

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



Mémoire de Fin d'Étude

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Réseaux électriques

Présenté par

AMRANI Abderrahim et BEN GLIA Ramdane

Thème

Modélisation et Optimisation d'un système photovoltaïque interconnecté au réseau électrique

Soutenu le 28/05/2017. Devant le jury composé de :

Dr. BKAKRA Yousef

Maitre de conférences Président

Mr. ALAG Meriam

Maitre de conférences Rapporteur

Dr. LABBI Yacine

Maitre de conférences Examineur

Dédicaces

A mes chers parents

A mon cher frère, à mes soeurs,

Et à tous mes amis.

Remerciements

nous voudrions exprimer nos profonde reconnaissance et nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'avancement de notre travail de recherche.

Nous tenons à remercier profondément notre directeur de recherche, Dr. LABI YACINE, pour la confiance qu'il a bien voulu nous accorder en acceptant de diriger ce travail et pour nous avoir guidé tout au long du mémoire pour ses conseils, ses critiques et son attitude exemplaire tout au long de la réalisation de ce travail de recherche.

Aussi, nous remercions les membres de jury d'avoir accepté d'examiner ce travail et tous les individus de département du génie électrique de l'Université Chahid Hamma Lakhidar. El Oued.

Finalement, nous tenons à remercier tous les membres de nos familles pour leur soutien et leur aide . Nous leur serons reconnaissants toute notre vie.

Liste des symboles

λ :	longueur d'onde en mètre
h :	Constante de Planck
C :	la vitesse de lumière
E :	énergie de photon
η_{STC} :	Le rendement de la cellule photovoltaïque
P_m :	La puissance produite par le générateur PV
E_{STC} :	L'éclairement absorbé par la cellule
$S_{cellule}$:	La surface de la cellule [m ²]
I_{ph} :	le photo courant
I_d :	le courant de diode
V :	la tension imposée sur la diode
I_0 :	la saturation inverse ou le courant de fuite de la diode (A)
T_c :	la température réelle de la cellule (K)
K :	Boltzmann constant $1.381 \cdot 10^{-23}$ J / K
q :	la charge d'électrons ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C)
V_T :	la tension thermique en raison de son utilisation exclusive dépendance de la température
N_s :	le nombre de cellules PV connectées en série
A :	le Facteur d'idéalité
I_p :	la fuite actuelle en résistance parallèle
R_p :	Résistance shunt de la cellule PV
R_s :	Résistance série de la cellule PV
V_{oc} :	Tension du circuit ouvert
$I_{SC}=I_{cc}$:	courant de court circuit
N_p :	Nombres des cellules en parallèle
G :	Irradiation (w/m ²)
G_{ref} :	Irradiation à STC =1000(w/m ²)
$I_{ph,ref}$:	Photo courant (A) à STC
R_L :	Résistance de filtres
L :	Inductance de filtres
E_g :	Énergie de Gap du matériel de la cellule PV en [ev]

I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque

V_{pv} : La tension de sortie d'un panneau photovoltaïque

Liste de tableaux

- Tableau I.1:** différents types des cellules avec leur rendement
- Tableau II.1:** facture d'idéalité
- Tableau II.2:** caractéristique PWX 500 PV module (49 W)
- Tableau IV.1:** Tensions en sortie de l'onduleur

Abréviation utilisées

PV:	Photovoltaïque
GPV:	Générateur Photovoltaïque
MPPT:	Maximum Power Point Tracking
P&O:	Perturbation et Observation
DC:	Courant Continu (Direct Current)
AC:	Courant Alternatif (Alternative Current)
CDER:	Centre de Développement des Énergies Renouvelable
STC:	Conditions de tests standard 'Standard Test Conditions
MPP:	Point de fonctionnement optimal 'Maximum Power Point

Sommaire

Introduction Générale.....	01
chapitre I: Les systèmes photovoltaïques	
I.1. Introduction.....	03
I.2. Les ressources des énergies renouvelables.....	03
I.2.1. Définition d'énergie renouvelable.....	04
I.3. L'énergie solaire.....	04
I.3.1. Rayonnement solaire.....	05
I.3.2. Spectre du rayonnement.....	06
I.4. Description d'un système photovoltaïque.....	07
I.4.1. Historique.....	07
I.4.2. Semi-conducteur.....	07
I.4.2.1. Formation de jonction PN.....	07
I.4.2.2. principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque.....	08
I.4.2.3. Type et rendement.....	09
I.5. Le générateur photovoltaïque.....	10
I.5.1. protection classique d'un générateur photovoltaïque.....	10
I.6. Les système photovoltaïque.....	11
I.6.1. Les système photovoltaïque avec stockage électrique.....	11
I.6.2. Les système a couplage direct son barrie.....	12
I.7. Secteur d'application.....	13
I.8. Les avantages et les inconvénients.....	13
I.8.1. Avantages.....	13
I.8.2. inconvénients.....	14
I.9. Conclusion.....	14
chapitre II: Modélisation d'un système photovoltaïque et l'étage d'adaptation	
Modélisation d'un système photovoltaïque	
II.1. Introduction.....	15
II.2. Circuit équivalent d'une cellule solaire.....	16
II.3. Détermination des paramètres.....	18
II.3.1. Détermination de I_{ph}	18
II.3.2. Détermination I_0	19
II.4. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV).....	22
II.4.1. Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle.....	22

II.4.2. Association des Cellules Photovoltaïques en Série.....	22
II.4.5. Influence de l'Éclairement.....	24
II.4.6. Influence de la Température	25
II.4.7. Influence de la résistance série.....	25
II.4.8. Influence de Eclairement et température.....	26
II.4.9. Influence de facteur d'idéalité.....	26
II.5. Étage d'adaptation d'un générateur photovoltaïque à la charge	27
II.5.1. Introduction.....	27
II.5.2.Connexion directe source-charge.....	27
II.5.3. Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge.....	27
II.5.4. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs).....	28
II.5.4.1. Hacheur dévolteur.....	30
II.5.4.2. Hacheur survolteur.....	32
II.5.4.3. Hacheur dévolteur-survolteur.....	33
II.6.conclusion.....	35

chapitre III: Techniques de poursuite du point de puissance maximale MPPT

III.1. introduction.....	36
III.2. Principe de fonctionnement de MPPT.....	36
III.3. Classification de l'algorithme de suiveur la puissance max.....	39
III.3.1. Les méthodes indirectes.....	39
III.3.1.1. La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur.....	39
III.3.1.2. La méthode de court-circuit.....	40
III.3.2. Les méthodes directes.....	40
III.3.2.1. La méthode Perturbe & Observe (P&O).....	40
III.3.2.2.La méthode incrémentation de la conductance.....	42
III.4. Structure et simulation de la commande MPPT numérique « P&O ».....	44
III.4.1. structure de la commande « perturbation et observation ».....	44
III.4.2. Simulation de la méthode MPPT.....	45
III.5.conclusion.....	46

chapitre IV: Système photovoltaïque connecté au réseau électrique

IV.1. Introduction.....	47
IV.2. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs).....	48
IV.3. Hacheur survolteur.....	49
IV.4. Modélisation et simulation du hacheur survolteur	48
IV.4.1. Modélisation de hacheur survolteur	49
IV.4.2. simulation de hacheur survolteur.....	51
IV.5. Convertisseurs Continus-Alternatifs.....	52
IV.5.1. L'onduleur de tension.....	53
IV.5.2.Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	54
IV.5.3. Modélisation de l'onduleur	56

IV.6.Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge)	57
IV.6.1. un système photovoltaïque sans la commande MPPT (P&O).....	58
IV.6.2.un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O).....	61
IV.7.Conclusion.....	66
Conclusion général.....	67
Bibliographies.....	68

Liste de figure

Figure I.1:	Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.....	06
Figure I.2:	spectre solaire hors atmosphère.....	06
Figure I.3:	Génération de la paire électron-trou.....	08
Figure I.4:	La jonction PN.....	08
Figure I.5:	Structure d'une cellule photovoltaïque.....	09
Figure I.6:	Les images de différents types de la cellule photovoltaïque.....	10
Figure I.7:	Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.....	11
Figure I.8:	Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec stockage.....	11
Figure I.9:	Schéma synoptique d'un système photovoltaïque à couplage direct	12
Figure I.10:	Schéma synoptique d'un système photovoltaïque.....	13
Figure II.1:	Le circuit équivalent d'une cellule solaire et d'un dispositif photovoltaïque.....	17
Figure II.2:	Iteration flow chart	20
Figure II.3:	Déploiement I_{ph} détaillé.....	20
Figure II.4:	Déploiement $I_{0,ref}$ détaillé.....	20
Figure II.5:	Déploiement I_0 détaillé.....	21
Figure II.6:	Déploiement I_{pv} détaillé.....	21
Figure II.7:	présentation de module PV.....	21
Figure II.8:	Schéma de 2 cellules photovoltaïques associées en parallèle.....	22
Figure II.9:	Caractéristique I-V des cellules PV raccordées en parallèle.....	22
Figure II.10:	Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en parallèle.....	22
Figure II.11:	Schéma de 2 cellules photovoltaïques associées en série	23
Figure II.12:	Caractéristique P-V des cellules photovoltaïques raccordées en série.....	23
Figure II.13:	Caractéristique I-V des cellules photovoltaïques raccordées en série.....	23
Figure II.14:	Schéma d'une partie de la centrale de production d'électricité d'un système photovoltaïque installé au CDER.....	23
Figure II.15:	Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque.....	24

Figure II.16:	Caractéristique P-V d'un générateur photovoltaïque.....	24
Figure II.17:	Caractéristique P-V du module PV selon l'éclairement.....	25
Figure II.18:	Caractéristique I-V du module PV selon l'éclairement.....	25
Figure II.19:	Caractéristique P-V du module PV selon la température.....	25
Figure II.20:	La caractéristique I-V du module PV selon la température.....	25
Figure II.21:	Caractéristique P-V de module PV selon la résistance série	26
Figure II.22:	Caractéristique I-V de module PV selon résistance série	26
Figure II.23:	Caractéristique P-V de module PV selon Eclairement et température	26
Figure II.24:	Caractéristique I-V de module PV selon Eclairement et température.....	26
Figure II.25:	Caractéristique I-V de module PV selon facteur d'idéalité	26
Figure II.26:	Connexion directe source-charge.....	27
Figure II.27:	Étage d'adaptation entre un GPV et une charge.....	28
Figure II.28:	Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage.....	29
Figure II.29:	Schéma d'un quadripôle électrique.....	29
Figure II.30:	périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.....	30
Figure II.31:	Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur.....	30
Figure II.32:	Schémas équivalents du hacheur dévolteur	31
Figure II.33:	Schéma de principe d'un convertisseur Boost.....	32
Figure II.34:	Schémas équivalents du hacheur survolteur.....	32
Figure II.35:	Convertisseur dévolteur-survolteur.....	33
Figure II.36:	Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur.....	33
Figure III.1:	La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM.....	37
Figure III.2:	Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.....	37
Figure III.3:	et recouvrement du Point Puissance Maximale (a) suite à une variation d'éclairement,(b) suite à une variation de charge,(c) suite à une variation de température.....	38
Figure III.4:	Schéma de converge vers le PPM par P&O.....	41
Figure III.5:	Algorithme de MPPT a base de la méthode P&O la nouvelle puissance.....	41
Figure III.6:	Trajectoire par Incrémentation de Conductance.....	43
Figure III.7:	Algorithme d'incrémentation de la conductance.....	43
Figure III.8:	Algorithme de la méthode MPPT « perturbation-observation »....	45

