



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ahmed Draïa Adrar
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Sciences Techniques

Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Science Technique
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux Electrique

Intitulé

**Etude et Simulation de Connection d'une
Centrale Photovoltaïque au Réseau Electrique
Triphasé**

Présenté par :

HAMDANI Abderrahmane
KACEM Brahim

Soutenu publiquement le : 05/06/2018

Devant le jury

Président	: Ben Touba Saaid	Pr.	Univ. Adrar
Promoteur	: Masmoudi Mohammed	M. A. A	Univ. Adrar
Examineur	: Ouled Ali Omar	M. A. A	Univ. Adrar

Année Universitaire : 2017/2018



Remerciement

Avant tout, nous remercions le dieu, le tout puissant, de nous avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur **Mr.Masmoudi Mohammed** pour sa disponibilité, ses conseils précieux pendant la période de la réalisation de ce travail*

*Nos respectueux remerciements à l'ensemble des membres du jury: **Pr.Ben Touba Saaid** et **Mr. Ouled Ali Omar** pour l'intéret porté sur notre travail.*

Nos remerciements vont également à tous les personnes qui nous ont aidées à réaliser ce travail.

Enfin, nous adressons nos vifs remerciements à tous les enseignants du département d'électrotechnique qui ont assisté à notre formation.





Dédicace

Merci Allah de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la

force et la patience d'aller jusqu'au bout du rêve

je dédie ce travail à ma mère et mon père

Que dieu les gardes et les protège

Et à toute ma famille HAMDANI

À mes amis dans l'étude

Je dédie ce travail.

H. Abderrahmane





Dédicace

*Merci Allah de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la
force et la patience d'aller jusqu'au bout du rêve
je dédie ce travail à ma mère et mon père
Que dieu les gardes et les protège
Et à toute ma famille KACEM
À mes amis dans l'étude
Je dédie ce travail.*

K. Brahim



Remerciements

Dédicace

Sommair

Liste des figures

Liste des symbols

Introduction générale1

Chapitre I : Production d'énergie photovoltaïque

I.1. Introduction 2

I.2. Energie renouvelable..... 2

I.2.1. Evaluation de l'énergie renouvelable en Algérie 2

I.3. L'énergie solaire 3

I.3.1. Rayonnement solaire 3

I.3.2. Spectre du rayonnement 5

I.4. Conversion photovoltaïque 6

I.4.1. L'effet photovoltaïque 6

I.4.2. Le principe de conversion photovoltaïque 6

I.4.3. Propriété électrique d'une cellule PV 8

I.4.4. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque 9

I.5. Les différentes technologies des cellules PV 13

I.5.1. Cellules cristallines 13

I.5.2. Cellules à couches minces (amorphes) 14

I.6. Panneau solaire (champ solaire) 14

I.6.1. Regroupement des cellules en série 15

I.6.2. Regroupement des cellules en parallèle 16

I.6.3. Regroupement des cellules (séries et parallèle) 16

I.7. Protection classiques d'un générateur photovoltaïque 17

I.7.1. Les diodes séries (Diode anti-retour)	17
I.7.2. Les diodes parallèles (Diode by-pass.)	18
I.8. Zones de fonctionnement du module solaire	18
I.9. Les systèmes photovoltaïques	19
I.9.1. Système autonome	20
I.9.2. Système hybride.....	21
I.9.3. Système PV raccordée au réseau.....	22
I.9.3.1. Centrales de petite taille ($P=1$ à 10 KW)	22
I.9.3.2. Centrales de taille moyenne ($P=10$ à 100 KW)	22
I.9.3.3. Centrales de grande taille ($P > 500$ KW).....	22
I.10. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	23
I.10.1. Les avantage.....	23
I.10. 2. Les inconvénients.....	23
I.11. Conclusion.....	24

Chapitre II: Les convertisseurs statiques

II.1 Introduction.....	26
II.2. Convertisseur DC-DC.....	26
II.2.1. Hacheur dévolteur (Buck)	27
II.2.2. Hacheur survolteur (Boost).....	29
II.2.3. Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)	31
II.3. La commande (MPPT)	32
II.3.1. Principe de MPPT.....	32
II.3.2. Méthode de poursuite du MPPT	33
II.4. Convertisseurs DC/AC	37
II.4.1. Structure d'onduleur	37
II.4.2. Principe de fonctionnement	38
II.4.3. La commande MLI.....	39
II.5 Conclusion	41

Chapitre III : Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

III.1. Introduction	42
III.2. Le Système Photovoltaïque proposée	42
III.3. Présentation de la structure du système photovoltaïque	43
III.4. Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque	44
III.4.1. Modélisation du générateur (GPV)	44
III.4.2. Simulation du générateur (GPV) à éclairement et température constante	46
III.4.3. Simulation du générateur (GPV) à éclairement et température variable	47
III.4.3.1. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique ($IPV = f(VPV)$)	47
III.4.3.2. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique ($PPV = f(VPV)$)	48
III.4.3.3. L'influence de la température sur la caractéristique ($IPV = f(VPV)$)	49
III.4.3.4. L'influence de la température sur la caractéristique ($PPV = f(VPV)$)	49
III.5. Simulation du system PV avec hacheur commandé en MPPT	50
III.5.1. Schéma de simulation	50
III.5.2. Résultat de simulation	51
III.6. Simulation globale de système PV en fonctionnement autonome	52
III.6.1. Schéma de simulation	52
III.6.2. Résultat de simulation	53
III.7. Simulation global de PV raccordé au réseau	54
III.7.1. Modélisation de réseau BT	54
III.7.2. Schéma de simulation du réseau	56
III.7.3. Le filtre LC	56
III.7.4. Schéma de simulation globale	57
III.7.5. Résultat de simulation du réseau sans filtre	58
III.7.6. Résultat de simulation du réseau avec filtre	59
III.8. conclusion	60
Conclusion générale	61

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1. Le potentiel ENR en Algérie.....4

Figure I.2. Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.....5

Figure I.3. Analyse spectrale du rayonnement solaire.....6

Figure I.4. Cellule élémentaire photovoltaïque.....8

Figure I.5. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....9

Figure I.6. Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule PV.....10

Figure I.7. Courant de court-circuit.....11

Figure I.8. Tension de circuit ouvert.....11

Figure I.9. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$12

Figure I.10. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$13

Figure I.11. L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$13

Figure I.12. L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$14

Figure I.13. Photos de cellules monocristallines.....14

Figure I.14. Photos de cellules multi-cristallines.....15

Figure I.15. Photos de cellules en couche mince (amorphe).....15

Figure I.16. Evolution de constructions des systèmes PV.....16

Figure I.17. Association des modules en série.....16

Figure I.18. Caractéristique de nombre des modules en série.....17

Figure I.19. Association des modules en parallèle.....17

Figure I.20. Caractéristique de nombre des modules en parallèles.....17

Figure I.21. Association mixte des modules.....18

Figure I.22. Caractéristique de nombre des modules mixte.....18

Figure I.23. Diodes anti-retour.....19

Figure I.24. Diodes by-pass.....19

Figure I.25. Les différentes zones de la caractéristique $I(V)$, $T=25^{\circ}\text{C}$20

Figure I.26. Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec stockage.....21

Figure I.27. Schéma synoptique d'un système photovoltaïque sans stockage.....22

Figure I.28. Exemple de la structure d'un système PV autonome.....	22
Figure I.29. Schéma principale d'un système hybride avec une éolienne.....	23

Chapitre II

Figure II.1. Symbole d'un convertisseur DC-DC.....	27
Figure II.2. Schéma électrique d'un hacheur Buck.....	27
Figure II.3. Schéma électrique d'un hacheur Buck ferm.....	28
Figure II.4. Schéma électrique d'un hacheur Buck ouvert.....	28
Figure II.5. Schéma électrique d'un hacheur Boost.....	29
Figure II.6. Schéma électrique d'un hacheur Boost fermé.....	29
Figure II.7. Schéma électrique d'un hacheur Boost ouvert.....	30
Figure II.8. Schéma de simulation d'un hacheur boost.....	31
Figure II.9. Schéma de principe d'un hacheur dévolteur-survolteur.....	31
Figure II.10. Caractéristique de la tension et du courant du Buck-Boost.....	32
Figure II.11 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.....	33
Figure II.12. Organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation.....	35
Figure II.13. Schéma de simulation de commande MPPT.....	35
Figure II.14. Organigramme de l'algorithme de l'incrémentale de la conductance.....	36
Figure II.15. Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé.....	38
Figure II.16. Structure d'un onduleur triphasée.....	38
Figure II.17. Schéma de simulation d'un onduleur.....	40
Figure II.18. Principe de la modulation.....	40
Figure II.19. Schéma de simulation de commande MLI.....	40

Chapitre III

Figure III.1. Schéma synoptique d'un système photovoltaïque relié au réseau électrique.....	42
Figure III.2. Convertisseur (DC-DC) élévateur de tension.....	43
Figure III.3. Onduleur de tension avec filtre(LCL).....	44
Figure III.4. Modèle de simulation d'un générateur PV.....	46
Figure III.5. Caractéristique (courant-tension) et (puissance-tension) du GPV.....	47
Figure III.6. Influence de l'éclairement sur la caractéristique ($I_{Pv}=f(V_{Pv})$).....	48

Figure III.7. Influence de l'éclairement sur la caractéristique ($P_{PV} = f(V_{PV})$).....	48
Figure III.8. Influence de la température sur la caractéristique ($I_{PV} = f(V_{PV})$).....	49
Figure III.9. Influence de la température sur la caractéristique ($P_{PV} = f(V_{PV})$).....	49
Figure III.10. Schéma de simulation d'un PV avec un hacheur commandé en MPPT.....	50
Figure III.11. Caractéristique $V_{PV} = f(t)$ et $V_s = f(t)$ du hacheur boost.....	51
Figure III.12. Le courant du panneau PV.....	51
Figure III.13. La puissance du panneau PV.....	51
Figure III.14. Schéma de simulation globale PV- hacheur boost-onduleur ML.....	52
Figure III.15. La tension et la puissance d'entrée de l'onduleur.....	53
Figure III.16. Le courant d'entrée et la sortie de l'onduleur.....	53
Figure III.17. La tension simple et composé de l'onduleur.....	54
Figure III.18. Système de tensions triphasé équilibré.....	55
Figure III.19. Schéma de simulation de réseau.....	56
Figure III.20. Schéma de simulation de filter.....	56
Figure III.21. Schéma de simulation de champ photovoltaïque.....	57
Figure III.22. Schéma de simulation global PV raccordé au réseau.....	57
Figure III.23. Les tensions simples et les courants simples de réseau.....	58
Figure III.24. Analyse spectrale de tension et courant de réseau.....	58
Figure III.25. Les tensions simples et les courants simples de réseau.....	59
Figure III.26. Analyse spectrale de tension et courant de réseau.....	59

Liste des tableaux

Tableau (III.1) : Caractéristiques physique et électriques du générateur PV.....	45
---	----

Liste des Abréviations et symboles

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)

V_{th} : La tension thermique

V : Tension de sortie de la cellule

m : Facteur d'idéalité de la diode

I_{ph} : Courant photo-courant

I_{sat} : Courant de saturation de la diode

I : Courant de sortie de la cellule

R_s : Résistance série

R_p : Résistance parallèle

q : La charge de l'électron (1.6×10^{-19} (C))

K : Constant de Boltzmann (1.38×10^{-23} ($\frac{J}{K}$))

η : Le rendement

I_{cc} : Le courant de court circuit

V_{co} : La tension de circuit ouvert

P_{inc} : La puissance incidente sur la surface

G_r : L'éclairement de référence $G=1000w /m^2$

I_t : Coefficient de température du courant de court-circuit [$I_t = 23 \times 10^{-4}$ A]

T_c : Température de la cellule [Kelven]

T_r : Température de référence [300°K]

I_0 : Le courant de saturation inverse de la diode à la température référence

E_g : Le gap d'énergie de semi-conducteur

Introduction Générale

Introduction générale

L'énergie électrique est l'une des formes d'énergie la plus consommée partout dans le monde. C'est l'un des facteurs le plus important pour le développement d'un pays. Pour disposer de cette énergie qui est si importante, elle doit nécessairement être produite dans des centrales. Pour cela, on dispose des différents types de centrales de production de l'énergie électrique, parmi lesquelles nous pouvons citer : les centrales hydrauliques, les centrales thermiques, les centrales éoliennes et les centrales nucléaires.

Presque toutes les énergies renouvelables sont des dérivées de l'énergie solaire : le vent, le rayonnement solaire, la force de l'eau sont des produits directs ou indirects de l'activité solaire. Seule la géothermie échappe à cet inventaire. Le Soleil envoie chaque année à la surface de la Terre à peu près 10 000 fois plus d'énergie que la planète en consomme. Il est donc légitime d'essayer d'en tirer profit [3].

Les énergies renouvelables ont tout pour s'imposer, tant aux niveaux environnemental, social, qu'économique. Les énergies renouvelables devraient être le fer de lance de toute politique de lutte contre le réchauffement climatique [3].

L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente une alternative intéressante et bien adaptée à des besoins limités. Malgré sa facilité de mise en œuvre, son faible impact environnemental et le peu d'entretien qu'il nécessite, un système photovoltaïque n'est plus concurrentiel lorsque la demande augmente. Ainsi une étude assez rigoureuse est nécessaire pour faire le meilleur choix et le plus performant avec le moindre coût possible [1].

Dans ce mémoire, on a analysé la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque adapté par une commande numérique (commande MPPT: perturbation et observation) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque sous éclairage uniforme et non uniforme.

L'objectif de ce travail est de présenter une meilleure compréhension des performances du convertisseur DC-DC adapté par la commande numérique lorsqu'il est couplé à un générateur photovoltaïque et améliorer sa tension de sortie afin d'obtenir une bonne source qu'on peut utiliser comme un générateur d'électricité.

Pour décrire cela, ce mémoire est présenté en trois chapitres:

Le premier chapitre décrit la nature de production d'énergie électrique et les principales caractéristiques de l'énergie solaire et rappelle sur le rayonnement solaire.

Le deuxième chapitre traite de la modélisation et la commande des équipements d'électronique de puissance utilisés dans les systèmes photovoltaïques, les différentes méthodes de recherche du point de puissance maximale ainsi que l'étude de la commande des onduleurs connectés au réseau.

Le dernier chapitre est consacré à la modélisation et à la simulation de la commande de la connexion d'un système de génération d'énergie au réseau électrique triphasé (un système photovoltaïque) via un onduleur à (*MLI*) d'une part, et alimentant une charge (*RL*) équilibrée d'autre part.

L'étude par simulation est effectuée sous l'environnement Matlab Simulink. Nous terminons ce travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I:

Production d'énergie photovoltaïque

I.1. Introduction

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. L'exploitation des énergies renouvelables est une solution indispensable. On peut prévoir que tout système énergétique durable dans le futur sera basé sur l'utilisation de ces sources [1].

Depuis quelques années, il n'est plus nécessaire d'installer les systèmes de production d'énergie renouvelable précisément sur le lieu d'utilisation de l'énergie. Ils sont maintenant utilisés pour générer de l'énergie électrique qui est transférée par un réseau électrique sur une distance plus ou moins grande vers les utilisateurs.

Aujourd'hui on distingue plusieurs sources d'énergies renouvelables, l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque. L'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la terre [14].

I.2. Energie renouvelable

Est une énergie qui peut être produite sans jamais s'épuiser, et toujours à partir de ressources et d'éléments naturelle "le vent, soleil, l'eau...etc."

Une énergie renouvelable est donc renouvelable à l'infini, et sans dommage pour l'environnement, elle ne dégrade ni les eaux, ni le sol, ni l'atmosphère que nous respirons, et encore moins la végétation qui représente la base des plantes ou que nous mangeons des animaux qui eux mangent des plantes. On peut définir une énergie renouvelable comme étant une source d'énergie dont le gisement ne risque pas de s'épuiser à l'échelle de l'humanité [14].

I.2.1. Evaluation de l'énergie renouvelable en Algérie

Le potentiel des énergies renouvelables en Algérie est le plus important d'Afrique du Nord. Le marché des énergies renouvelables est prometteur et leur promotion constitue l'un des axes de

la politique énergétique et environnementale du pays. La figure (I.1) montre le potentiel ENR en Algérie [14].

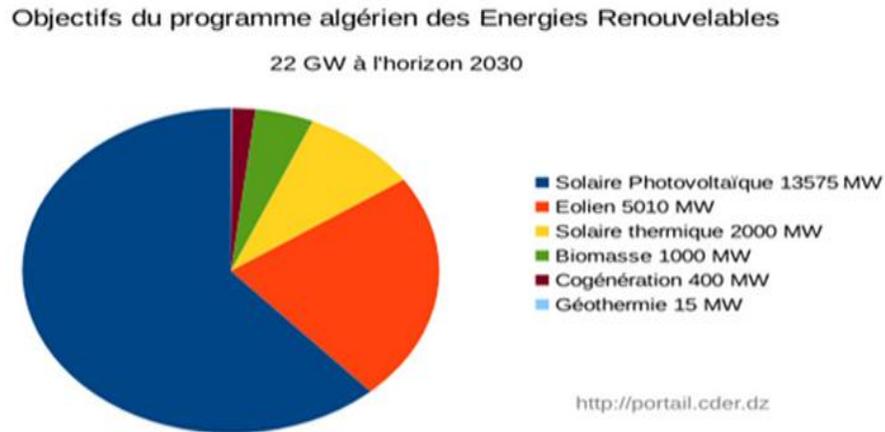


Figure I.1. Le potentiel ENR en Algérie

I.3. L'énergie solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement [15].

I.3.1. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une onde de longueur qui varie entre 0.2 et 4.10⁻⁶ m. sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent [16].

I.3.1.1. Le rayonnement direct

Est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un pyréliomètre [16].

I.3.1.2. Le rayonnement diffus

Est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent ce (éclatement) des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques [16].

I.3.1.3. Le rayonnement solaire réfléchi

Ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige) [16].

I.3.1.4. Le rayonnement global

Est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran. Les stations météorologiques généralement mesurer le rayonnement global horizontal par un pyranomètre placé horizontalement à l'endroit requis.

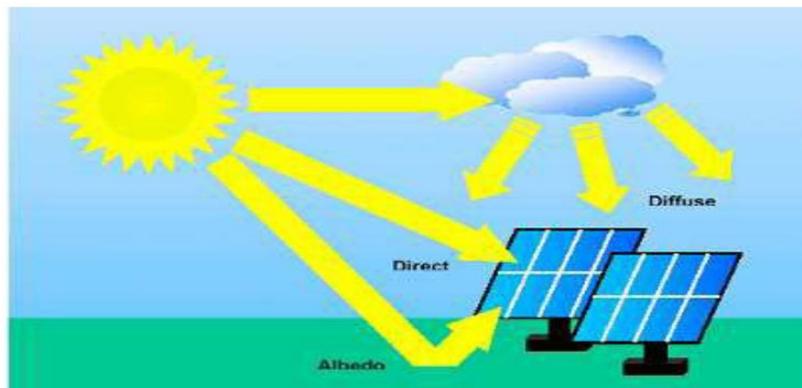


Figure I.2. Composante du rayonnement global sur un plan horizontal [1].

