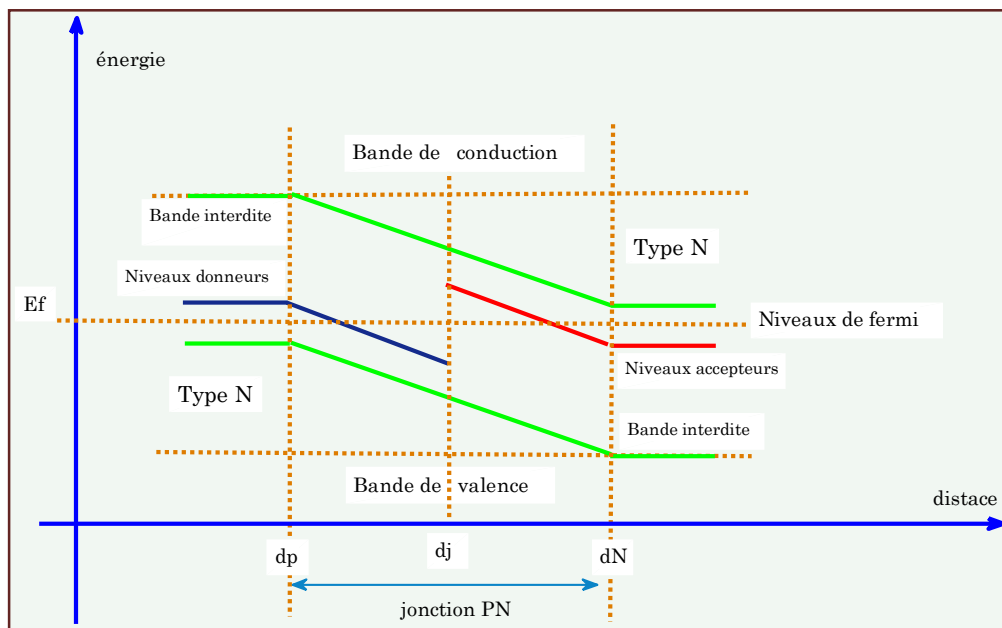


Figure II.2: Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction

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.

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 :

$$E = h \times c / \lambda \quad (\text{II.1})$$

Où λ : La longueur d'onde

h : La constante de Planck

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.

II.2. 3. Caractéristiques de la cellule photovoltaïque

Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque qui est largement utilisé est représenté sur la **Figure (II.3)**.

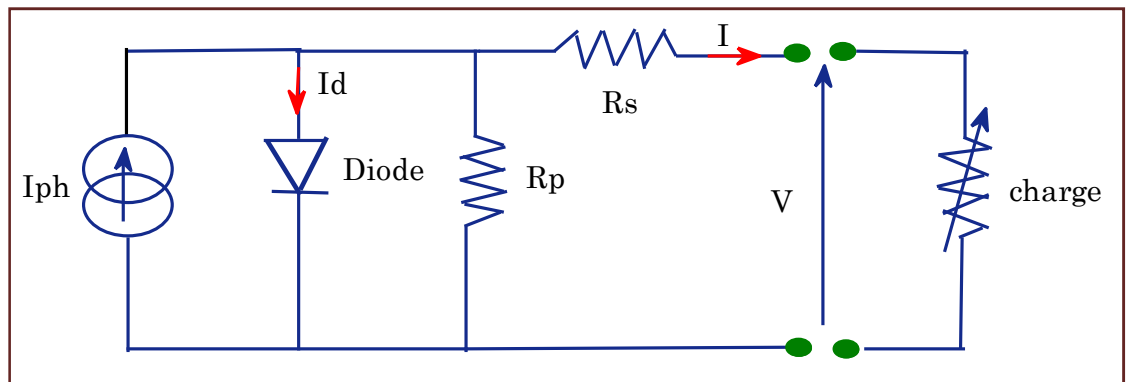


Figure II.3 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Comme montre la **figure (II.3)** une cellule photovoltaïque comporte en réalité une résistance série R_s et une résistance shunt R_p . Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique **I-V** de la cellule [9] :

- ✚ La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.

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

D'après la **Figure (II.3)** le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension est donné par :

$$I = I_{ph} - I_d - \frac{V + I.R_s}{R_p} \tag{II.2}$$

Avec
$$I_d = I_0 \left(\exp \left[\frac{q}{m.k.T_c} (V + I.R_s) \right] - 1 \right) \tag{II.3}$$

Où

V : Tension de sortie de la cellule

R_s : Résistance série

I : Courant de sortie de la cellule

R_p : Résistance parallèle

I_{ph} : Courant photo-généré ou photo-courant (A) **q** : La charge électrique 1.6×10^{-19} (C)

I₀ : Courant de saturation de la diode (A) **K** : Constant de Boltzmann 1.38×10^{-23} J/K

T_c : Température absolue de fonctionnement de la jonction (K°)

m : Facteur d'idéalité de la diode ($m \in [1, 2]$), La valeur typique de **m** est **1.3**

Dans la pratique l'équation (II.2) peut être simplifiée. Pour le cas d'une cellule solaire de bonne qualité, on admet que :

- La résistance **R_p** a une valeur assez élevée. Donc le terme $\left(\frac{V + I.R_s}{R_p} = 0 \right)$
- L'expression $\exp \left[\frac{q}{m.k.T_c} (V + I.R_s) \right] \gg 1$

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

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left[\frac{q}{m.k.T_c} (V + I.R_s) \right] \right) \tag{II.4}$$

La **figure (II.4)** montre la caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule PV à une température fixée **T_c** et à une certaine ambiante irradiation **G_a**.

Si une résistance série variable **R** connectée au terminale de la cellule, le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de la courbe **I-V** et la caractéristique **I-V** de la charge. La caractéristique de la charge résistive est une droite avec **I/V = 1/R**. Si la résistance est petite la cellule fonctionne dans la région **A** vers **B** seulement (comme une source de courant constant) et si la résistance est large, la cellule fonctionne dans la région **C** vers **D** de la courbe (comme une source de tension constant) [9].

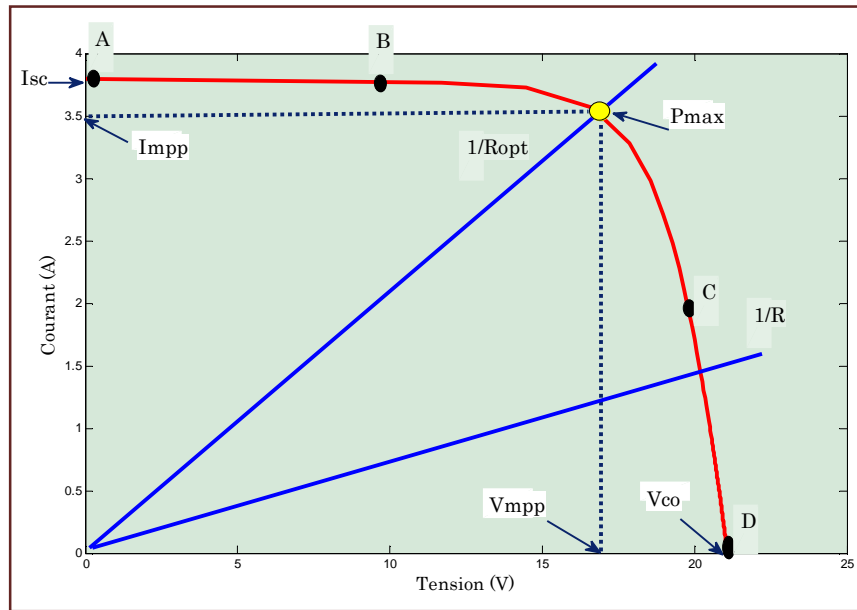


Figure II.4 : caractéristique I-V

II.2. 3.1. Paramètres d'une cellule PV

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes I-V.

II.2.3.1.1. Le courant de court-circuit (I_{CC}) :

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

II.2.3.1.2. Tension de circuit-ouvert (V_{CO})

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

$$V_{CO} = \left(\frac{m.k.T_c}{q}\right) \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) = V_{th} \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) \quad (II.5)$$

Avec $V_{th} = \left(\frac{m.k.T_c}{q}\right)$: la tension thermique.

II.2. 3. 1.3. La puissance maximale :

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

II.2. 3. 1.4. Facteur de forme FF

C'est le rapport de la puissance maximale qui peut être délivré à la charge sur le produit de (I_{cc} , V_{CO}).

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{CO}} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{I_{cc} \times V_{CO}} \quad (II.6)$$

Pour les cellules ayant moyen rendement, le **FF** des valeurs d'ordre **0.7** à **0.85**. Le facteur de forme **FF** diminue si la température augmente.

II.2. 3. 1. 5. L'efficacité (rendement) de la conversion

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

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{S \cdot G_a} = \frac{V_{CO} \cdot I_{CC} \cdot FF}{P_{inc}} \quad (II.7)$$

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

II.2. 3.2. Influence de l'éclairement :

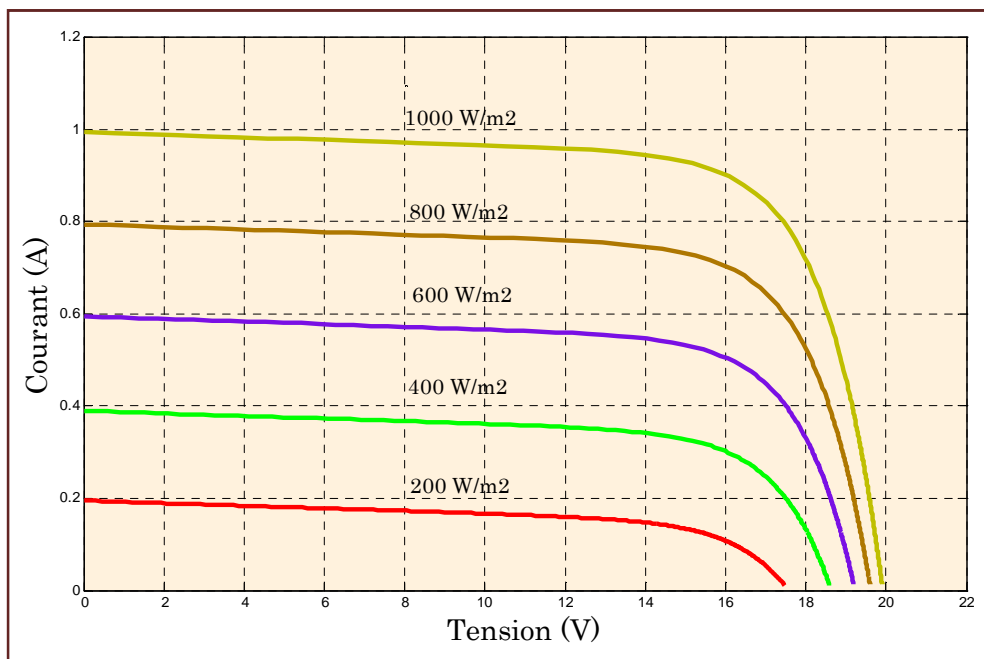


Figure II.5 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. **La figure (II.5)** 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 [13].

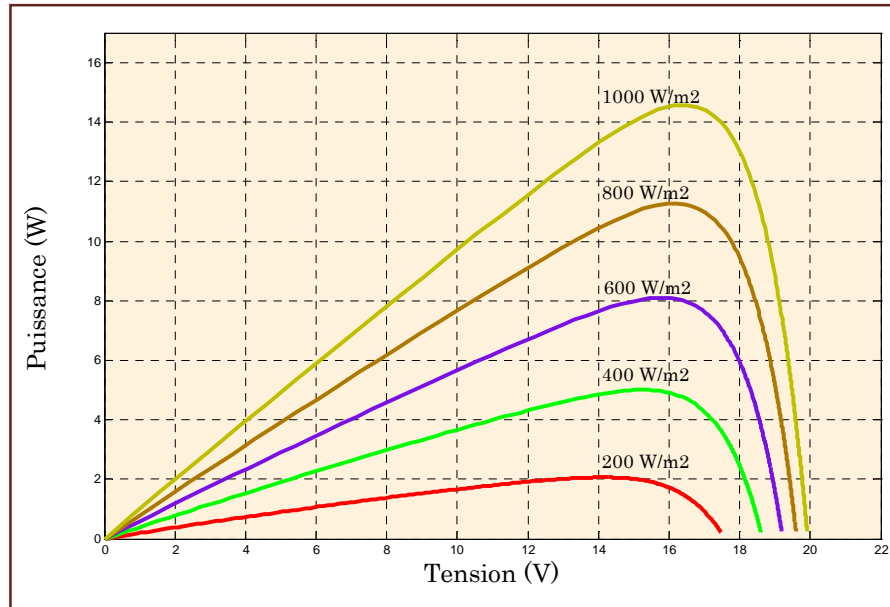


Figure II.6 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$

La figure (II.6) 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.2. 3.3. Influence de la température

L'influence de la température est importante et a des conséquences pour la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques.

La température est un paramètre essentiel puisque les cellules sont exposées aux rayonnements solaires, susceptibles de les échauffer. De plus, une partie du rayonnement absorbé n'est pas convertie en énergie électrique, il se dissipe sous forme de chaleur ; c'est pourquoi la température de la cellule (T_c) est toujours plus élevée que la température ambiante (T_a).

$$T_c = T_a + \frac{E_m}{800} (TUC - 20) \tag{II.8}$$

Avec :

E_m : Eclairement moyenne (W/m^2)

TUC : Température d'utilisation de la cellule (c)

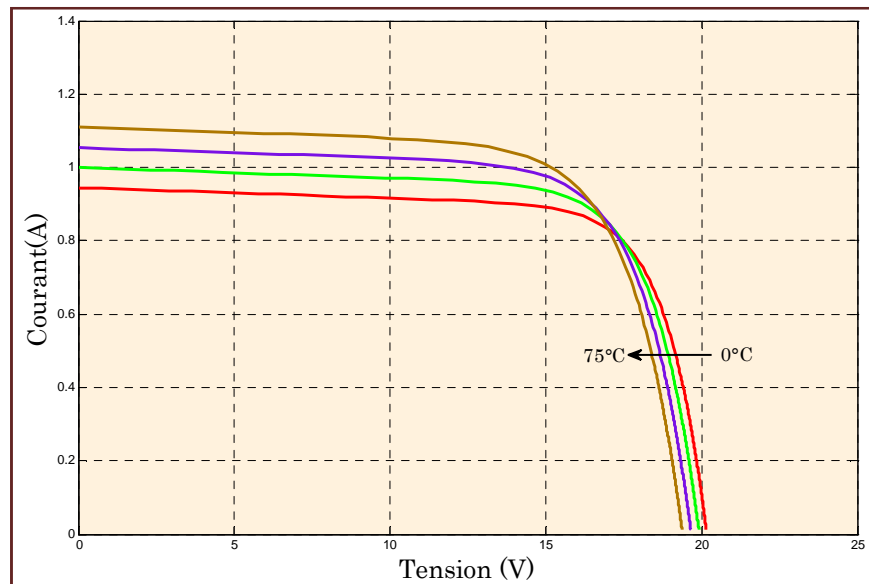


Figure II.7 : L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$

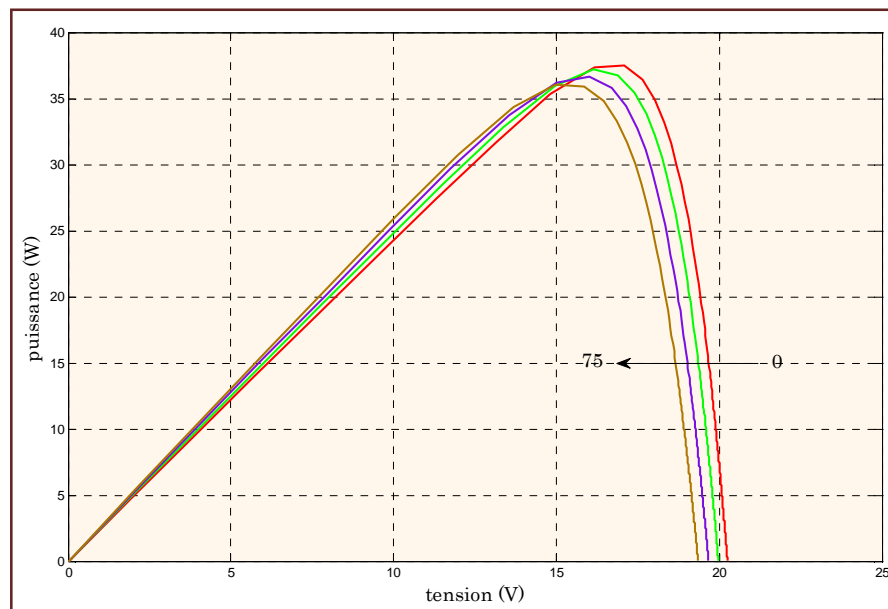


Figure II.8 :L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$

La figure (II.7), montre l'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$. Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique $I=f(V)$.

Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution [13].

La figure (II.8) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$.

II.2. 3.4. Influence de l'association série des cellules PV

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

Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau) [14]. .

Un module de 36 cellules en série (**Type GTO136 – 80/2**) est suffisant pour obtenir une tension compatible avec la charge. Pour avoir plus de tension, il faut assembler N_s modules en série, par contre pour le courant généré, un nombre N_p de modules en parallèle permet d'en ajouter, les diodes de protection série et parallèles protègent le circuit contre le retour de courant.

L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule [14].

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

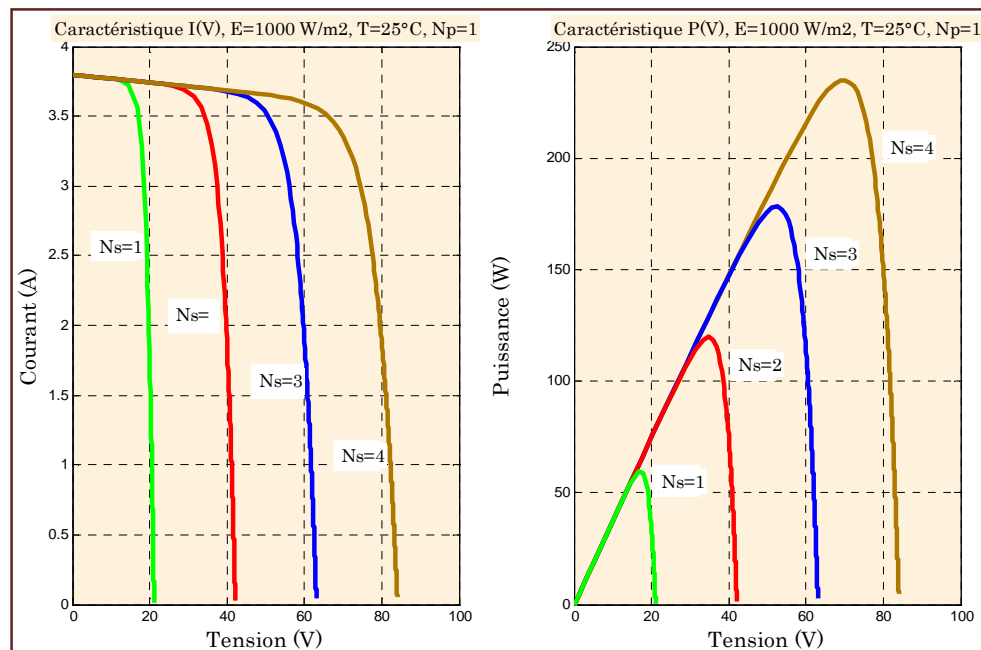


Figure II.9 : Caractéristique de nombre des modules en série

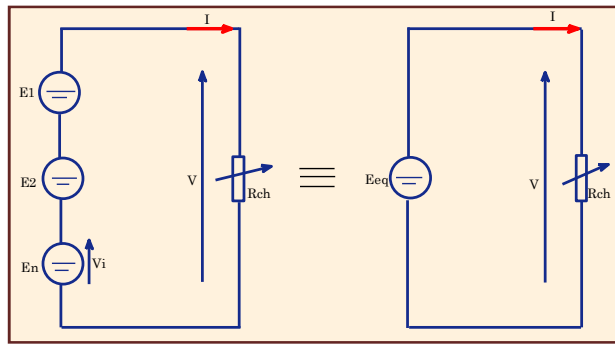


Figure II.10 : Association de N modules solaires en série

II.2. 3.5. Influence de l'association parallèle des cellules PV

L'association en parallèle des photopiles délivre un courant égal à la somme des courants individuels et une tension égale à celui d'une seule cellule [14].