Figure III.9:	Schéma block de la commande MPPT.....	45
Figure III.10 :	Signal commande MPPT.....	46
Figure IV.1:	Système PV connecté au réseau électrique.....	47
Figure IV.2:	Schéma de principe d'un convertisseur Boost.....	48
Figure IV.3:	Schémas équivalents du hacheur survolteur.....	49
Figure IV.4:	Convertisseur (DC/DC) survolteur de tension (type Boost).....	50
Figure IV.5:	Schéma block d'un convertisseur survolteur.....	51
Figure IV.6:	Signal commande DC/DC (gâchette- d'hacheur).....	51
Figure IV.7:	Résultats de simulation de la tension d'entrée du hacheur survolteur.....	52
Figure IV.8:	Résultats de simulation de la valeur moyenne de la tension de sortie du hacheur survolteur.....	52
Figure IV.9:	Résultats de simulation de la valeur moyenne du courant de sortie du hacheur survolteur.....	52
Figure IV.10:	Onduleur de courant.....	53
Figure IV.11:	Onduleur de tension.....	53
Figure IV.12:	Filtre actif à structure tension.....	53
Figure IV.13:	Principe de commande par MLI.....	55
Figure IV.14:	Signal de commande et référence.....	55
Figure IV.15:	Onduleur de tension avec filtre L.....	55
Figure IV.16:	Position d'un onduleur en pont-H dans la chaîne PV connectée au réseau.....	56
Figure IV.17:	Diagramme de phase.....	57
Figure IV.18:	<i>Schéma block globale</i>	57
Figure IV.19:	Signal commande DC/DC (gâchette- d'hacheur).....	58
Figure IV.20:	<i>Courant généré par le générateur photovoltaïque</i>	58
Figure IV.21:	<i>la tension générée par le générateur photovoltaïque</i>	58
Figure IV.22:	<i>Résultats de simulation de la puissance générée par le générateur photovoltaïque</i>	59
Figure IV.23:	<i>Résultats de simulation de la tension de sortie hacheur du système PV.....</i>	59
Figure IV.24:	<i>Résultats de simulation du courant de sortie hacheur du système PV.....</i>	59
Figure IV.25:	<i>Résultats de simulation de la puissance hacheur de sortie du système PV.</i>	60
Figure IV.26:	<i>Résultats de simulation du courant de sortie onduleur du système PV.....</i>	60

Figure IV.27:	<i>Résultats de simulation de la tension sortie onduleur du système PV.....</i>	60
Figure IV.28:	<i>Résultats de simulation de la courant de réseau électrique 3Φ.....</i>	61
Figure IV.29:	<i>La tension de référence.....</i>	61
Figure IV.30:	Signal commande MPPT	62
Figure IV.31:	Courant généré par le générateur photovoltaïque.....	62
Figure IV.32:	La tension générée par le générateur photovoltaïque.....	62
Figure IV.33:	La puissance générée par le générateur photovoltaïque.....	63
Figure IV.34:	La tension de sortie hacheur du système PV.....	63
Figure IV.35:	Courant de sortie hacheur du système PV.....	63
Figure IV.36:	Courant de sortie onduleur du système PV.....	64
Figure IV.37:	La tension sortie onduleur du système PV.....	64
Figure IV.38:	La courant de réseau électrique 3 Φ	64
Figure IV.39:	La tension référence.....	65
Figure IV.40:	La tension générée parle générateur photovoltaïque.....	65
Figure IV.41:	Courant généré par le générateur photovoltaïque.....	65
Figure IV.42:	La puissance générée parle générateur photovoltaïque.....	65
Figure IV.43:	La tension de sortie hacheur.....	66

Introduction générale :

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. 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. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures [1].

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue [1].

L'exploitation directe de l'énergie solaire au moyen des capteurs relève de deux technologies bien distinctes : l'une produit des calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre produit de l'électricité, et c'est cette dernière énergie solaire photovoltaïque qui fait l'objet de ce mémoire [1].

A travers l'effet photovoltaïque, l'énergie fournie est très variable et est toujours en courant continu: il faut souvent la stocker et parfois la transformer. L'association des centrales PV connectées au réseau électrique se fait à l'aide d'un convertisseur. Dans le cadre de notre travail, nous traitons l'une des structures les plus recommandées dite « onduleur de tension » qui sera utilisé pour injecter l'énergie électrique issue d'une source PV vers le réseau de distribution [1]. Cette mémoire comporte quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, les systèmes photovoltaïques est exposée. De plus, une description générale sur les éléments d'un système de captage photovoltaïque.

Dans le deuxième chapitre, on va **étudier la Modélisation d'un système photovoltaïque et étage d'adaptation.**

Dans le troisième chapitre nous présentons quelques méthodes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) des panneaux solaires.

Dans le dernier chapitre, on étudie l'échange d'énergie entre le panneau photovoltaïque et le réseau électrique grâce à l'étude comportementale d'un onduleur.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et de simulation.

Chapitre I

Les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction :

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie [2]. c'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Le nom Photovoltaïque vient du Grec, il est composé de deux parties:

Photos : Lumière.

Volt : Unité de tension électrique, du nom Alessandro volta.

Ce phénomène fut découvert au 19^{ème} siècle par le physicien [Alexandre Edmond Becquerel]. La première cellule photovoltaïque fut développée début 1954 pour l'alimentation en énergie des satellites. depuis 1958, les cellules photovoltaïques alimentent seulement le système énergétique des satellites jusqu'à ses premières applications terrestres au début des années 70. Le photovoltaïque fut utiliser pour l'alimentation en énergie de petites maisons isolées et d'équipements de télécommunications. [3]

Aujourd'hui, grâce à sa fiabilité et à son concept respectueux de l'environnement, le photovoltaïque prend une place prépondérante.

Pour comprendre ce phénomène, nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur le rayonnement solaire et les propriétés des semi-conducteurs ; matériaux de base des cellules photovoltaïques.

Une fois ces rappels théoriques sont faits, il nous sera facile d'expliquer le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque en passant au système photovoltaïque complet et à ses trois types à savoir [4]:

- Les systèmes autonomes,
- Les systèmes connectés au réseau,
- Les systèmes fonctionnant au fil du soleil (Pompage PV).

I.2. Les ressources des énergies renouvelables :

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte

croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Ces énergies satisfont quant à elles 13 % de la demande, dont 10 % pour hydraulique. Comparé aux énergies classiques (fossiles et nucléaires), les énergies renouvelables présentent le double avantage de ne pas être source d'émissions de gaz à effet de serre lors de leur utilisation et de présenter des gisements renouvelables donc inépuisables. ce sont des énergies de flux, par opposition aux énergies dites de stock (gaz, fioul, charbon, uranium, ...) [5]. La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement [6-7].

I.2.1. Définition d'énergie renouvelable :

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) c'est-à-dire, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation [6], [8].

Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...), à l'échelle de la durée de vie de humanité .Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires [5-6], [9].

1.3. L'énergie solaire :

La distance de la terre au soleil est environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h [10], les rayons du soleil mettent donc environ 8minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément a le à 1360 W/m^2 . Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduit à 1000 W/m^2 à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein à découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation:

$$E = (h * C) / \lambda \quad (\text{I-1})$$

h : la constante de Planck ,

C : la vitesse de la lumière.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande . Une façon commode d'exprimer cette énergie est:

$$E = 1.26 \times 10^{-18} \frac{1}{\lambda} \quad (\text{I.2})$$

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns (μm). L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- ◆ 6% dans la bande des ultraviolets ($<0,4\mu\text{m}$).
- ◆ 74% dans la bande visible ($0,4$ à $0,8 \mu\text{m}$).
- ◆ 77% dans la bande des infrarouges ($>0,8\mu\text{m}$).

I.3.1. Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. c'est une propagation d'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

- ◆ **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 Pyranomètre.
- ◆ **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 cet(éclatement) des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.
- ◆ **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).
- ◆ **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 [2] .

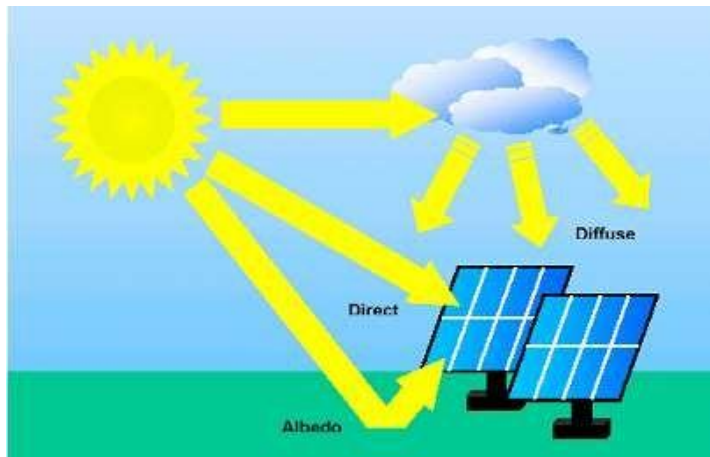


Fig. I.1 : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal

I.3.2. Spectre du rayonnement :

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde :

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800°K . Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en [10]:

Ultraviolet U_V $0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$ 6.4% Visible $0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$ 48.0%
Infrarouge I_R $0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$ 45.6%

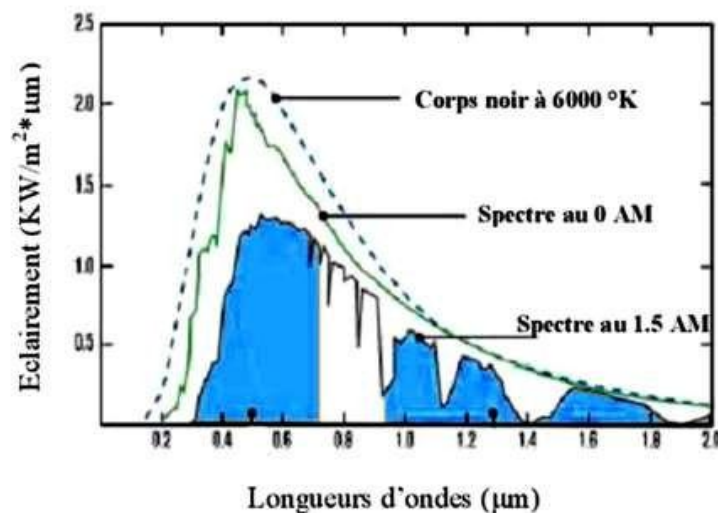


Fig. I.2 : spectre solaire hors atmosphère

I.4. Description d'un système photovoltaïque :

I.4.1. Historique :

IL est important de citer les dates les plus importantes dans l'histoire du photovoltaïque qui noté 7 :

1839 : Le physicien français [Edmond becquerel] découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. c'est l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner von siemens expose devant l'académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1954 : Trois chercheurs américains, Chaplin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de delaware.

1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000km en Australie [1].

I.4.2. Semi conducteur :

La filière la plus avancée sur le plan technologique et industrielle est la réalisation de cellules à base de silicium. Ce dernier est l'élément semi-conducteur le plus utilisé car il est peu coûteux et il se trouve en très grande quantité sur terre : il constitue 28% de l'écorce terrestre, sous forme de silice, parfaitement stable et non toxique [11].

I.4.2.1. Formation de la jonction PN :

Le silicium, comme tous les semi-conducteurs, a une bande de valence pleine et une bande de conduction vide. Mais grâce à un apport énergétique suffisant, il est possible de faire passer des électrons de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC), d'où la génération d'électrons libres, figure I.3.

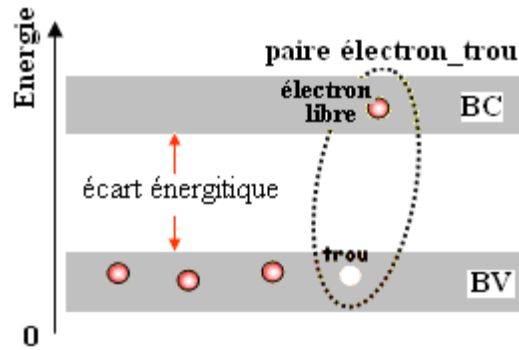


Fig. I.3 : Génération de la paire électron-trou.