I.3.2. Spectre du rayonnement

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns (μm). La *Figure 2.3* représentera variation de la répartition spectrale énergétique. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi [15] :

- 9% dans la bande des ultraviolets ($<0,4 \mu\text{m}$),
- 47% dans la bande visible ($0,4 \text{ à } 0,8 \mu\text{m}$),
- 44% dans la bande des infrarouges ($>0,8 \mu\text{m}$)

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1370 W/m^2 , à plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement $1,2 \text{ kW/m}^2$. La rotation et l'inclinaison de la Terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus [15].

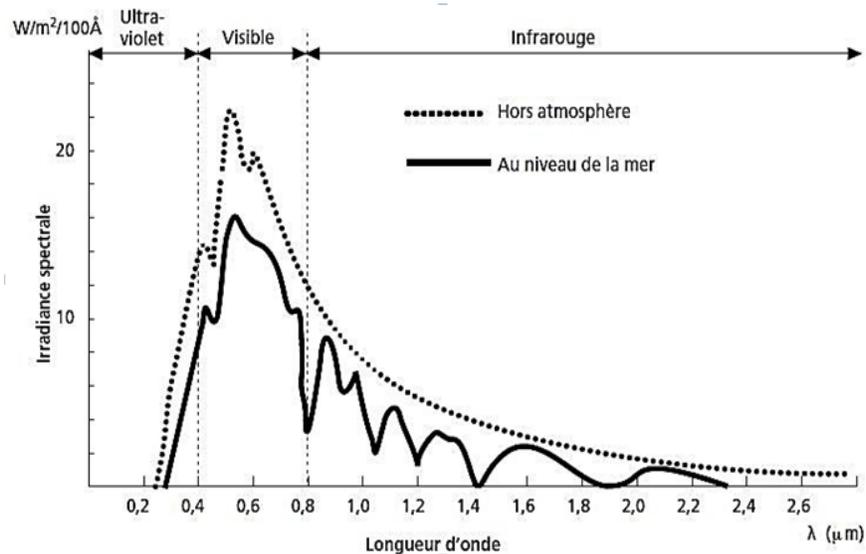


Figure I.3. Analyse spectrale du rayonnement solaire

Un élément essentiel dans la conversion photovoltaïque est l'énergie transmise par les photons (E_{ph}). On définit un rayon de lumière solaire comme la superposition d'ondes électromagnétiques de fréquences différentes. C'est aussi un faisceau de photons dont l'énergie est liée à la longueur d'onde λ par la constante de PLANCK :

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

Dans laquelle :

h : Constante de PLANCK ($h = 6.62 * 10^{-34} Js$).

c : Vitesse de la lumière ($c = 3 * 10^8 m/s$)

Il y a deux techniques pour exploiter l'énergie solaire; le solaire thermique et le solaire photovoltaïque.

I.4. Conversion photovoltaïque

La possibilité de transformer directement l'énergie lumineuse, et en particulier le rayonnement solaire en énergie électrique est apparue en 1839 avec la découverte de l'effet photovoltaïque. Cet effet utilise les propriétés quantiques de la lumière permettant la transformation de l'énergie incidente en courant électrique dont la cellule solaire, est l'élément de base de cette conversion photovoltaïque [10].

I.4.1. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés "semi-conducteurs" qui, exposés à la lumière, produisent de l'électricité. Le plus connu d'entre eux est le silicium cristallin qui est utilisé aujourd'hui dans 90% des panneaux solaires produits dans le monde [10].

I.4.2. Le principe de conversion photovoltaïque

- Comment fonctionne une cellule solaire photovoltaïque?

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle composée de matériaux semi-conducteurs est capable de convertir l'énergie de photons reçus a sa surface en une différence de potentiel, créée par une délocalisation d'électrons dans le matériau (figure I.4). La circulation des électrons dans le circuit extérieur permet à la cellule photovoltaïque de

fonctionner comme un générateur. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et de son vieillissement [1].

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 [3].

On appelle cellule solaire un convertisseur qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque [9].

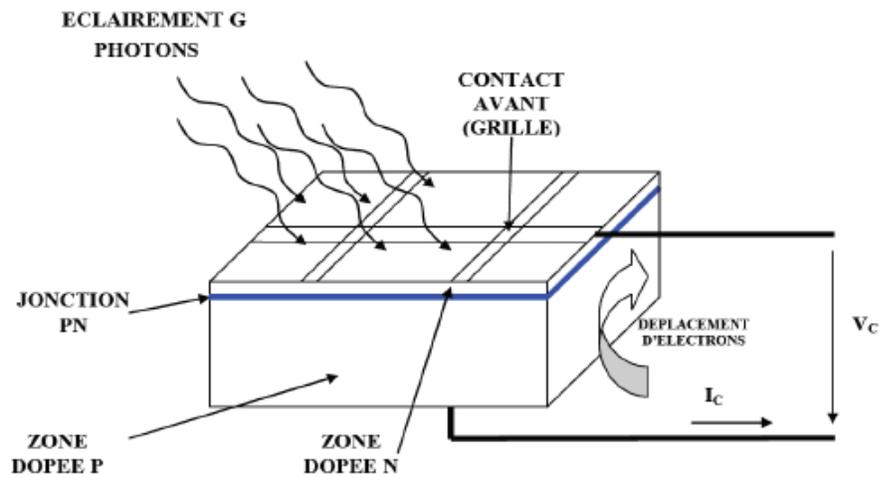


Figure I.4. Cellule élémentaire photovoltaïque

La réalisation d'une cellule photovoltaïque est comparable à une diode classique. La cellule est composée de deux différentes couches. La couche supérieure est dopée N et la couche inférieure est dopée P créant ainsi une jonction PN. Cette jonction PN crée une barrière de potentiel.

Quand la cellule est éclairée, elle produit un courant I_{ph} approximativement proportionnel à l'ensoleillement. La température est également un facteur influant sur les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque [2].

I.4.3. Propriété électrique d'une cellule PV

Le schéma du circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque qui est largement utilisée dans littérature est représentée par la figure (I.5).

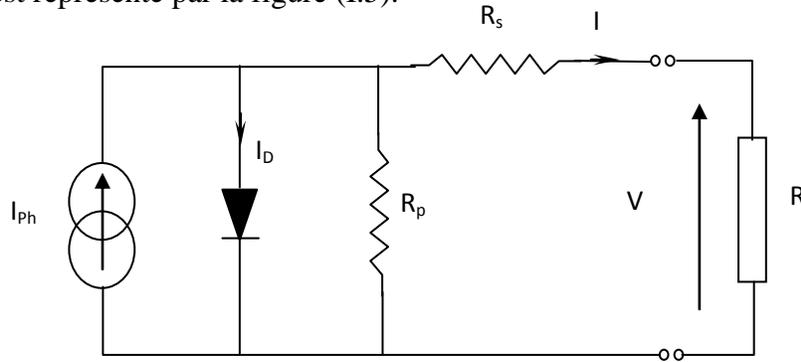


Figure I.5. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Comme montre la figure (I.5) 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 [3].

- **La résistance série**

En pratique la cellule PV contient des résistances dans le matériel qui constitue des semi-conducteurs. L'ensemble des pertes dépend de la résistance série R_s .

Son effet devient très remarquable en module composé de plusieurs cellules connectées en série, la valeur de cette résistance multiplié par le nombre de cellule [4].

- **La résistance shunte**

La résistance shunte, représente une partie des pertes liée à une petite fuite de courant par un chemin résistif parallèlement au dispositif intrinsèque. Son effet est beaucoup moins remarquable dans un module photovoltaïque comparé à la résistance série, qui devient seulement apparent quand un certain nombre de module sont reliés en parallèle pour créer un générateur photovoltaïque [4].

D'après la figure (I.5), la cellule PV produit un courant de court circuit (I_{cc}) proportionnel à l'éclairement. L'équation mathématique du courant de sortie d'une cellule PV est écrite come suite :

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

Tel que $I_d = I_{sat} \left[\exp \left(\frac{(V+I.R_s)}{m.V_{th}} \right) - 1 \right]$ (I.3)

Donc $I = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{(V+I.R_s)}{m.V_{th}} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V+I.R_s}{R_p} \right)$ (I.4)

Où

$V_{th} = \frac{m.K.T}{q}$: La tension thermique

m : Facteur d'idéalité de la diode

V : Tension de sortie de la cellule

I_{ph} : Courant photo-courant

I : Courant de sortie de la cellule

I_{sat} : Courant de saturation de la diode

R_s : Résistance série

q : La charge de l'électron 1.6×10^{-19} (C)

R_p : Résistance parallèle

K : Constant de Boltzmann 1.38×10^{-23} (J/K)

I.4.4. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

La tension en circuit ouvert (V_{oc}) d'une cellule PV est comprise entre 0,3V et 0,7V selon le matériau utilisé, la température et son état de vieillissement, elle est produite dans des conditions de circuit ouvert ($I_{cc} = 0$). Son courant de court-circuit (I_{cc}) varie principalement selon le niveau d'éclairement et selon les technologies et la taille des cellules. Le point de puissance maximale (PPM) est le point de fonctionnement $M (V_{opt}, I_{opt})$, pour lequel la puissance dissipée dans la charge est maximale.

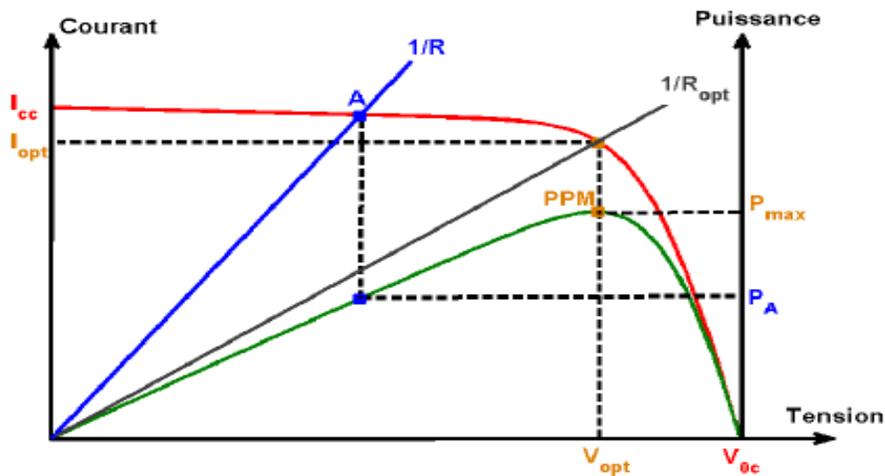


Figure I.6. Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule PV [1]

I.4.4.1. Le courant de court-circuit (I_{cc})

C'est la plus grande valeur de courant dans lequel la tension aux bornes de la cellule est nulle. Dans le cas idéal ($R_s = 0, R_p = \infty$), pratiquement ($I_{cc} = I_{ph}$) [4].

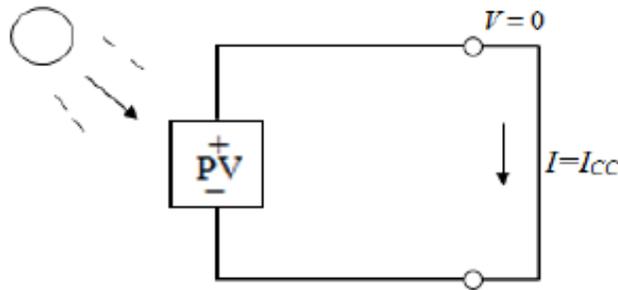


Figure I.7. Courant de court-circuit

I.4.4.2. Tension de circuit-ouvert (V_{co})

C'est la tension pour laquelle le courant débité par la cellule PV est nul (la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur PV) [3]. Son expression est déduite de l'équation suivante:

$$V_{co} = V_{th} \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}}\right) \quad (I.5)$$

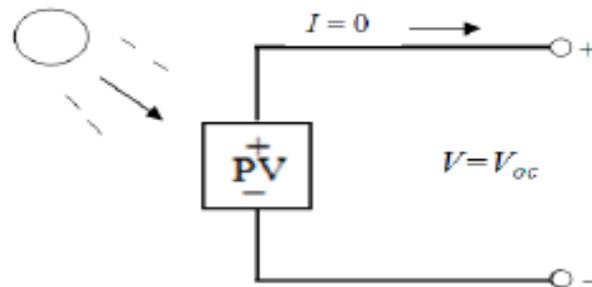


Figure I.8. Tension de circuit ouvert [5]

I.4.4.3. La puissance maximale

C'est la puissance électrique maximale que peut fournir par le module, qui est associé à une tension maximale et à une intensité maximale. Lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions standard ($G=1000\text{w}/\text{m}^2, 25^\circ$), on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête [3].

I.4.4.4. Facteur de forme FF

Le facteur de forme FF , dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage ou "fill factor", C'est le rapport de la puissance maximale qui peut être délivré à la charge sur le produit de (I_{cc}, V_{co}) [5].

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{cc} * V_{co}} \quad (\text{I.6})$$

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.

I.4.4.5. Le rendement

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.

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{inc}}} = \frac{I_{cc} * V_{co} * FF}{P_{\text{inc}}} \quad (\text{I.7})$$

I.4.4.6. Influence de l'éclairement

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure (I.9) 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 [6].

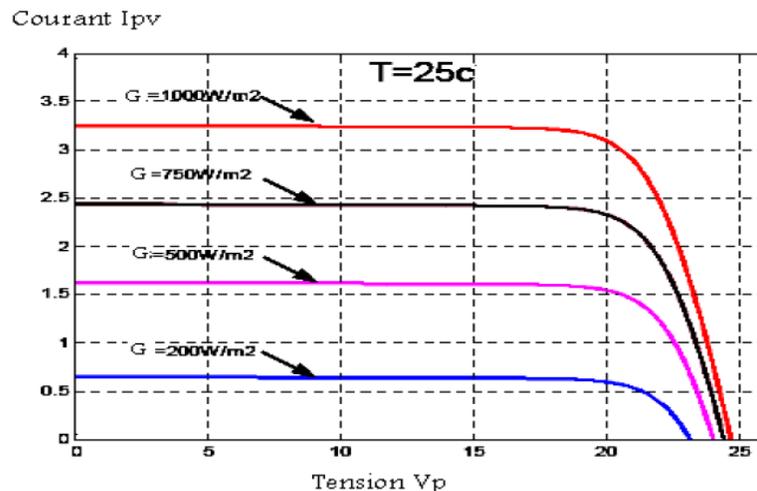


Figure I.9. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ [4]

La figure (I.10) 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 $P(V)$ [6].

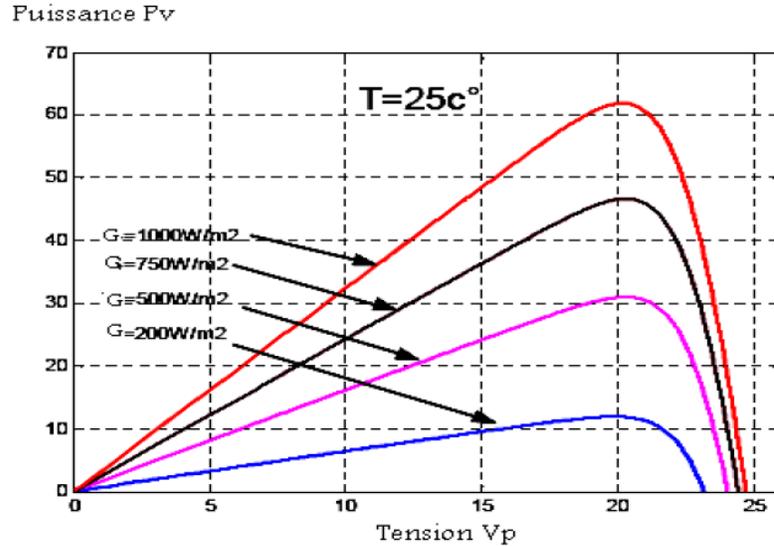


Figure I.10. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$ [4]

I.4.4.7. Influence de la température

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 (voir les figures I.11, I.12) [6].

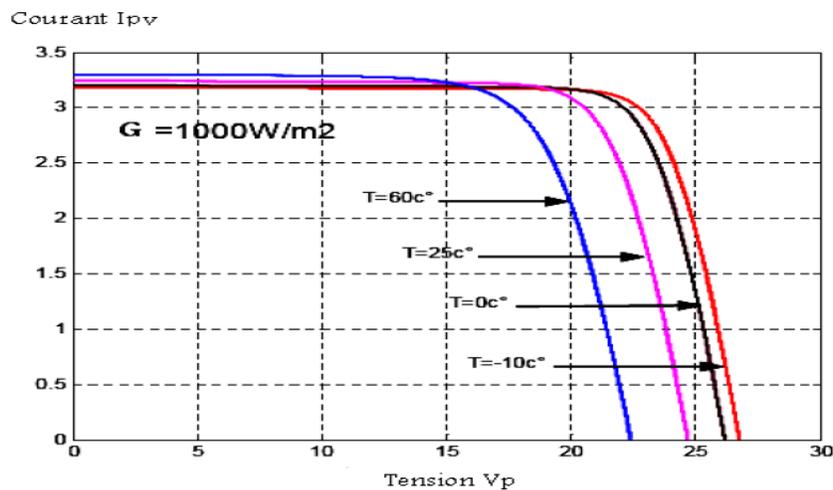


Figure I.11. L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ [4]

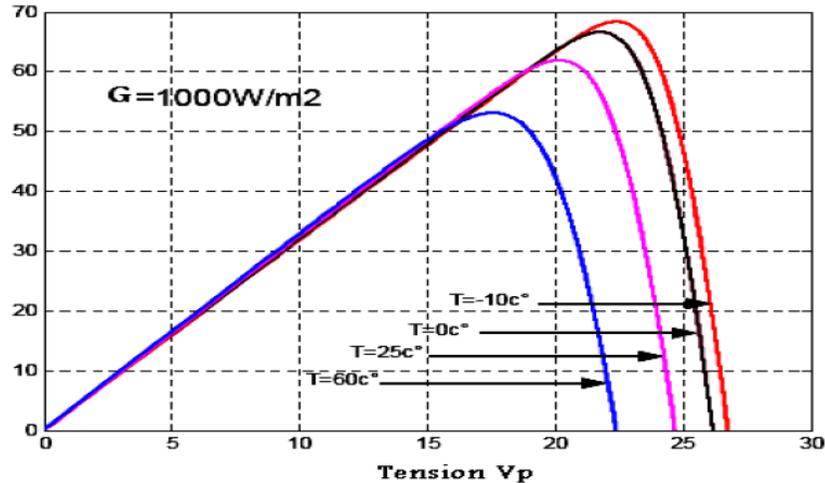


Figure I.12. L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ [4]

I.5. Les différentes technologies des cellules PV

Les technologies des cellules solaires se sont développées de manière très diverses. On distingue les deux catégories principales qui se disputent le marché (les cellules cristallines et les cellules à couches minces). Ils ont des caractéristiques, des durées de vie, et des sensibilités différentes [5].

I.5.1. Cellules cristallines

Les cellules en silicium cristalline (mono et multi) représente la majorité de la production mondiale d'énergie solaire. On reconnaît deux types des cellules sont :

I.5.1.1. Les cellules monocristallines

Sont constitué d'un seul cristal offrant à la cellule un arrangement parfait des atomes. Le rendement de la cellule monocristalline est le plus élevé, il est compris entre 15 et 20% [10].