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

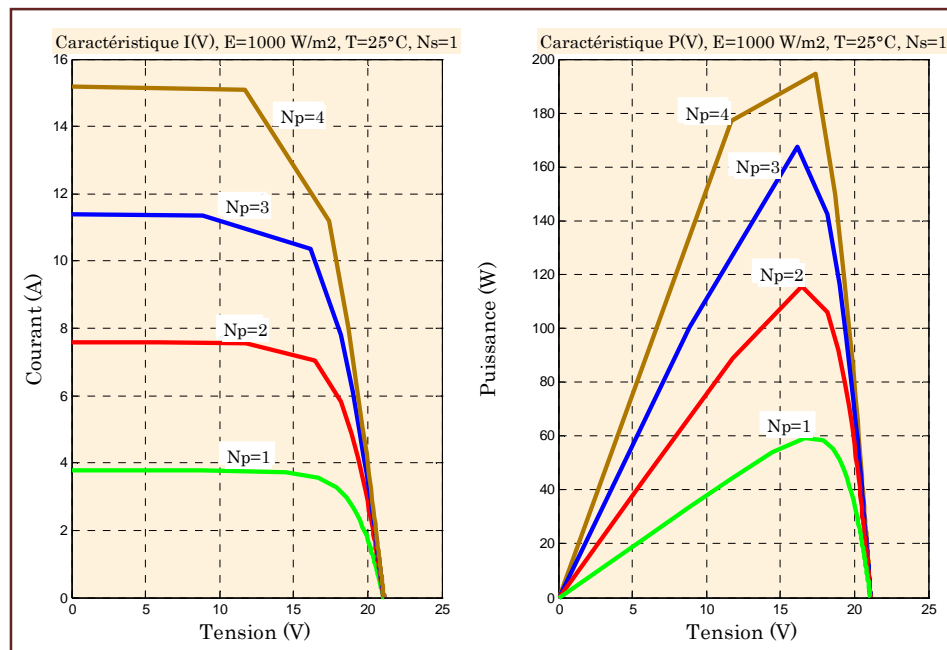


Figure II.11: Caractéristique de nombre des modules en parallèles

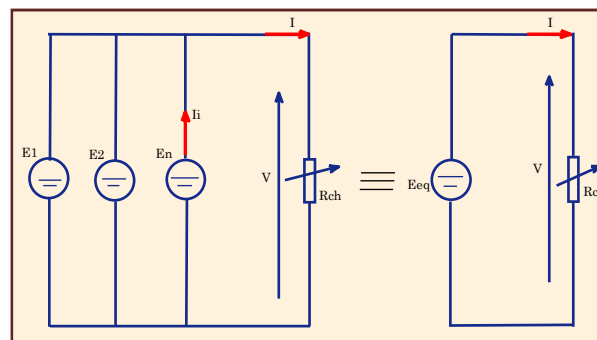


Figure II.12 : Association de N_p modules solaires en parallèle

II.2. 3.6. Influence de l'association mixte (Série + Parallèle) des cellules PV

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle [14].

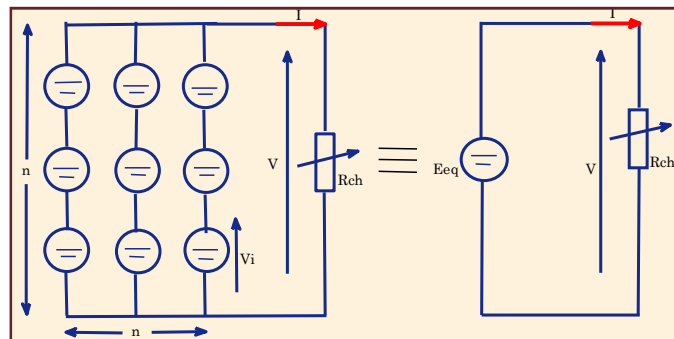


Figure II.13 : Association mixte $N_s \times N_p$ modules solaires

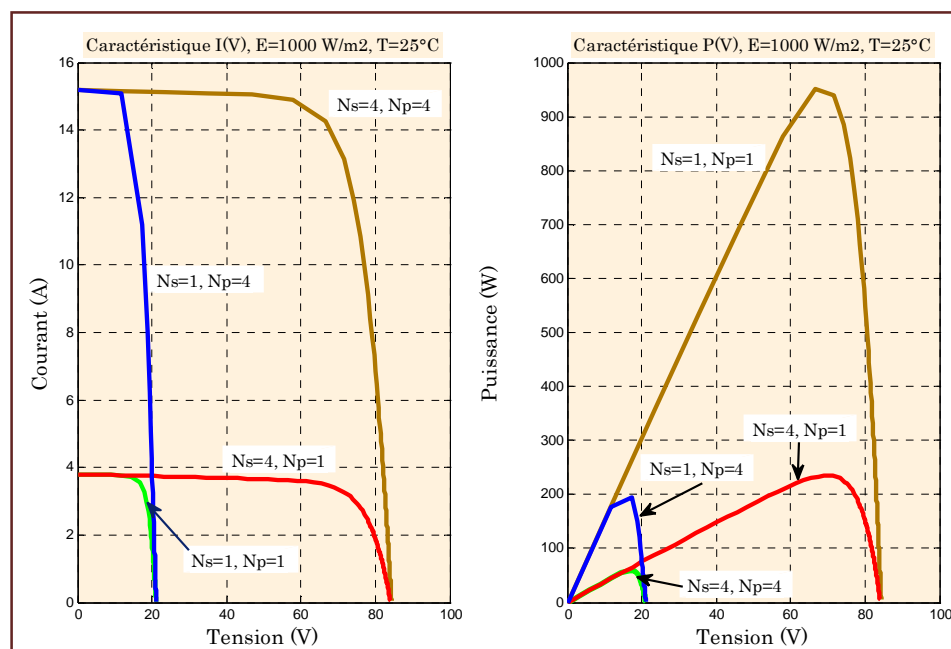


Figure II.14 : Caractéristique de nombre des modules en série et parallèle

II.3. Les différentes technologies des cellules PV

Le rendement des cellules PV dépend principalement des matériaux constitutants, la plupart des recherches se dirigent dans ce domaine, car c'est l'élément qui freine jusqu'à maintenant la production photovoltaïque et sa répartition à grande échelle.

Les technologies des cellules solaires se sont développées de manière très diverses. On distingue en général les cellules cristallines et les cellules à couches minces.

II.3.1. Cellules cristallines

Les cellules en silicium mono et poly-cristallin représentent environ **94%** du marché. On reconnaît deux types des cellules sont :

II.3.1.1. La cellule monocristalline : qui s'approche le plus du modèle théorique: cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches (**figure II.15.a**). Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de **15 à 22 %** [12].

II.3.1.2. Les cellules poly-cristallines : sont composées d'un agglomérat de cristaux (**figure II.15.b**). Elles aussi proviennent du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes [12].

II.3.2. Cellules à couches minces

La technologie des couches minces a l'avantage de produire les cellules par un procédé de revêtement à grande surface peu onéreux. Elles sont plus minces et peuvent même être déposées sur des supports flexibles (**figure II.15.c**) [12].

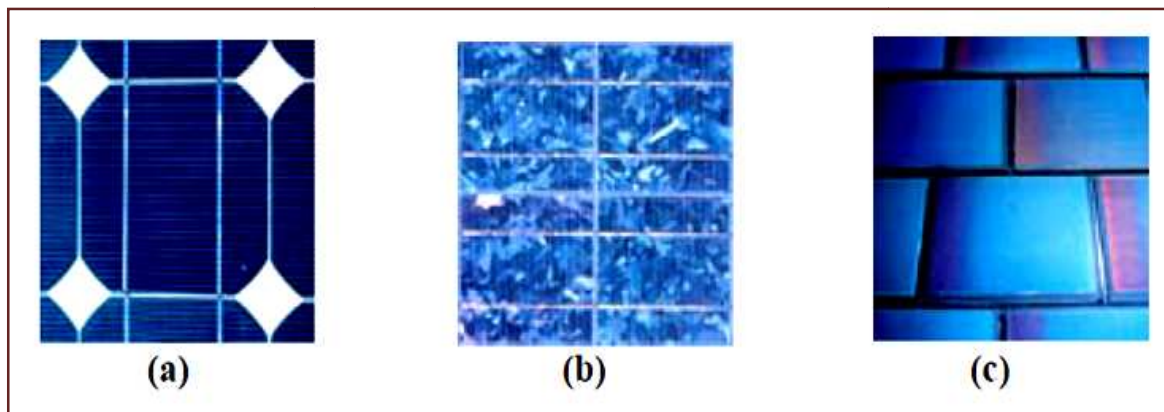


Figure II.15 : Différents technologies des cellules PV

II.4. Classification d'un système solaire photovoltaïque

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

- ✚ Autonome
- ✚ Hybride
- ✚ raccordée au réseau

II.4.1. 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 [13].

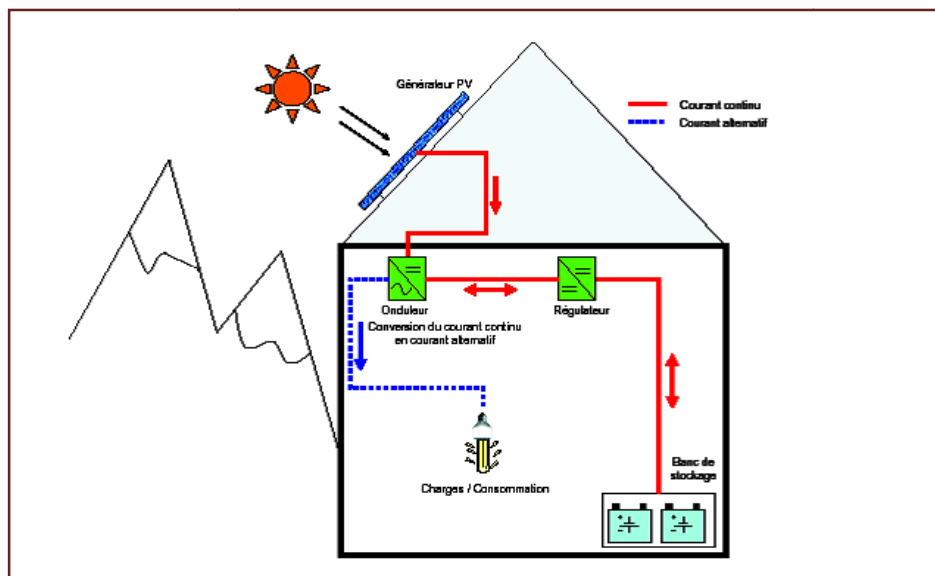


Figure II.16 : Exemple de la structure d'un système PV autonome

II.4.2. Système hybride

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendantes 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 [13].

II.4.3. 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 [12].

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.

II.5. Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution

Dans le passé, les réseaux de distribution se comportaient comme des éléments passifs dans lesquels les flux de puissance s'écoulaient de manière unidirectionnelle du poste source vers les consommateurs finaux. Du fait de l'insertion des productions décentralisées, les flux de puissance et les tensions sont impactés non seulement par les charges mais aussi par les sources. Par suite de ces spécificités techniques des installations photovoltaïques, le raccordement des systèmes PV au réseau peut avoir des impacts importants sur son fonctionnement. Les influences les plus significatives des systèmes PV sur le réseau de distribution sont les suivantes [15].

II.5.1. Influence sur le plan de tension

La présence de générateurs PV a une influence sur le plan de tension et sur les dispositifs de réglage du réseau. La tension varie en fonction des injections de puissances active et réactive sur le réseau. En particulier pendant une période de fort ensoleillement et de faible consommation, la tension de certains nœuds du réseau peut dépasser le seuil admissible [15].

Une étude de l'université d'agriculture et technologie de Tokyo montre que, dans la localité d'Ota City qui concentre quelques **550** installations **PV**, l'injection d'énergie sur le réseau fait croître la tension jusqu'à un seuil provoquant le découplage de certains systèmes, notamment en fin de semaine lorsque la consommation est faible [15].

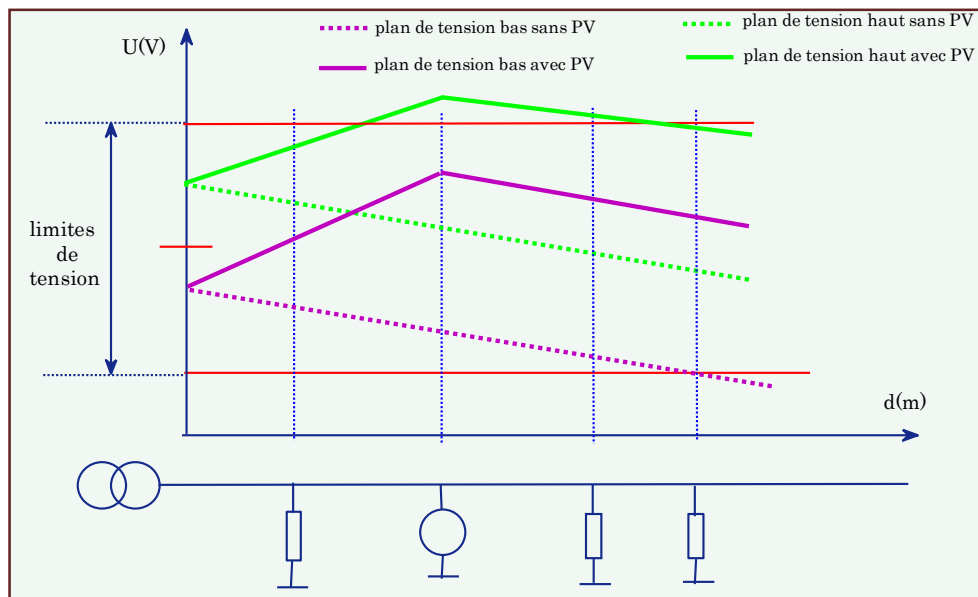


Figure II.17 : Exemple de variations de tension sur un réseau BT en fonction de la présence de production PV

II.5.2. Influence sur la qualité de l'énergie

II.5.2.1. Injection d'harmoniques de courant : La présence d'interfaces électronique de puissance peut injecter des harmoniques de découpage au réseau si les onduleurs ne sont pas munis de filtres efficaces. Les onduleurs actuels contribuent tout de même à l'augmentation des harmoniques de courant car ils fonctionnent le plus souvent à puissance réduite (un appareil fonctionnant à puissance réduite ne peut fournir la même qualité de courant qu'à puissance nominale), ainsi les **THD** sont plus importants. Les conséquences de ces harmoniques peuvent être instantanées sur certains appareils électroniques : troubles fonctionnels (synchronisation, commutation), disjonctions intempestives, erreurs de mesure sur des compteurs d'énergie... [15].

II.5.2.2. Injection de courant continu au réseau : Une étude réalisée en Espagne montre que les onduleurs actuels (avec transformateur haute fréquence et avec ou sans transformateur basse fréquence) du marché européen injectent une composante continue dans le réseau. La présence de courants DC dans les réseaux de distribution peut affecter le bon fonctionnement des dispositifs de coupure différentiels, créer des erreurs sur les compteurs d'énergie, affecter la durée de vie des composants du réseau, notamment à travers une augmentation de leur corrosion et enfin contribuer à une saturation des transformateurs [15].

II.5.2.3. Déséquilibre entre phases : L'insertion des systèmes PV engendre un déséquilibre entre phases en cas d'utilisation d'onduleurs monophasés. Si la puissance produite n'est pas correctement répartie entre les 3 phases d'un même système PV triphasé, alors ce système va contribuer à déséquilibrer le réseau BT [15].

II.6. Influence du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques

Les caractéristiques, le fonctionnement et les perturbations des réseaux de distribution peuvent influencer le fonctionnement normal des systèmes PV. Ceci provient généralement, soit des caractéristiques intrinsèques des réseaux de distribution, soit de la qualité de tension dégradée par d'autres utilisateurs du réseau, soit d'une association de ces deux causes. [15].

Ces effets entraînent généralement des découplages injustifiés des onduleurs. Les influences du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques peuvent se résumer comme suit :

II.6.1. Régime de neutre et courants de fuite

Pour un régime de neutre de TT (point milieu du transformateur du poste de distribution à la terre, masse métallique des appareils à la terre). La protection des personnes s'effectue à l'aide de disjoncteurs ou d'interrupteurs différentiels qui ont pour fonction de s'ouvrir en cas de fuite de courant.

Les installations PV peuvent produire des courants de fuite du fait des caractéristiques capacitatives des panneaux, et des onduleurs (capacités des filtres MEC).

Ces capacités en présence d'une composante alternative sur le circuit à courant continu engendrent des courants de fuite dans la liaison de mise à la terre. Ces courants de fuite peuvent être d'amplitude importante et devenir potentiellement dangereux pour les personnes en cas de contact direct avec le fil de terre.