La présence d'électrons libres dans la bande de conduction d'un matériau n'est pas suffisante pour générer un courant : il est nécessaire de créer une différence de potentiel aux bornes du photo- générateur afin d'entraîner les charges positives d'un côté et les charges négatives de l'autre. Cette opération est possible par dopage du Silicium. Une jonction PN est créée par l'assemblage de deux barreaux de Silicium de type N et P. Le composant ainsi créé est appelé diode.

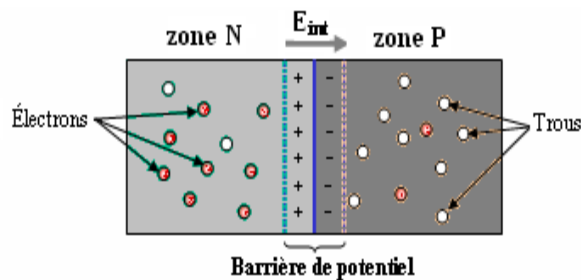


Fig. I.4 : La jonction PN.

I.4.2.2. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base de silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [4].

La structure d'une cellule photovoltaïque est illustrée dans la figure I.5 ci-dessous.

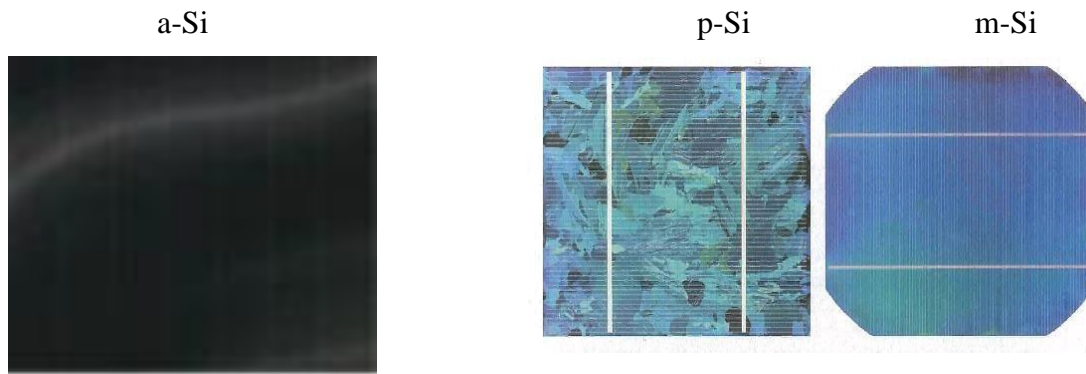


Fig. I-6 : Les images de différents types de la cellule photovoltaïque.

$$\eta_{STC} = \frac{P_m}{E_{STC} * S_{cellules}} \quad (1-3)$$

η_{STC} Le rendement de la cellule photovoltaïque ;

P_m La puissance produite par le générateur PV ;

E_{STC} L'éclairement absorbé par la cellule

$S_{cellule}$ La surface de la cellule [m²].

Ce rendement dépend plusieurs facteurs [13]:

- Réflexion à la surface.
- Température de jonction des cellules.
- Type de matériau utilisé et technique de fabrication.
- La résistance série et parallèle responsables des pertes par effet Joule.
- Absorption incomplète et excès d'énergie des photons absorbés.

I.5. Le générateur photovoltaïque :

I.5.1. Protections classiques d'un générateur photovoltaïque :

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage.

Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles [14] :

- La protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- La protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds.

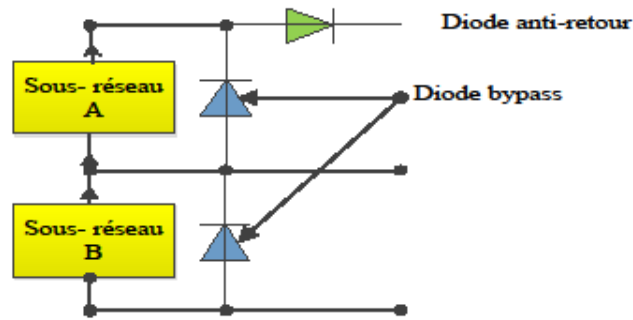


Fig. I.7 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour [15].

I.6. Les systèmes photovoltaïques :

Partie générale :

On ne peut pas considérer les modules photovoltaïques comme simples générateurs d'énergie électrique en remplacement d'un réseau, mais associer étroitement ces modules à un système complet pour une application bien spécifique correspondant à un besoin défini.

Les systèmes photovoltaïques les plus couramment utilisés sont de deux types :

I.6.1. Les systèmes photovoltaïques avec stockage électrique :

Batterie 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).

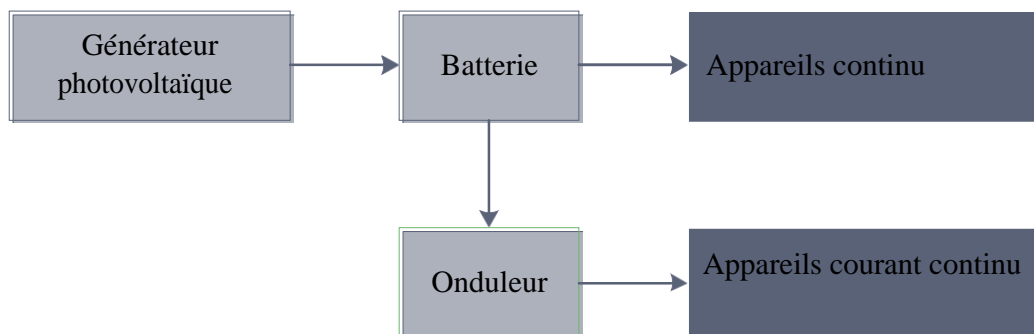


Fig. I.8 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec stockage.

I.6.2. Les systèmes à couplage direct sans batterie :

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.

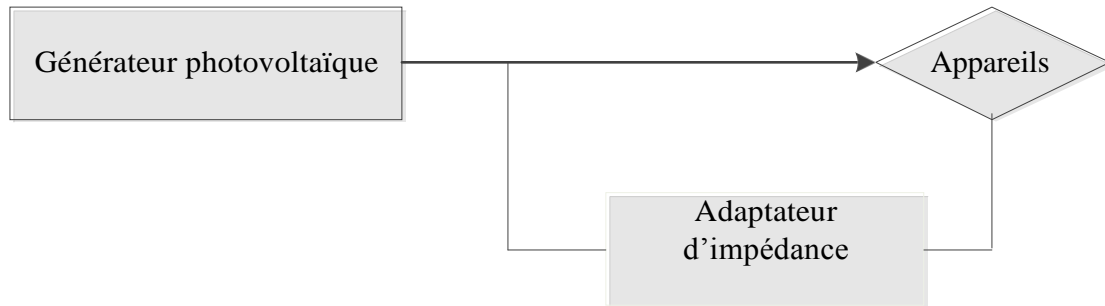


Fig. I.9 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque à couplage direct.

Pour les systèmes sans batterie, il y a possibilité d'avoir recours à un stockage mais qui ne sera pas sous forme électrochimique.

Exemple :

- pompage \Rightarrow stockage par réservoir d'eau.
- Réfrigération \Rightarrow stockage de froid.

Le choix de tel ou tel système se fera en fonction de différents critères : simplicité, application, environnement, etc.

Toutefois l'étude de systèmes photovoltaïques se ramène à l'étude de l'adaptation de la charge constituée, soit d'une batterie, d'une charge quelconque par rapport à l'ensemble des modules solaires.

Comme il est vu précédemment, on recherchera à optimiser le système pour avoir le meilleur rendement d'adaptation du système (rapport de l'énergie électrique fournie à l'utilisation à l'énergie électrique qu'aurait pu fournir le générateur fonctionnant toujours à son point de puissance maximum).

Un système photovoltaïque est donc constitué du générateur, et des charges à alimenter. Ces charges sont de type courant continu ou courant alternatif.

Les diverses composantes d'un système photovoltaïque sont représentées symboliquement sur le schéma généralisé dans la figure (I.10) ci-dessous.

Cette représentation synoptique recouvre à peu près tous les cas de figure (I.9) mais il

est bien certain qu'un système photovoltaïque ne comporte en général qu'un certain nombre des éléments représentés ici.

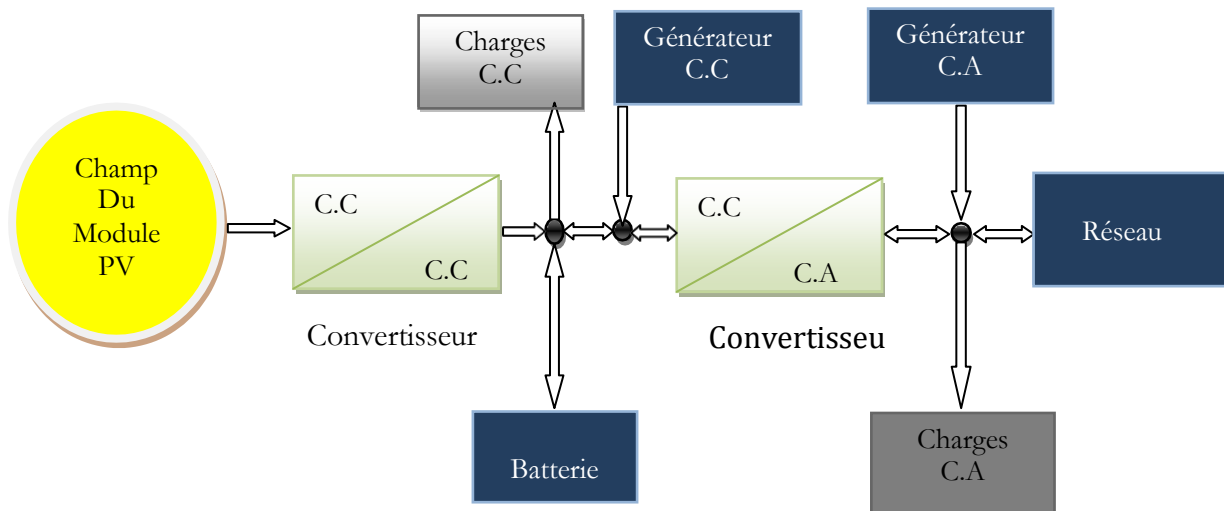


Fig. I.10 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque.

I.7. Secteurs d'application :

Domaine spatial : c'est de loin le secteur le plus ancien puisque les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes,...) remontent aux années soixante.

Télécommunications : Téléphonie rurale, radiotéléphonie,...

Sites isolés : Parcs nationaux, service des eaux et forêts, régions isolées, pays en voie de développement. Pompage de l'eau, irrigation, domiciles, villages ...

Acquisition de données : L'énergie photovoltaïque joue un rôle très important pour les stations isolées d'acquisition de données, vu la haute fiabilité de fonctionnement, l'autonomie, la moindre sensibilité à la foudre, la résistance extrême aux conditions naturelles, la maintenance légère et la longévité des équipements (25 ans).

Domaine du transport : Lampadaires, panneaux à messages variables, éclairage de panneaux, signalisation lumineuse routière et ferroviaire.

I.8. Les avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

I.8.1. L'avantages :

D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la

rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.

Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [15].

1.8.2. Inconvénients :

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

Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.

Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes [15].

1.9. Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de la conversion PV et les cellules monocristallines qui ont le meilleur rendement dans les conditions réelles d'utilisation des systèmes photovoltaïques et leurs secteurs d'application.

Chapitre II

Modélisation d'un système photovoltaïque et l'étage d'adaptation

II.1. Introduction :

Les photopiles ou **cellules photovoltaïques** sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. Le matériau de base est dans la plupart des cas le **silicium**. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, polycristalline, ou monocristalline[2].