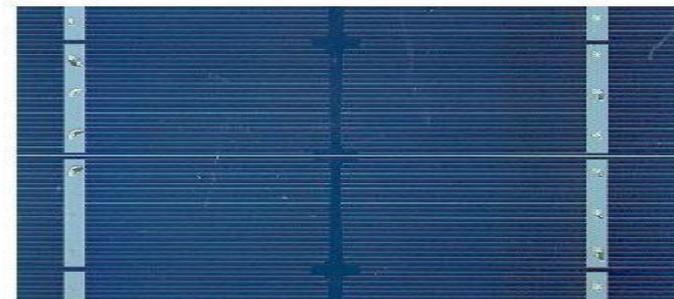


Figure I.13. Photos de cellules monocristallines

I.5.1.2. Les cellules poly-cristallines

Sont constitués de multiples petits cristaux de tailles. Son rendement est légèrement inférieur au la cellule monocristalline (environ 15 %) selon les fabricants [10].

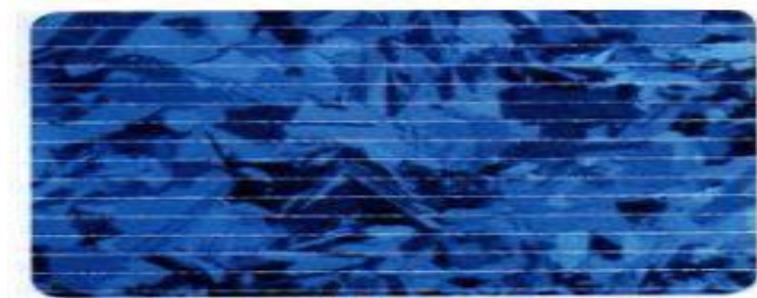


Figure I.14. Photos de cellules multi-cristallines

I.5.2. Cellules à couches minces (amorphes)

Sont déposés en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre son rendement de conversion est faible (de 7 à 10 %) [10].

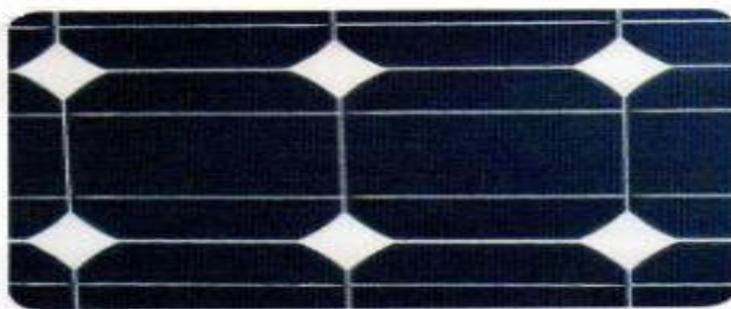


Figure I.15. Photos de cellules en couche mince (amorphe)

I.6. Panneau solaire (champ solaire)

Se compose des modules PV interconnectés en série ou en parallèle pour produire la puissance électrique.

Ces modules sont montés une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire, avec une degré d'inclinaisons spécifique. Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation [4].

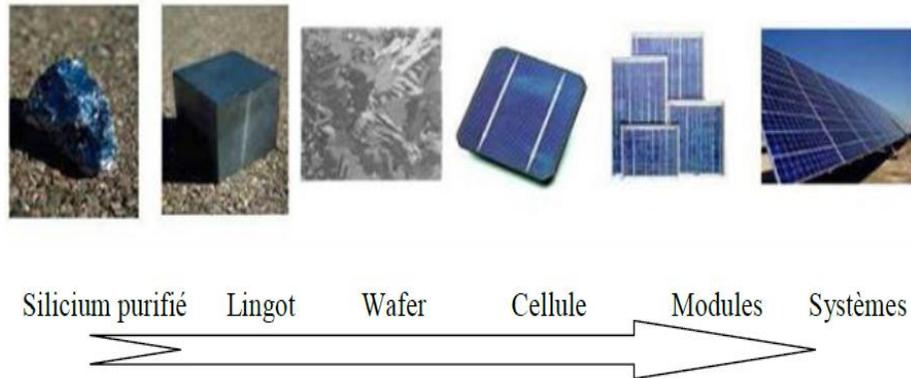


Figure I.16. Evolution de constructions des systèmes PV

I.6.1. Regroupement des cellules en série

Une cellule PV, c'est l'unité de base d'un système photovoltaïque ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de **2.5 W** sous une tension de moins d'un volt.

Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées en série ou/et en parallèle avec grand nombre pour former un générateur ou un panneau. 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 [7].

La caractéristique d'un groupement de n s cellules PV identiques est présentée sur la figure (I.17).

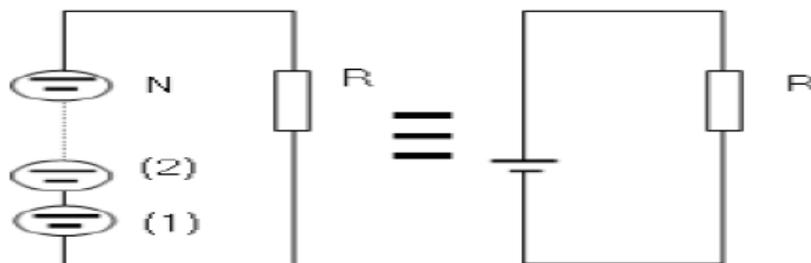


Figure I.17. Association des modules en séries

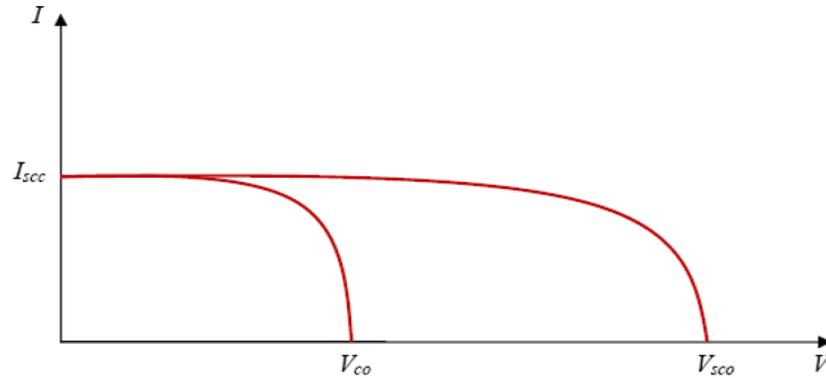


Figure I.18. Caractéristique de nombre des modules en série

I.6.2. Regroupement des cellules en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et un courant égal à la somme des courants individuels [7]. La caractéristique d'un groupement de ns cellules PV identiques est présentée sur la figure(I.19).

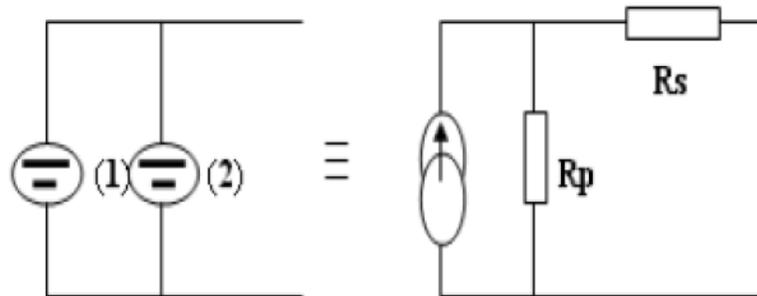


Figure I.19. Association des modules en parallèle

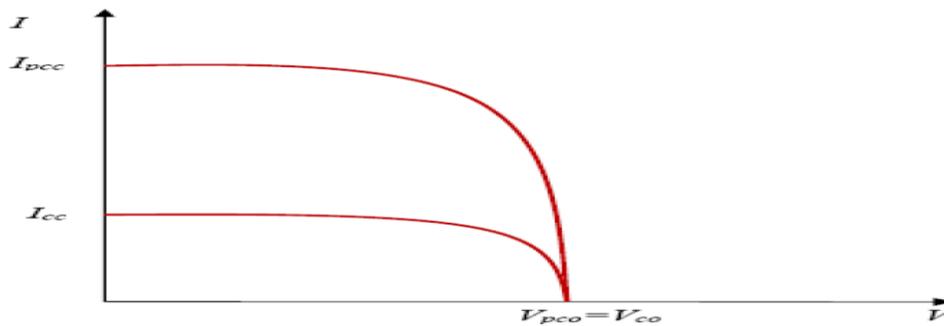


Figure I.20. Caractéristique de nombre des modules en parallèle

I.6.3. Regroupement des cellules (séries et parallèle)

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

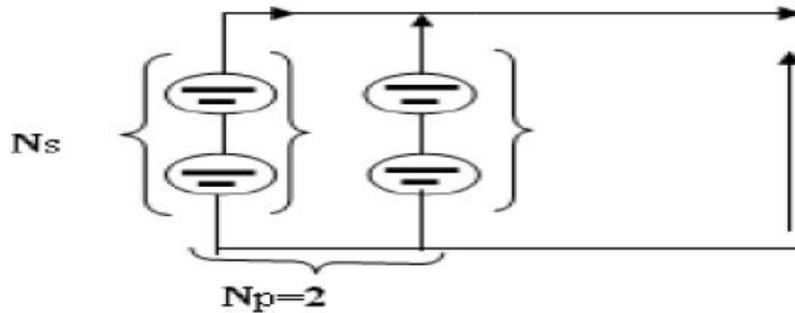


Figure I.21. Association mixte des modules

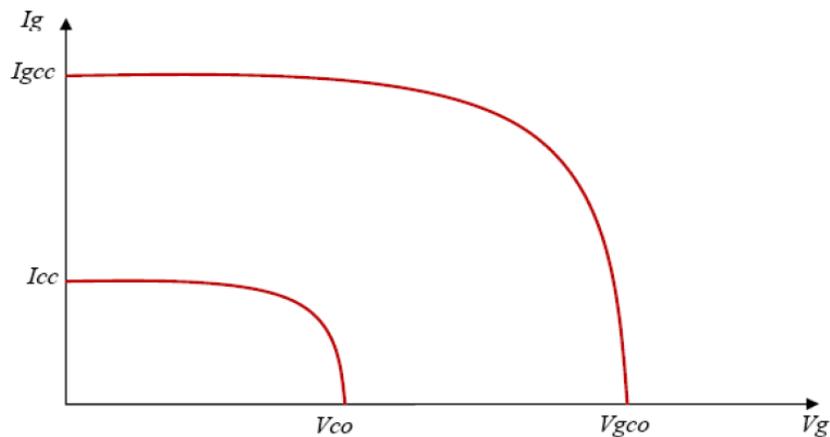


Figure I.22. Caractéristique de nombre des modules mixte

I.7. Protection classiques d'un générateur photovoltaïque

Tout choc électrique doit être évité aux cellules, qui sont des éléments fragiles. En particulier, elles peuvent être détruites par un échauffement excessif par effet Joule si elles deviennent réceptrices de courant. Il y a deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles [8].

I.7.1. Les diodes séries (Diode anti-retour)

Ces diodes, sont placées en série avec un module ou une branche de modules câblés en série afin d'empêcher tout courant électrique de retourner vers les modules. Pour les systèmes solaires connectés à une batterie, la diode de blocage empêche la circulation d'un courant inverse

dans le sens batterie vers panneau durant la nuit. La chute de tension aux bornes de la diode dépend du type utilisé [8].

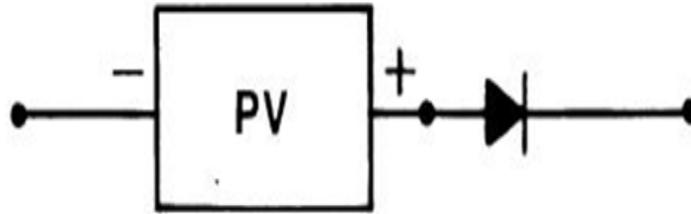


Figure I.23. Diodes anti-retour

I.7.2. Les diodes parallèles (Diode by-pass.)

Les diodes by-pass permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne et éviter les points chauds. La diode by-pass est appelée diode shunt car elle shunte les cellules correspondant à la partie non éclairée les autres cellules continuent à produire l'énergie correspondant à la partie éclairée du module. En condition normale de fonctionnement les diodes shunt ne conduisent aucun courant [8].

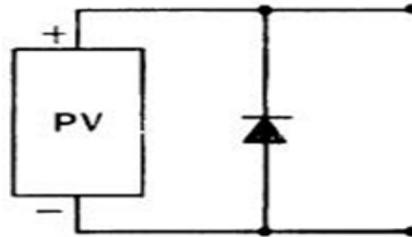


Figure I.24. Diodes anti-retour et by-pass

I.8. Zones de fonctionnement du module solaire

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement; seule la courbe $I(V)$ est fixée.

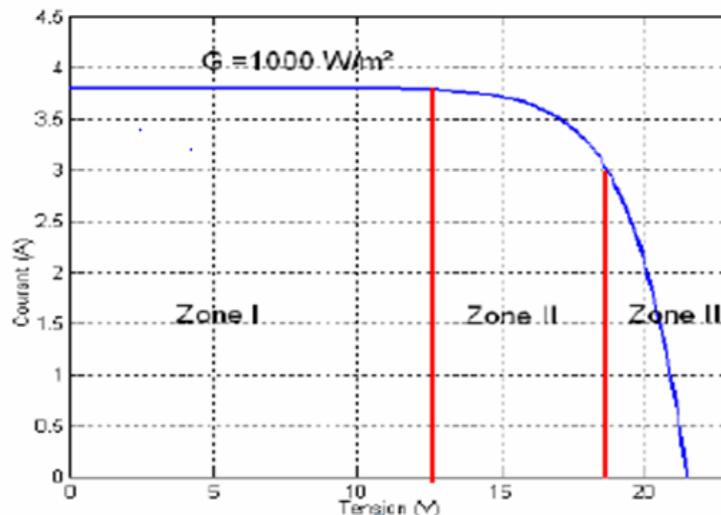


Figure I.25. Les différentes zones de la caractéristique I (V), $T=25^\circ\text{C}$ [9].

- **La zone (I)** : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- **La zone (II)** : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- **La zone (III)** : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension[9].

I.9. Les systèmes photovoltaïques

Un système photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale, à savoir la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser les modules, les câblages, la batterie en cas de stockage et sont régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif [4].

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

- Autonome
- Hybride
- Raccordée au réseau

I.9.1. Système autonome

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Il existe deux types :

I.9.1.1. systèmes avec stockage électrique

Ce type de système est utilisé généralement lorsqu'une puissance supplémentaire est nécessaire pour alimenter des charges critiques telles que la réfrigération, les pompes à eau, l'éclairage ou autres figure (I.26) [17].

Les batteries d'accumulateurs électrochimiques, ceux-ci alimentent des appareils d'utilisation :

- soit directement en courant continu.
- soit en courant alternatif par l'intermédiaire d'un convertisseur continu- alternatif (onduleur).

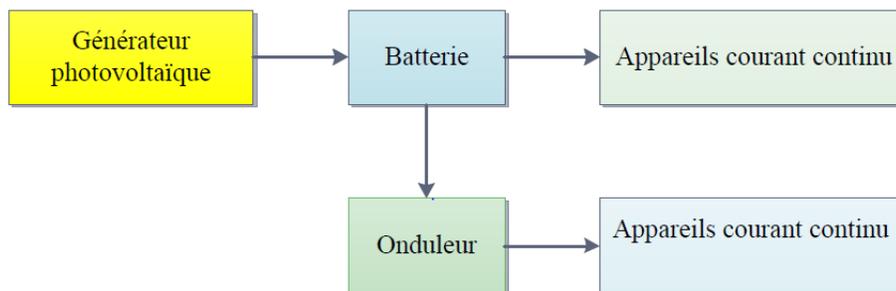


Figure I.26. Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec stockage

I.9.1.2. systèmes sans stockage électrique

Le principal composant de ce type de système est l'onduleur. Il convertit la puissance continue (*DC*) obtenue à partir des modules *PV* en puissance alternative (*AC*).

Les appareils d'utilisation sont branchés soit directement sur le générateur solaire, soit, éventuellement, par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-continu, adaptateur d'impédance figure (I.27) [17].

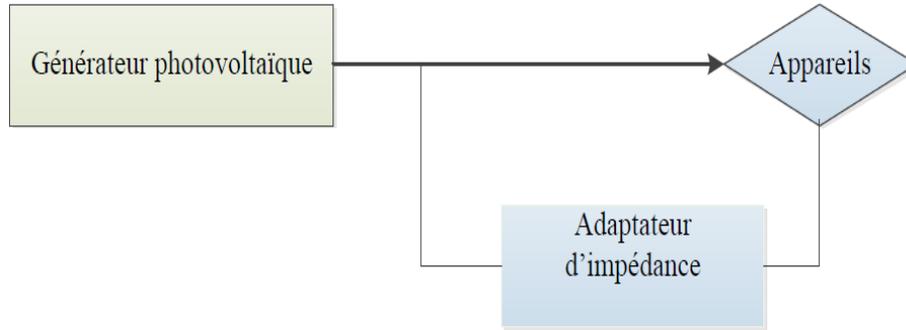


Figure I.27. Schéma synoptique d'un système photovoltaïque sans stockage

La figure (I.28) représente l'exemple d'un système PV autonome.

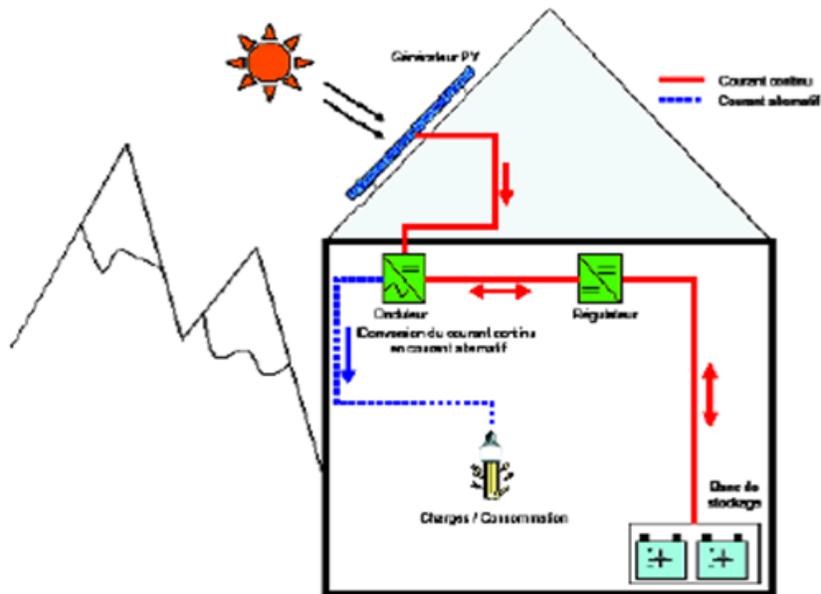


Figure I.28. Exemple de la structure d'un système PV autonome

I.9.2. Système hybride

Les systèmes hybrides sont généralement des systèmes PV couplés à d'autres sources comme par exemple une éolienne ou un groupe électrogène. Le rôle de second producteur d'énergie est de palier aux insuffisances éventuelles de la production photovoltaïque [6].

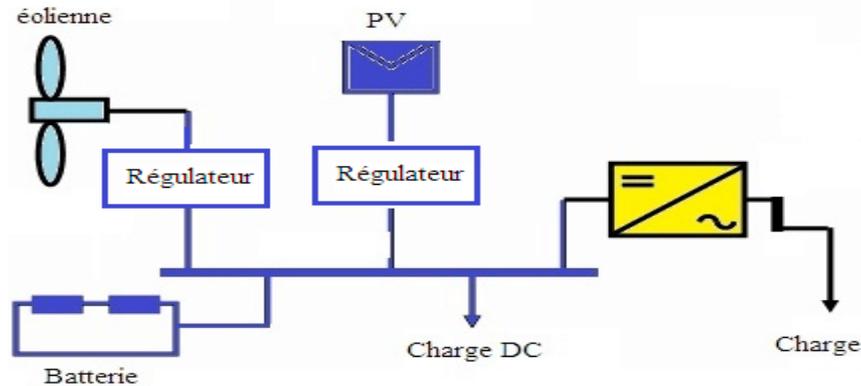


Figure I.29. Schéma principal d'un système hybride avec une éolienne

I.9.3. 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 [8].