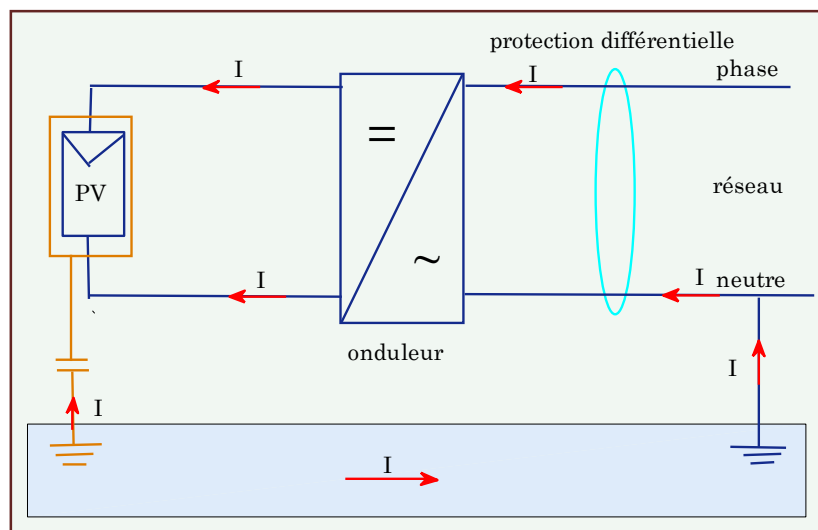


Figure II.18 : Schéma simplifié du courant de fuite via les capacités des panneaux PV, la Terre et l'onduleur

II.6.2. Creux de tension et tenue des systèmes

Les creux de tension sont ainsi l'une des principales causes de déclenchements des systèmes PV. La déconnexion d'un nombre important de systèmes PV pourrait avoir des impacts locaux et globaux sur le fonctionnement du réseau, en particulier sur des réseaux faibles.

II.6.3. Présence de composante continue et d'harmoniques de tension

Les onduleurs pour systèmes photovoltaïques hachent le courant continu issu des modules photovoltaïque en modulation à largeur d'impulsion (MLI ou PWM pour "Pulse Width Modulation") pour le convertir en courant alternatif sinusoïdal.

Le fonctionnement des onduleurs sans transformateur peut être affecté par une asymétrie des tensions du réseau (déformation de la sinusoïde par addition d'harmoniques paires), par exemple en présence d'harmoniques issues de charges non-linéaires, qui se traduirait par l'ajout d'une composante DC dans la tension injectée par l'onduleur.

II.7. 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.7.1. 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 [16].

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 :

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

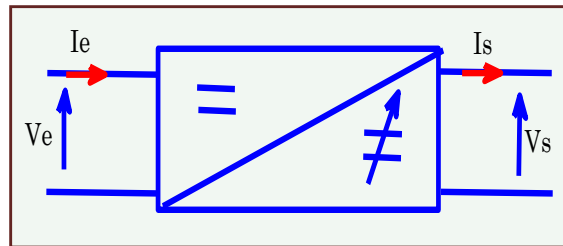


Figure II.19 : Symbole d'un convertisseur DC-DC

II.7.1.1. 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.21)** 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 $M = \frac{V_0}{V_i}$ change avec le rapport cyclique du commutateur.

Savoir le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle mathématique [16].

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. La **figure (II.22)** montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur dévolteur dans les deux cas : l'interrupteur fermé pendant $d \cdot T_s$ et l'interrupteur ouvert pendant $(1 - d)T_s$.

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

d : Le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0 \ 1]$) **figure (II.20)**.

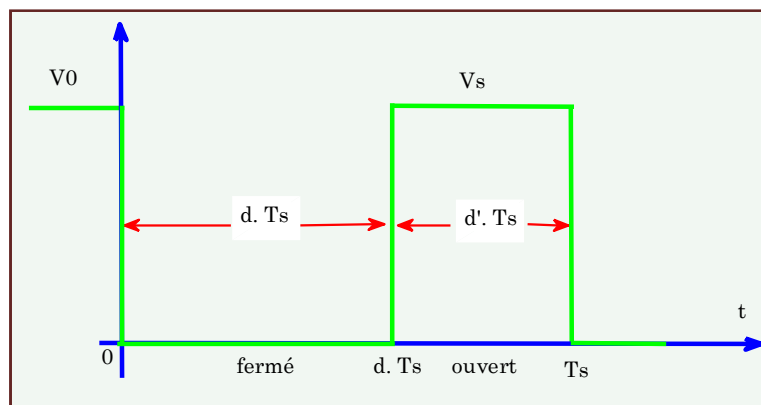


Figure II.20 : Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur

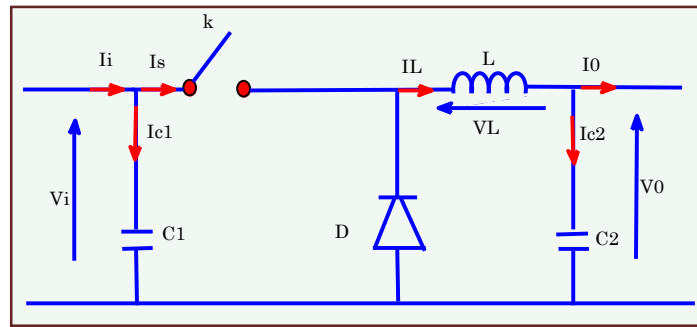


Figure II.21 : Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur

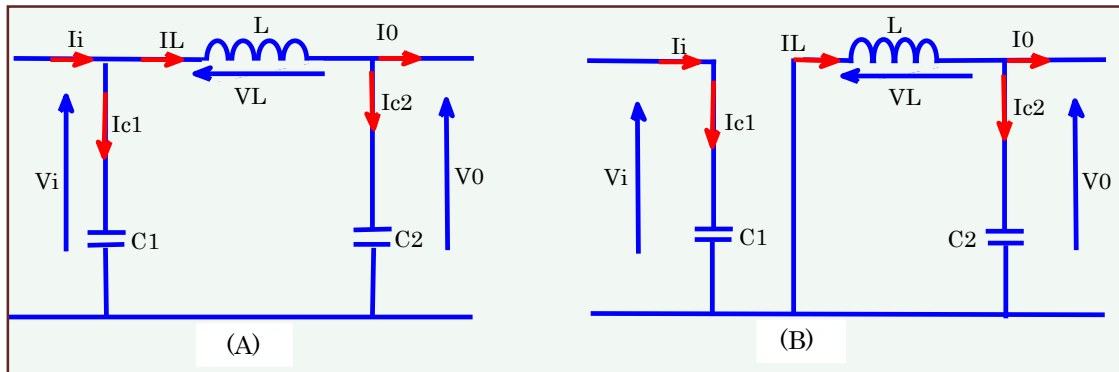


Figure II.22 : Schémas équivalents du hacheur dévolteur (A) : K fermé, (B) : ouvert

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la figure (II.22), on obtient les systèmes d'équations suivants :

- Pour la première période $d.T_s$:

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \end{cases} \quad (II.9)$$

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

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = -V_0(t) \end{cases} \quad (II.10)$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période T_s , on utilise généralement l'expression suivante :

$$\left(\frac{dx}{dt}\right) T_s = \frac{dx}{dt_{DT_s}} dT_s + \frac{dx}{dt_{(1-D)T_s}} (1 - d)T_s \quad (II.11)$$

En appliquant la relation (II.11) sur les systèmes d'équations (II.9) et (II.10), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$\begin{cases} C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} T_s = dT_s(i_i - i_L) + (1 - d)T_s i_i \\ C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} T_s = dT_s(i_L - i_0) + (1 - d)T_s(i_L - i_0) \\ L \frac{di_L}{dt} = dT_s(V_i - V_0) + (1 - d)T_s(-V_0) \end{cases} \quad (II.12)$$

Après arrangement, on obtient :

$$\begin{cases} i_0(t) = i_L(t) - C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} \\ i_L(t) = \frac{1}{d} (i_i(t) - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt}) \\ V_i(t) = \frac{1}{d} (L \frac{di_L(t)}{dt} + V_0(t)) \end{cases} \quad (II.13)$$

II.7.1.2. 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.23)**. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [16].

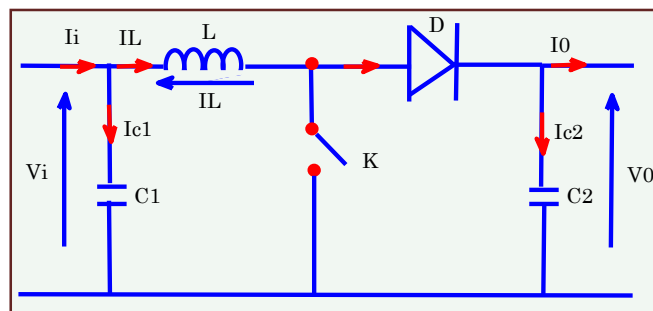


Figure II.23 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost

Comme pour le convertisseur dévolteur, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (voir figure II.24) des deux phases de fonctionnement donne :

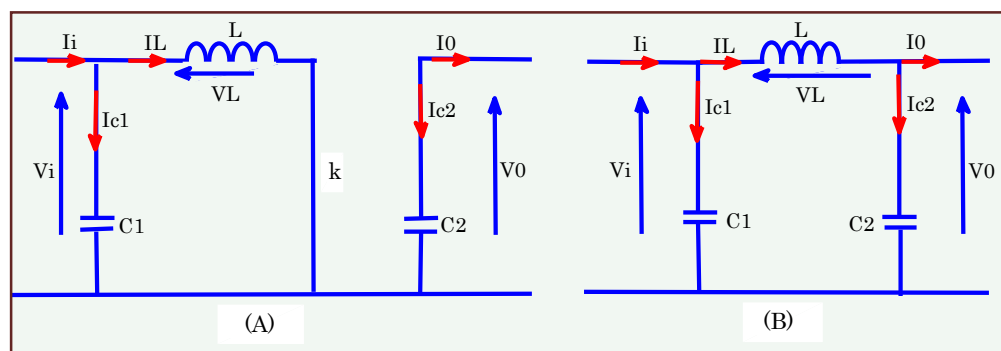


Figure II.24 : Schémas équivalents du hacheur survolteur (A) : K fermé, (B) : ouvert

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = -V_i(t) \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

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

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

En appliquant la relation (II.11) sur les systèmes d'équations (II.14) et (II.15), Comme pour le convertisseur dévolteur, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur :

$$\begin{cases} i_L = i_i - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ i_0 = (1 - d)i_L - C_2 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ V_i = L \frac{di_L}{dt} + (1 - d)V_0 \end{cases} \quad \text{II.16}$$

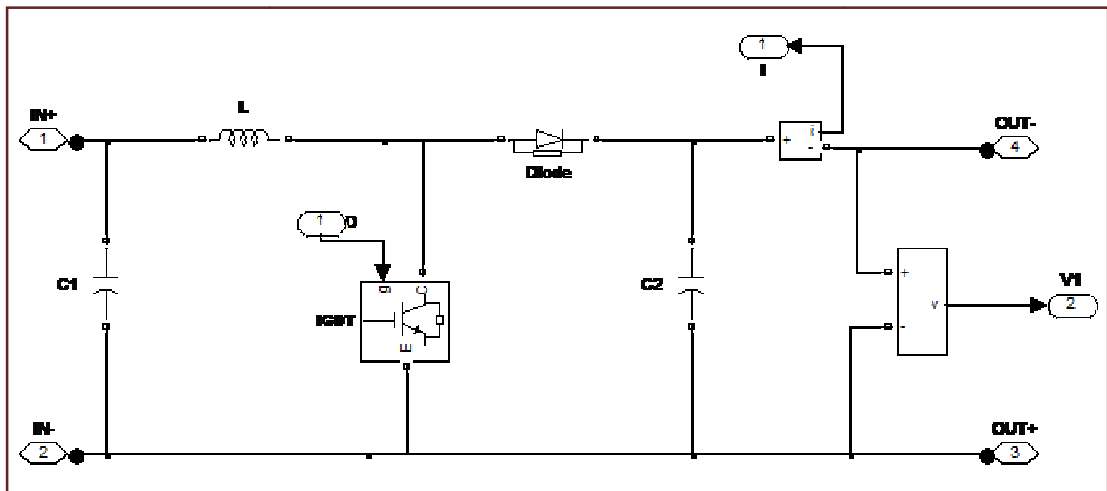


Figure II.25 : Schéma de simulation d'un hacheur boost

II.7.1.3. 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 illustré par la figure (II.26) [16].

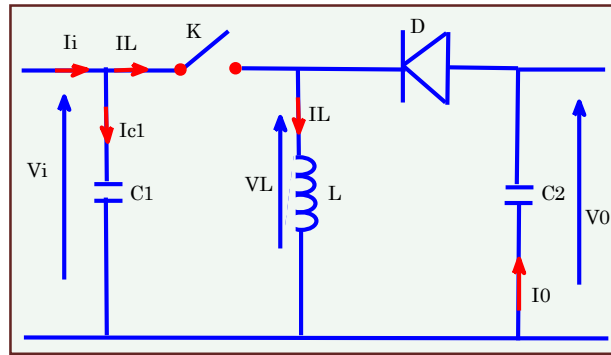


Figure II.26 : Schéma de principe d'un Convertisseur dévolteur-survolteur

La figure (II.27) montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur pour les deux cycles de fonctionnement.

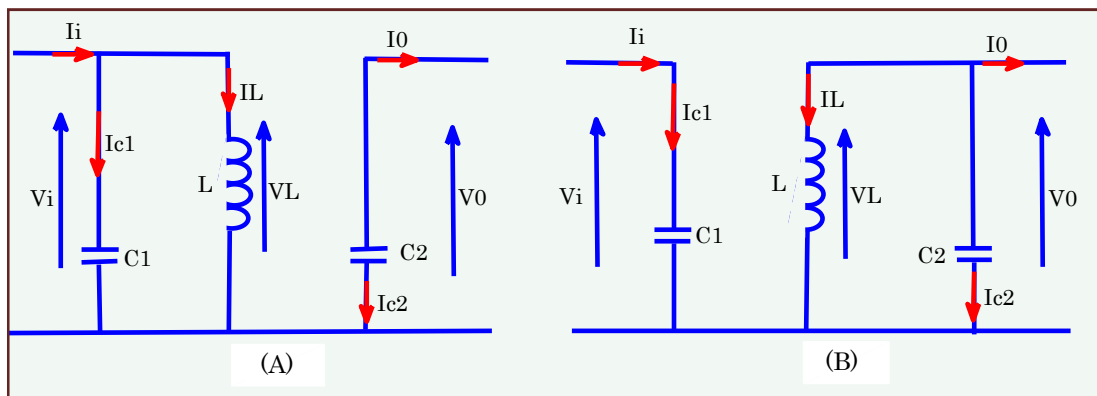


Figure II.27 : Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur (A) : K fermé, (B) : ouvert

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** fonctionne comme un hacheur **boost** et si le rapport cyclique $d < 0.5$ le hacheur **Buck-boost** fonctionne comme un hacheur **Buck**.

- Pour la première période $d \cdot T_s$:

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = V_i(t) \end{cases} \quad (II.17)$$

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

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = -V_0(t) \end{cases} \quad (II.18)$$

En appliquant la relation (II.11) sur les systèmes d'équations (II.17) et (II.18), on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur-survolteur :

$$\begin{cases} i_L = \frac{1}{d} (i_i - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt}) \\ i_0 = -(1-d)i_L - C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} \\ V_i = \frac{1}{d} (-(1-d)V_0 + L \frac{di_L}{dt}) \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

II.8. Commande (MPPT) des convertisseurs DC/DC

Les panneaux solaires de première génération sont généralement dimensionnés pour que leurs (PPM) correspondent à la tension nominale de batterie de **12** ou **24** Volts. Grâce à cette configuration, une simple connexion directe via une diode anti-retour suffit pour effectuer le transfert d'énergie du générateur photovoltaïque (GPV) à la charge. Cependant, les caractéristiques non-linéaires du module photovoltaïque et sa sensibilité aux conditions extérieures, comme l'éclairement et la température, induisent des pertes énergétiques [9].

L'utilisation d'un étage d'adaptation afin d'optimiser la production d'énergie à tout moment est ainsi de plus en plus préconisée.

II.8. 1. Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation DC-DC

La **Figure (II.28)** 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,...). [9]

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). [9]

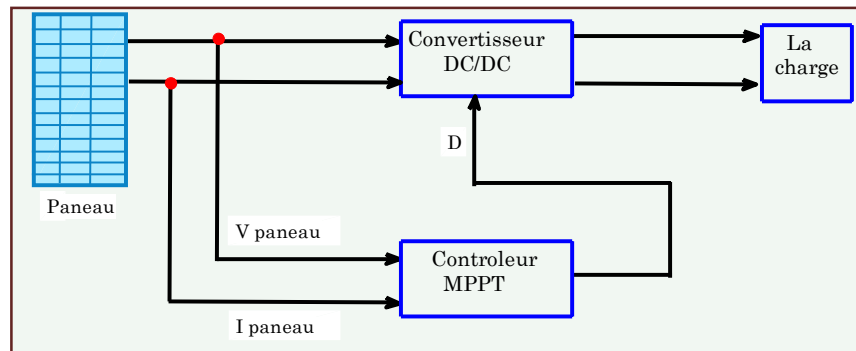


Figure II.28 : Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC-DC) contrôlé par une commande (PPM) sur charge DC.

II.8. 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 [17].

II.8. 2.1. Méthodes a 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 [17] :

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

II.8. 2.2. Méthodes a 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 [17].

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

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

II.8.2.3. Méthodes a 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 augmentation de la puissance du panneau alors on maintien cette direction de recherche, sinon on cherche dans le sens opposé [17].

II.8.2.3.1. Algorithme perturbation et observation

C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM) le plus 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)[17].

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.29) [17].