D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de Gallium (AsGa), Tellure de Cadmium (CdTe).

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des "impuretés") sont substitués à des atomes de silicium dans un réseau cristallin : c'est ce que l'on appelle le dopage [16];

Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type "N" (ex : dopage au phosphore) [16].

Si l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le Silicium, le matériau sera déficitaire en électrons : il sera dit de type "P" (ex : dopage au bore) [16].

Une cellule solaire sera obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposées (jonction PN) [16]. Au voisinage de la jonction, un champ électrique apparaît provoqué par le déséquilibre de charges. Il va contribuer à drainer les électrons qui auront été détachés par l'énergie des photons (grains de lumière) incidents [16].

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèles, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module PV.

II.2.Circuit équivalent d'une cellule solaire :

Le modèle ne prend pas en compte les pertes internes du actuel. Une diode est connectée en anti parallèle à la lumière de générateur de courant . Le courant de sortie I est obtenu Par la loi Kirchhoff :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.1})$$

I_{ph} : est le photocourant,

I_d : est le courant de diode qui est proportionnel au courant de saturation et il est donné par l'équation

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{A \cdot N_s \cdot V_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.2})$$

V : est la tension imposée sur la diode

$$V_T = K * T_c / q \quad (\text{II.3})$$

I_0 : est la saturation inverse ou le courant de fuite de la diode (A).

$V_{TC} = 26mV$ à 300 K Pour cellule de silicium.

T_c : est la température réelle de la cellule (K).

K : Boltzmann constant $1.381 \cdot 10^{-23}$ J / K.

q : est la charge d'électrons ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C).

V_T : s'appelle la tension thermique en raison de son utilisation exclusive dépendance de la température[17].

N_s : est le nombre de cellules PV connectées en série.

A : est le Facteur d'idéalité.

Cela dépend de la technologie des cellules photovoltaïques et peut être choisi dans le tableau 1. Il faut souligner que A est une constante qui dépend de la technologie des cellules photovoltaïques.

Tous les termes par lesquels, V est divisé en équation (II.2) sous la fonction exponentielle sont inversement proportionnels à la cellule

Tableau II.1 : facteur d'idéalité (A) [18].

Technologie	facteur d'idéalité
Si-poly	1.3
a-Si-H	1.8
a-Si-Htandem	3.3
a-Si-Htriple	5
cdTe	1.5
CTs	1.5
AsGa	1.3

La température et donc, varient selon les conditions variables. Dans ce travail, ce terme est conçu par 'a' et appelé tension thermique(V), le facteur d'idéalité, est considéré comme constant et choisi dans le tableau II.1 selon la technologie de la cellule photovoltaïque. La tension thermique " a " est présentée par l'équation (II.4)

$$a = \frac{N_s * A * K * T_c}{q} = N_s * A * V_T \tag{II.4}$$

Dans [19], 'a' s'appelle " l'idéalité modifiéeFacteur " et est considéré comme un paramètre à déterminer, alors que Aest l'idéalité de la diode (voir tableau II.2).

• **Dans la (Fig.1b):**

En réalité, il est impossible de négliger la résistance en série R_s et La résistance parallèle R_p , en raison de leur impact sur l'efficacité de la cellule PV et du module photovoltaïque. Lorsque R_s est pris en considération, l'équation (II.2) devrait prendre la forme suivante:

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I * R_s}{a}\right) - 1 \right] \tag{II.5}$$

Bien sûr, la fig. 1b est une forme simplifiée, facile à mettre en œuvre danssimulateurs. Mais la fig. 1c est le plus représentatif du cellulePV.

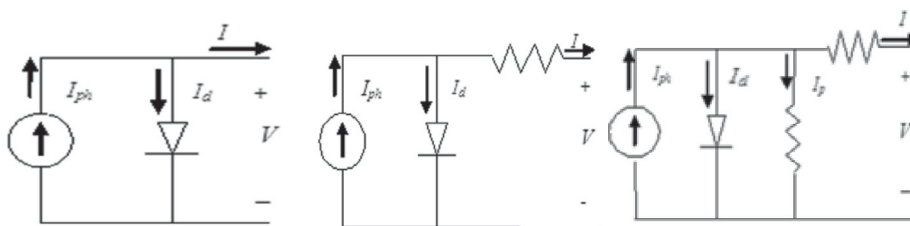
• **Dans la (Fig.1c)**

En appliquant la loi de Kirchhoff, l'actuel sera obtenu par l'équation:

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \tag{II.6}$$

I_p : est la fuite actuelle en résistance parallèle.

Selon l'équation (II.7), le courant de sortie d'un le module contenant des cellules N en série sera:



a) Modèle de diode unique idéal b)Modèle pratique avec R_s c)Modèle pratique avec R_s et R_p

Fig.II.1 : Le circuit équivalent d'une cellule solaire et d'un dispositif photovoltaïque.

Tableau II.2 : caractéristique PWX 500 PV module (49 W)

Parameters	Valeur
P _{mp} (W)	49
I _{mp} (A)	2.88
V _{mp} (V)	17
I _{sc} (A)	3.11
V _{oc} (V)	21.8
R _S (Ω)	0.55
Noct°C	45
I _{sc} (K°)	1.3 × 10 ⁻³
K _d (K°)	-72.5 × 10 ⁻³
NS	36

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + I R_S}{q} \right) - 1 \right] \frac{V + R_S I}{R_p} \quad (\text{II.7})$$

Il n'est pas facile de déterminer les paramètres de ce transcendantal équation. Mais ce modèle offre le meilleur match avec valeurs expérimentales.

II.3. Détermination des paramètres :

Le nombre de paramètres varie selon les choix Modèle et sur les hypothèses adoptées par les chercheurs. Pour Exemple, Dans [20] , [21] , c'est a considéré que I_{ph} , I_0 , R_S , R_p et l'idéal du facteur sont cinq Paramètres qui dépendent du rayonnement solaire incident et la température de la cellule. Pendant que [22],[23] les paramètres inconnus sont : I_{ph} , I_0 , R_S et γ ainsi que :

$$\gamma = N_s * A$$

Dans ce travail, les quatre paramètres à évaluer sont également I_{ph} , I_0 , R_S , R_p

II.3.1. Détermination I_{ph} :

Selon la Fig.1.a, le courant de sortie au test standard conditions (STC) est :

$$I = I_{ph,ref} - I_{0,ref} \left[\exp \left(\frac{V}{a_{ref}} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.8})$$

Cette équation permet de quantifier I_{ph} , I_{ref} qui ne peut pas être déterminé autrement. Lorsque la cellule PV est en court-circuit:

$$I_{sc,ref} = I_{p\Box,ref} - I_{0,ref} \left[\exp \left(\frac{0}{a_{ref}} \right) - 1 \right] = I_{pv,ref} \quad (\text{II.9})$$

Mais cette équation n'est valable que dans un cas idéal. Donc, l'égalité n'est pas correcte. Ensuite, l'équation (II.10) doit être écrite comme suit :

$$I_{ph,ref} = I_{sc,ref} \quad (\text{II.10})$$

Le photocourant dépend à la fois de l'irradiance et température

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{p\Box,ref} + \mu_{sc} * \Delta T) \quad (II .11)$$

G: Irradiation (W/m²),

G_{ref}: Irradiation à STC = 1000W/m²,

ΔT = - T_c - T_{c,ref} (Kelvin)

T_{c,ref}: Température cellulaire à STC = 25+ 273 = 298 K,

I_{sc}: Coefficient de température de Courant de court-circuit (A/K) fourni par le fabricant,

I_{p□,ref}: Photocurrent (A) à STC.

II.3.2. Détermination I₀:

La résistance au shunt RP est généralement considérée comme excellente, donc la le dernier terme de la relation (II 8) devrait être éliminé pour le Prochaine approximation. en appliquant l'équation (II .8) aux trois Points les plus remarquables à l'état d'essai standard: la tension en circuit ouvert (I=0, V = V_{oc,ref}) le courant en court-circuit (V=0, I = I_{sc,ref}) et la tension (V_{mp,ref}) et courant (I_{mp,ref}) à la puissance maximale, les équations suivantes peuvent être écrit:

$$I_{sc,ref} = I_{p\Box,ref} - I_{0,ref} \left[\exp\left(\frac{I_{sc,ref} * R_s}{a_{ref}}\right) - 1 \right] \quad (II.12)$$

$$0 = I_{p\Box,ref} - I_{0,ref} \left[\exp\left(\frac{V_0}{a_{ref}}\right) - 1 \right] \quad (II .13)$$

$$I_{sc,ref} = I_{p\Box,ref} - I_{0,ref} \left[\exp\left(\frac{V_{pm,ref} + I_{pm,ref} * R_s}{a_{ref}}\right) - 1 \right] \quad (II .14)$$

Le terme (-1) doit être négligé car il est très plus petit que le terme exponentiel. Selon l'équation (11), et par en remplaçant (I_{ph}, ref) par l'équation (II .14):

$$0 = I_{sc,ref} - I_{0,ref} \exp\left(\frac{V_{oc,ref}}{a_{ref}}\right) \quad (II.15)$$

$$I_{0,ref} = I_{sc,ref} \exp\left(\frac{-V_{oc,ref}}{a}\right) \quad (II.16)$$

$$I_0 = D T_c^3 \exp\left(\frac{-q * \mathcal{E}_G}{A * K}\right) - 1 \quad (II .17)$$

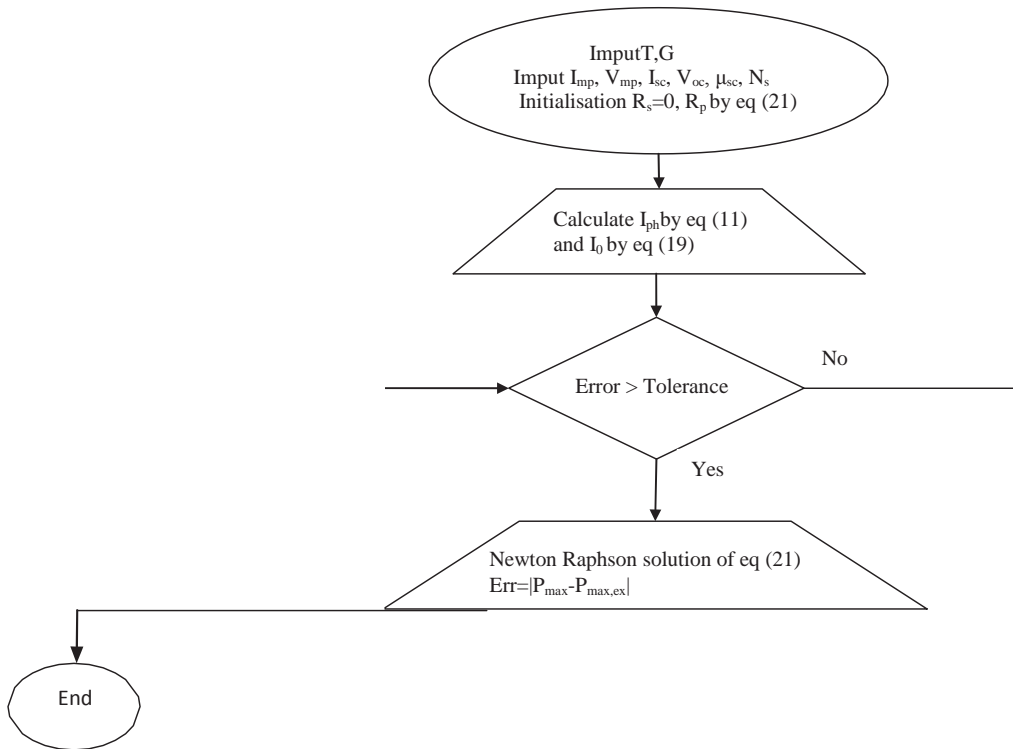


Fig.II.2 :Iteration flowchart.