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.

Les systèmes PV peuvent être classifiés selon leur taille :

I.9.3.1. Centrales de petite taille ($P=1$ à 10 KW)

Pour des applications sur les toits des maisons individuelles ou d'institutions publiques (écoles, parkings, mosquées). Elles se connectent au réseau basse tension [4].

I.9.3.2. Centrales de taille moyenne ($P=10$ à 100 KW)

Ces systèmes peuvent être installés et intégrés sur un édifice, sur les toits ou les façades. Elles se connectent à la basse ou à la moyenne tension du réseau de distribution électrique [4].

I.9.3.3. Centrales de grande taille ($P > 500$ KW)

Ce sont des systèmes installés au sol souvent raccordés au réseau électrique [4].

I.10. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Malgré les avantages qu'elle présente, l'énergie photovoltaïque présente certains inconvénients qui peuvent être résumés comme suit :

I.10.1. Les avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages à savoir :

- le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au Mégawatt [9].

- le coût de fonctionnement est faible vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni personnel hautement spécialisé.

- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [9].

I.10. 2. Les inconvénients

- la fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

- le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium est de 28%).

- les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée [9].

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis [9].

I.11. Conclusion

L'énergie photovoltaïque est une énergie renouvelable qui provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein des matériaux bien particuliers tels que les semi-conducteurs (le silicium, le Germanium, l'Arséniure des Galium,...). Afin de la rendre réalisable physiquement, elle nécessite un équipement complémentaire dit système produite consommable (régulation, conversion *DC/AC*...).

Dans ce chapitre on a présentés des notions générales sur les systèmes photovoltaïques, synthèse d'assemblage des panneaux et une spécification des différentes zones de fonctionnement et les avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

CHAPITRE II:

Les convertisseurs statiques

II.1 Introduction

Le système (PV) le plus simple n'exige aucune commande électronique au traitement de puissance, qui est constitué d'une rangée de module (PV) avec un nombre convenablement choisi de cellules et une batterie de charge. La batterie soutient l'approvisionnement lors d'insuffisance d'énergie solaire, mais elle aide également à maintenir la tension d'alimentation dans des limites bien définies. Une telle approche est si simple mais elle présente des limitations, aucune commande pour limiter la charge fournie à la batterie. De plus, aucun moyen de limitation de la décharge de la batterie n'est disponible.

La puissance assurée à la charge est directement le produit courant-tension qui peut flotter sensiblement selon l'état de la charge. En outre, il n'y a aucune manière de commander la tension des panneaux (PV) pour assurer un transit de puissance maximum.

Afin de surmonter ce problème, des circuits électroniques sont utilisés pour la commande et la limitation des courants de charge des batteries. La conversion de la tension (DC / DC) et la transformation du courant (DC/AC).

Ce chapitre II décrit certains convertisseurs d'électronique de puissance et les techniques de commande et de conversion DC/ DC, DC /AC connectés au réseau.

II.2. Convertisseur DC-DC

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) [3].

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 [11].

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)

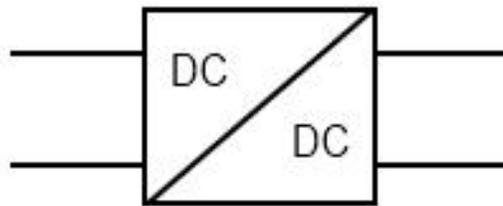


Figure II.1. Symbole d'un convertisseur DC-DC

II.2.1. Hacheur dévolteur (Buck)

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à gauche du MPP. La figure (II.2) représente le schéma de circuit électrique d'un convertisseur Buck.

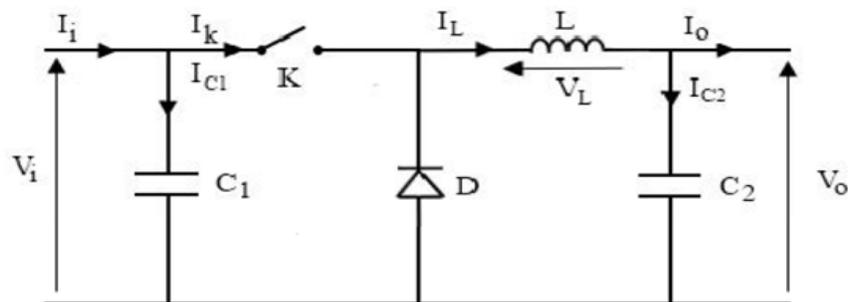


Figure II.2. Schéma électrique d'un hacheur Buck

Pour savoir le comportement réel 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.3) montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec le commutateur fermé, tandis que la figure (II.4) représente le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant $(1 - \alpha)T_e$ [11].

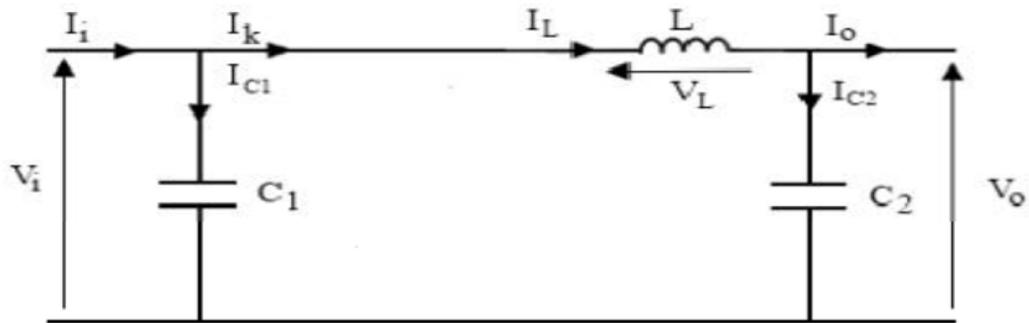


Figure II.3. Schéma électrique d'un hacheur Buck fermé

Lorsqu'on applique la loi de Kirchoff sur le circuit ci-dessus on aura les équations suivantes:

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \tag{II.1}$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \tag{II.2}$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \tag{II.3}$$

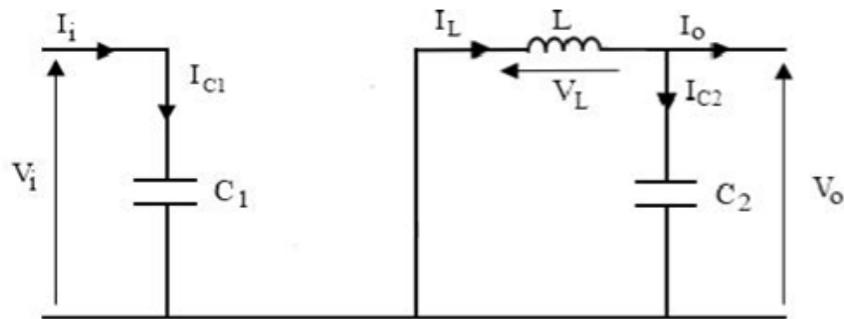


Figure II.4. Schéma électrique d'un hacheur Buck ouvert

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) \tag{II.4}$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \tag{II.5}$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = -V_o(t) \tag{II.6}$$

D'où la tension de sortie du le hacheur Buck est :

$$V_s = \alpha V_i \quad (\text{II.7})$$

II.2.2. Hacheur survolteur (Boost)

Un convertisseur élévateur 'Boost', ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à droite du MPP. La figure (II.5) montre le schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [11].

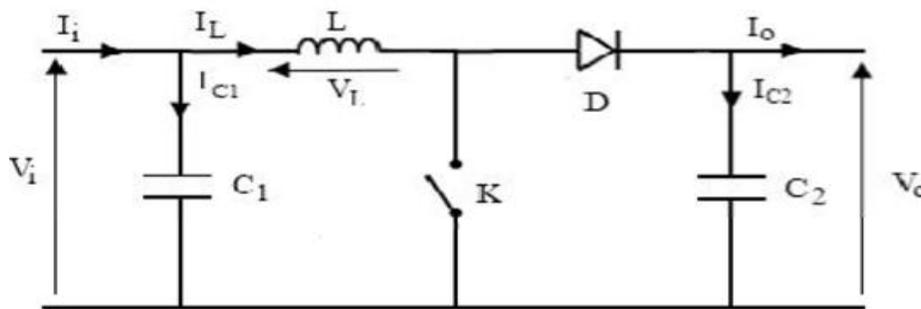


Figure II.5. Schéma électrique d'un hacheur Boost

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K . celui de la figure (II.6) présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c.-à-d. d'entre $[0, \alpha T_e]$.

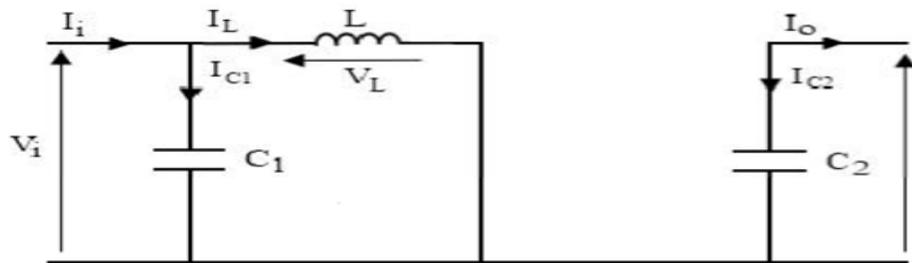


Figure II.6. Schéma électrique d'un hacheur Boost fermé

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents donnent les calculs suivants:

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (\text{II.8})$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) \quad (\text{II.9})$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \quad (\text{II.10})$$

L'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant:

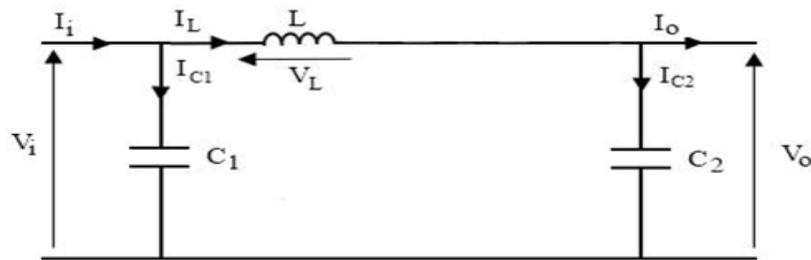


Figure II.7. Schéma électrique d'un hacheur Boost ouvert

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (\text{II.11})$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_i(t) - I_o(t) \quad (\text{II.12})$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \quad (\text{II.13})$$

D'où la tension de sortie du le hacheur boost est :

$$V_s = (1 - \alpha)V_e \quad (\text{II.14})$$

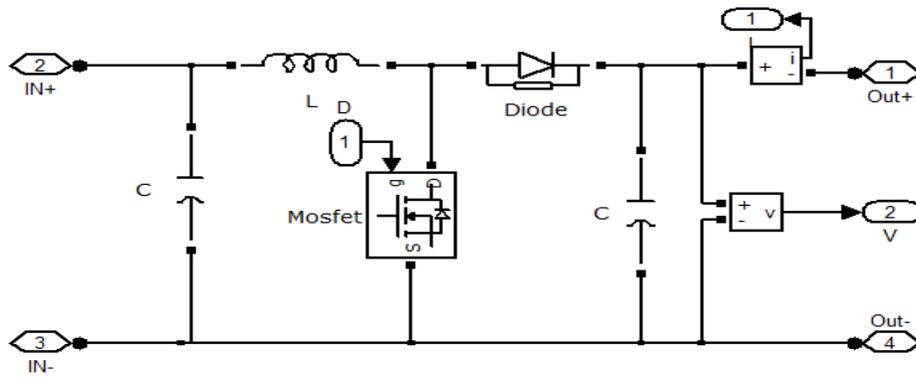


Figure II.8. Schéma de simulation d'un hacheur boost

II.2.3. 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 [12].

Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Tandis que, lorsque le transistor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur tourne sur la position (off). La tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode. Dans ce cas, l'équation de la tension aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée comme suit:

$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_i \tag{II. 15}$$

Le circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur, et les caractéristiques du courant et de la tension de charge sont données par la figure (II.9)

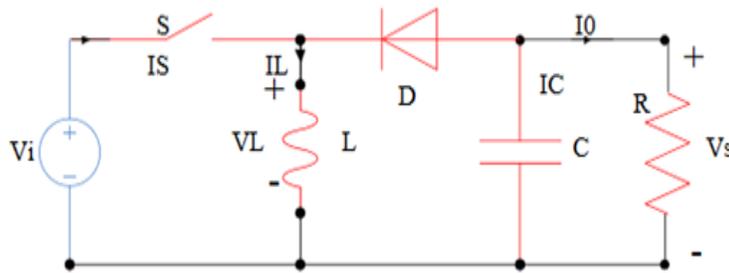


Figure II.9. Schéma de principe d'un hacheur dévolteur-survolteur

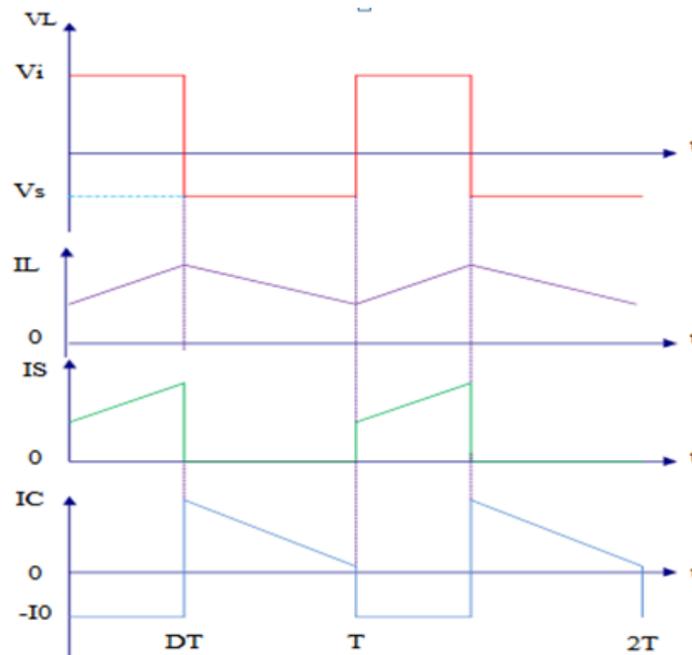


Figure II.10. Caractéristique de la tension et du courant du Buck-Boost

II.3. La commande (MPPT)

Un MPPT, (Maximum Power Point Tracker) est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques.

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre elles par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application [17].

II.3.1. Principe de MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement),

la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}) [17].

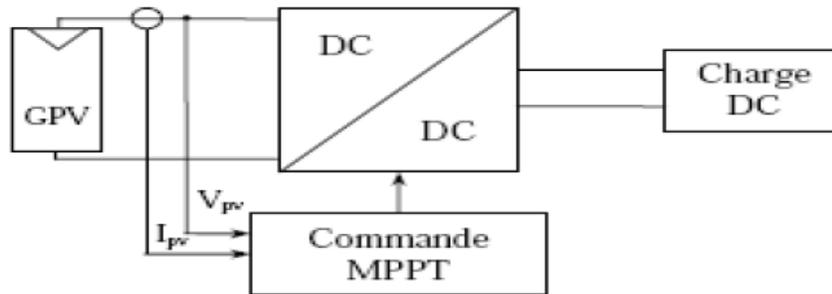


Figure II.11 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT

II.3.2. Méthode de poursuite du MPPT

Pour obtenir un meilleur rendement dans le fonctionnement des générateurs photovoltaïques, la technique appelée la poursuite de la puissance maximale (MPPT) qui consiste à transférer de façon optimale toute la puissance électrique à extraire de cette source de l'énergie photovoltaïque vers la charge à alimenter. Elle doit être utilisée dans toute application utilisant ces générateurs, et deviendra nécessaire et même indispensable selon la théorie du transfert optimal de puissance.

II.3.2.1. Méthodes à contre réaction de tension

Ce genre de mécanismes repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par la comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la **PWM** de commande afin d'annuler cette erreur. Selon la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe) on a trois types de méthodes [18] :

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

II.3.2.2. 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 [18].

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

II.3.2.3. 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 [18].

II.3.2.3.1. Algorithme perturbation et observation

C'est l'algorithme de poursuite du PPM le plus utilisé. Comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système à travers l'augmentation ou la diminution de V_{ref} ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis par l'observation des effets de ces perturbations sur la puissance de sortie du panneau [17].

Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du panneau est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$ alors en garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent. La figure (4.9) montre l'organigramme de l'algorithme de P&O tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle.

L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (**P et O**) est donné par la figure (II.12).