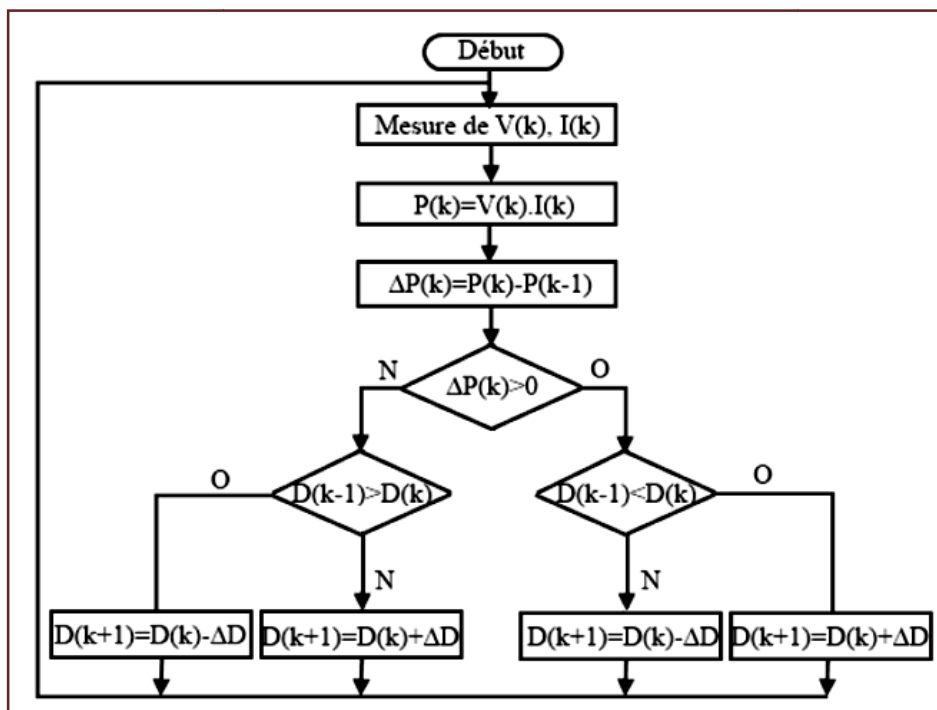


Figure II.29 : Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O)

II.8.2.3.2. Algorithme incrémentation de la conductance

L'algorithme par incrémentation de conductance se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro. Ceci peut être décrit par les équations suivantes :

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \tag{II.20}$$

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = \frac{1}{V} \tag{II.21}$$

On définit la conductance de la source $\frac{1}{V}$ et incrémentation de la conductance $\frac{dP}{dV}$. Puisque la tension V du panneau est toujours positive, la relation $(V_0 = (1 - d)V_i)$ explique que le point de puissance maximale MPP est atteint si la conductance de la source égale incrémentation de la conductance de la source avec un signe moins, et qu'elle est à gauche de ce point lorsque la conductance est supérieure à l'incrémentale conductance et vice-versa, [17] comme suit :

$$\frac{dP}{dV} > 0 \text{ si } \frac{1}{V} > -\frac{dI}{dV} \tag{II.22}$$

$$\frac{dP}{dV} = 0 \text{ si } \frac{1}{V} = -\frac{dI}{dV} \tag{II.23}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \text{ si } \frac{1}{V} < -\frac{dI}{dV} \tag{II.24}$$

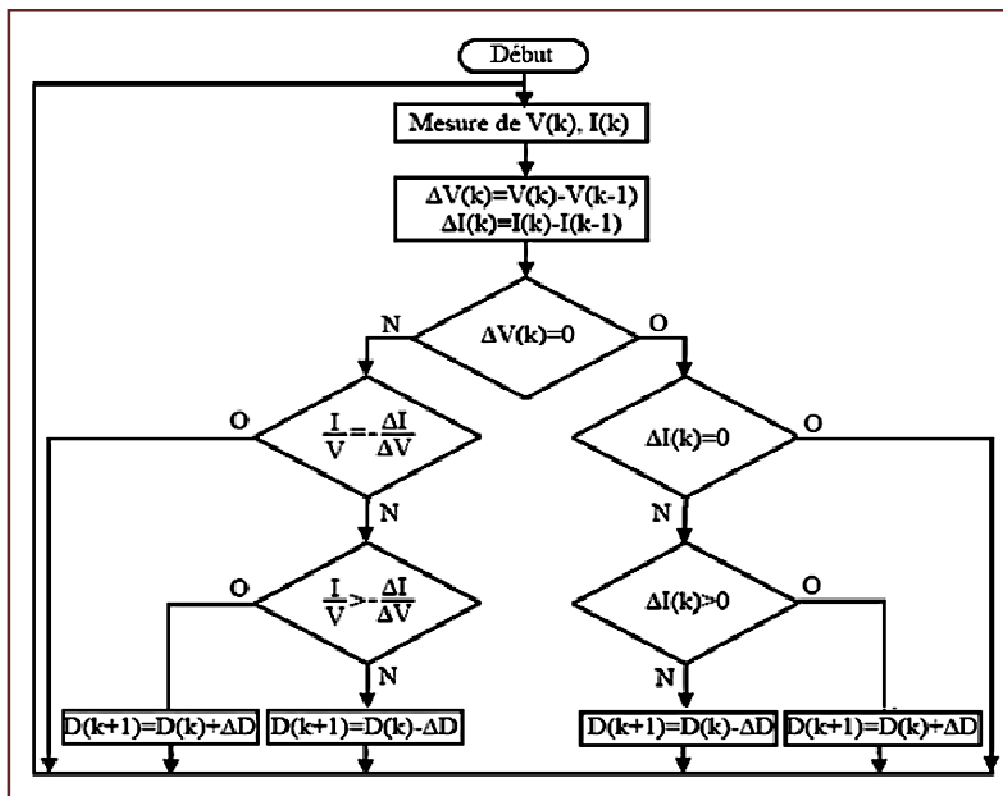


Figure 30 : Algorithme incrémental conductance

II.9. Les onduleurs

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet la transformation de l'énergie de type continue, en une énergie alternative. la forme de la tension de la sortie de l'onduleur doit être plus proche d'une sinusoïde (l'allure sinusoïdale), c'est que le taux d'harmonique soit très faible, et ça dépend essentiellement à la technique de commande utilisée.

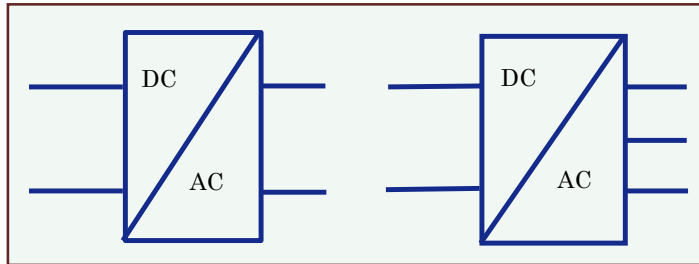


Figure II.31 : Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé

II.9. 1. Structure d'onduleur

Les onduleurs triphasés constitués de trois bras chaque bras se compose de deux interrupteurs. Les interrupteurs choisis, constituent bien une cellule de commutation. Leur fonctionnement doit être complémentaire afin de ne jamais court-circuiter la source continue V_e .

Donc les interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant. et se compose soit d'un thyristor et une diode en antiparallèle ou bien un transistor avec une diode en antiparallèle [18].

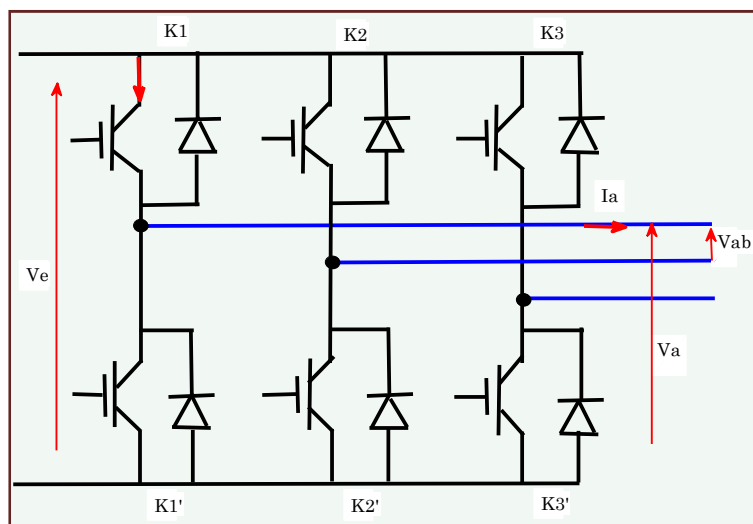


Figure II.32 : Structure d'un onduleur triphasée

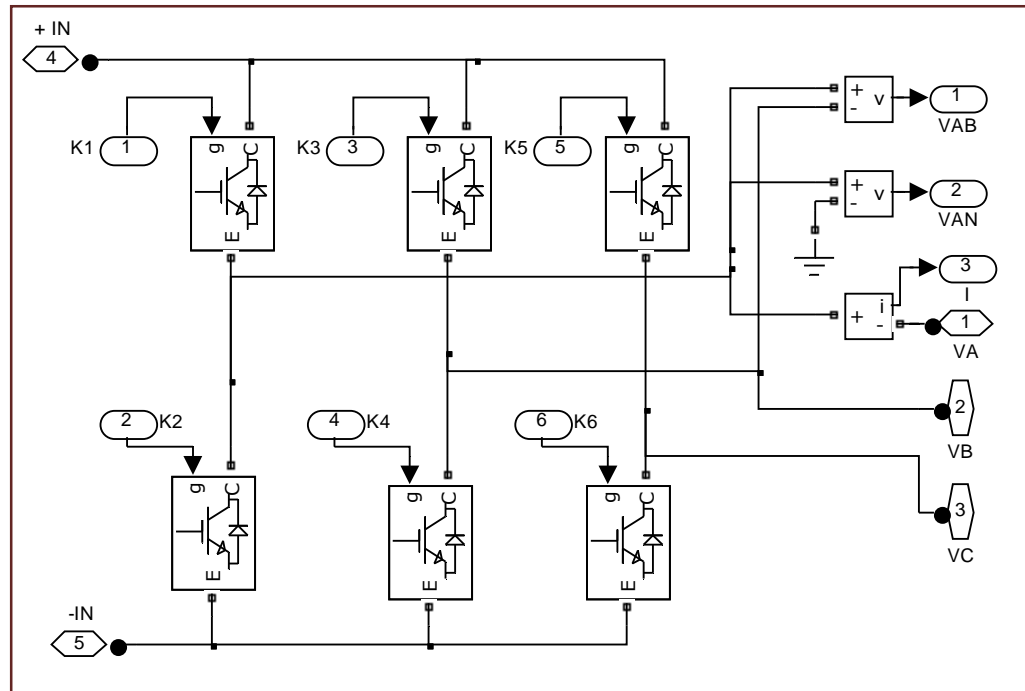


Figure II.33 : Schéma de simulation d'un onduleur triphasé

II.9. 2. Principe de fonctionnement

Il existe plusieurs types de commande d'onduleurs comme (**commande symétrique** (adjacente), **Décalée** (disjointe), **MLI**....).les déférente commande ont le but d'obtenir l'allure sinusoïdale ou niveau de la sortie .et pour chaque commande le principe de fonctionnement se change.

II.9. 2. 1.Commande plein onde

Deux thyristors d'un même bras sont commandés à 180° de décalage. Les thyristors de deux bras voisins sont commandes à 120° de décalage. On obtient ainsi des tensions composées dont les valeurs sont E , 0 ou $-E$ volts, la durée d'un niveau non nul étant de 120° par alternance [19].

II.9. 2. 2.Commande MLI

L'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) ou Pulse Width Modulation (PWM) permet d'éliminer les premiers rangs d'harmoniques de courant afin d'améliorer le facteur de puissance. Cependant, cette technique ne résout pas totalement le problème des harmoniques de courant [19].

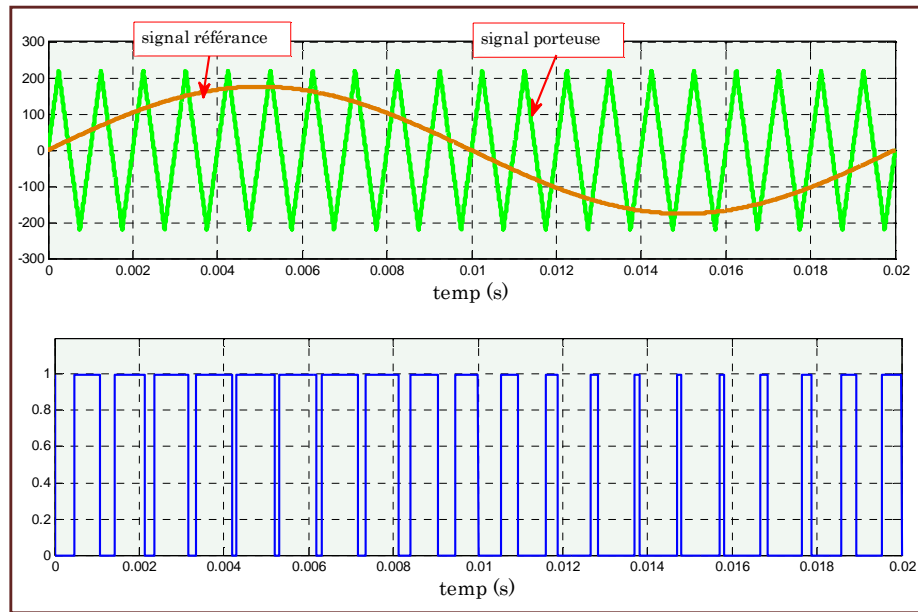


Figure II.34 : Principe de la commande MLI et les impulsions d'un interrupteur

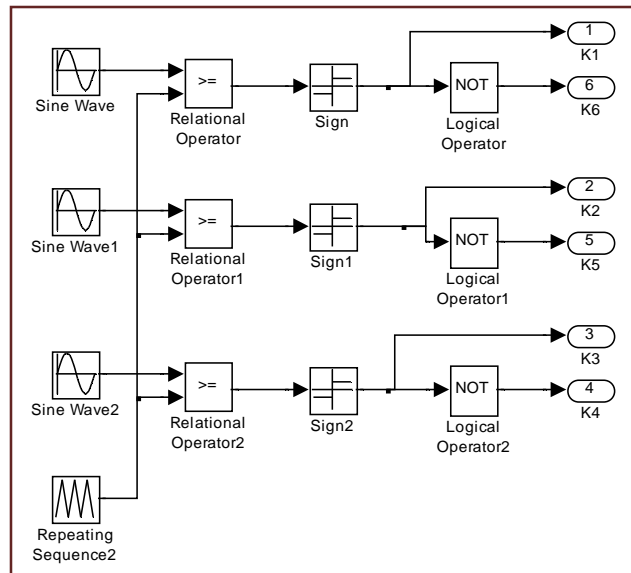


Figure II.35 : Schéma de simulation d'une commande MLI

II.10. Conclusion

Le fonctionnement du générateur (GPV) et le récepteur à leur rendement optimal, nécessitent l'insertion des convertisseurs statiques entre le générateur récepteur. Dans la littérature plusieurs travaux se sont intéressés à l'étude des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique. Ce chapitre a été consacré à l'introduction de quelques notions et définitions relatives aux systèmes photovoltaïques, et les convertisseurs **DC-DC** et sur les méthodes de poursuite de point de puissance maximale (**MPPT**), nous avons donné l'exemple de deux méthodes de maximisation de puissance de **GPV**, la **P&O** et la conductance incrémentale (**inc-cond**). On a présenté aussi les convertisseurs DC-AC et la commande MLI.

Chapitre III

**simulation du système de
compensation photovoltaïque**

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons effectuer la simulation d'un générateur PV raccordé au réseau. Nous allons montrer le problème des perturbations des harmoniques liées aux composants non linéaires sur la qualité de l'énergie fourni au réseau. Les courbes de la tension, du courant et de la puissance seront présentées à chaque étage du système depuis le générateur passant par l'hacheur boost vers l'onduleur et finalement arrivant à la charge et le réseau électrique.

III.2. Le Système de Compensation Photovoltaïque proposée

Le système PV proposé contient un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur « boost », une commande MPPT « perturbation et observation », l'onduleur de tension (DC-AC) commandé par MLI, un filtre RLC une charge non linéaire et le réseau électrique **BT** figure (III.1).

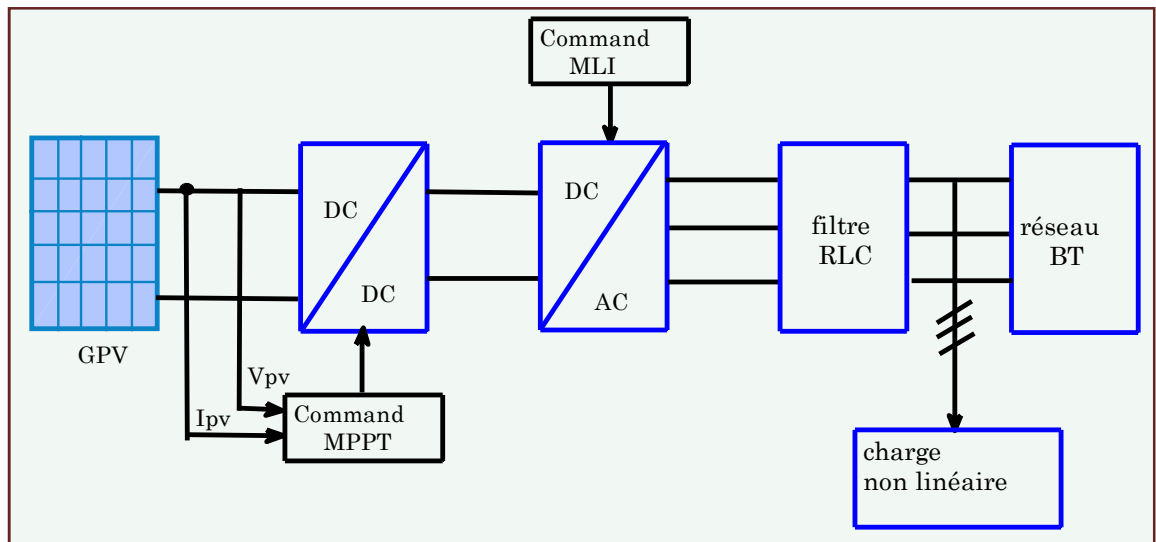


Figure III.1 : schéma synoptique d'un système photovoltaïque relié au réseau électrique

III.3. Simulation du générateur PV

Le module photovoltaïque (**MSX-60**) est choisi pour la simulation. Il contient (36) cellules solaires du silicium multi cristallines, et fournit une puissance maximum nominale de 60 W. Les caractéristiques physiques et électriques de ce panneau photovoltaïque sont données par le tableau suivant :

Eclairement standard G	$1000W/m^2$
Température standard T	$25^{\circ}C$
Puissance maximale P_{max}	$60W$
Tension à P_{max} ou tension optimale V_{opt}	$17.1V$
Courant à P_{max} ou courant optimale I_{opt}	$3.5A$
Courant de court- circuit I_{SC}	$3.8A$
Tension à circuit ouvert V_{CO}	$21.1V$
Nombre des cellules en séries	36
Energie de la bande interdite	$1.12eV$
Coefficient de la température de I_{SC}	$65mA/^{\circ}C$
Coefficient de température de V_{CO}	$-80mV/^{\circ}C$
Coefficient de température de puissance	$(0.5 \mp 0.05)\%/^{\circ}C$
Courant de saturation I_{sat}	$20nA$
Résistance série R_s	0.18Ω
Résistance série R_{shunt}	360Ω

Tableau (III.1) : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau MSX-60 dans les conditions standards «CST»

Le schéma de générateur photovoltaïque dans l’environnement Matlab-Simulink est représenté par la **figure (III.2)**:

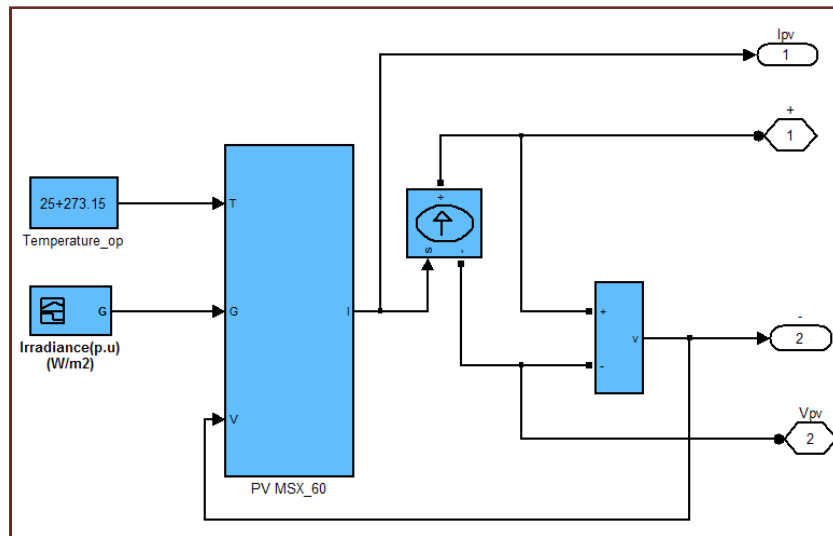


Figure III.2 : Modèle de simulation d'un générateur PV

III.3.1. Simulation du générateur (GPV) à éclairage et température constante

✚ Caractéristique $(I_{pv} = f(V_{pv}))$ et $(P_{pv} = f(V_{pv}))$

À température et éclairage constants, et particulièrement aux conditions standards (STC) ($G = 1000\text{w}/\text{m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$) . Les caractéristique $(I_{pv} = f(V_{pv}))$ et $(P_{pv} = f(V_{pv}))$ sont données par la Figure (III.3).