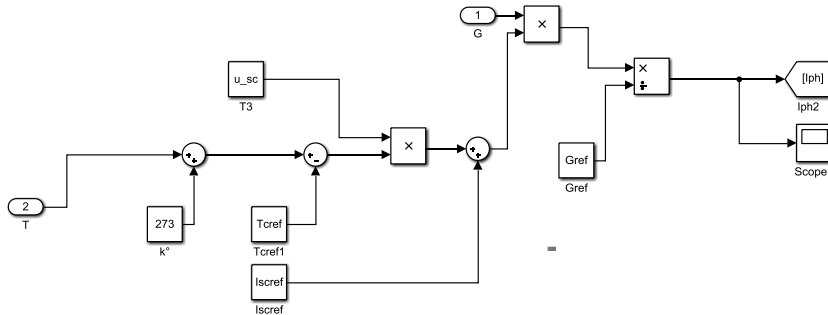


Fig.II.3 : Déploiement I_{ph} détaillé.

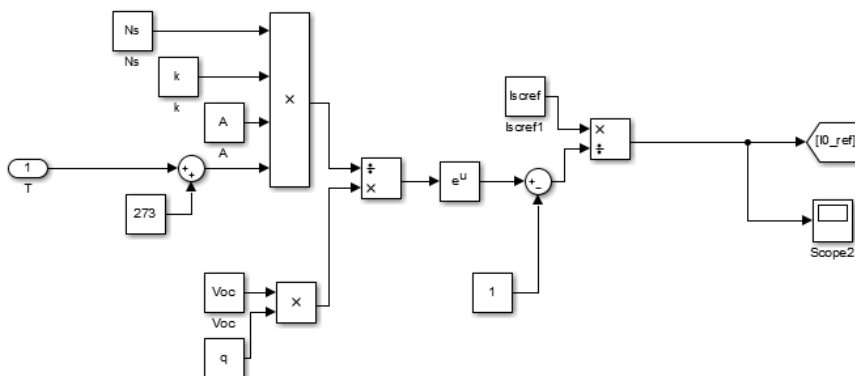


Fig.II.4 :Déploiement $I_{0,ref}$ détaillé.

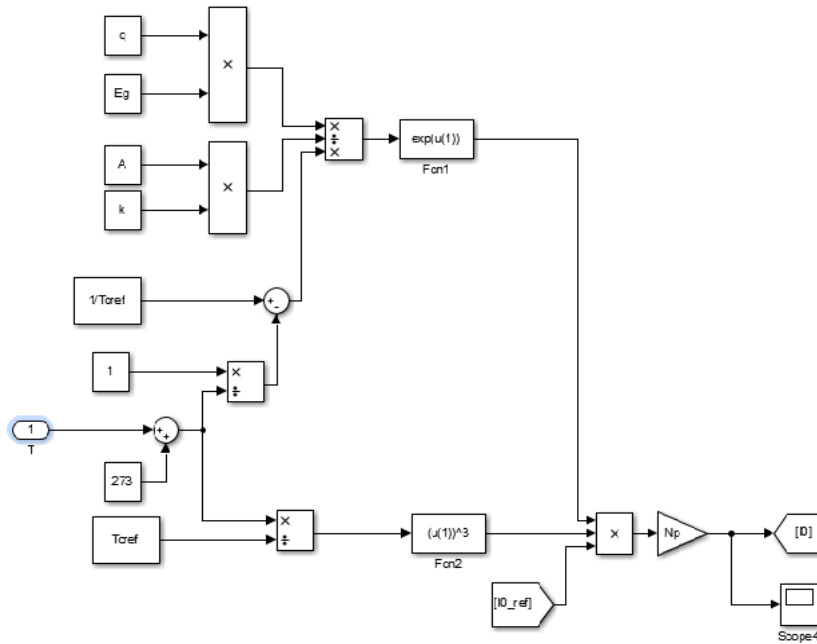


Fig.II.5 : Déploiement I_0 détaillé.

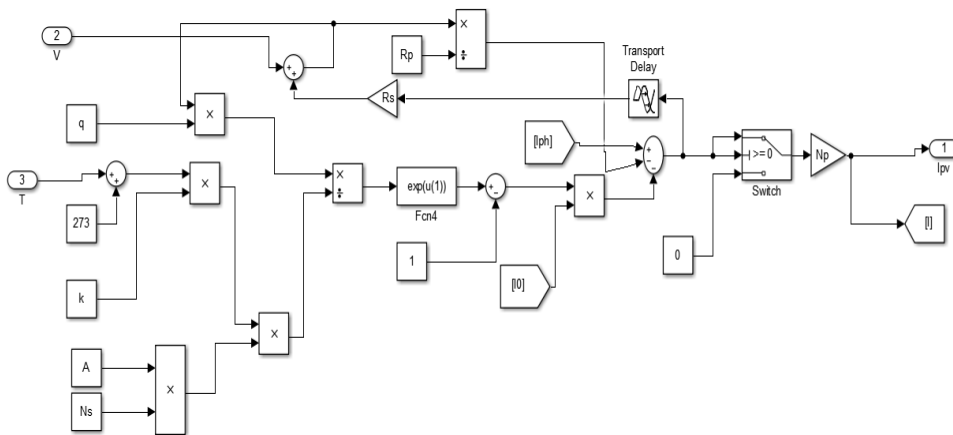


Fig.II.6 : Déploiement I_{pv} détaillé.

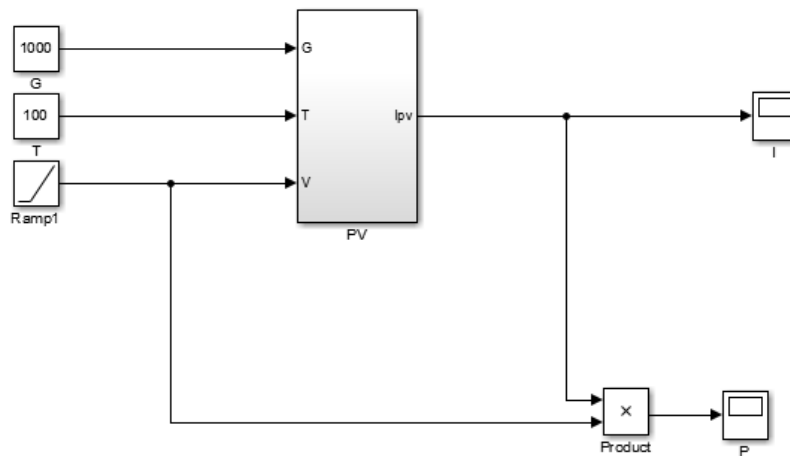


Fig.II.7 : présentation de module PV

II.4. Constitution d'un générateur photovoltaïque(GPV) :

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

II.4.1.Association des cellules photovoltaïques enparallèle :

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement des cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. Les figures II. (9-10) montrent les caractéristiques résultantes (I_{PCC}, V_{PCO}) obtenues en associant en parallèle (indice p) N_p cellules identiques:

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

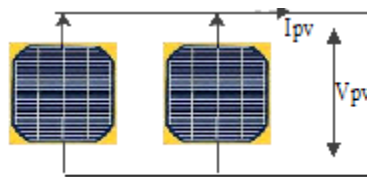


Fig.II. 8 : Schéma de 2 cellules photovoltaïques associées en parallèle

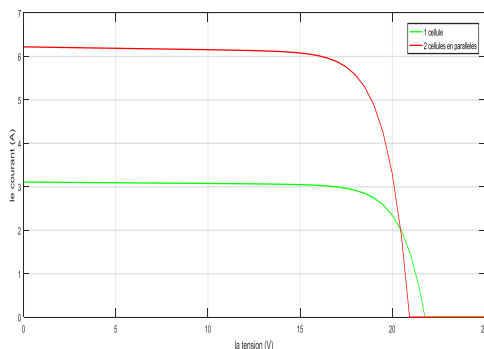


Fig.II.9 :Caractéristique I-V des cellules PV raccordées enparallèle.

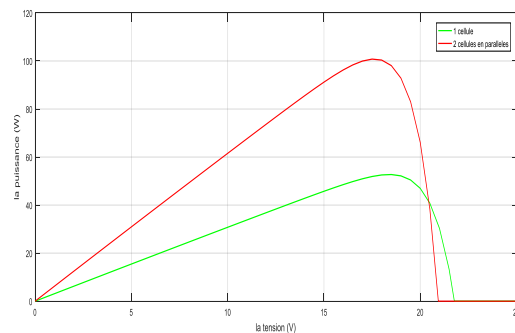


Fig.II.10 :Caractéristique P-V descellules PV raccordées enparallèle

II.4.2.Association des cellules photovoltaïques en série :

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. Les figures (II.12-13) montrent la caractéristique résultante (I_{SCC}, V_{SCO}) obtenue en associant en série (indice s) N_s cellules identiques (I_{CC}, V_{CO}) :

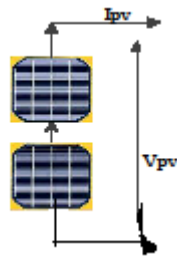


Fig.II.11 :Schéma de 2 cellules photovoltaïques associées en série

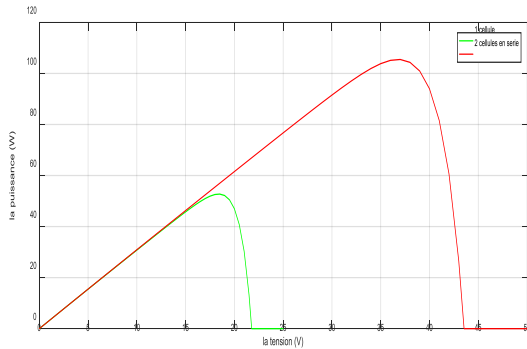


Fig.II.12 : Caractéristique P-V des cellules Photovoltaïques raccordées en série.

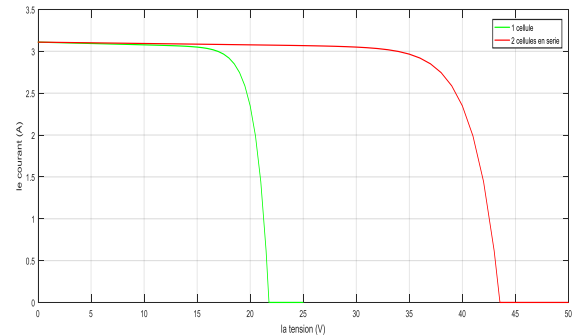


Fig.II.13 :Caractéristique I-V des cellules Photovoltaïques raccordées en série

La plupart des panneaux photovoltaïques commerciaux sont constitués par des sous-réseaux de cellules connectées en série. Chacun de ces sous-réseaux est lui-même constitué d'un groupe de cellules photovoltaïque connectés en série. Le nombre de cellules par sous-réseaux est le fruit d'un compromis économique entre protection et pertes d'une partie importante du générateur photovoltaïque en cas de défaut partiel.