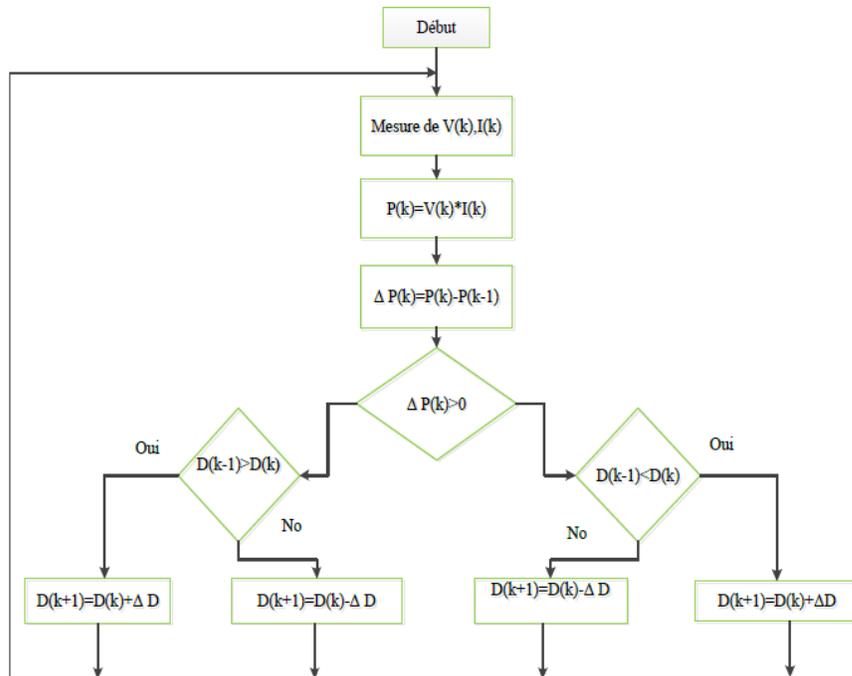


Figure II.12. Organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation

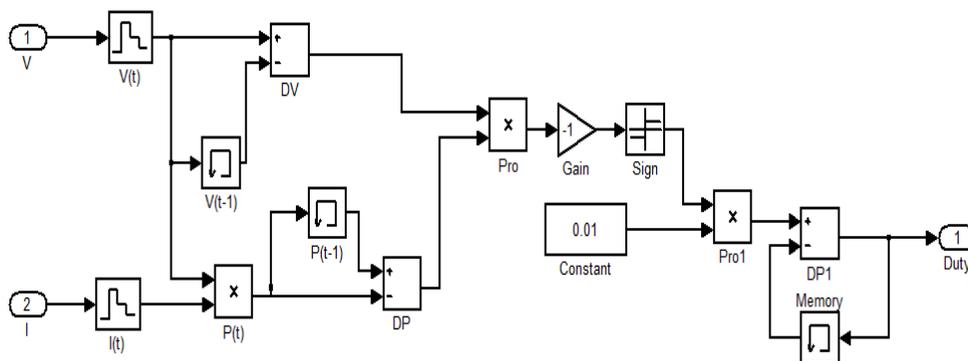


Figure II.13. Schéma de simulation de commande MPPT

II.3.2.3.2. Algorithme incrémentation de la conductance

Cette méthode s'intéresse directement aux variations de la puissance en fonction de la tension. La conductance est une grandeur physique relativement connue il s'agit du quotient de l'intensité par la tension ($G=I/V$) La conductance incrémentielle est beaucoup plus rarement définie, il s'agit du quotient de la variation, entre deux instants, de l'intensité par celle de la

tension ($G = dI / dV$). En comparant la conductance G à la conductance incrémentielle ΔG , nous allons chercher le maximum Précisément la puissance en sortie de la source peut s'écrire [17]:

$$P = V \times I \tag{II.16}$$

D'ou en écrivant la dérivée :

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} = V \frac{dI}{dV} + \frac{dV}{dV} I \\ \frac{dP}{dV} = V \frac{dI}{dV} + I \\ \frac{dP}{dV} = V \frac{\Delta I}{\Delta V} + I \end{cases} \tag{II.17}$$

Donc

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} > 0 \\ \frac{dP}{dV} = 0 \\ \frac{dP}{dV} < 0 \end{cases} \text{ Ou } \begin{cases} \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \end{cases} \tag{II.18}$$

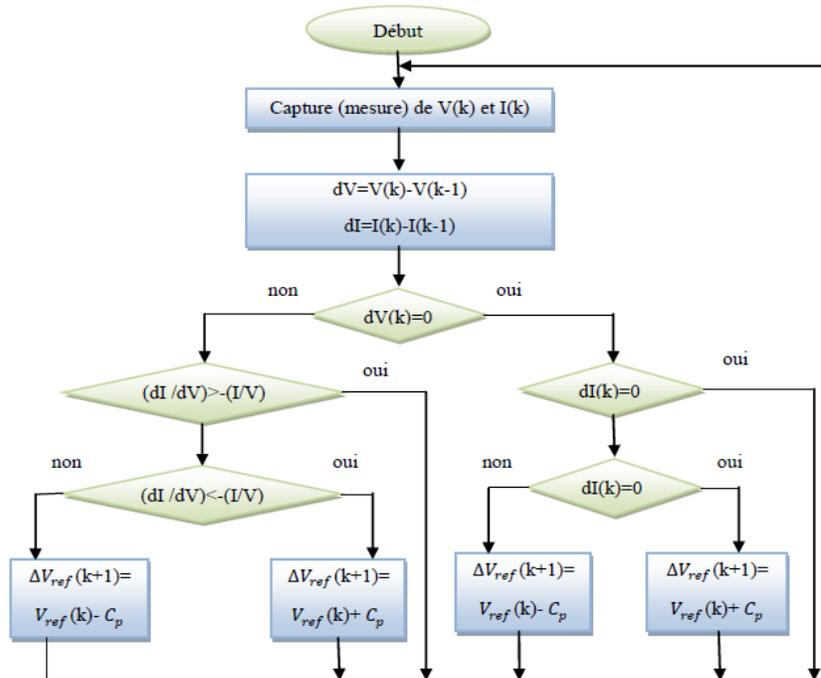


Figure II.14. Organigramme de l'algorithme de l'incrémentale de la conductance

II.4. Convertisseurs DC/AC

Un convertisseur (DC/AC) 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.

Les convertisseurs (DC/AC) se distinguent principalement par la nature de l'étage continu et par le nombre de phases de la source alternative. Si l'étage continu est vu comme étant une source de courant, les convertisseurs continu-alternatif associés sont des onduleurs de courant. Si l'étage continu est vu comme étant une source de tension, les convertisseurs continu-alternatif associés sont des onduleurs de tension.

Le plus souvent, on utilise deux ou trois phases. Ces convertisseurs (DC/AC) sont des convertisseurs directs, ils ne sont composés que d'interrupteurs semi-conducteurs, et la nature de la source continue impose la nature de la source alternative [3].

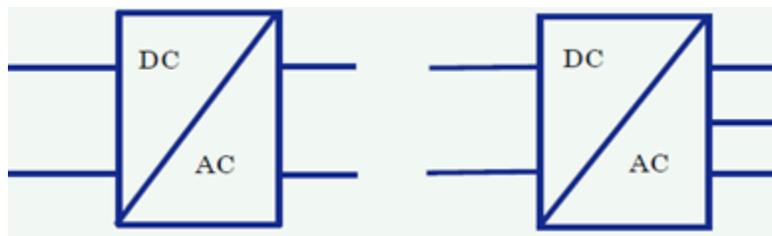


Figure II.15. Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé

II.4.1. 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.

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 [19].

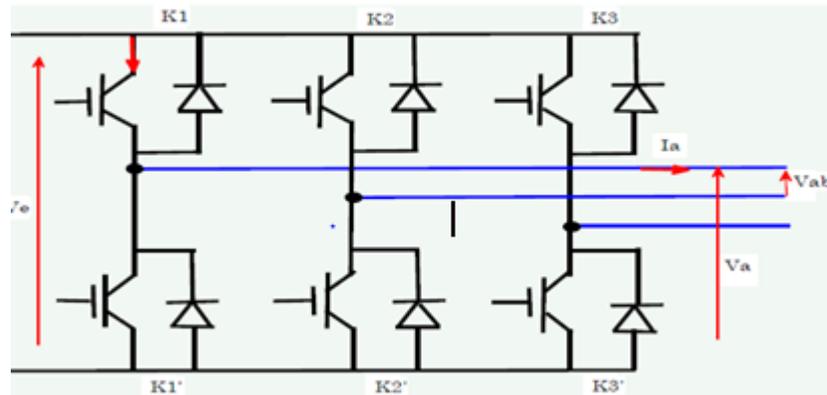


Figure II.16. Structure d'un onduleur triphasé

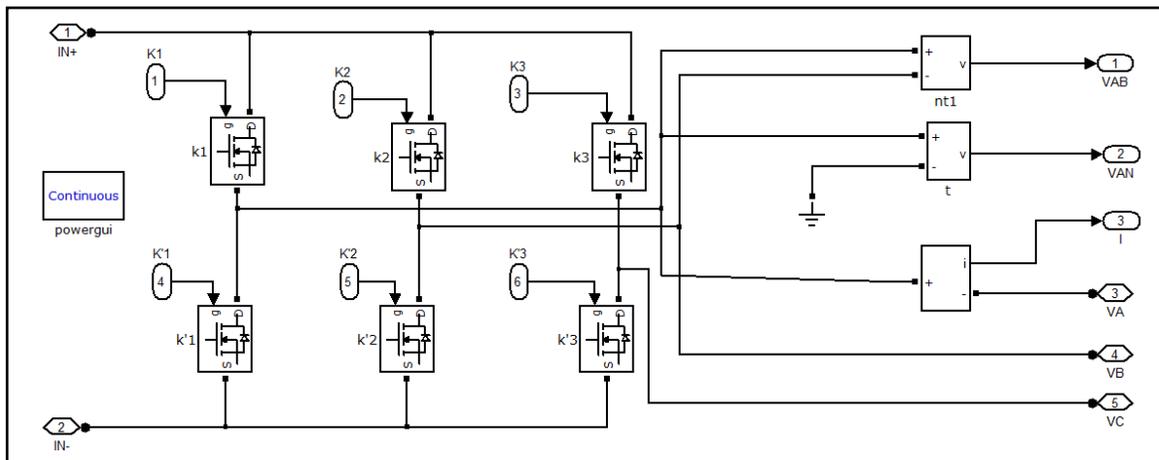


Figure II.17. Schéma de simulation d'un onduleur

II.4.2. Principe de fonctionnement

Plusieurs stratégies peuvent être considérées pour la commande d'un onduleur :

- Commande pleine onde (dite 180°).
- Commande décalée.
- Commande à Modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Les différentes commandes ont le but d'obtenir l'allure sinusoïdale ou niveau de la sortie et pour chaque commande le principe de fonctionnement se change. La supériorité de la commande à base de semi-conducteur sur les autres systèmes : automatique, mécanique, hydraulique et électrique vient de faible temps de réponse de circuit électronique.

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence [19].

II.4.2.1. Commande plein onde (180°)

Lorsque la séquence de commande de formateur d'un interrupteur concède avec la commutation d'ouverture de l'interrupteur situé sur le même bras, on parle dans ce cas d'un onduleur de type 180°.

Pour le 1^{er} bras de l'onduleur l'interrupteur k1 est fermé pendant une demi-période (180°). Pour les deux autres bras de l'onduleur on applique la même procédure mais avec un décalage de $\frac{2\pi}{3}$ et $\frac{4\pi}{3}$ par rapport de 1^{er} bras (voir la figure II.16). La tension générée par la stratégie de commande (180°) à une forme rectangulaire, sa décomposition en série de Fourier [20]:

$$V_{ab} = \sum_{n=1,3,5}^k \frac{4V}{n\pi} \sin \left[n \cdot \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) \right] \quad (\text{II.19})$$

Cette décomposition montre que la forme d'ordre de tension est riche en harmoniques.

II.4.2.2. Commande décalée (120°)

Dans ce cas, la commande d'ouverture d'interrupteur ne concède pas avec la commande d'ouverture de l'interrupteur placé sur le même bras. On parle dans ce cas d'un onduleur de type 120°. Avec cette technique chaque interrupteur fonctionne pendant 120°, tel que la séquence est k1, k2 et k3 successivement de même pour les interrupteurs k'1, k'2 et k'3 avec un décalage de 60° par rapport k1, k2 et k3 [20].

II.4.3. La commande MLI

L'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion 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].

La MLI est réalisée par la comparaison d'une onde modulée (tension référence) avec une onde porteuse de forme triangulaire (haute fréquence). Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante [20].

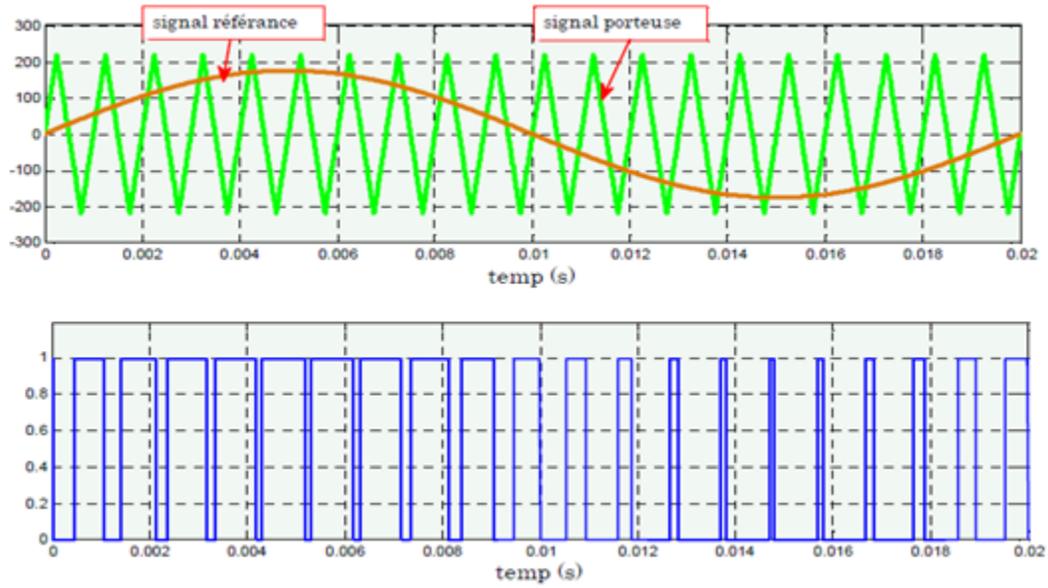


Figure II.18. Principe de la modulation

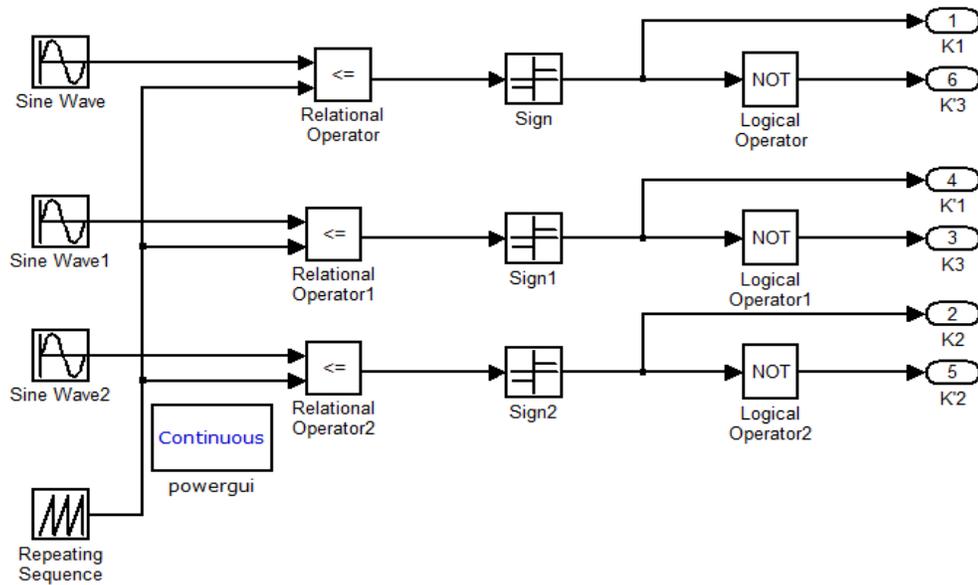


Figure II.19. Schéma de simulation de commande MLI

II.5 Conclusion

Le fonctionnement du générateur photovoltaïque à un rendement optimal nécessite l'insertion des convertisseurs statiques (hacheur) entre le générateur et le récepteur (charge). Dans la littérature plusieurs travaux se sont intéressés à l'étude des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique.

Dans ce chapitre, nous avons décrit généralement tous les équipements d'électronique de puissance utilisés pour la connexion des systèmes photovoltaïques au réseau électrique. Ainsi que, leur Principe de fonctionnement, leurs modèles mathématiques et leurs différents types de commande (*MPPT* et *MLI*).

CHAPITRE III:

Modélisation et simulation d'un system photovoltaïque

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons effectuer la simulation d'un générateur PV raccordé au réseau. Le system PV contient une représentation détaillée des composant principaux du ce system, le générateur photovoltaïque, le convertisseur (DC-DC), l'onduleur de tension (DC-AC), commandé par MLI (sinus triangle), un filtre (LC-L), une charge du coté (AC), et le réseau électrique BT.

Une commande des convertisseurs (DC-DC) et (AC - DC) est développée dans le but d'extraire et d'injecter le maximum de puissance du générateur photovoltaïque.

L'onduleur transfère l'énergie produite des modules (PV) dans le réseau en gardant la tension alternative constante. Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et simulation ont été effectuées sous logiciel Matlab/Simulink. Les grandeurs de réglage de la tension sont la valeur efficace, la fréquence et la phase, ce contrôle nous permettra d'injecter la puissance active désirée et de régler la tension au point de raccordement du réseau connecté. Le but de la modélisation et la simulation des composants de la centrale grâce au logiciel MATLAB est d'aider à comprendre les critères de conception et de dimensionnement des systèmes PV connectés au réseau. Ces critères permettent de déduire et d'estimer l'énergie électrique injectée au réseau

III.2. Le Système Photovoltaïque proposée

Le system que nous proposons pour l'étude et la simulation est schématisé par la figure (III.2).

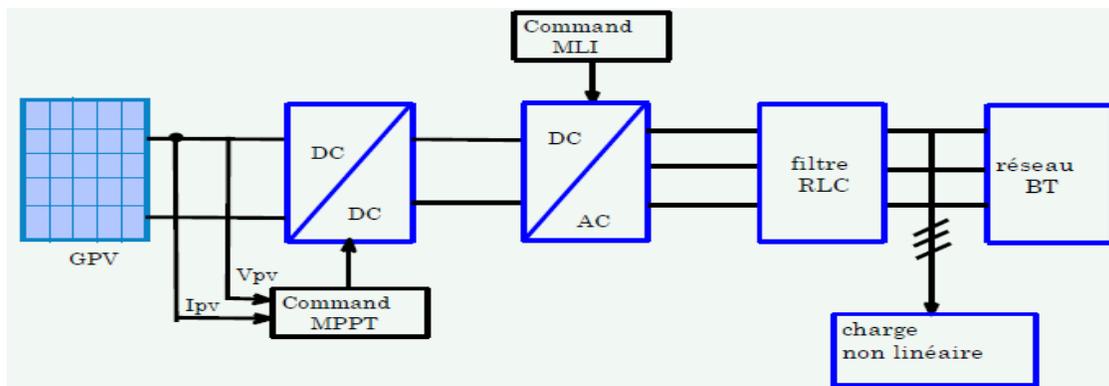


Figure III.1. Schéma synoptique d'un système photovoltaïque relié au réseau électrique

La figure (III.1) représente la configuration du système photovoltaïque raccordé au réseau électrique de distribution. Le générateur photovoltaïque est relié à un convertisseur (DC/DC) qui assure le suivi du point de fonctionnement optimal, et alors l'ensemble est connecté au réseau électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur (DC/AC) commandé par une stratégie qui permet de synchroniser la source photovoltaïque avec le réseau [4].

III.3.Présentation de la structure du système photovoltaïque

Le modèle globale de la centrale photovoltaïque représenté par la figure (III.2) est constitué de :

- **Un générateur PV**

Il contient (36) cellules solaires du silicium multi cristallines, et fournit une puissance maximum nominale de 60 W.

- **Convertisseur (continu- continu)**

Ce convertisseur est connu par le nom d'élévateur de tension. Il permet d'alimenter une batterie à stockée de l'énergie ou une charge qui ne supporte pas les fluctuations de la tension [4].

Le schéma électrique du hacheur survolteur est donné par la Figure (III.3)

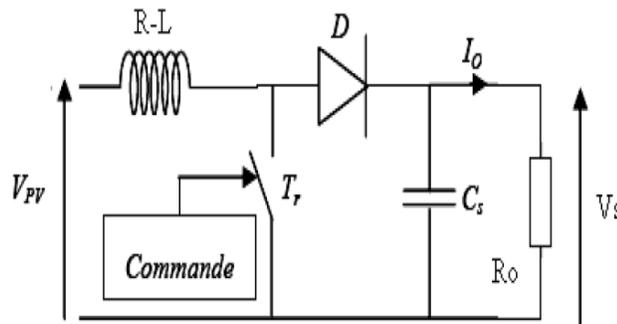


Figure III.2. Convertisseur (DC-DC) élévateur de tension

- **Convertisseur (continu-alternatif)**

Ces convertisseurs continu-alternatif sont des convertisseurs directs, ils ne sont pas composés d'interrupteurs semi-conducteur, et la nature de la source continue impose la nature de la source alternative.

- **Les filtres 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 **CL**). Le filtre (**LCL**) est l'autre alternative de raccordement [4].