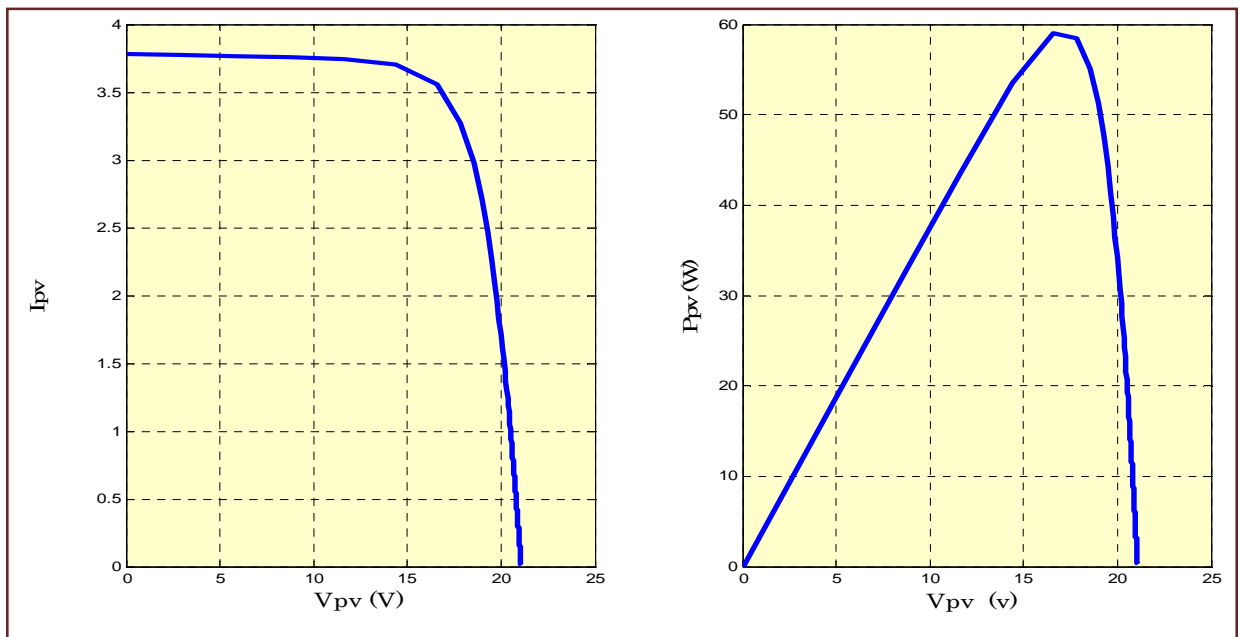


Figure III.3 : Caractéristique (courant-tension) et (puissance-tension) du GPV

III.3.2. Simulation du générateur (GPV) à éclairage et température variable

Afin d'observer l'influence des conditions externes, de l'éclairage et de la température (G, T) sur les caractéristiques $(I_{pv} = f(V_{pv}))$ et $(P_{pv} = f(V_{pv}))$ nous avons adopté la méthode suivante :

- Pour visualiser l'influence de l'éclairage, on fixe la température ambiante ($T = 25^\circ\text{C}$) et on fait varier l'éclairage dans une gamme suffisante.
- Pour un éclairage constant ($G = 1000\text{w}/\text{m}^2$) nous ferons varier la température afin de voir l'influence de celle-ci sur caractéristiques du GPV.

III.3.2.1. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique ($I_{pv} = f(V_{pv})$)

En faisant varier l'éclairement (G) entre ($200\text{w}/\text{m}^2$ et $1000\text{w}/\text{m}^2$) avec un pas de ($200\text{w}/\text{m}^2$), la caractéristique ($I_{pv} = f(V_{pv})$) est donnée par la **figure (III.4)**.

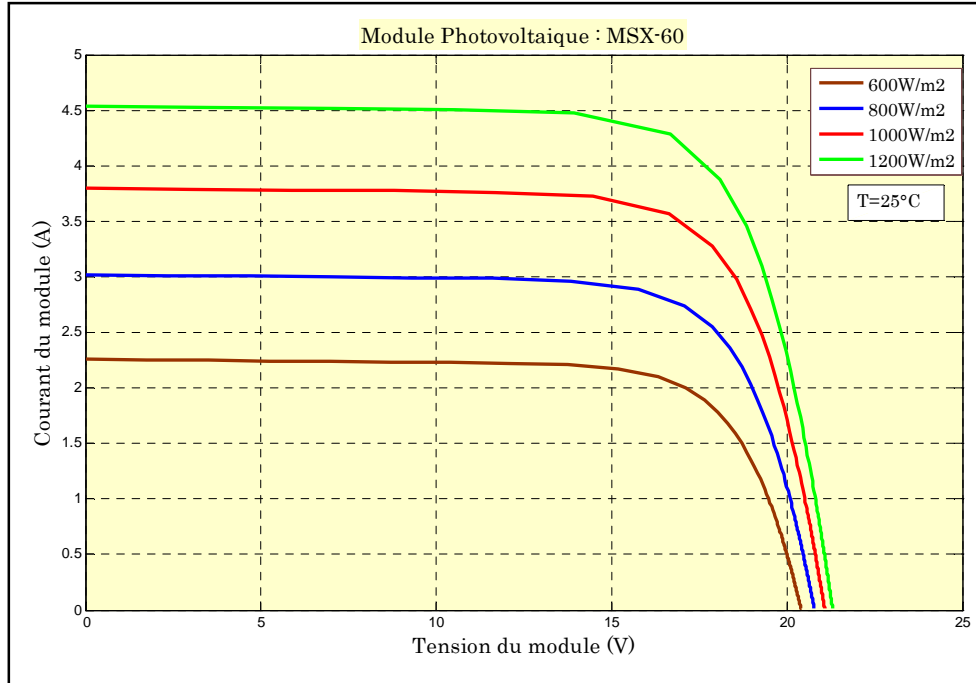


Figure III.4 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$

D'après la figure (III.4) on remarque une forte diminution du courant de court-circuit et une faible diminution de la tension du circuit ouvert avec la diminution de l'éclairement (G). Ce qui prouve que le courant de court circuit de la cellule dépend de l'éclairement, par contre la tension de circuit ouvert est moins influencé par la variation de celui ci.

III.3.2.2. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique ($P_{pv} = f(V_{pv})$)

En faisant varier l'éclairement (G) entre ($200\text{w}/\text{m}^2$ et $1000\text{w}/\text{m}^2$) avec un pas de ($200\text{w}/\text{m}^2$), la caractéristique ($P_{pv} = f(V_{pv})$) est donnée par la **figure (III.5)**.

On remarque d'après la **figure (III.5)** que la variation de l'éclairement influe sur la puissance du GPV, plus l'éclairement augmente plus la puissance augmente.

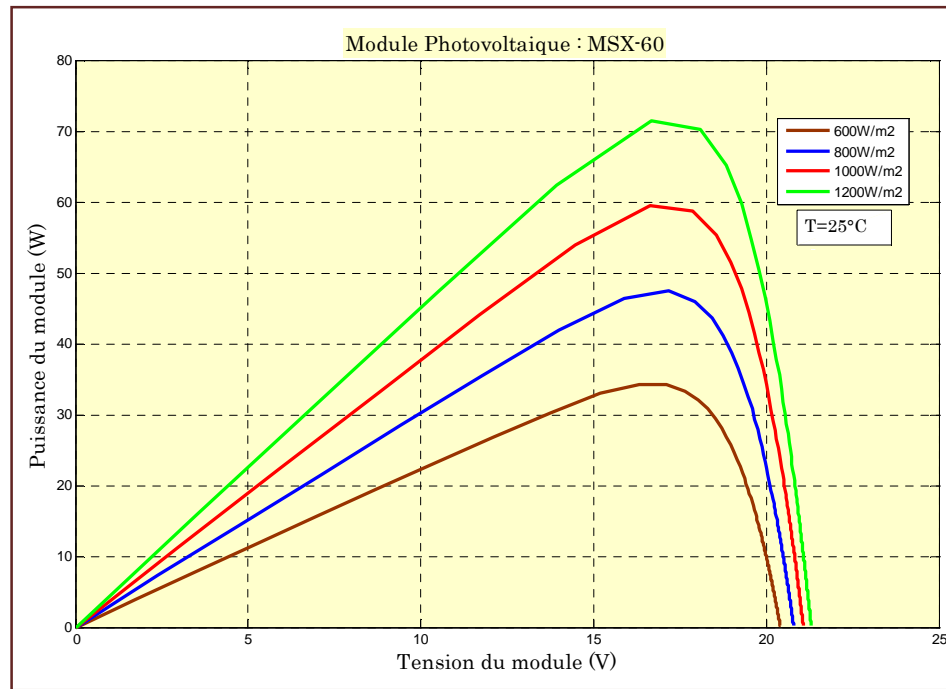


Figure III.5 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique ($P_{pv} = f(V_{pv})$)

III.3.2.3. L'influence de la température sur la caractéristique ($I_{pv} = f(V_{pv})$)

En faisant varier la température (T) entre (0°C et 75°C) avec un pas de (25°C), l'influence de celle-ci sur la caractéristique la caractéristique ($I_{pv} = f(V_{pv})$) est donnée par la figure(III.6) pour un éclairement($G = 1000\text{w}/\text{m}^2$).

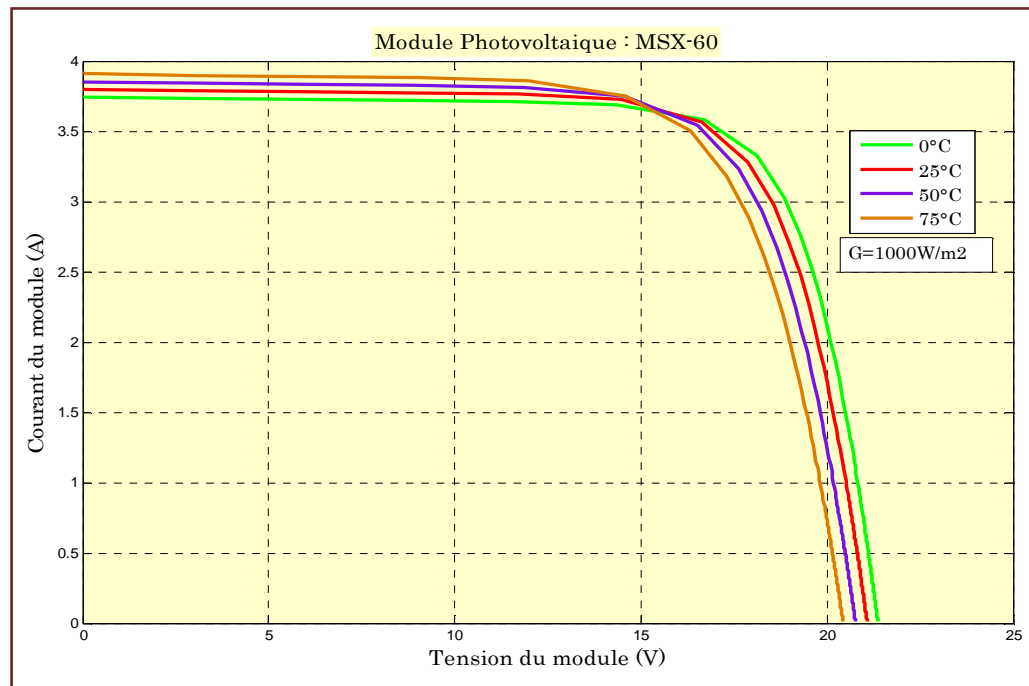


Figure III.6: Influence de la température sur la caractéristique ($I_{pv} = f(V_{pv})$)

On constate d'après la **figure (III.6)** que la tension à vide d'un module photovoltaïque (une cellule solaire) diminue avec l'augmentation de la température du module PV (de la cellule). Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température du module PV (de la cellule solaire).

III.3.2.4. L'influence de la température sur la caractéristique ($P_{pv} = f(V_{pv})$)

La caractéristique ($P_{pv} = f(V_{pv})$) est donnée par la **figure (III.7)**.

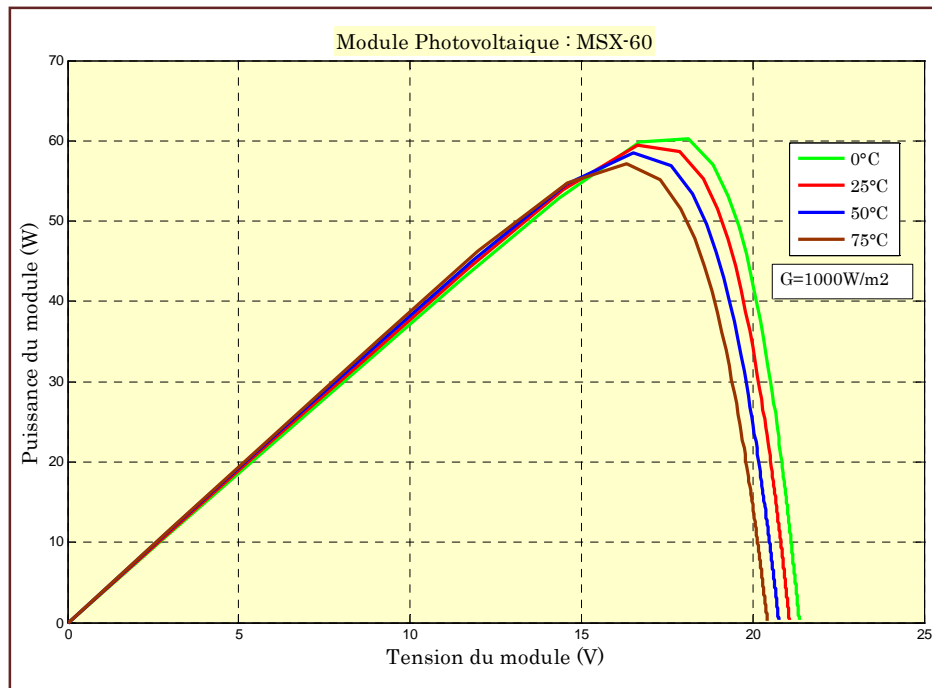


Figure III.7: Influence de la température sur la caractéristique ($P_{pv} = f(V_{pv})$)

On peut remarquer sur la figure (III.7) que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

III.4. Simulation du system photovoltaïque avec hacheur commandé en MPPT

Dans cette simulation on a utilisé un générateur PV de type MSX-60 et un hacheur boost caractérisé par:

- Inductance d'entrée ($l = 6 \mu H$)
- Capacité d'entrée ($C_1 = 5 mF$)
- Capacité de sortie ($C_2 = 1 mF$)
- IGBT et une diode de puissance

On a utilisé aussi une commande MPPT de type P&O Charge RL ($R = 250 \Omega$, $l = 1 mH$)

III.4.1. Schéma de simulation :

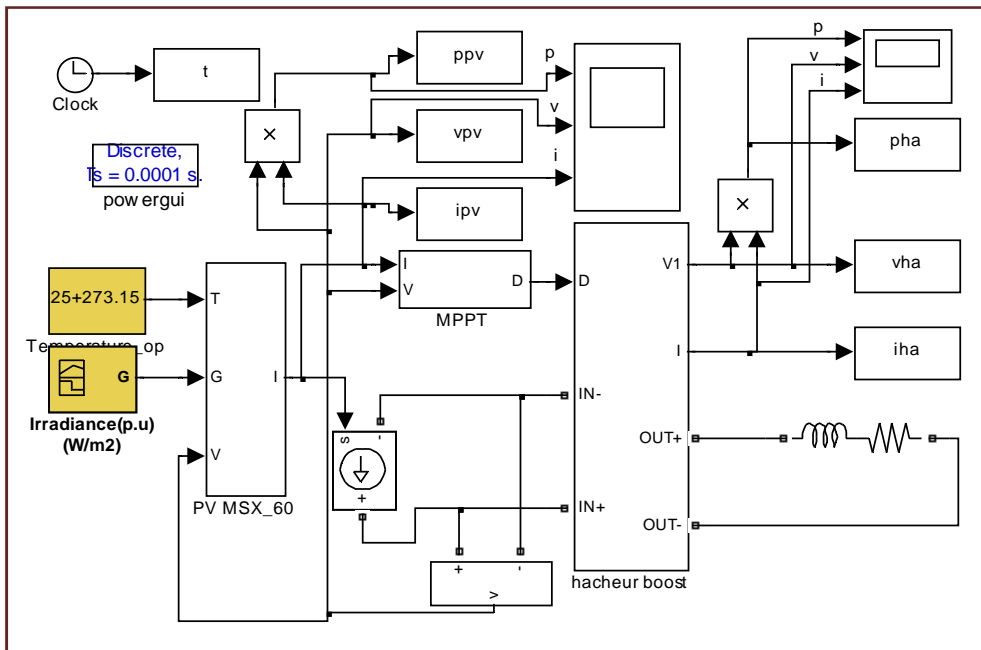


Figure III.8: Schéma de simulation d'un PV avec un hacheur commandé en MPPT

L'objectif fixé dans ces simulations est d'atteindre une tension suffisamment grande à partir d'une tension relativement faible en sortie du **GPV** c.à.d. de faire fonctionner le hacheur comme un hacheur survolteur avec un rapport cyclique ($\alpha > 0.5$).