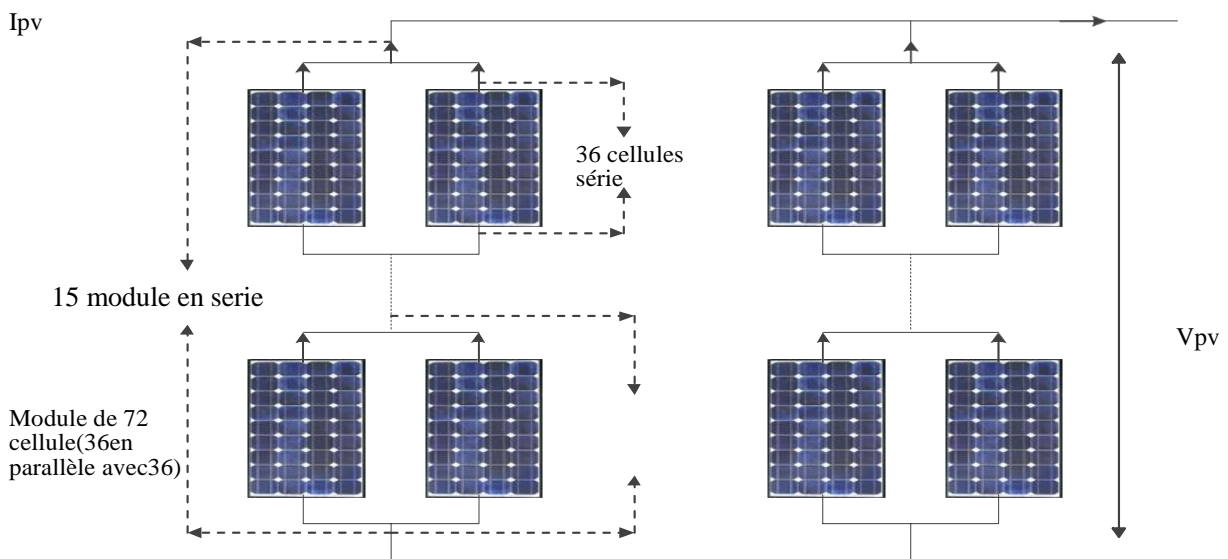


Fig.II.14 : Schéma d'une partie de la centrale de production d'électricité d'un système photovoltaïque installé au CDER

Le site de démonstration, CDER, est actuellement doté de 3 panneaux, , chacun d'eux est constitué de plusieurs modules connectés entre eux en série et en parallèle, référencés: ISOFOTON 106 W MONOCRISTALLIN, crêtes et structurés comme montre la figure II.14.

La puissance maximale débitée par le panneau photovoltaïque donnée par le produit entre la tension V_{op} et le courant I_{op} comme représente la formule suivante :

$$P_{max} = V_{op} \times I_{op}$$

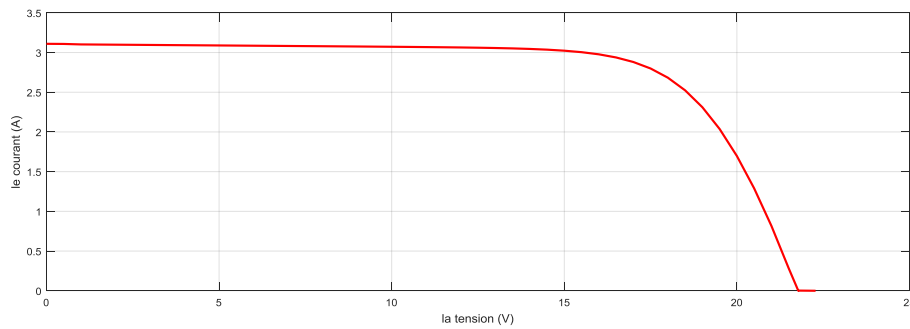


Fig.II.15 :Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque

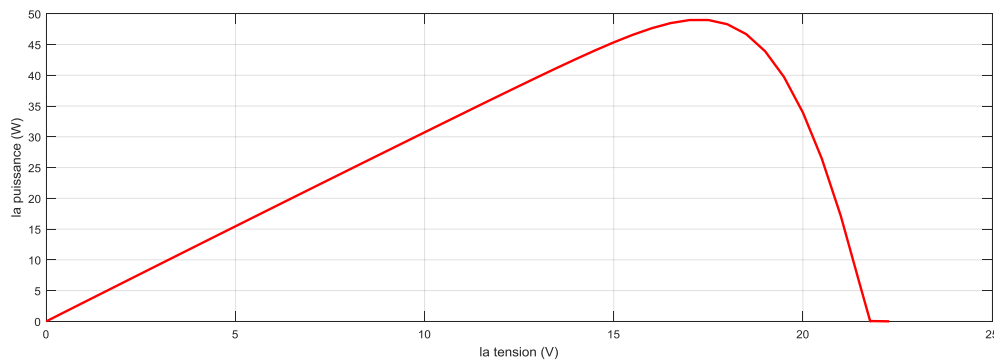


Fig.II.16 :Caractéristique P-V d'un générateur photovoltaïque.

II.4.3.Influence del'Éclairement :

En faisant varier l'éclairement entre 200 w/m^2 et 1000 w/m^2 , la caractéristique ($I_{pv}=f(V_{pv})$) est donnée par les figures (II.17-18). On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

L'irradiation standard internationalement accepter pour muser le réponse des panneaux photovoltaïque est un intensité rayonnante de 1000W/m^2 et une température 25 C^0 .

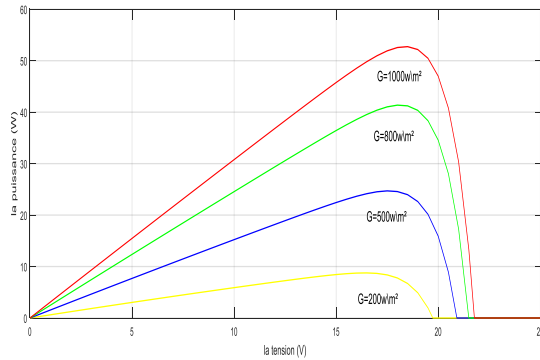


Fig.II.17 :Caractéristique P-V du module PV selon l'éclairement.

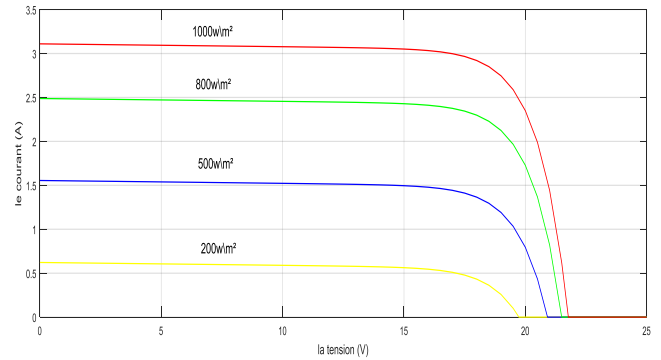


Fig.II.18 : Caractéristique I-V du module PV selon l'éclairement

II.4.4. Influence de la Température :

En faisant varier la température de 0°C jusqu'à 75°C, la caractéristique ($I_{pv}=f(V_{pv})$) est donnée par les figures (II.(19-20)). On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte.

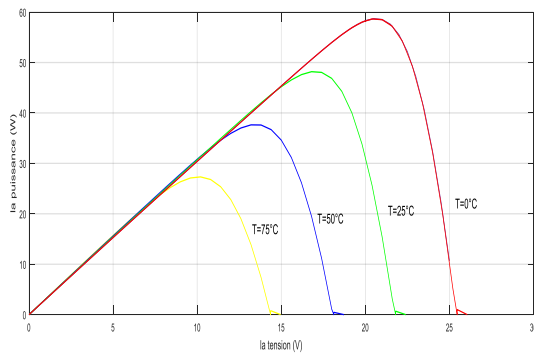


Fig.II.19 :Caractéristique P-V du module PV selon la Température

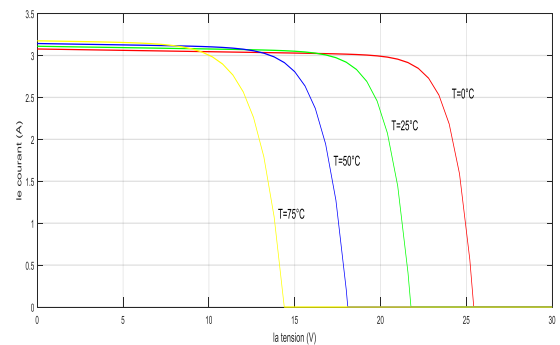


Fig.II.20 :Caractéristique I-V du module PV selon la Température

II.4.5. Influence de la résistance en série :

La figure (II.21-22) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique I-V de la cellule qui se traduit par une diminution de la pente de la courbe de puissance P-V dans la zone où la cellule fonctionne comme générateur de tension constante.

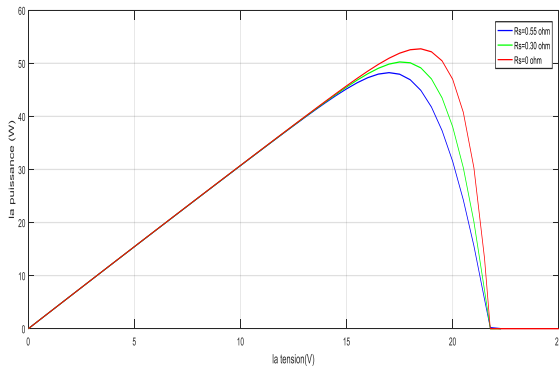


Fig.II.21 : Caractéristique P-V de module PV selon résistance série

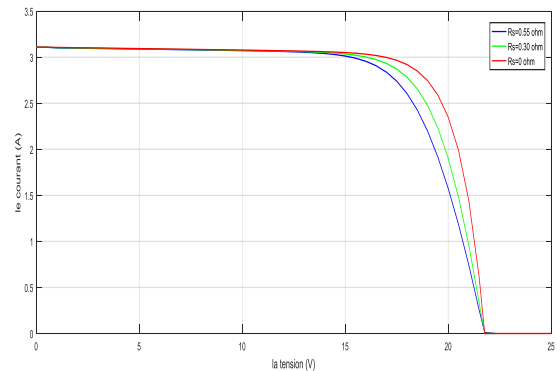


Fig.II.22 : Caractéristique I-V de module PV selon la résistance série

II.4.6. Influence de Eclairment et température :

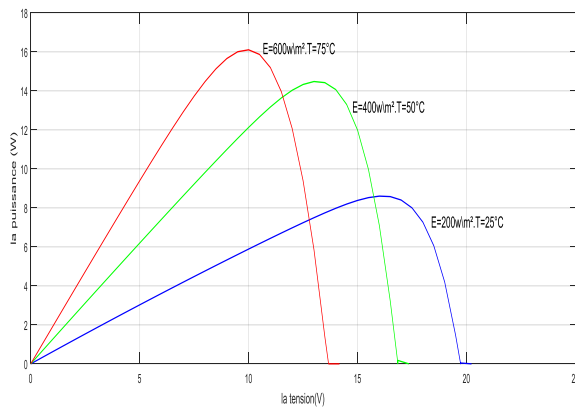


Fig.II.23 : Caractéristique P-V de module selon Eclairment et température

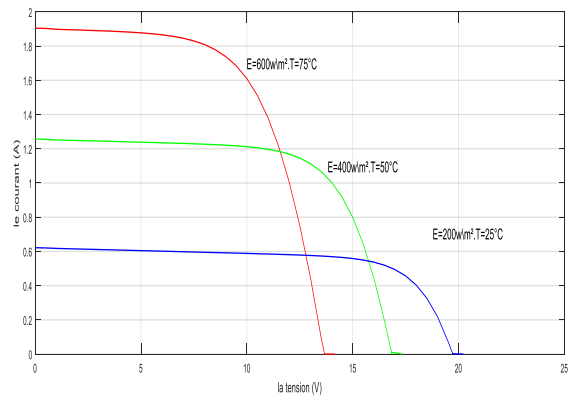


Fig.II.24 : Caractéristique I-V de PV selon Eclairment et température

II.4.7. Influence de facteur d'idéalité :

Théoriquement, la facteur d'idéalité A des cellule poly-cristallines prend un valeur entre 1et 2 , tout en étant près de la valeur de 1 par rapport aux courants élèves , il augmente jusqu'à la valeur pour des courant faibles . Pour un fonctionnement normal il est généralement égale à 1.3. la courbe de la figureII.25affirment la notification précédente.