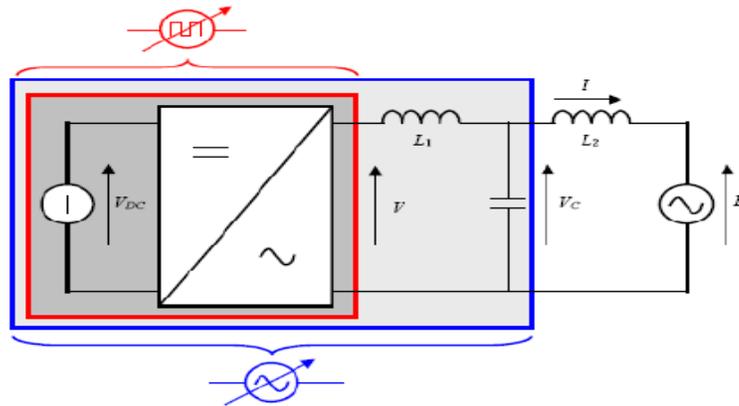


Figure III.3. Onduleur de tension avec filter (LCL)

- **Les charges**

Les charges sur le coté (DC), sont des batteries de stockage et pour le coté (AC).

- **Le réseau électrique**

Il représente le réseau de distribution d'amplitude $V=220V$ et de fréquence $f=50Hz$.

III.4.Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque

III.4 .1. Modélisation du générateur (GPV)

Le module photovoltaïque (**MSX-60**), est choisi pour la modélisation puis 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 :

Caractéristique physique	MSX60
Nombre de cellule en série (N_S)	36
Nombre de cellule en parallèle (N_P)	2
Caractéristique électrique	(G=1000w /m², 25°)
Tension nominale (V_N)	17.1V
Puissance maximale (P_{max})	60W
Courant de court-circuit (I_{cc})	3.8A
Tension de circuit ouvert (V_{co})	21.1V

Tableau (III.1) : Caractéristiques physique et électriques du générateur PV

Pour un module constitue de N_S cellules en série et de N_P cellules en parallèle, l'équation du courant photo-génère I_{ph} ramenée aux conditions de référence (G=1000w /m², 25°) est donnée par [4] :

$$I_{ph} = \left[I_{cc} \cdot \frac{G}{G_r} + I_t (T_C - T_r) \right] N_P \quad (\text{III.1})$$

Avec :

G_r : L'éclairement de référence G=1000w /m²

I_t : Coefficient de température du courant de court-circuit [$I_t = 23 \times 10^{-4} A$]

T_C : Température de la cellule [Kelven]

T_r : Température de référence [300°K]

Le courant de conduction de la diode dans le cas d'un module est donné par l'équation suivant :

$$I_d = I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q(V+R_S I)}{m.K.T} - 1 \right) \right] N_P \quad (\text{III.2})$$

Le courant de saturation de la diode est donné par l'équation suivant :

$$I_{sat} = I_0 \left[\frac{T_C}{T_r} \right] \cdot \exp \left[\frac{q \cdot E_g}{m \cdot K} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_C} \right) \right] \tag{III.3}$$

Avec :

I_0 : Le courant de saturation inverse de la diode à la température référence

E_g : Le gap d'énergie de semi-conducteur, $E_g = 1.1 eV$ pour le silicum cristallin

Le schéma de générateur photovoltaïque dans l'environnement Matlab-Simulink est représenté par la figure (III.4)

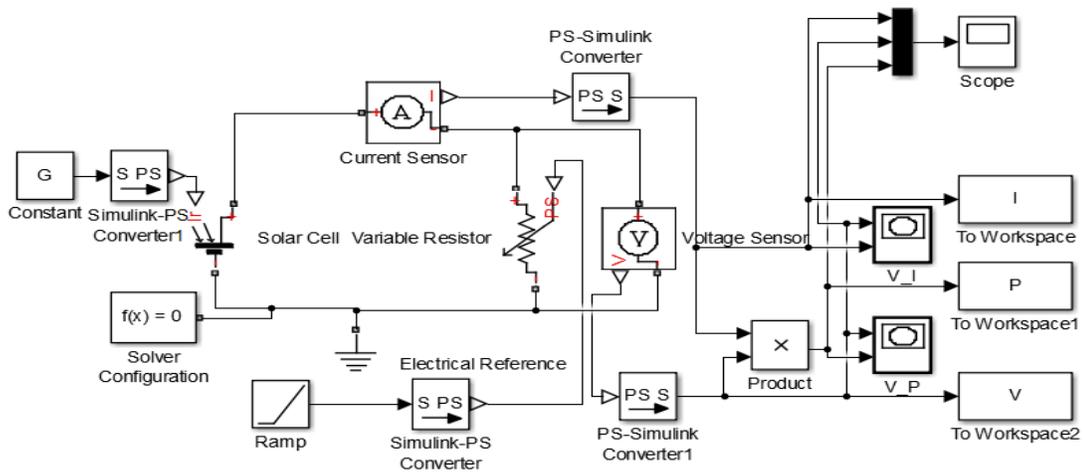


Figure III.4. Modèle de simulation d'un générateur PV

III.4 .2. Simulation du générateur (GPV) à éclairnement et température constante

- *Caractéristique ($I_{P_v} = f(V_{P_v})$) et ($P_{P_v} = f(V_{P_v})$)*

À température et éclairnement constants, et particulièrement aux conditions standards ($G=1000w /m^2$, $25^{\circ}C$). La caractéristique ($I_{P_v} = f(V_{P_v})$) et ($P_{P_v} = f(V_{P_v})$) sont données par la figure (III.5)

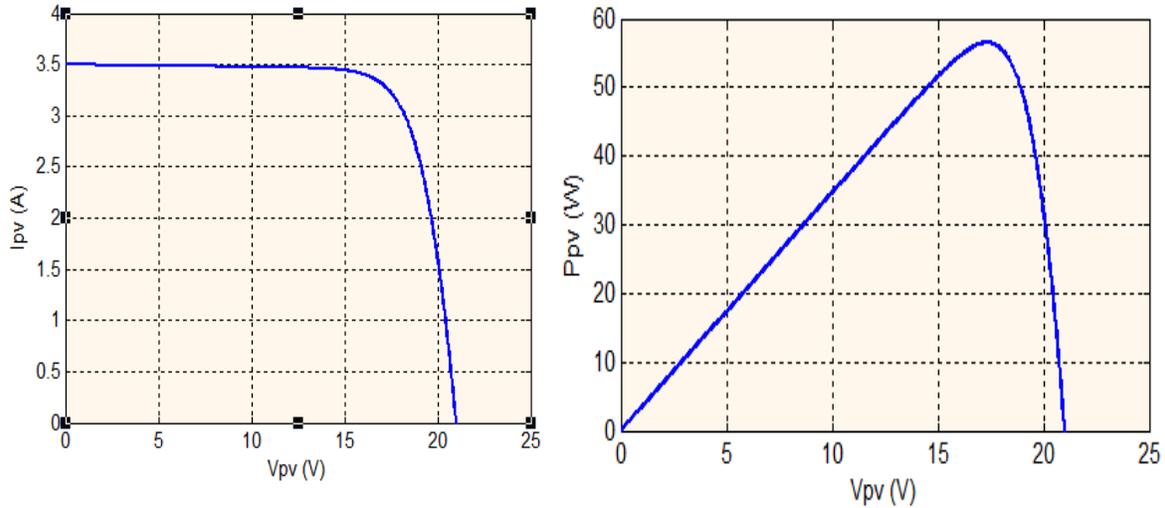


Figure III.5. Caractéristique (courant-tension) et (puissance-tension) du GPV

III.4 .3. Simulation du générateur (GPV) à éclairement et température variable

Afin d'observer l'influence des conditions externes, de l'éclairement 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'éclairement, on fixe la température ambiante (25°C) et on fait varier l'éclairement dans une gamme suffisante.
- Pour un éclairement 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.4.3.1. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique ($I_{PV} = f(V_{PV})$)

En faisant varier l'éclairement (G) entre ($G=400\text{w}/\text{m}^2$ et $G=1000\text{w}/\text{m}^2$) avec un pas de ($G=200\text{w}/\text{m}^2$), la caractéristique ($I_{PV} = f(V_{PV})$) est donnée par la figure (III.7), avec une température ($T=25^{\circ}\text{C}$).

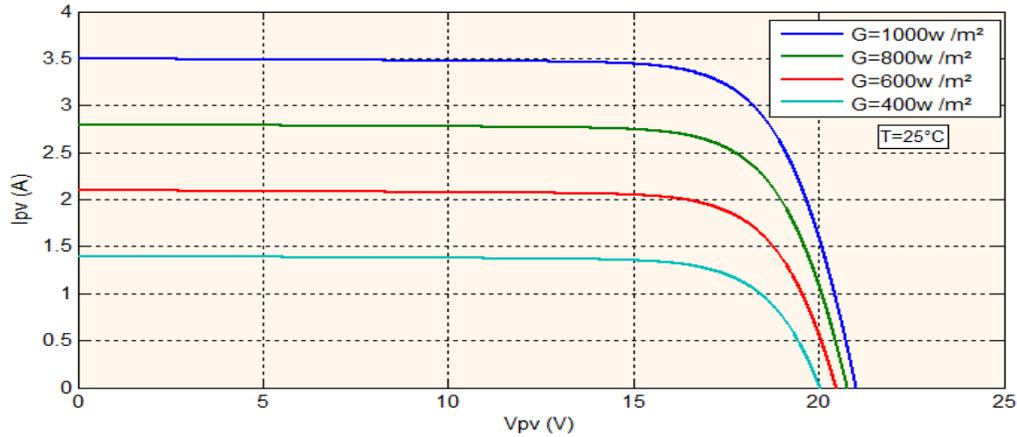


Figure III.6. Influence de l'éclairement sur la caractéristique ($I_{PV} = f(V_{PV})$)

D'après la figure (III.6) 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 ouverte.

III.4.3.2. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique ($P_{PV} = f(V_{PV})$)

En faisant varier l'éclairement (G) entre ($G=200 \text{ w/m}^2$ et $G=1000 \text{ w/m}^2$) avec un pas de ($G=200 \text{ w/m}^2$), la caractéristique ($P_{PV} = f(V_{PV})$) est donnée par la figure (III.8), avec une température ($T=25^\circ\text{C}$).

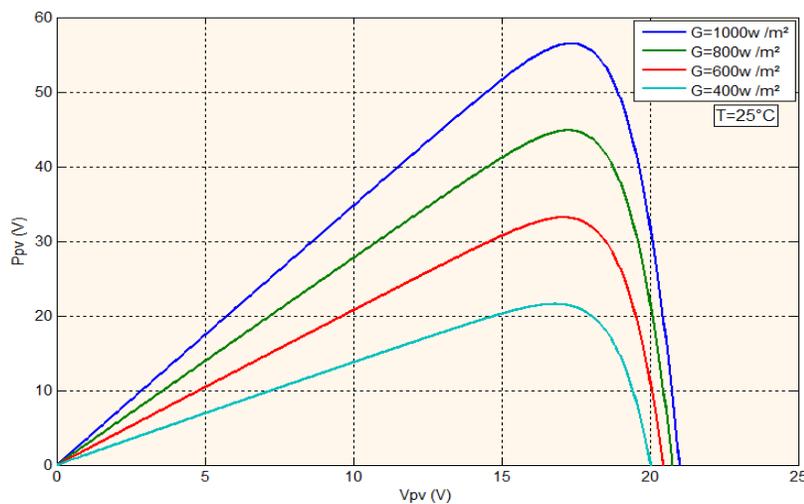


Figure III.7. Influence de l'éclairement sur la caractéristique ($P_{PV} = f(V_{PV})$)

On remarque d'après la figure (III.7) que la variation de l'éclairement influe sur la puissance du **GPV**, plus l'éclairement augmente plus la puissance augmente.

III.4.3.3. L'influence de la température sur la caractéristique ($I_{PV} = f(V_{PV})$)

En faisant varier la température (T) entre (0°C , 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.8) pour un éclairement ($G=1000\text{w}/\text{m}^2$).

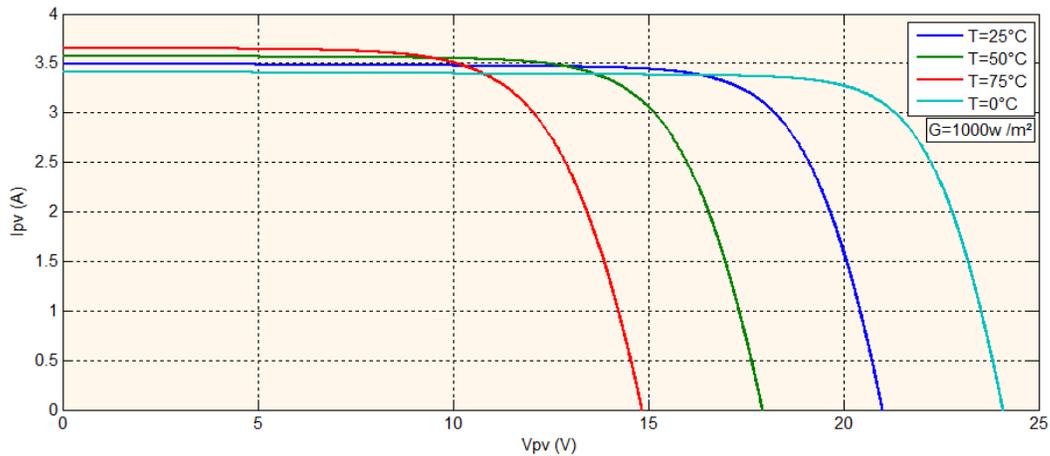


Figure III.8. Influence de la température sur la caractéristique ($I_{PV} = f(V_{PV})$)

On constate d'après la figure (III.8) que la tension à vide d'un module photovoltaïque diminue avec l'augmentation de la température du module PV. Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température du module PV.

III.4.3.4. L'influence de la température sur la caractéristique ($P_{PV} = f(V_{PV})$)

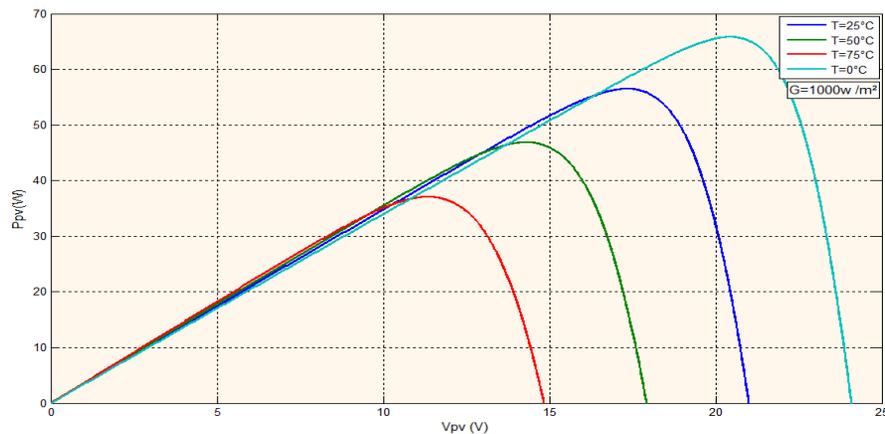


Figure III.9. Influence de la température sur la caractéristique ($P_{PV} = f(V_{PV})$)

En faisant varier la température (T) entre (0°C , 75°C) avec un pas de (25°C), l'influence de celle-ci sur la caractéristique la caractéristique ($P_{Pv} = f(V_{Pv})$) est donnée par la figure (III.9) pour un éclairement ($G=1000\text{w}/\text{m}^2$).

On peut remarquer sur la figure (III.9) que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

III.5. Simulation du system PV 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 ($l = 6\mu\text{H}$)
- Capacité d'entrée ($C = 5\text{mF}$)
- Capacité de sortie ($C = 1\text{mF}$)
- IGBT et une diode de puissance

On a utilisé aussi une commande MPPT de type P&O Charge **RL** ($R = 250\Omega$, $l = 6\text{mH}$)