III.4.2. Résultat de simulation :

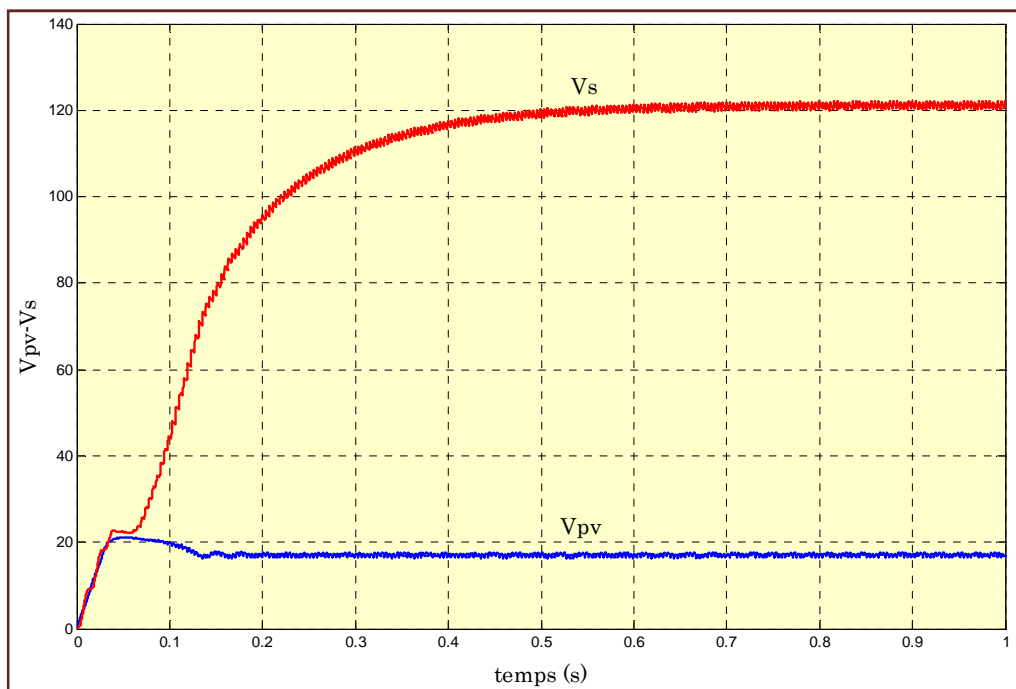


Figure III.9 : Caractéristique $V_{PV} = f(t)$ et $V_s = f(t)$ du haheur boost

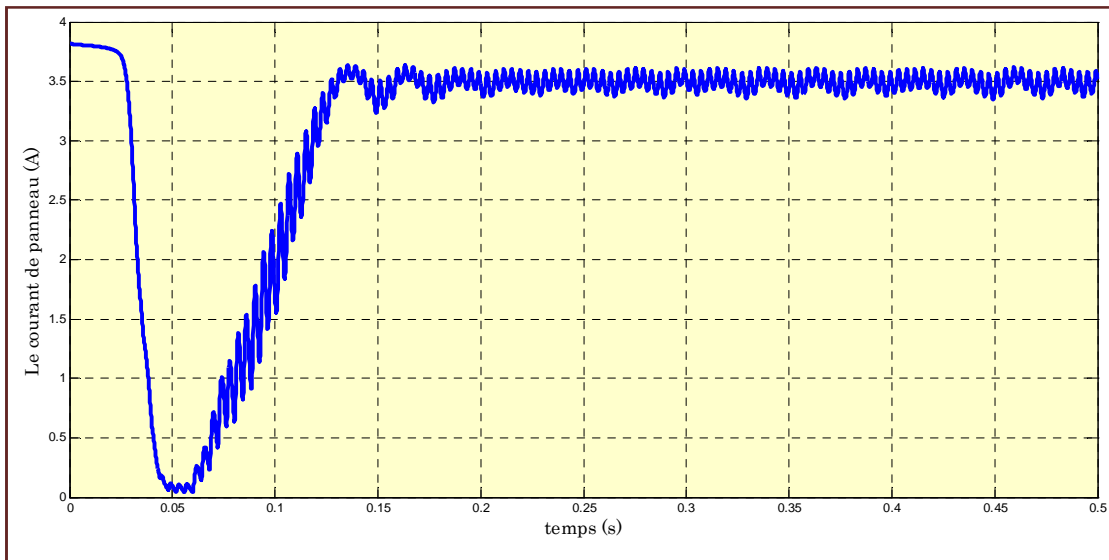


Figure III.10 : le courant du panneau PV

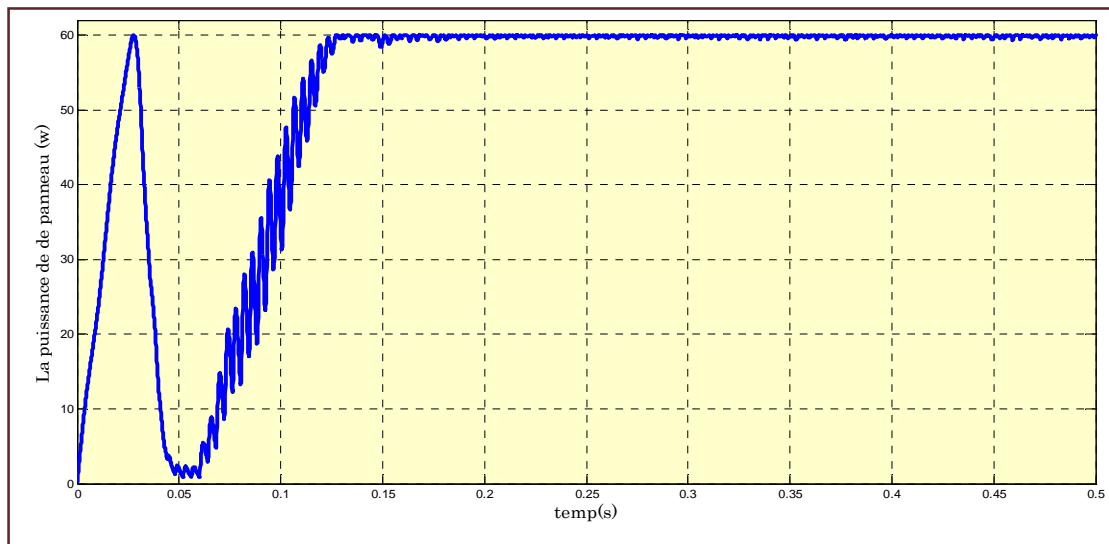


Figure III.11 : La puissance de module photovoltaïque

D'après la figure (III.9), au départ la tension de PV prend un saut puis elle se stabilise à la valeur désirée (tension optimale de PV).

D'après la figure (III. 10) on remarque qu'au départ le courant prend la valeur de court-circuit ensuite il revient la valeur nominale.

Dans la figure (III.11) on remarque que le générateur PV fonctionne en puissance maximale après le régime permanent.

III.5. Simulation globale de système PV en fonctionnement autonome

Dans cette simulation on a utilisé un générateur PV de type MSX-60 et hacheur boost caractérisé par:

- Inductance d'entrée ($l = 6 \mu H$)
- Capacité d'entrée ($C_1 = 5 mF$)
- Capacité de sortie ($C_2 = 1 mF$)
- IGBT et une diode de puissance

On a utilisé aussi une commande MPPT de type et un onduleur triphasé commandé par la commande MLI Charge RL ($R = 250 \Omega, l = 1 mH$).

III.5.1. Schéma de simulation

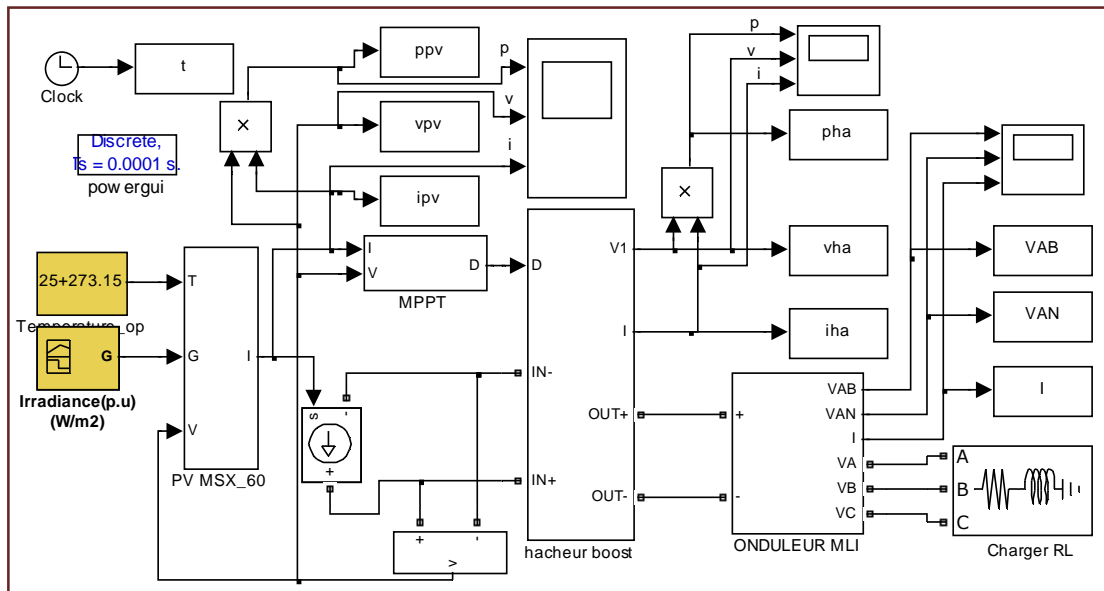


Figure III.12 : Schéma de simulation globale PV- hacheur boost-onduleur MLI

III.5.1. Résultat de simulation :

D'après la figure (III.13), on remarque que les valeurs de tension et la puissance d'entrée de l'onduleur sont supérieures à celles de PV.

D'après la figure (III.14), on remarque que le courant de sortie de l'onduleur prend la forme sinusoïdale à cause de la charge inductive.

D'après la figure (III.15), on remarque que la valeur max de la tension composé est égale à celle de la tension continu de l'entrée ainsi que la forme de la tension simple et la tension composé est découpé.

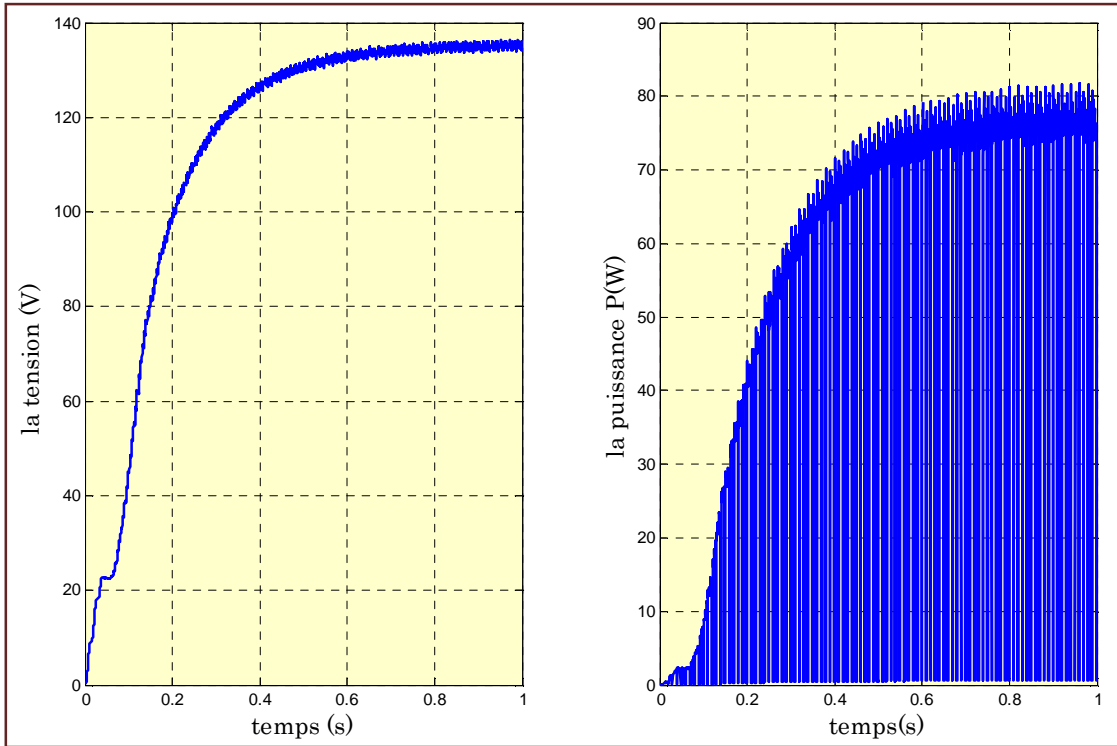


Figure III.13 : La tension et la puissance d'entrée de l'onduleur

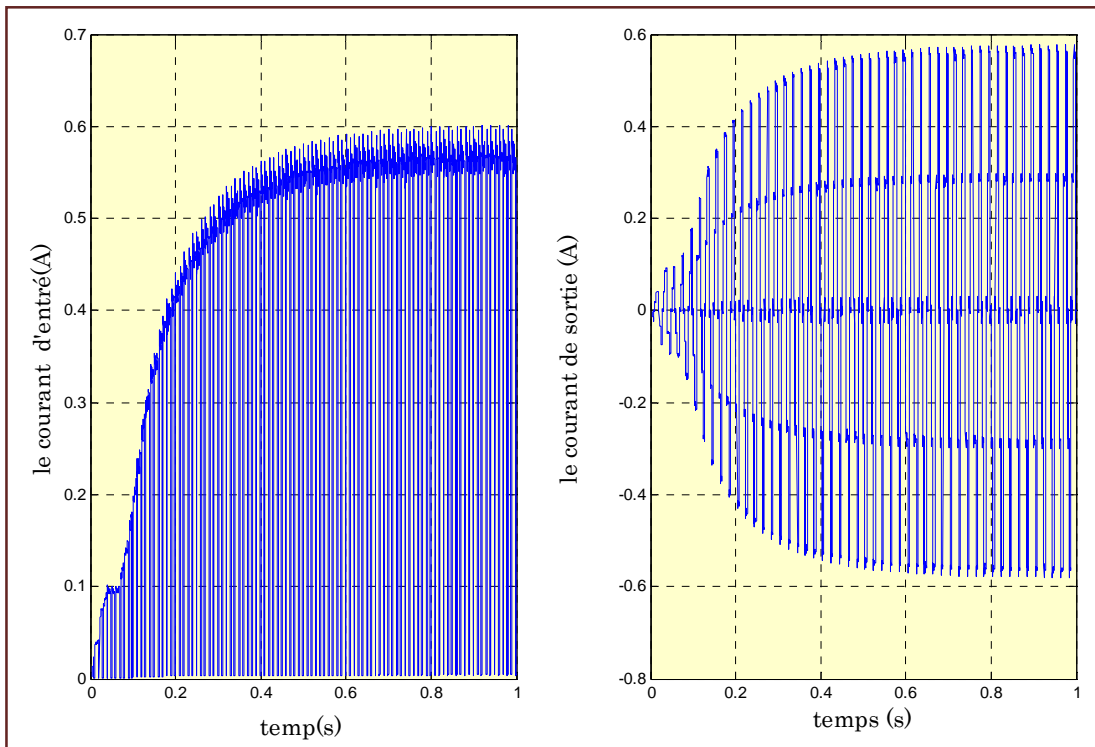


Figure III.14: Le courant d'entrée et la sortie de l'onduleur

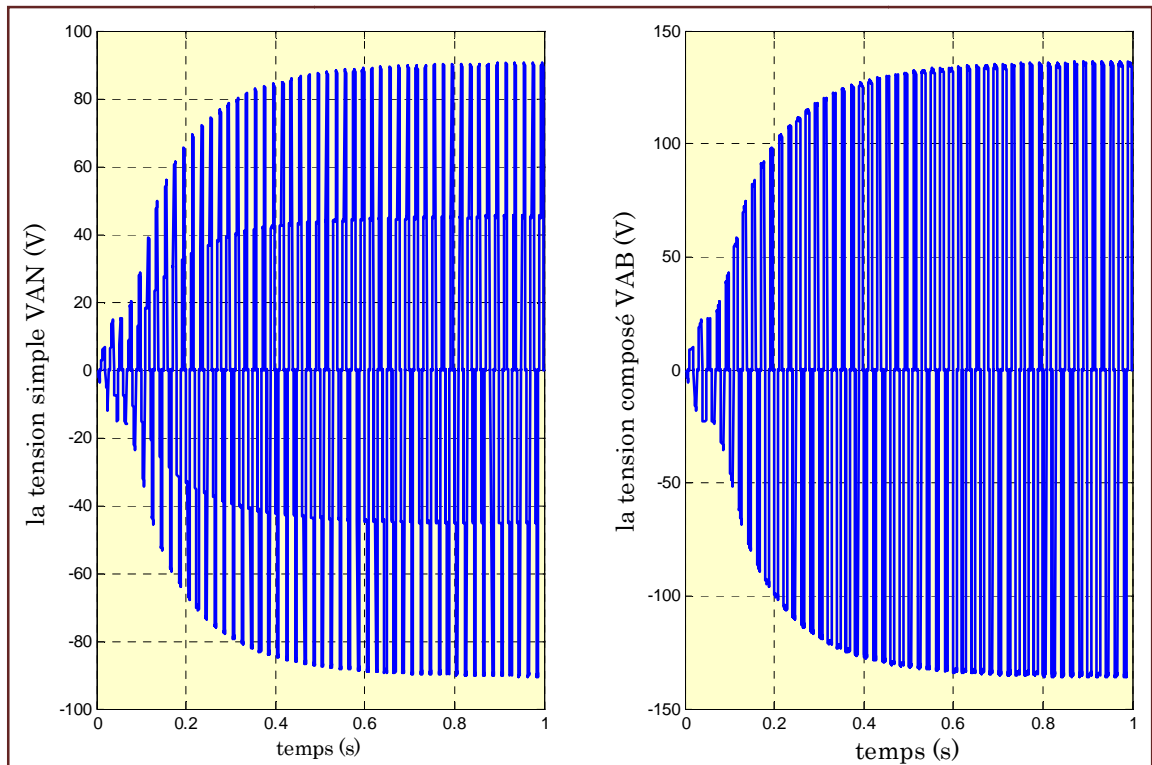


Figure III.15: la tension simple et composé de l'onduleur

III.6. Simulation global de PV raccordé au réseau

III.6.1. Modélisation de réseau BT

Le réseau triphasé trois grandeurs sinusoïdales de même fréquence, déphasées entre elles de $\frac{2\pi}{3}$, et ayant même valeur efficace, forment un système triphasé équilibré.