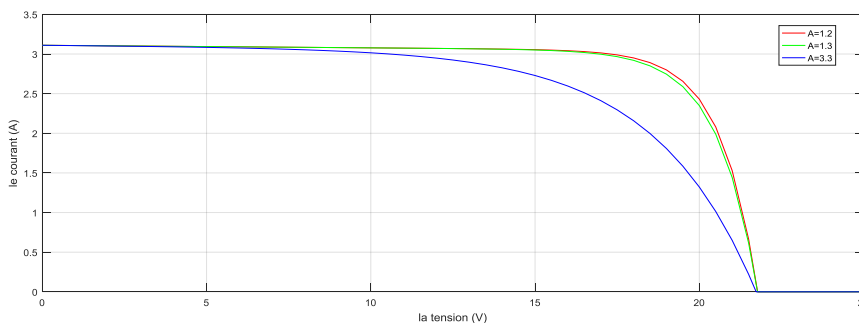


Fig.II.25 : Caractéristique I-V de module PV selon facteur d'idéalité

II.5. Étage d'adaptation d'un générateur photovoltaïque à la charge :

II.5.1. Introduction :

La conception d'un étage d'adaptation permet aujourd'hui de relier aisément un générateur photovoltaïque (GPV) à une charge de type continue (DC), avec un rendement de conversion très élevé. En fait, le concept de cet étage correspond à la modélisation des fonctions basiques idéalisées d'un convertisseur à découpage continu-continu (DC/DC). Ce concept est nommé ainsi à cause des liens que le convertisseur crée entre ses quatre grandeurs électriques sur les ports d'entrée et de sortie qui sont ses courants et ses tensions d'entrée et de sortie [3].

II.5.2. Connexion directe source-charge :

Actuellement, il reste encore beaucoup d'applications où une connexion directe entre un générateur photovoltaïque et une charge est effectuée. Ce choix est principalement lié à la simplicité de l'opération et le très faible degré de fiabilité, dû fondamentalement à l'absence d'électronique, sans parler d'un faible coût. La figure (II -26) montre ce cas de connexion. Si cette charge était une batterie, lorsque le module n'est pas éclairé, celui-ci pourrait fonctionner en tant que récepteur, la batterie pourrait donc se décharger sur le générateur photovoltaïque et en plus l'endommager irréversiblement, Ainsi, pour éviter cette situation, la connexion doit être assurée à l'aide d'une diode anti-retour placée entre le GPV et la charge. Cette configuration est illustrée à la figure (II -25). L'inconvénient de cette configuration, c'est qu'elle n'offre aucun type de limitation et/ou réglage de la tension de la batterie. Le transfert de puissance maximale disponible aux bornes du générateur photovoltaïque vers la charge n'est pas non plus garanti [14].

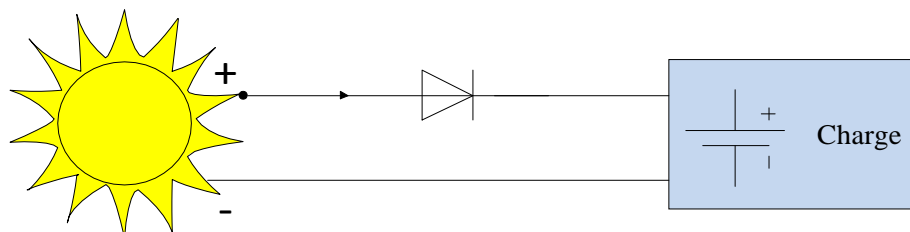


Fig.II.26 : Connexion directe source-charge

II.5.3. Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge :

Un générateur photovoltaïque présente des caractéristiques I-V non linéaires avec de point de puissance maximum PPM. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur

et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe.

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge comme décrit dans la figure II-27.

Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de puissance maximale disponible [25].



Fig.II.27 :Étage d'adaptation entre un GPV et une charge.

Ce dernier par le biais d'une commande spécifique est alors susceptible de permettre au générateur de délivrer sa puissance maximale notée ; P_{max} ($P_{max} = V_{opt} * I_{opt}$) où V_{opt} et I_{opt} représentent respectivement les tensions et les courants optimaux du générateur photovoltaïque, pour une courbe I-V donnée), tout en assurant que la tension ou bien le courant de la charge correspond bien aux caractéristiques de cette dernière.

Pour que le générateur PV fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge.

Rôle du convertisseur DC-DC fait fonctionner les modules à leur point de puissance optimale, quelques soient l'éclairement et la charge pour délivrer cette puissance à l'utilisation.

II.5.4. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) :

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 [26].

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 [26].

La technique du découpage, apparue environ dans les années soixante, a apporté une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement des alimentations séries.

Dans une alimentation à découpage (Figure II.28), la tension d'entrée est "hachée" à une fréquence donnée par un transistor alternativement passant et bloqué.

Il en résulte une onde carrée de tension qu'il suffit de lisser pour obtenir finalement une tension continue [26].

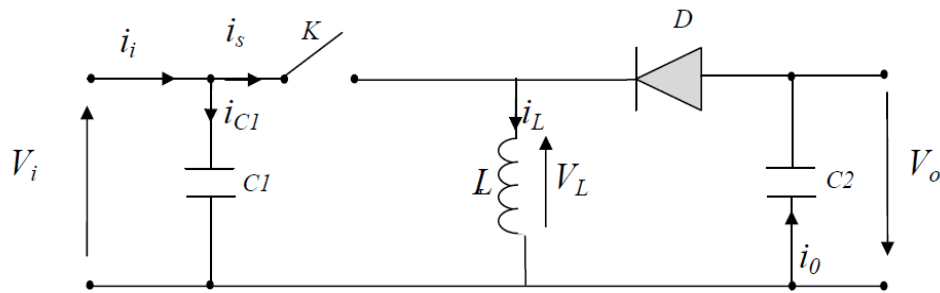


Fig.II.28 : Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage

D'un point de vue circuit, le hacheur apparaît comme un quadripôle (figure II.29), jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues [26].

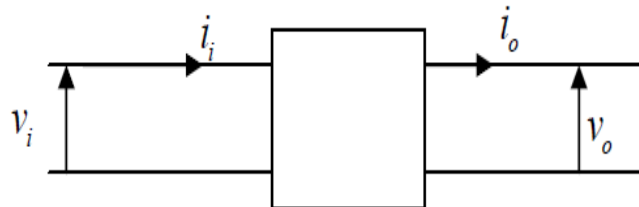


Fig.II.29 : Schéma d'un quadripôle électrique

La régulation de la tension de sortie à un niveau constant est réalisée par une action sur le "rapport cyclique", défini comme la fraction de la période de découpage où l'interrupteur est passant (figure II.30). L'interrupteur est un dispositif semi-conducteur en mode tout-rien (bloqué – saturé), habituellement un transistor MOSFET. Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite[26].

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante f

avec un temps de fermeture $= dT$ et un temps d'ouverture $= (1-d) T$. Où:

- T_s est la période de commutation qui est égale à $1/f_s$
- d le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0,1]$).

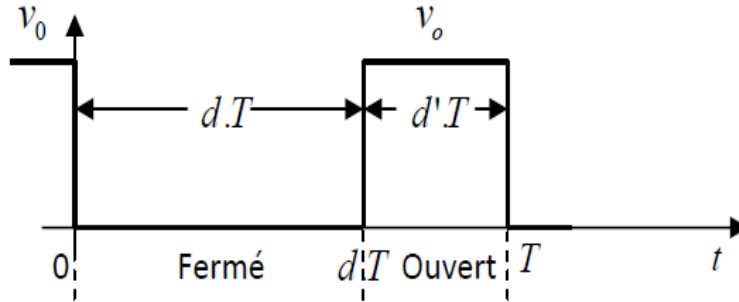


Fig.II.30 : périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi les quels, on présente le principe des trois types des convertisseurs à découpage (dévolteur, survolteur et mixte), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les différentes charges [26 27 28 29].

II.5.4.1. Hacheur dévolteur:

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur Buck ou hacheur série. La figure (II.31) présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur [26]. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion $M=V_o/V_i$ change avec le rapport cyclique du commutateur.

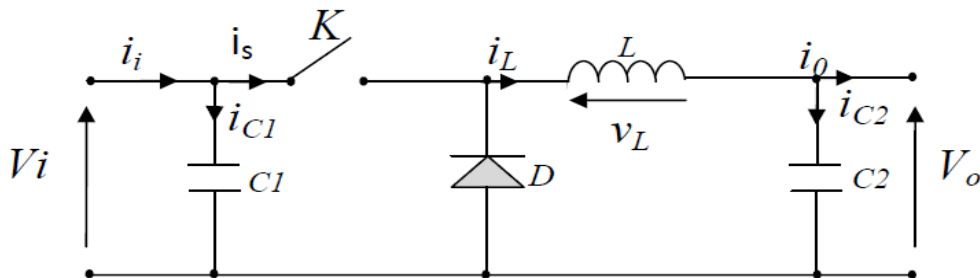


Fig.II.31 : Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur.

Savoir le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle

mathématique.

Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (II.32) montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur dévolteur dans les deux cas : l'interrupteur fermé pendant dT_s et l'interrupteur ouvert pendant $(1-d) T_s$ [26 27 28 29].

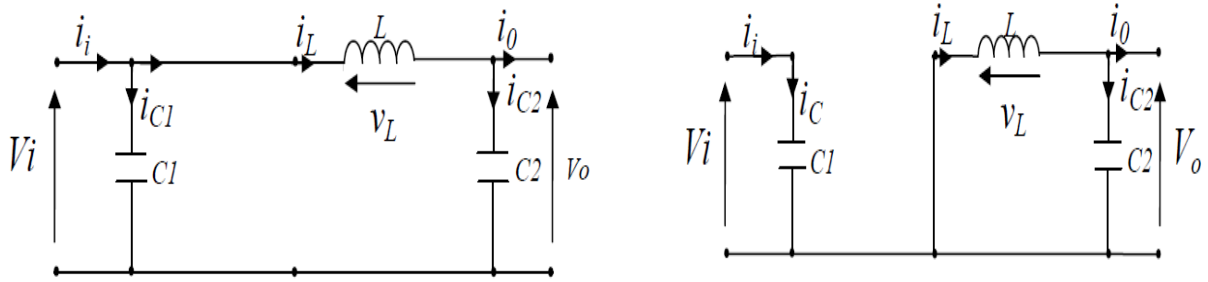


Fig.II.32 : Schémas équivalents du hacheur dévolteur,

(a) : K fermé, (b) : ouvert

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la figure (II.32), on obtient les systèmes d'équations suivants :

Pour la première période $d.T_s$:

$$\begin{aligned} I_{C1}(t) &= C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ I_{C2}(t) &= C_2 \frac{dv_o}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) &= L \frac{di_L}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{aligned} \quad (II.18)$$

Pour la deuxième période $(1-d)T_s$:

$$\begin{aligned} I_{C1}(t) &= C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ I_{C2}(t) &= L \frac{di_L(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) &= L \frac{di_L}{dt} = -V_o(t) \end{aligned} \quad (II.19)$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période T_s , on utilise généralement l'expression suivante [26] :

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_{T_s} = \frac{dx}{dt_{dT_s}} dT_s + \frac{dx}{dt_{(1-d)T_s}} (1-d)T_s \quad (II.20)$$

En appliquant la relation (II.20) sur les systèmes d'équations (II.18) et (II.19), on obtient les

équations qui régissent le système sur une période entière :

$$\begin{aligned}
 C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} T_s &= dT_s(i_i - i_L) + (1 - d)T_s i_i \\
 C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} T_s &= dT_s(i_L - i_o) + (1 - d)T_s(i_L - i_o) \\
 L \frac{di_L}{dt} &= dT_s(V_i - V_o) + (1 - d)T_s(-V_o)
 \end{aligned}
 \tag{II.21}$$

Après arrangement, on obtient :

$$\begin{aligned}
 i_o(t) &= i_L(t) - C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} \\
 i_L(t) &= \frac{1}{d} (i(t) - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt}) \\
 V_i(t) &= \frac{1}{d} (L \frac{di_L(t)}{dt} + V_o(t))
 \end{aligned}
 \tag{II.22}$$

II.5.4.2.1 Hacheur survolteur:

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (II.33). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [26].