III.5.1. Schéma de simulation

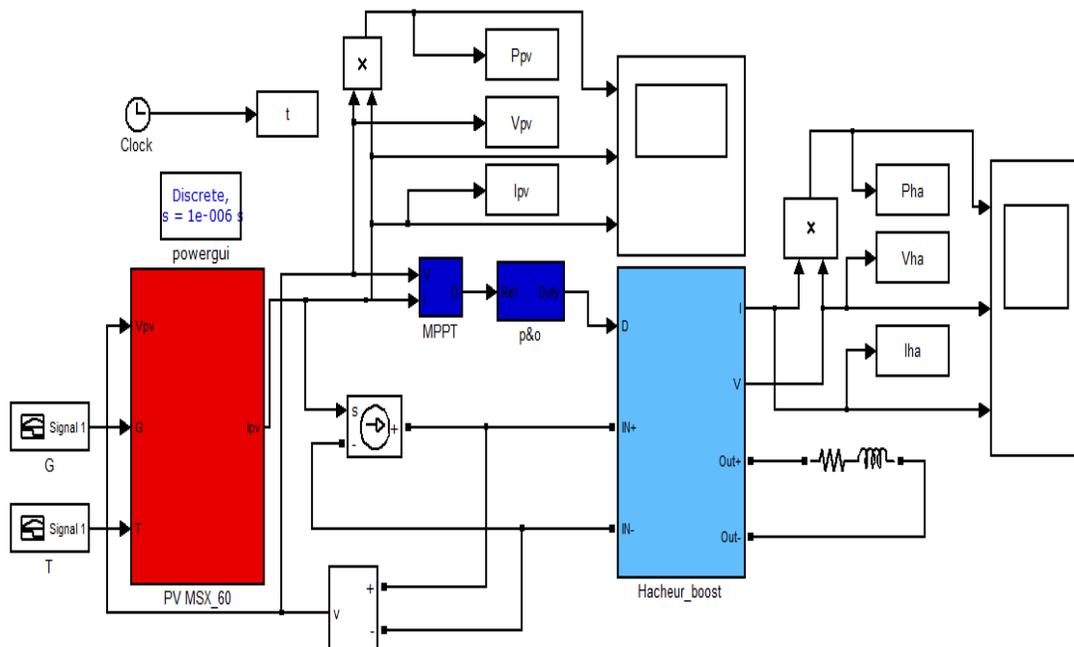


Figure III.10. Schéma de simulation d'un PV avec un hacheur commandé en MPPT

III.5.2. Résultat de simulation

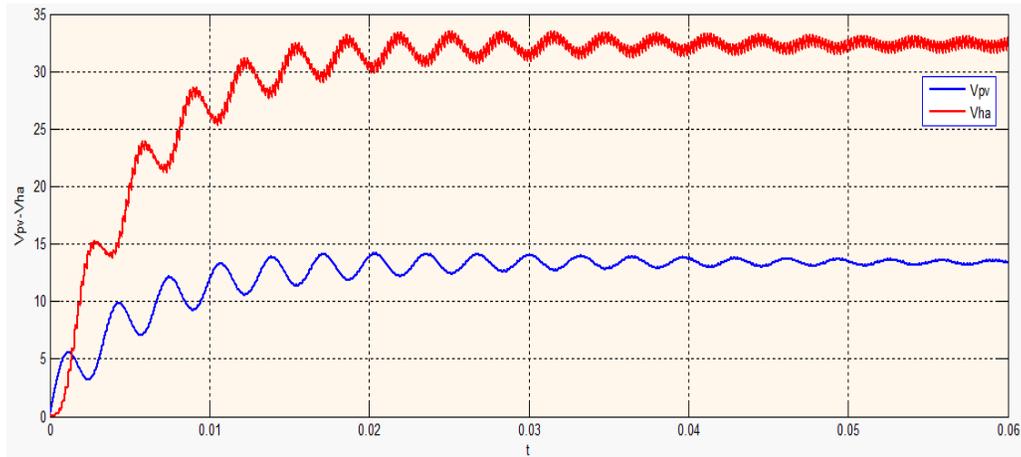


Figure III.11. Caractéristique $V_{PV} = f(t)$ et $V_s = f(t)$ du hacheur boost

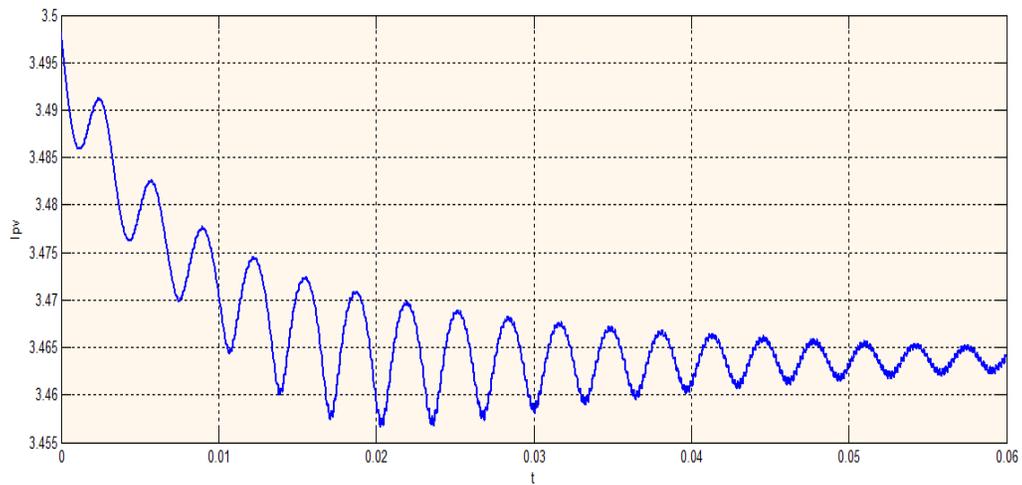


Figure III.12. Le courant du panneau PV

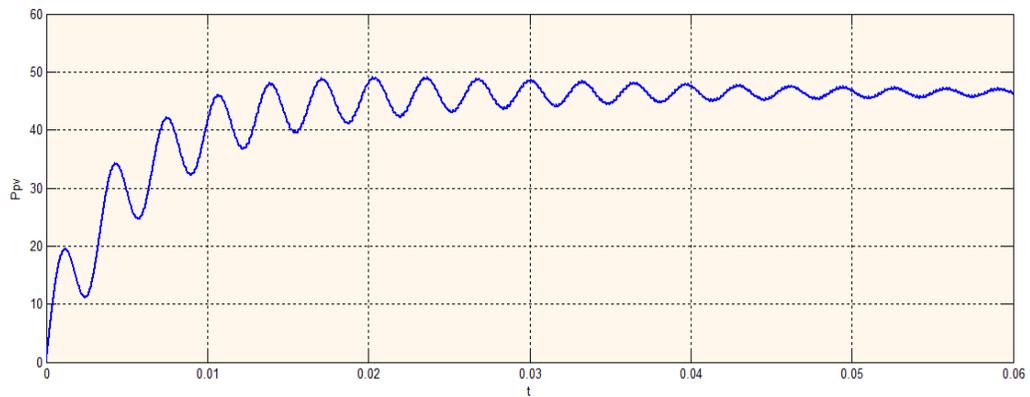


Figure III.13. La puissance du panneau PV

D'après la figure (III.11), on remarque que la tension de sortie du GPV est plus faible par-rapport de tension de sortie du hacheur c.à.d. de faire fonctionner le hacheur comme un hacheur survolteur.

D'après la figure (III. 12), on remarque qu'au départ le courant prend la valeur de court-circuit ensuite il revient la valeur nominale.

Dans la figure (III.13), on remarque que le générateur PV fonctionne en puissance maximale après le régime permanent.

III.6. Simulation globale de système PV en fonctionnement autonome

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

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

On a utilisé aussi une commande MPPT, un onduleur triphasé commandé par la commande MLI et Charge RL ($R = 250\Omega, l = 6mH$).

III.6.1. Schéma de simulation

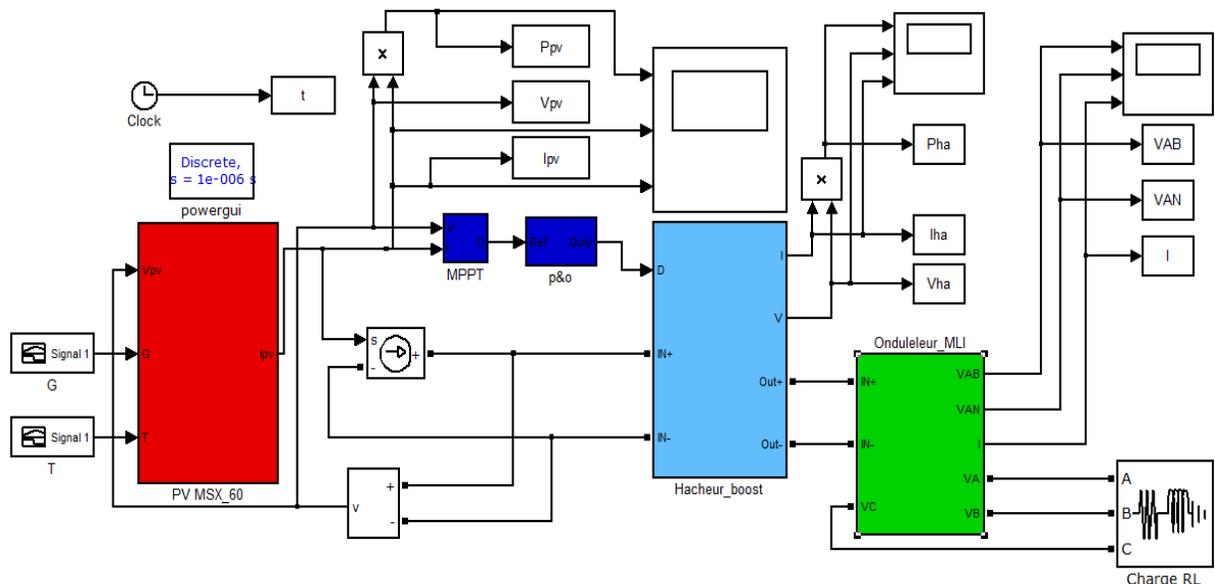


Figure III.14. Schéma de simulation globale PV- hacheur boost-onduleur MLI

III.6.2. Résultat de simulation

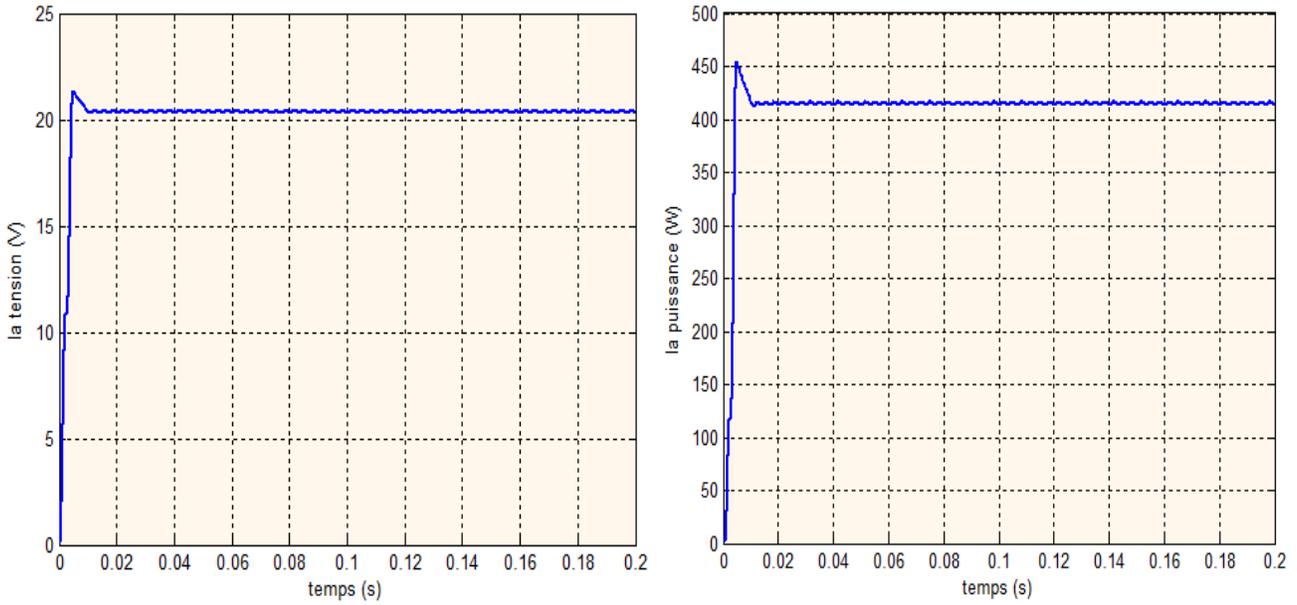


Figure III.15. La tension et la puissance d'entrée de l'onduleur

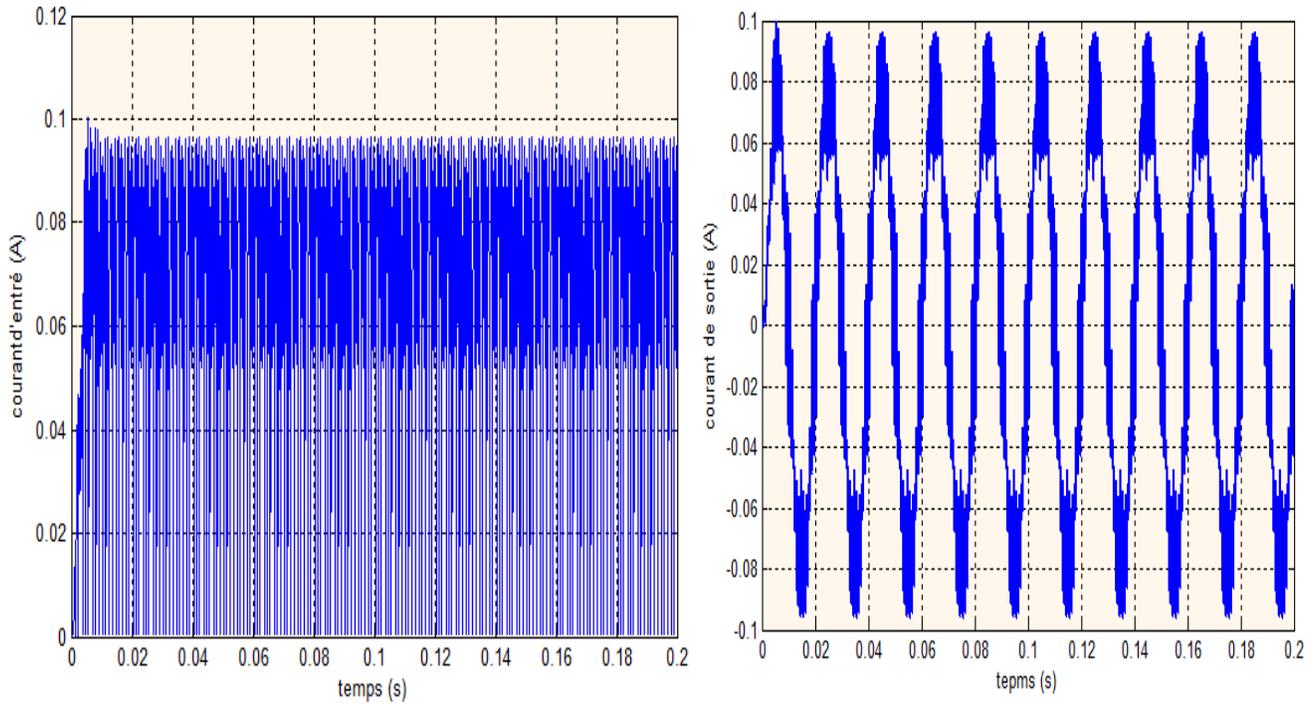


Figure III.16. Le courant d'entrée et la sortie de l'onduleur

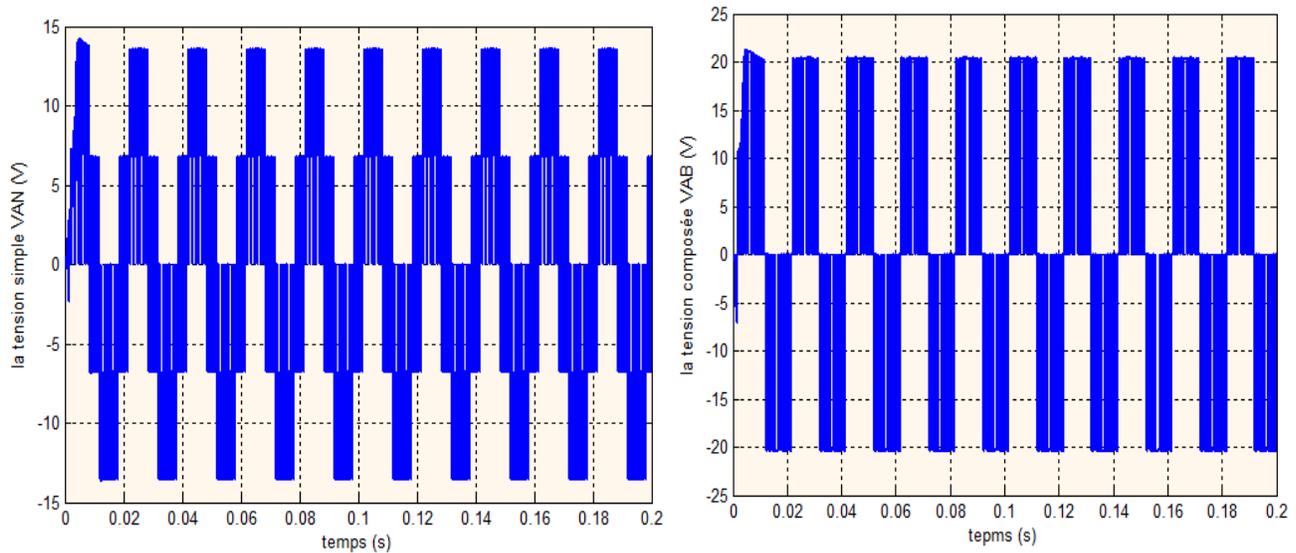


Figure III.17. La tension simple et composé de l'onduleur

D'après la figure (III.15), on remarque que les valeurs de tension et la puissance d'entrée de l'onduleur sont supérieures à celles de PV.

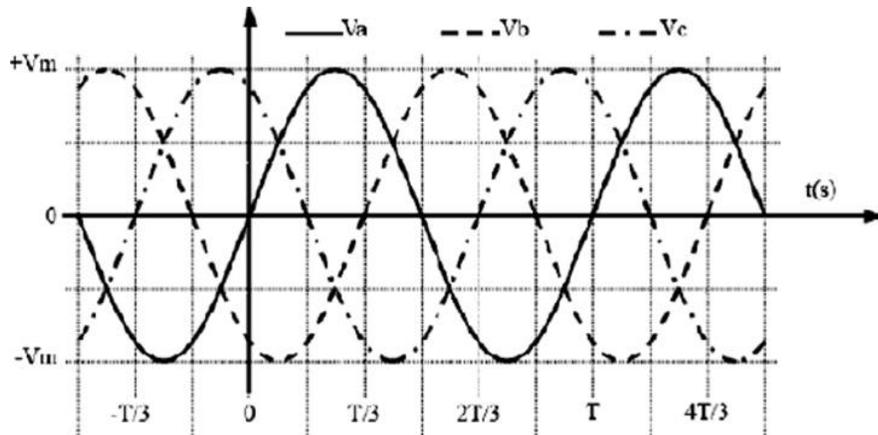
D'après la figure (III.16), on remarque que le courant de sortie de l'onduleur prend la forme sinusoïdale à cause de la charge inductive.

D'après la figure (III.17), on remarque que la valeur max de la tension composé est égale à celle de la tension continu de l'entré ainsi que la forme de la tension simple et la tension composé est découpé.

III.7. Simulation global de PV raccordé au réseau

III.7.1. Modélisation de réseau BT

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



Figur III.18. Système de tension triphasé équilibré

Le réseau de distribution électrique. Il est basé sur un système triphasé de tensions. On peut généralement considérer que $(\mathbf{Vab} \mathbf{Vbc} \mathbf{Vca})$ est un système de tensions triphasé équilibré direct. Il en est de même pour $(\mathbf{Uab} \mathbf{Ubc} \mathbf{Uca})$.

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.7.2. 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.

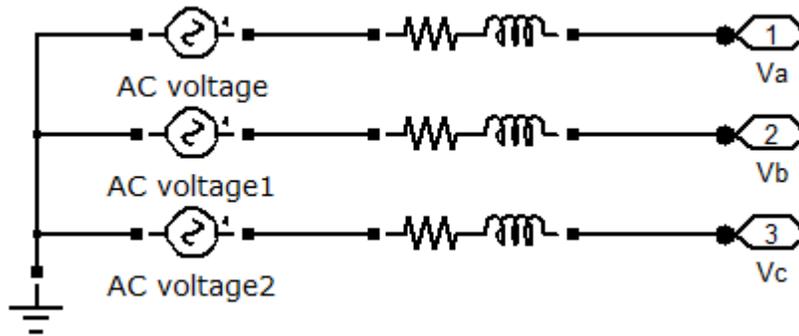


Figure III.19. Schéma de simulation de réseau

III.7.3. 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) [3].

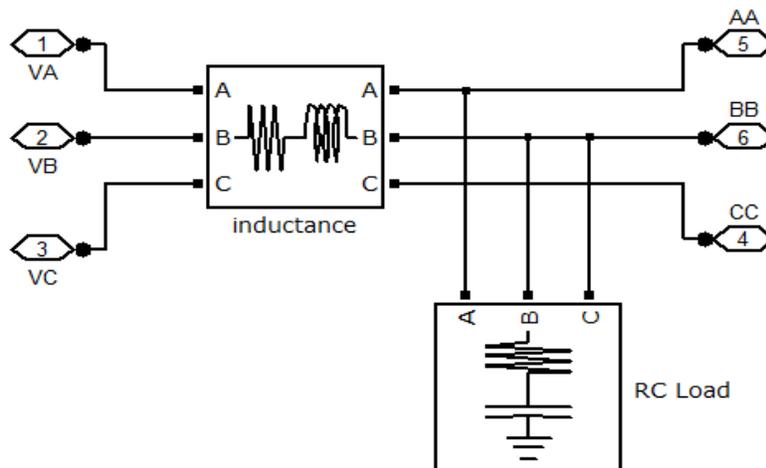


Figure III.20. Schéma de simulation de filtre

III.7.4. Schéma de simulation globale

Dans cette simulation on a utilisé un champ photovoltaïque de $1.18KW$ raccordé à un réseau de $220V/380V$, un hacheur boost caractérisé par : $(l=6 \mu H, C1=5mF, C2=1mF)$ commandé en MPPT de type P&O et un onduleur triphasé commandé en MLI, on a utilisé aussi une charge RL ($R=250\Omega, l=1mH$) et un filtre LC ($l=40mH, C=1F$).