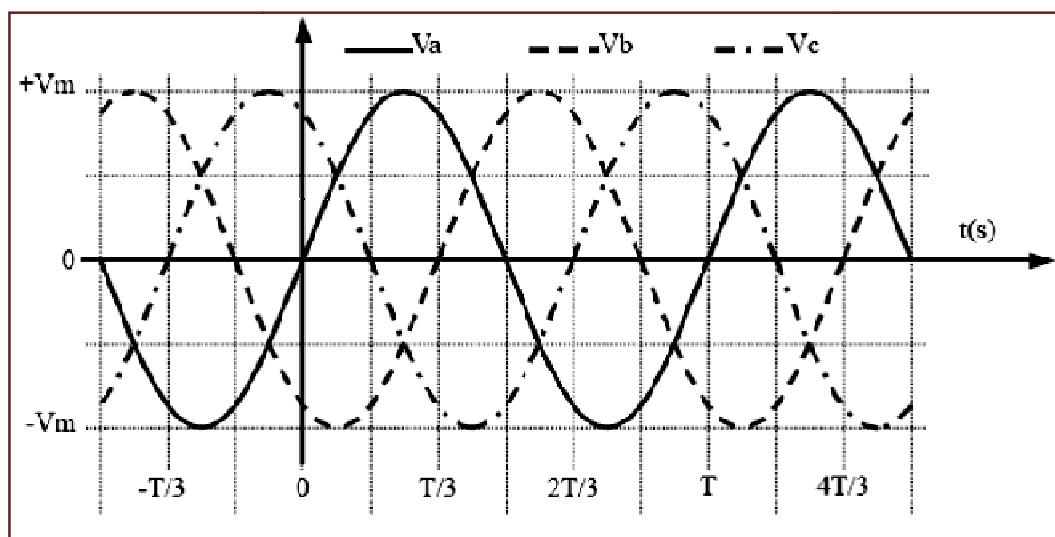


Figure III.16: Système de tensions triphasé équilibré

Réseau de distribution électrique. Il est basé sur un système triphasé de tensions. On peut généralement considérer que $(V_a V_b V_c)$ est un système de tensions triphasé équilibré direct. Il en est de même pour $(U_{ab} U_{bc} U_{ca})$.

On a

$$\begin{cases} V_a = V_m \sin(\omega t) \\ V_b = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c = V_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad \text{(III.1)}$$

$$\begin{cases} U_{ab} = V_a - V_b \\ U_{bc} = V_b - V_c \\ U_{ca} = V_c - V_a \end{cases} \quad \text{(III.2)}$$

Relations pour un système triphasé équilibré :

$$\begin{cases} V_m = \sqrt{2} V_{eff} \\ U_m = \sqrt{3} V_m \\ U_{eff} = \sqrt{3} V_{eff} \end{cases} \quad \text{(III.3)}$$

III.6.2. Schéma de simulation du réseau

On va utiliser un réseau BT (220V/380V) avec une fréquence de 50 Hz raccordé à un filtre de lissage de courant.

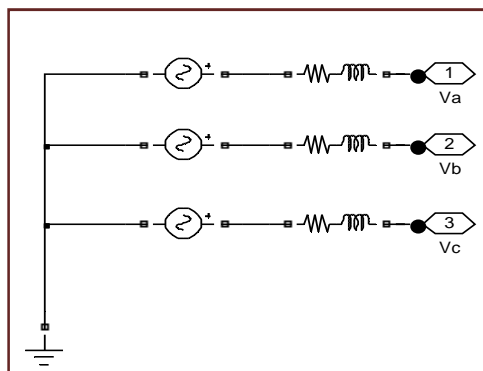


Figure III.17 : Schéma de simulation de réseau

III.6.3. Le filtre LC

Le filtre **LC** élimine les harmoniques de découpage presque parfaitement et son comportement est quasiment idéal lorsqu'on travaille à vide (courant de sortie nul) et avec des signaux de fréquences voisines de la fréquence fondamentale.

Pour pouvoir connecter l'onduleur de tension en parallèle avec le réseau et le faire travailler comme une source de courant. Il est nécessaire d'utiliser un filtre de raccordement de nature inductive (**L** ou **LCL**). [20]

La fonction de ce filtre permet d'une part de convertir le compensateur en dipôle de courant du point de vue du réseau. Et d'autre part de réduire la dynamique du courant. De façon à le rendre plus facile à contrôler.

Le filtre de type (**L**) permet de diminuer les harmoniques autour de la fréquence de commutation. Pour obtenir cela, la valeur de cette inductance doit être relativement élevée. Cependant cette augmentation peut mettre en risque la capacité de compensation du système. Le filtre (**LCL**) est l'autre alternative de raccordement.

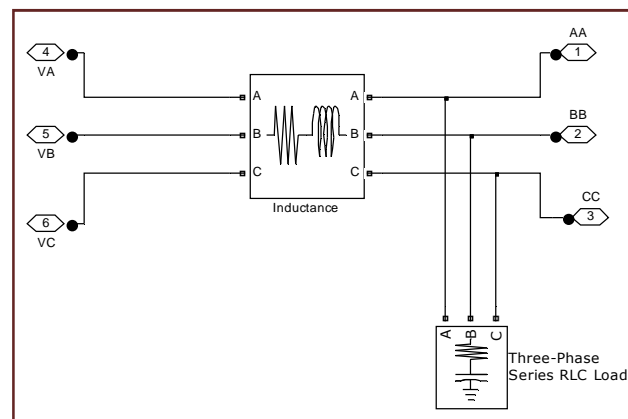


Figure III.18 : Schéma de simulation de filtre

III.6.4. Schéma de simulation globale

Dans cette simulation on a utilisé un champ photovoltaïque de 1.18 KW raccordé à un réseau de **220V/380V**, un hacheur boost caractérisé par : ($L = 6 \mu H$, $C_1 = 5 mF$, $C_2 = 1 mF$) commandé en MPPT de type P&O et un onduleur triphasé commandé en **MLI**, on a utilisé aussi une charge RL ($R = 250 \Omega$, $L = 1 mH$) et un filtre LC ($L = 40$, $C = 1F$).

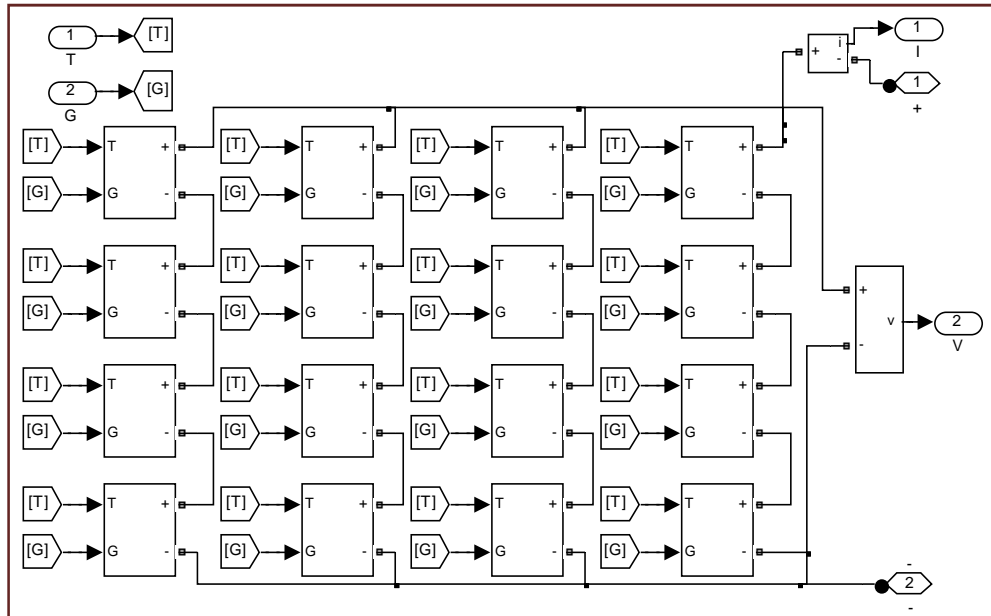


Figure III.19 : Schéma de simulation de champ photovoltaïque

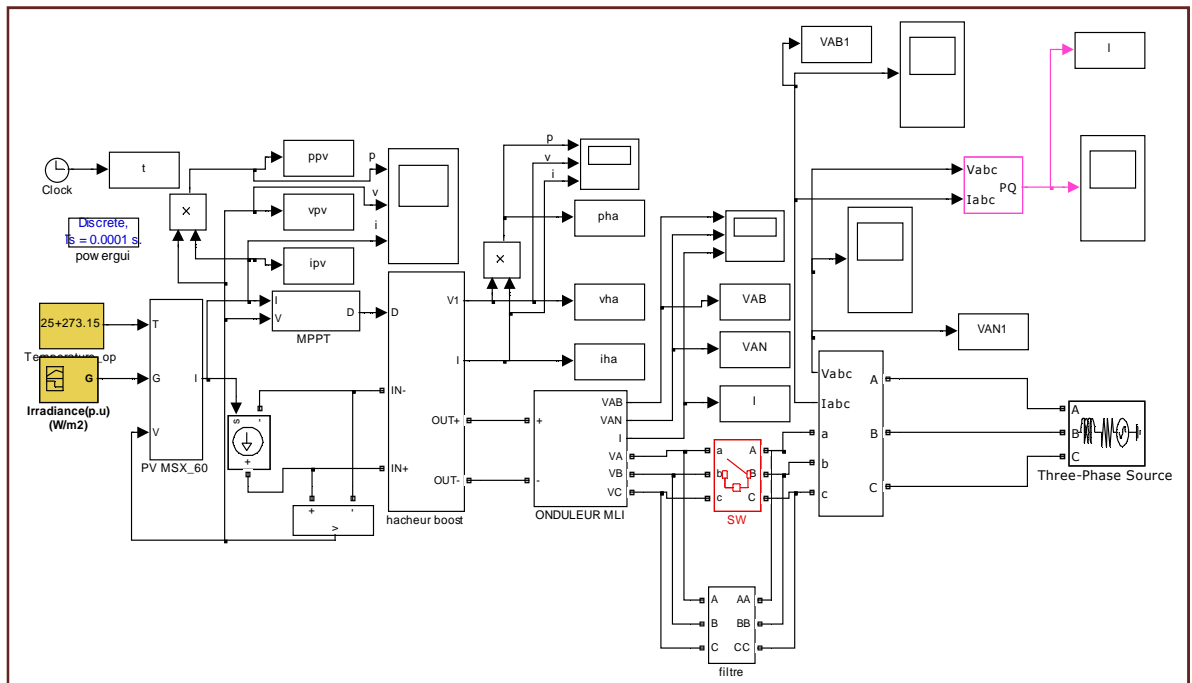


Figure III.20 : Schéma de simulation global PV raccordé au réseau

III.6.5. Résultat de simulation du réseau sans filtre

On effectue la simulation du système PV connecté directement au réseau sans l'intervention du filtre (position de l'interrupteur SW fermé).

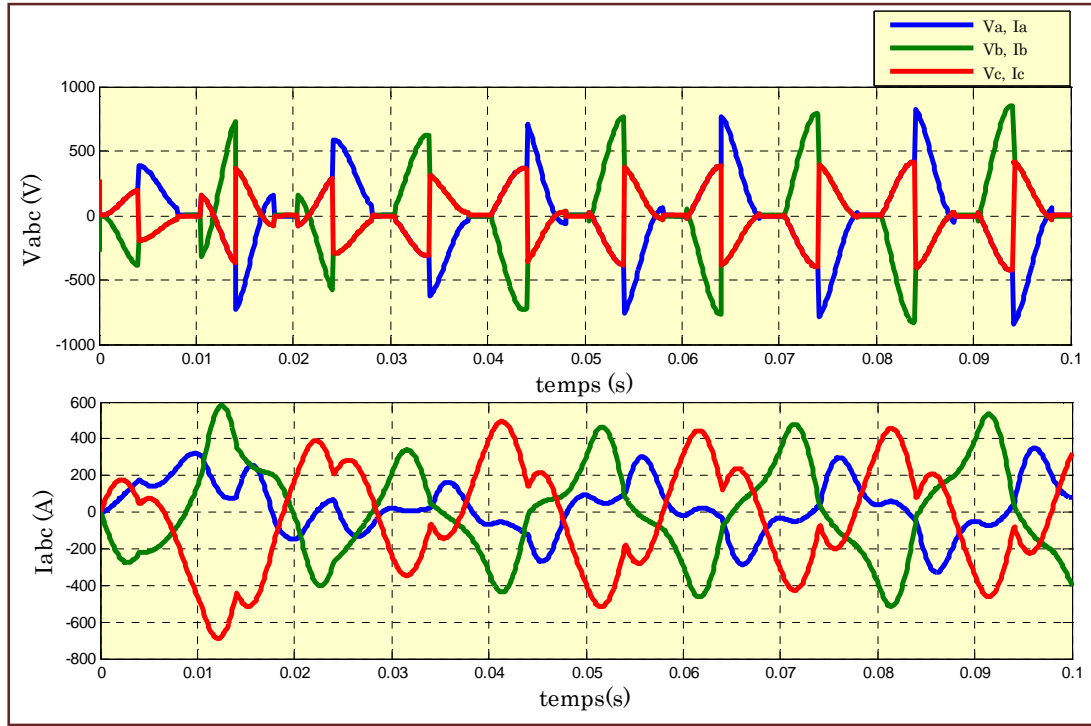


Figure III.21 : les tensions simple et les courants simple de réseau

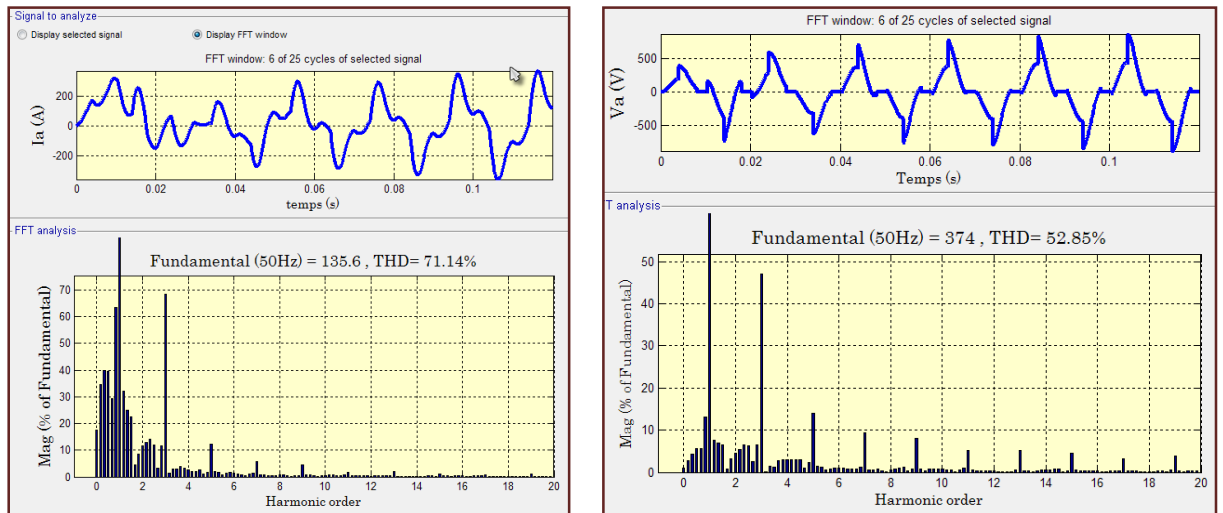


Figure III.22 : Analyse spectrale de tension et courant de réseau

D'après la figure (III.21) on observe la forme déformée de la tension et du courant injecté au réseau. La mesure du THD des deux gradeurs donne pour la tension **52.85%** et pour le courant **71.14%**.

III.6.6. Résultat de simulation du réseau avec filtre

On effectue la simulation du système PV raccordé au réseau avec l'ajout d'un filtre (position de l'interrupteur SW ouvert)

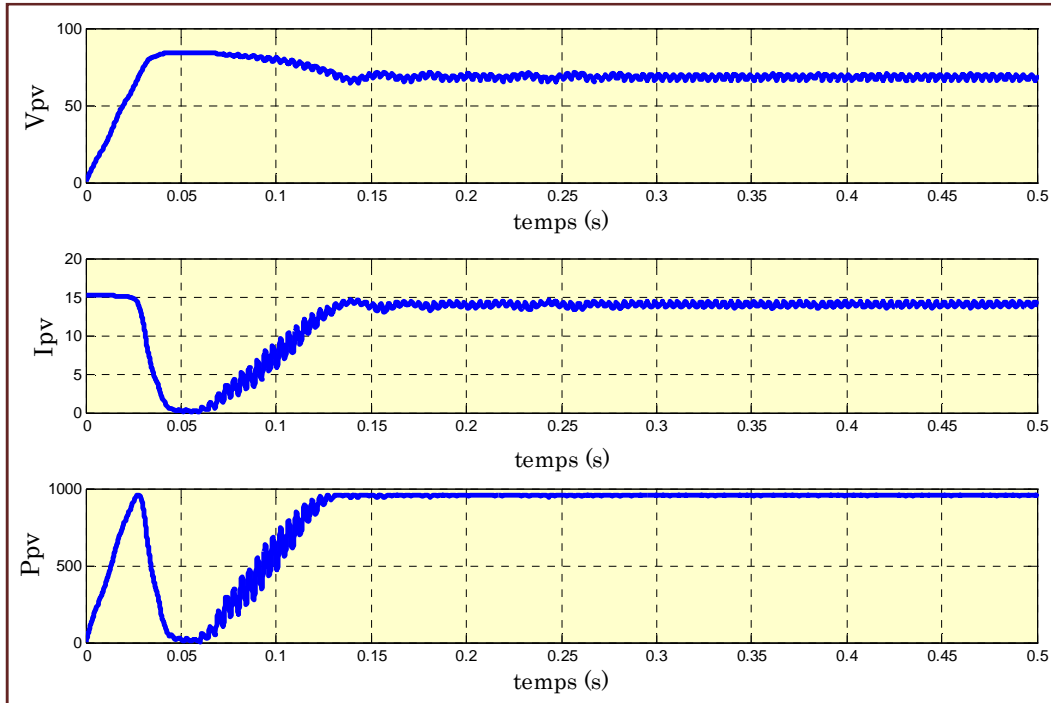


Figure III.23 : la tension, le courant et la puissance du GPV

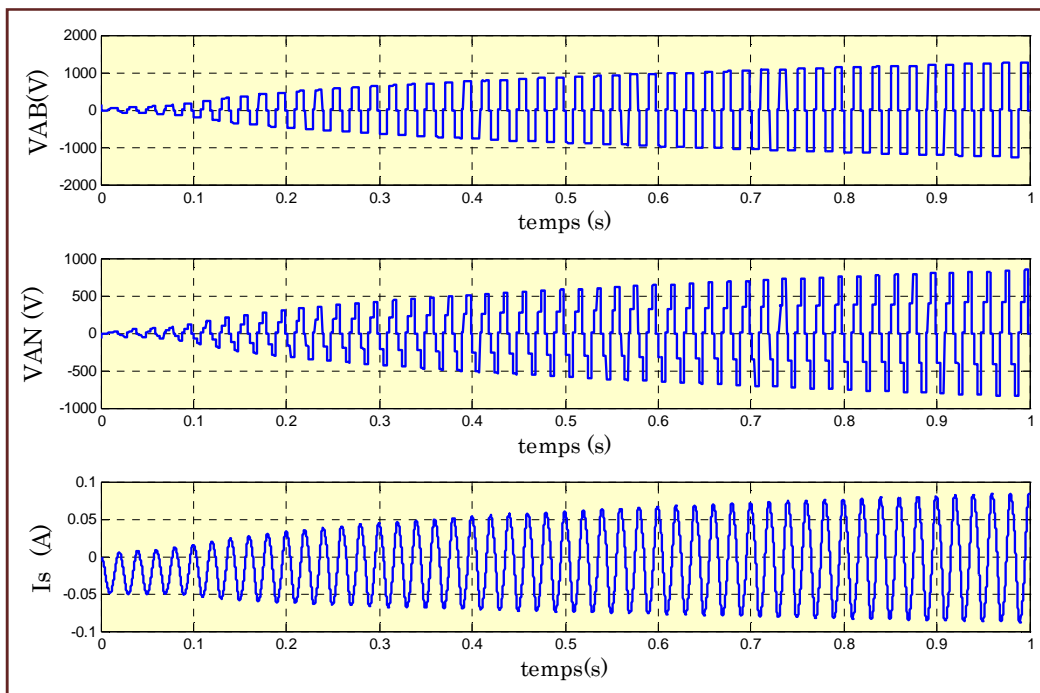


Figure III.24 : la tension composée, la tension simple et le courant de sortie de l'onduleur

D'après la figure (III.23) on remarque que le courant de générateur PV est stable à la valeur de 14 A , la tension de GPV se stabilise à 68 V et on remarque que la puissance de PV presque égale à la puissance nominale 1.18 KW grâce à la commande MPPT.