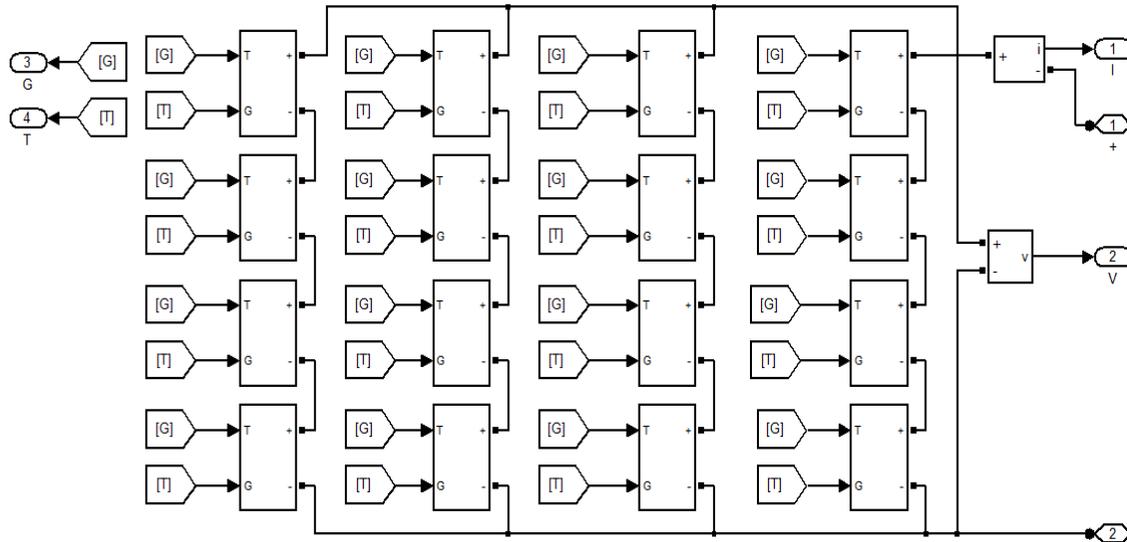


Figure III.21. Schéma de simulation de champ photovoltaïque

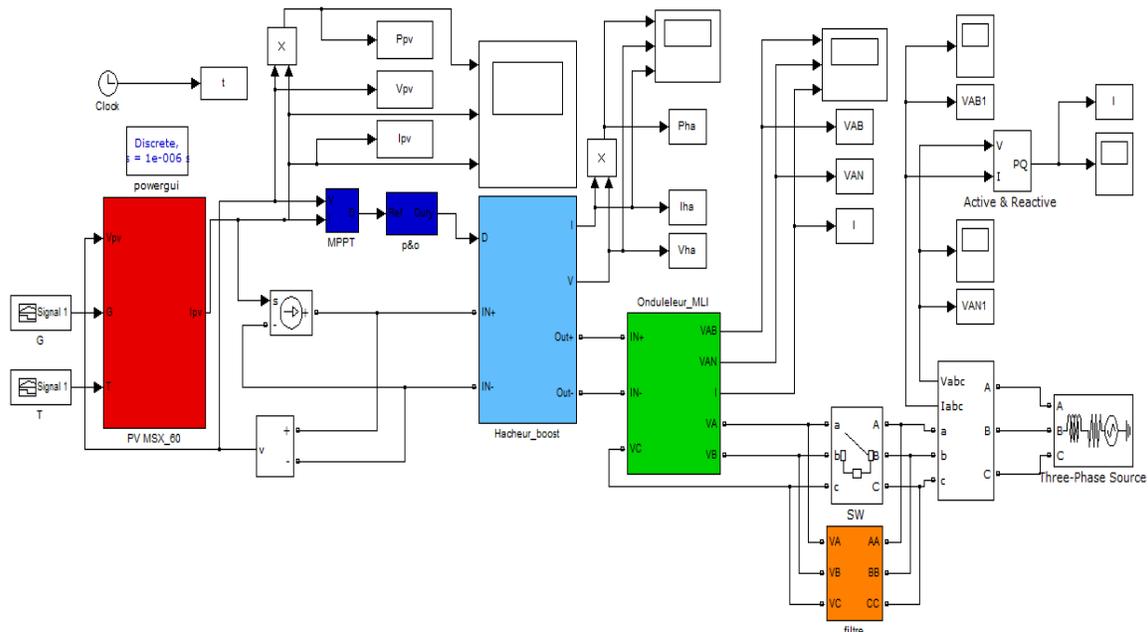


Figure III.22. Schéma de simulation global PV raccordé au réseau

III.7.5. 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).

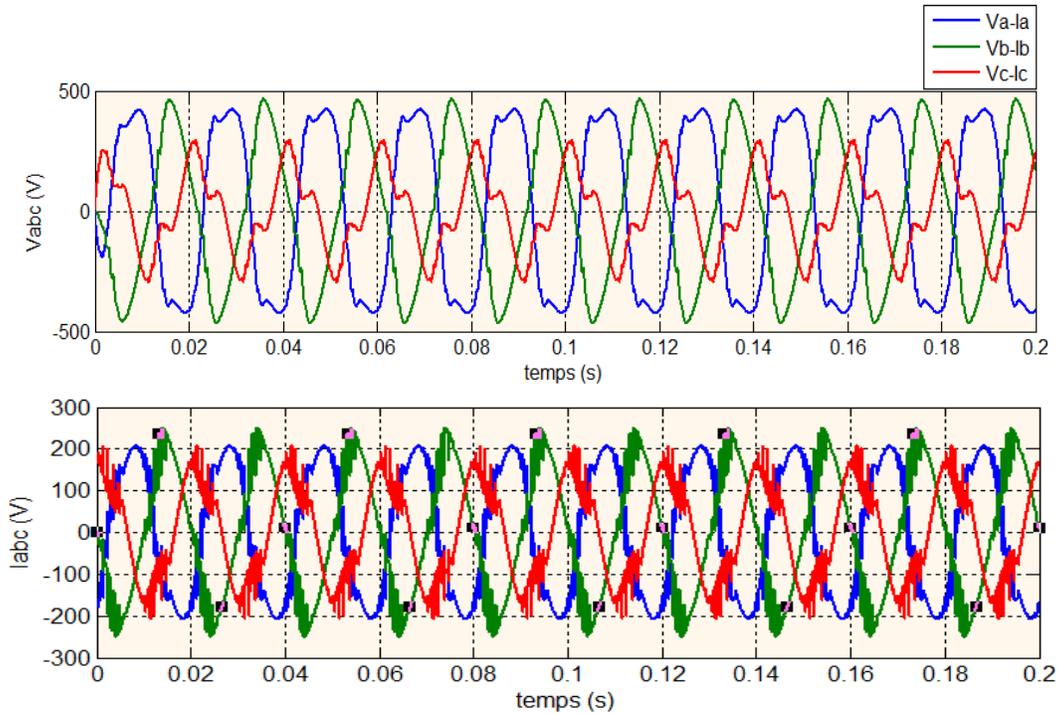


Figure III.23. Les tensions simples et les courants simples de réseau

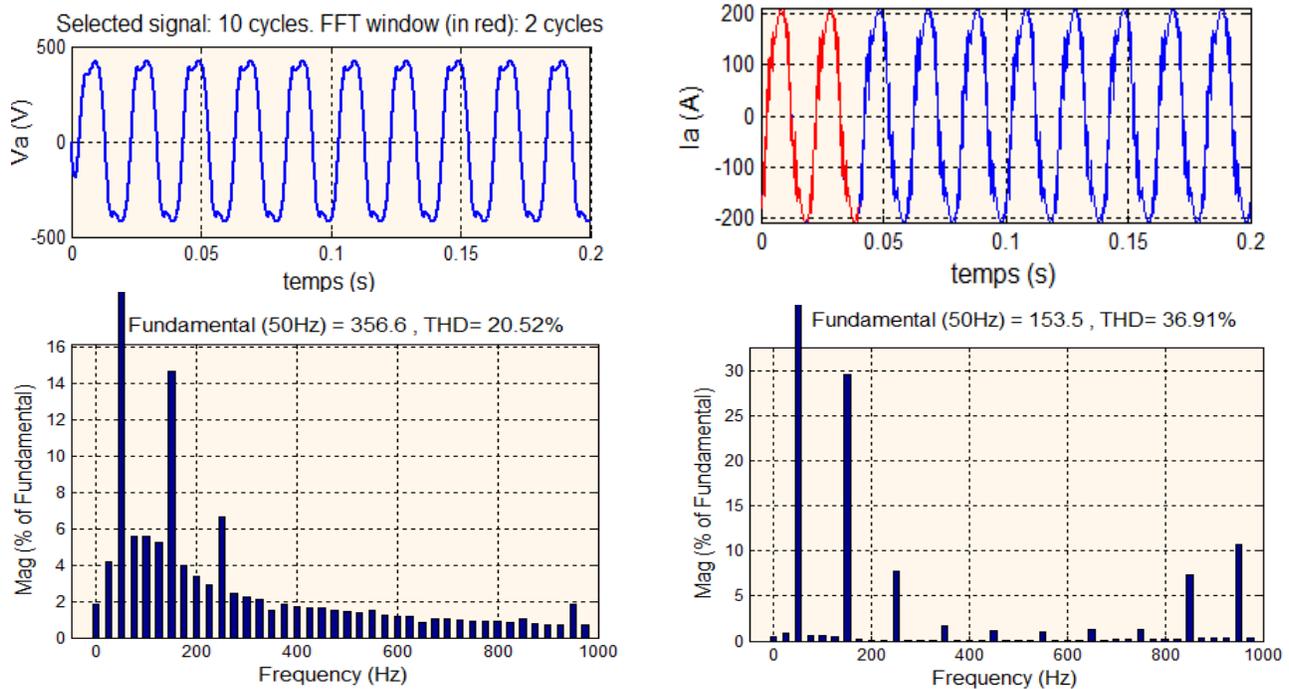


Figure III.24. Analyse spectrale de tension et courant de réseau

D'après la figure (III.23) 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 **20.52%** et pour le courant **36.91%**.

III.7.6. 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).

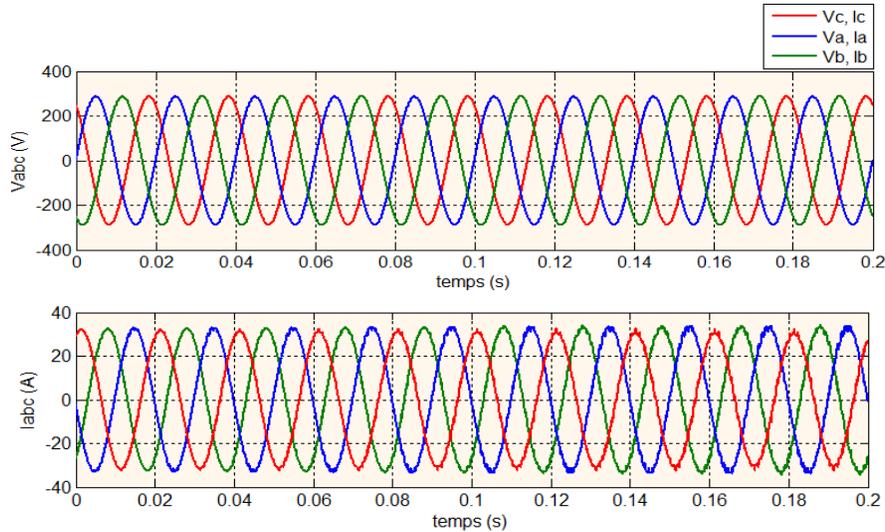


Figure III.25. Les tensions simples et les courants simples de réseau

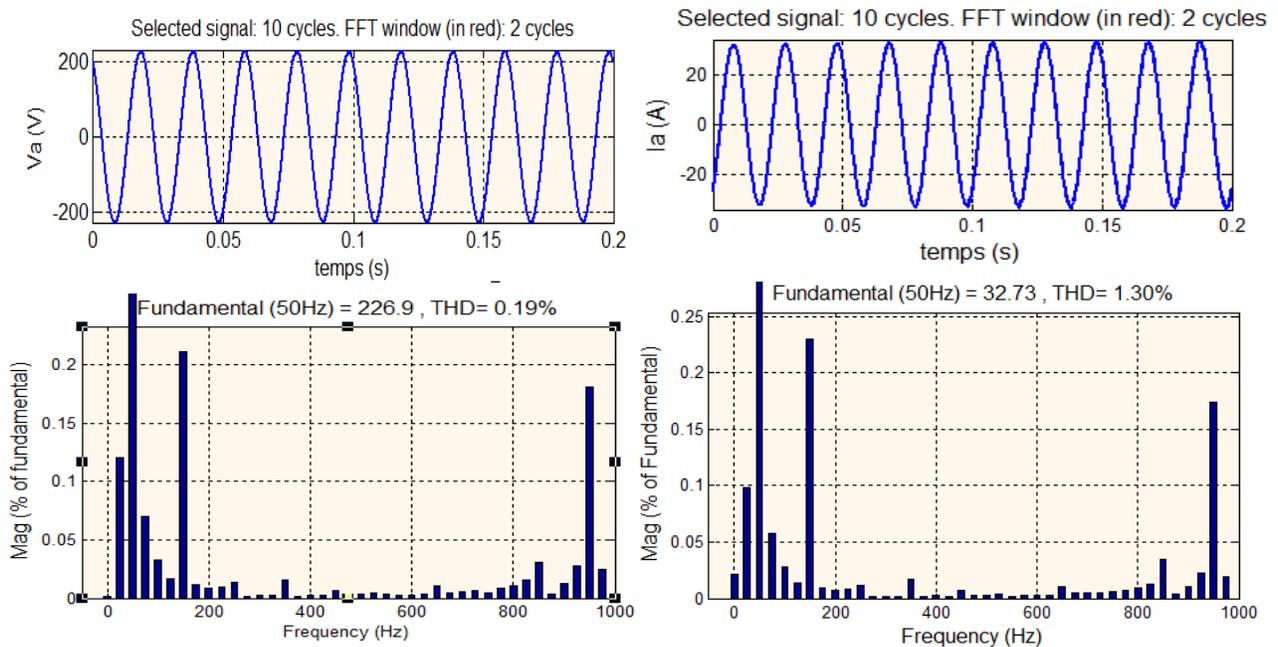


Figure III.26. Analyse spectrale de tension et courant de réseau

D'après la figure (III.25), On observe que l'ajout du filtre améliore bien la forme du courant et de la tension fourni au réseau et le courant et la tension fourni 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 **0.19%** et pour le courant **1.30%**.

III.8. conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté 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 le besoin 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 fournir 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

Le travail qu'on a présenté ouvrir une analyse d'une modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique triphasé moyennant le logiciel *MATLAB Simulink*).

Dans un premier temps, on a donné des généralités sur les systèmes PV, principe de l'effet PV, cellule PV. Ainsi le générateur photovoltaïque et leurs performances.

On a étudié, dans un deuxième temps, quelques types des convertisseurs statiques utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme l'hacheur dévolteur, l'hacheur survolteur, l'hacheur mixte (dévolteur-survolteur) et l'onduleur qui est commandé par *MLI*. Ainsi, on a décrit le mécanisme de la poursuite pour l'extraction de la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement. On a présenté la méthode MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme l'algorithme la méthode de perturbation et observation. Cette dernière est utilisée dans ce travail à cause de sa simplicité, et son exigence seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque.

Un convertisseur *DC-DC* fournissant une tension continue réglable et un convertisseur *DC-AC* commandé par la *MLI*, pour transformer l'énergie de forme continu à la forme alternative puis filtrée par l'intermédiaire d'un filtre *LC*, ce système sert à injecter de la puissance au réseau de distribution. 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.

Finalement, on a étudié la modélisation du système photovoltaïque. Pour ce la, on a étudié d'abord la modélisation du générateur PV par la résolution de l'équation caractéristique non linéaire d'une cellule PV et les convertisseurs statiques.

- **Caractéristiques électriques du module MSX_60 monocristallin.**

éclairage standard	G 1000W/m ²
Température standard	T 25°C
Puissance maximale P_{max}	60W
Tension à P_{max} ou tension optimale (V_{opt})	17.1 V
Courant à P_{max} ou courant optimal (I_{opt})	3.5 A
Courant de court-circuit I_{cc}	3.8 A
Tension à circuit ouvert V_{co}	21.1 V
Nombre des cellules en séries N_s	36
Coefficient de température de I_{cc}	65 mA/ °C
Coefficient de température de V_{co}	-80mV/ °C
Coefficient de température de puissance	(0.5 ±0. CC5)% /°C
Courant de saturation I_{sat}	20 nA

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] M. Abdelaziz Hamzaoui, « Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour site isolé », Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne.
- [2] Stéphane VIGHETTI, «Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion », Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 24 septembre 2010.
- [3] M. Yousef, «Etude de raccordement d'un système photovoltaïque au réseau électrique», Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2015.
- [4] ABBASSEN Lyes, «Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque», Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammri de Tizi Ouzou, le 05/05/2011.
- [5] Ayache Khedidja, «Modélisation et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Couplé à un Réseau Électrique», Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaâdia de Souk-Ahras, le 30/09/2014.
- [6] W. Boucheritte, « Convertisseurs multi niveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau», Mémoire de Magistère, Université de Biskra.
- [7] M. Makhoulf, « Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie Photovoltaïque application au pompage », Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2006.
- [8] 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.
- [9] Y. Pankow, « Etude de l'intégration de la production décentralisé dans un réseau basse tension». Thèse de doctorat de l'école National supérieure d'Art et Métiers, décembre 2004.
-

Référence Bibliographiques

- [10] Office fédéral des questions conjoncturelles, « centrales photovoltaïques », guide pour le dimensionnement et la réalisation des projets à l'usage des bureaux des ingénieurs.
- [11] M. Mchalikh et CH.Hmada, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau», Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla 2013.
- [12] N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT» Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.
- [13] Z. Azeddine, «Etude expérimentale d'un convertisseur DC/DC contrôlé par une commande robuste», Mémoire de Magister, Université de Batna.
- [14] D. Ahmed, «Modélisation et commande d'une chaine traction d'une véhicule électrique», Mémoire de Magister, Université de Moulay Tahar de Saida, le 29/10/2005.
- [15] BELHADJ Mohammed. «Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome», Mémoire de Magister, Université de Bechar, 2008.
- [16] N.Touil et S.ghenbazi, «Modélisation et Simulation d'un système Photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 2015.
- [17] F.Slama. « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique», Mémoire de Magister Université de Ferhat Abbas – Setif, le 01/04/2011.
- [18] 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.
- [19] T. Youssef, «Commande aléatoire du convertisseur Buck-Boost triphasé à prélèvement sinusoïdal du courant », Thèse de Doctorat, Université de Clermont-Ferrand, 2006.
- [20] BERREZZEK FARID, «Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone», Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba,2006
-

ملخص :

يقدم هذا العمل دراسة لربط نظام توليد ضوئي موصول بالشبكة الكهربائية ثلاثية الطور، ويعمل هذا النظام على حقن

الطاقة المولدة بواسطة المولد الضوئي في نظام تحويل على طابقين ويتألف 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 (boost) - متناوب، وحدة التحكم (MPPT)، الشبكة الكهربائية.

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 (boost), convertisseur DC-AC, MPPT, réseau électrique.

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 withe 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 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.