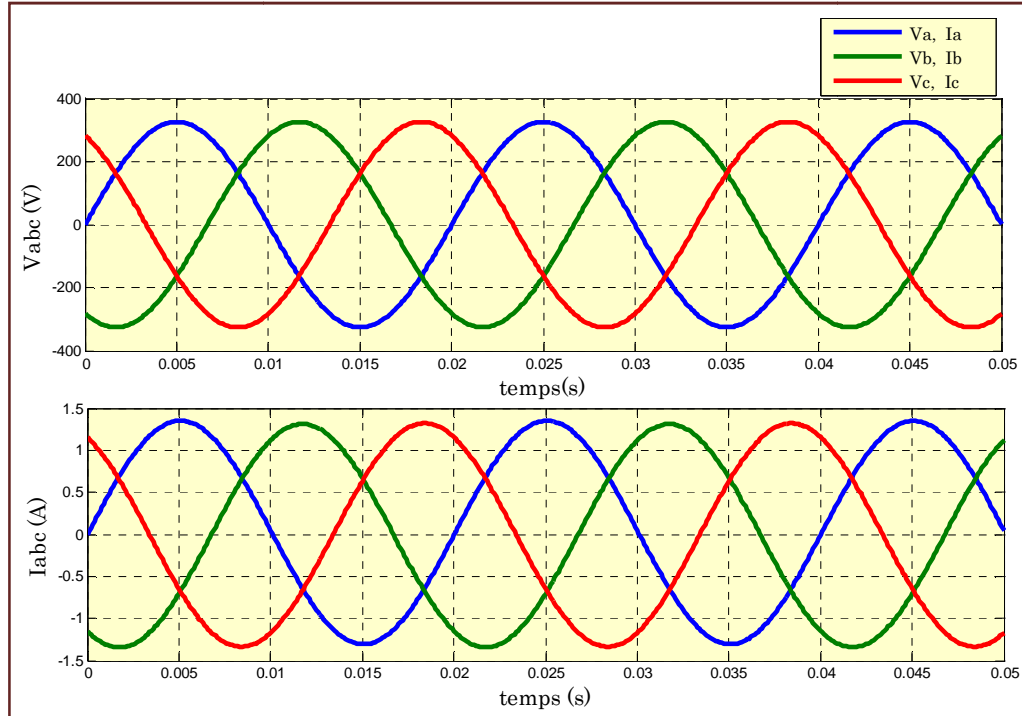


Figure III.25: : les tensions simple et les courants simple de réseau

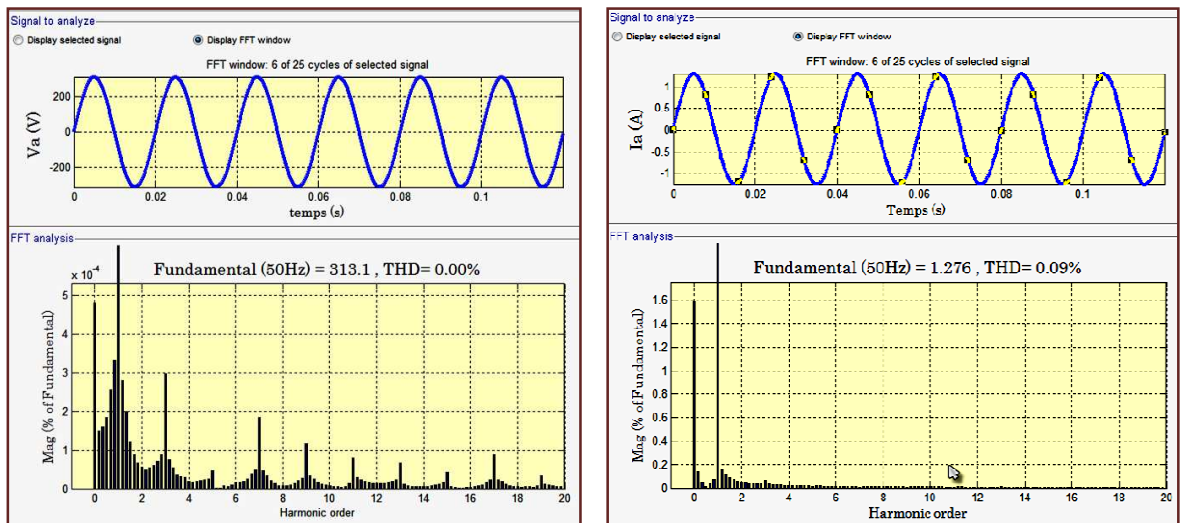


Figure III.26 : Analyse spectrale de tension et courant de réseau

D'après la figure (III.25) et On observe que l'ajout du filtre améliore bien la forme du courant et de la tension fourni au réseau d'après la figure (III.25) Le courant et la tension fourni au réseau par le générateur PV sont sinusoïdaux et équilibrés.

On remarque d'après la figure (III.26) l'influence du filtre sur l'amélioration de la tension et du courant injectés au réseau. Le THD est bien amélioré pour la tension **0.00%** et pour le courant **0.09%**.

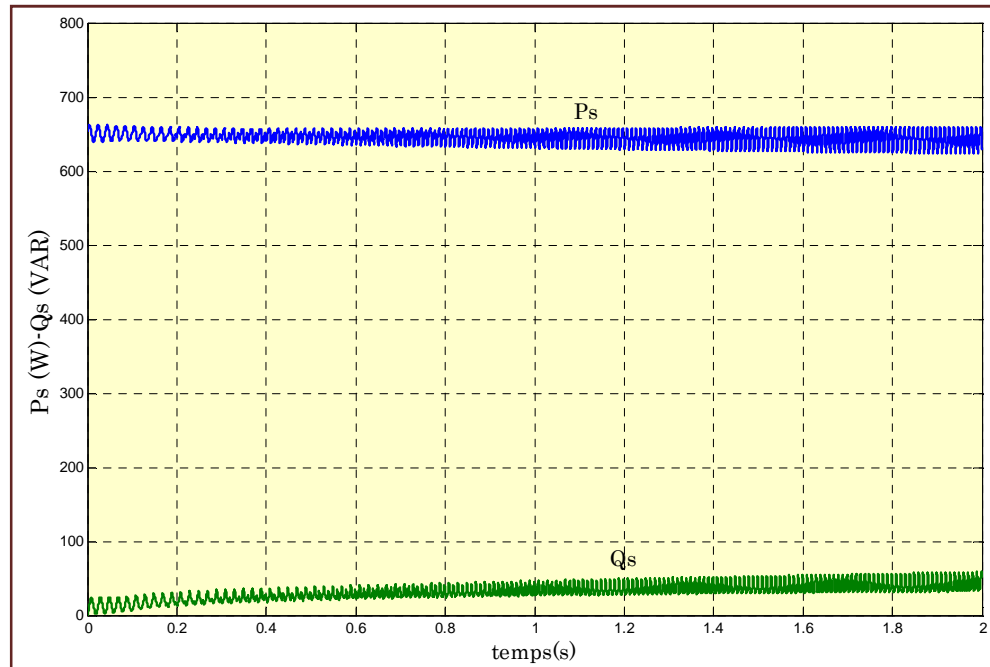


Figure III.27 : la puissance active et réactive de réseau

III.7. conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenter la simulation du système photovoltaïque connecté au réseau avec l'illustration des différentes opérations que subit la tension produite par le générateur PV à fin de satisfaire les besoins de la charge. Le problème des harmoniques a été présenté, l'analyse spectrale du courant et de la tension de réseau ont montré l'effet de la perturbation harmonique sur la qualité de l'énergie fournie par le GPV et les résultats de simulation ont montré l'efficacité de l'ajout d'un filtre à la sortie de l'onduleur pour améliorer la qualité de la tension et du courant injectés au réseau.

conclusion générale

Conclusion générale

La fonction principale et l'objectif essentiel du réseau électrique depuis la construction des premiers réseaux étaient la fourniture et l'acheminement de cette énergie aux différents consommateurs avec continuité et bonne qualité. Cependant vu la construction complexes des réseaux électriques et la diversité des différents éléments assurant l'acheminement de cette énergie, la qualité de cette dernière sera sans doute exposé à des perturbations dans les différents étages de la chaîne.

Le travail présenté dans ce mémoire a consisté dans la première partie en une présentation des différentes perturbations survenant dans le réseau électrique qui peuvent dégrader la qualité d'énergie, ces perturbations influent essentiellement sur les deux grandeurs principales qui sont la tension et le courant caractérisés par l'amplitude, la forme d'onde et la fréquence de propagation. Ces trois paramètres sont bien définis dans des normes selon le niveau de la tension et selon les exigences des pays.

Dans la deuxième partie nous avons parlé de la production de l'énergie électrique par les centrales photovoltaïques. Après la présentation de ce moyen de production avec ses différents composants, nous avons parlé des perturbations liées à ce système électriques et des différents effets mutuels entre ces productions et le réseau électrique. Une concentration a été faite sur le problème des harmoniques, leurs origines et les différentes solutions utilisées pour leur élimination comme les filtre passifs et les filtre actifs sur lesquels a été donnée une idée dans cette partie.

Dans la dernière partie nous avons essayé d'effectuer une simulation sous l'environnement Matlab Simulink d'une centrale photovoltaïque raccordé au réseau électrique. Nous avons présenté les différentes transformations qui se passent dans la chaîne depuis le générateur photovoltaïque qui produit le courant continu passant au convertisseur continu continu (hacheur boost) qui a pour fonction d'élever le niveau de tension vue la faiblesse de l'énergie fourni par le générateur PV par rapport à la charge, avec l'intégration de la technique MPPT qui consiste à la poursuite du point de puissance maximale, puis le convertisseur alternatif continu (l'onduleur) qui est commandé par MLI et qui a pour fonction de transformer l'énergie de forme continu à la forme alternative pour pouvoir alimenter les charge à courant alternatif. Cette chaîne de production peut être muni d'un transformateur élévateur pour élever le niveau de tension alternatif en cas de charge de grandes puissances. Les différentes courbes de la tension

du courant et de la puissance fournis par la centrale à chaque étage ont été établi pour illustrer toutes ces transformations.

Finalemment nous avons essayé de montrer une des perturbations liées aux systèmes photovoltaïques qui est le problème des harmoniques dues au convertisseur d'électronique de puissances. Une solution a été proposée pour éliminer ces harmoniques qui consiste à l'ajout d'un filtre RLC à la sortie de l'onduleur. D'après les résultats de simulation, les courbes de la tension et du courant injectés au réseau dans le cas du système sans filtre et le cas avec filtre on a bien montré l'influence des perturbations. Les résultats de simulation étaient satisfaisants et ont montré l'intérêt du système de filtrage.

• **Rendements des différentes technologies des PV [12]**

Type de cellule	Rendement des cellules PV			Domaines d'applications
	théorique	en laboratoire	disponibles	
Si mono (silicium monocristallin)	27.0%	24.7%	14.0 – 16.0%	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Si poly (silicium polycristallin)	27.0%	19.8%	12.0 – 14.0%	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
Si a (silicium amorphe)	25.0%	13.0%	6.0 – 8.0%	Appareils de faible puissance production d'énergie embarquée (calculatrice, montres...) modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
GaAs	29.0%	27.5%	18.0 – 20.0%	Systèmes de concentrateur, espace (satellites).
CIGS (séléniure de cuivre, indium et gallium)	27.5%	18.2%	10.0 – 12.0%	Appareils de faibles puissances, modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
CdTe (tellure de cadmium)	28.50%	16.0%	8.0%	Modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment)

• **Détermination des composants du convertisseur boost**

1- La bobine

$$L = \frac{\alpha_0 * V_{pv}}{I_{Smin} * f}$$

Avec : α_0 : Le rapport cyclique f : Fréquence de commutation

Le rapport cyclique que l'on peut prévoir dans les conditions nominales ($V_e = 17.1$ et $V_s = 120 V$) se déduit de

$$\frac{V_e}{V_s} = \frac{1}{1 - \alpha}$$

2- Condensateur

a) Condensateur d'entrée

Le critère de conception pour les condensateurs d'entrée est que la tension d'ondulation à travers eux devrait être plus moins de 1%.

$$C_e = \frac{I_{opt} * \alpha}{\Delta V_{ef}}$$

b) Condensateur de sortie

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = \frac{1 - \alpha}{8LC_s f^2}$$

Avec :

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = 1\%$$

- Détermination des composants de filtre

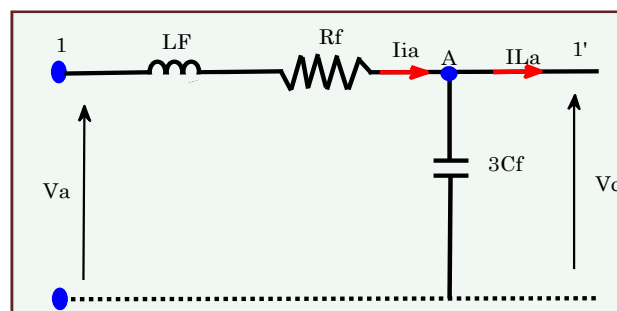


Schéma monophasé équivalent du filtre LC

La fonction de transfert de filtre est donnée par l'expression suivante :

$$H(p) = \frac{V_c}{V_A} = \frac{1}{1 + 3.Cf.Rf.P + 3.Cf.Lf.P^2}$$

Et la pulsation :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{3.Cf.Lf}}$$

$$\zeta = 0.7 = \frac{\omega_0 \cdot 3.Cf.Rf}{2}$$

Bibliographie

- [1] **A. Robert**, «**Qualité de l'électricité dans le marche libéralisé** », Séminaire organisé par université de LIEGE décembre 2004.
- [2] **V. Ignatova**, « **Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique** », Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, France 2006.
- [3] **S. Haddad**, « **gestion de la qualité d'énergie électrique dans un réseau de transmission**» Thèse de Doctorat d'état, Université de Annaba 2010.
- [4] **P. Bornard**, **M. Pavard**, « **Réseaux d'interconnexion et de transport: réglage et fonctionnement, Techniques de l'ingénieur** », mars 1993.
- [5] **B. Gattal**, «**Méthodes 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 Magistère, Université de Batna 2012.
- [6] **N. Hanna Mendalek**, « **qualité de l'onde électrique et moyens de mitigation**», Thèse de Doctorat, université du Québec kanada 2003.
- [7] **I. EL Baaklini**, « **outil de simulation de propagation des creux de tension dans les réseaux industriels** » Thèse de doctorat.
- [8] **C. Fetha**, « **Analyse des indices de la qualité d'énergie électrique et les phénomènes transitoires dans les réseaux électrique** », Thèse de doctorat
- [9] **A. Sahli**, « **Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau** », Mémoire de Magistère, Université de Sétif 2012
- [10] **A. Chaoui**, « **Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires** », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif, Décembre 2010
- [11] **H. Denoun**, « **Contribution à l'étude et la réalisation des convertisseurs AC/DC à M.L.I à Facteur de puissance unitaire** », Thèse de Doctorat, Université de Tizi-Ouzou 2010.

- [12] **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.
- [13] **W. Boucheritte**, « **Convertisseurs multi niveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau**», Mémoire de Magistère, Université de Biskra.
- [14] **M. Makhlouf**, « **Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque application au pompage** », Mémoire de magister, université de Constantine 2006.
- [15] **T. Minh Chau Le**, « **Couplage Onduleurs Photovoltaïques et Réseau, aspects contrôle/commande et rejet de perturbations** » Thèse de Doctorat, Université de Grenoble France 2012.
- [16] **N. Abouchabana**, « **Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT** » Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.
- [17] **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
- [18] **P. Barrade**, « **électronique de puissance méthodologie et convertisseurs élémentaire** » presse polytechnique et universitaires, 1^{ère} édition 2006
- [19] **T. Youssef**, «**Commande aléatoire du convertisseur Buck-Boost triphasé à prélèvement sinusoïdal du courant** » , thèse de Doctorat, Université de Clermont-Ferrand 2006.
- [20] **M. Seddik Bacha** « **les systèmes de l'électronique de puissance dédiée à la distribution électrique – application à la qualité de l'énergie** », thèse de Doctorat, l'laboratoire d'électrotechnique de Grenoble 2003.

ملخص: يقدم هذا العمل دراسة لربط نظام توليد ضوئي موصول بالشبكة الكهربائية ثلاثية الطور، و يعمل هذا النظام على حقن الطاقة المولدة بواسطة المولد الضوئي في نظام تحويل على طابقين و يتألف من تحويل مستمر – مستمر (boost) والعاكس مستمر – متناوب يتم تطبيق وحدة تحكم (MPPT) للسعي وراء نقطة الاستطاعة القصوى .

الكلمات الدالة :

الضياعات الكهربائية ، ترشيح التوافقات ، نظام كهروضوئي ، تحويل مستمر – مستمر، تحويل مستمر – متناوب وحدة تحكم (MPPT) ، الشبكة الكهربائية .

Abstract: This work presents a three-phase grid-connected photovoltaic generation system , our objectif in this work is a study the connexion of photovoltaic generator with various network elements, the system and inject the solar energy into the power system as the active power by means of a two-stage conversion system, composed of a DC-DC Boost converter and a DC-AC inverter. The MPPT controller is applied to tracking the maximum power point of PV system .

Key word

Electrical losses, compensate harmonic, photoelectric system , DC-DC converter, DC-AC converter, MPPT, the electric grid .

Résumé : Ce travail présente un système de génération photovoltaïque connecté au réseau triphasé, et notre objectif c'est l'étude de raccordement d'un système photovoltaïque au réseau électrique . Ce système injecter de l'énergie solaire dans le réseau triphasé comme une puissance active a travers un système de conversion en deux étages, composées d'un convertisseur continu-continu(Boost) et un onduleur continu-alternatif. Le contrôleur MPPT est appliqué pour la poursuite du point de puissance maximale du système PV dans des conditions variables d'éclairément. La tâche de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) dans un système de puissance PV.

Mots clés

Les perturbations électriques, compensation des harmoniques, système photovoltaïque, convertisseur DC-DC, convertisseur DC-AC , MPPT, réseau électrique.