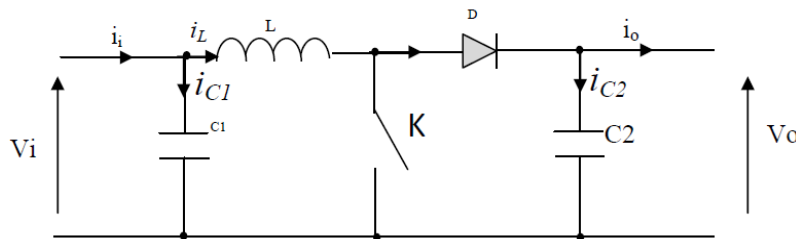


Fig.II.33 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost

Comme pour le convertisseur dévolteur, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (voir figure II.34) des deux phases de fonctionnement donne [26]

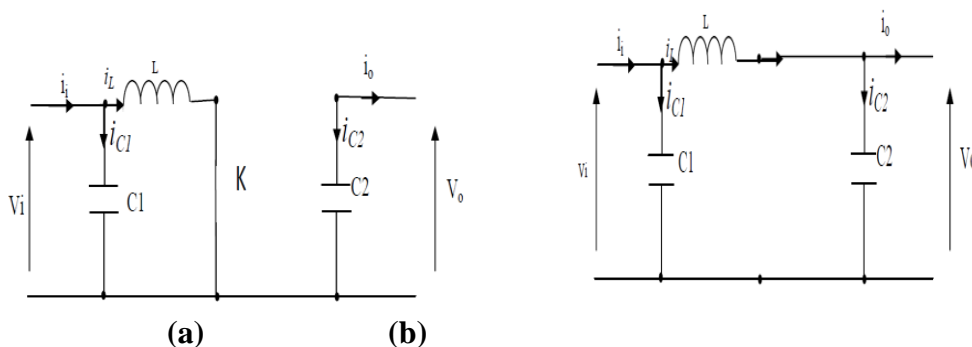


Fig.II.34 : Schémas équivalents du hacheur survolteur,

(a) : K fermé, (b) : ouvert

II.5.4.3. Hacheur dévolteur-survolteur :

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée; son schéma de base est illustré par la figure (II.35) [26] :

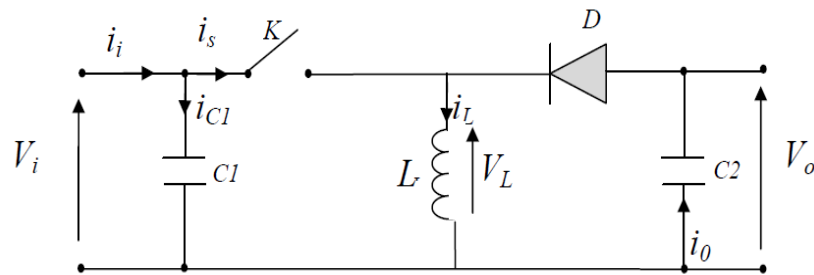


Fig.II.35 : Convertisseur dévolteur-survolteur

La figure (II.36) montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur pour les deux cycles deux fonctionnements [26].

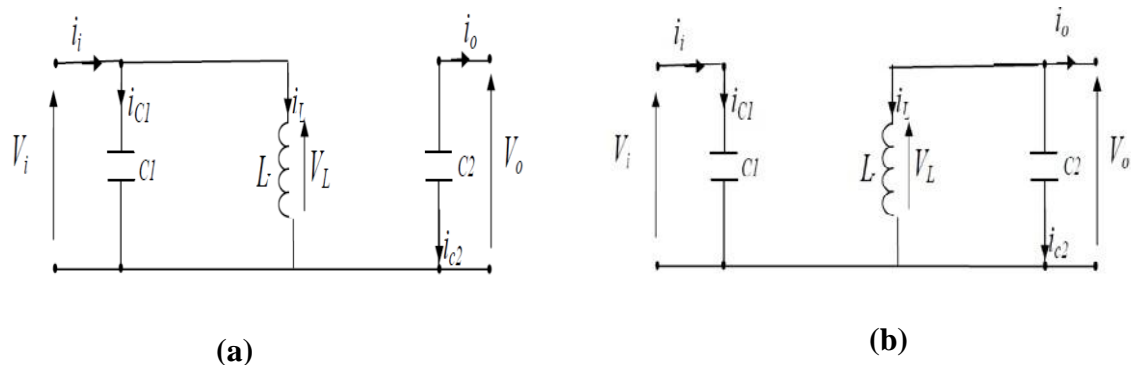


Fig.II.36 : Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur, (a): K fermé, (b) : Kouvert

Pour la première période d.Ts :

$$\begin{aligned}
 i_{C1}(t) &= C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\
 i_{C2}(t) &= C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\
 V_L(t) &= L \frac{di_L(t)}{dt} = V_L(t)
 \end{aligned}
 \tag{II.23}$$

Pour la deuxième période $(1-d)T_s$

$$\begin{aligned} I_{C_1}(t) &= C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ I_{C_2}(t) &= C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_l(t) &= L \frac{di_L}{dt} = V_0(t) \end{aligned} \quad (\text{II.24})$$

on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [26] :

$$\begin{aligned} i_L &= \frac{1}{d} \left(i_i - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} \right) \\ i_0 &= (1-d)i_L - C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} \\ V_l &= \frac{1}{d} \left(-(1-d)V_0 + L \frac{di_L}{dt} \right) \end{aligned} \quad (\text{II.25})$$

II.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'une cellule photovoltaïque et d'un générateur photovoltaïque, les caractéristiques du générateur PV avec ses performances. Ainsi, l'influence de quelques paramètres sur ses caractéristiques.

Pour le fonctionnement optimal d'un système photovoltaïque, il est nécessaire d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge ou un autre système que nous allons l'étudier dans la partie suivante.

Ce chapitre s'est consacré à présenter les différents composants d'un système photovoltaïque. On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. Ensuite on fait un rappel sur les systèmes PV et leurs performances et il étudie l'étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge qui présente le convertisseur DC-DC (hacheur).

Dans le chapitre prochain, on présente la commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.

Chapitre III

Techniques de poursuite du point de Puissance maximale MPPT

III.1. introduction:

Le branchement d'une charge à un générateur photovoltaïque est le mode de couplage le plus simple qui soit. Le point de fonctionnement dans ce cas se situe à l'intersection de la droite de charge et de la caractéristique I-V du générateur. Ce point ne peut pas coïncider avec le point de puissance maximale, il s'ensuit une perte de puissance maximale du système.

Ce problème peut être résolu soit par le changement de configuration du générateur photovoltaïque, soit par l'adjonction d'un dispositif de recherche de point de puissance maximale placé entre le générateur et la charge pour assurer l'adaptation d'impédance.

L'exploitation optimale de l'énergie électrique disponible aux bornes du générateur photovoltaïque peut contribuer à la réduction du coût global du système. Il existe plusieurs techniques pour satisfaire ce but.

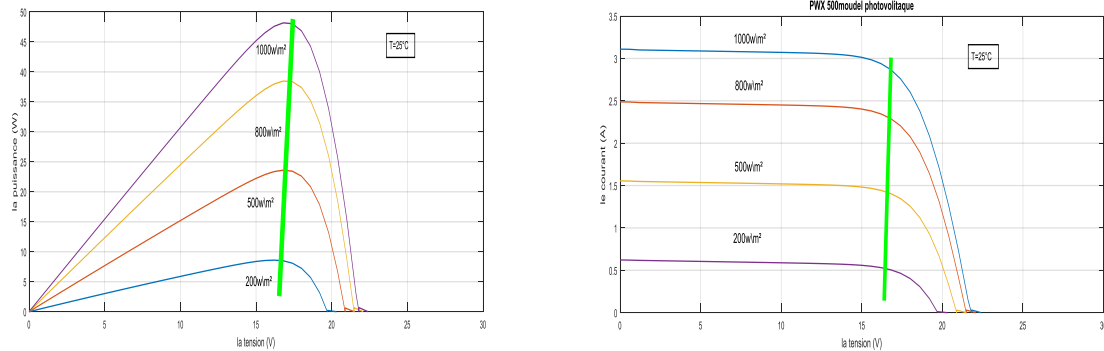
Dans ce chapitre nous allons citer et expliquer différentes méthodes de poursuite du point de puissance maximale et en terminant par notre méthode qui est choisie parmi les précédentes s'appelle 'perturbation et observation', (P&O : Perturb-and-Observe).[15]

III.2. Principe de fonctionnement de MPPT :

Un MPPT, de l'anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant. La figure (III.1) représente la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur.

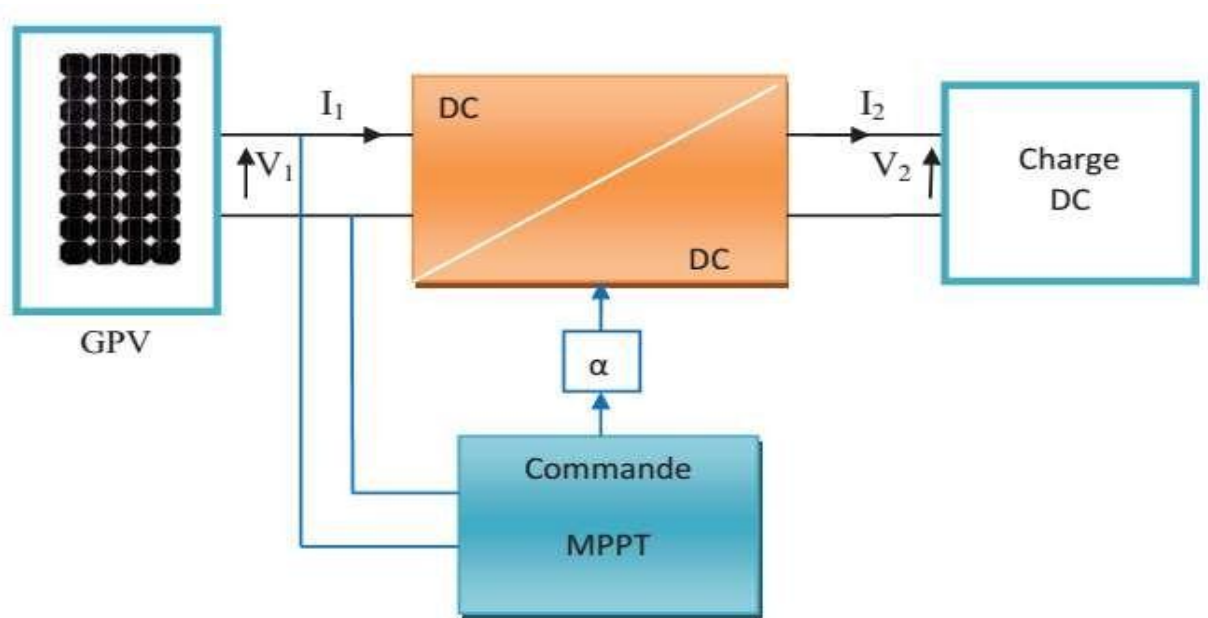
La Figure (III.1) présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une

batterie servant de stocke l'énergie pour une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension.[1]



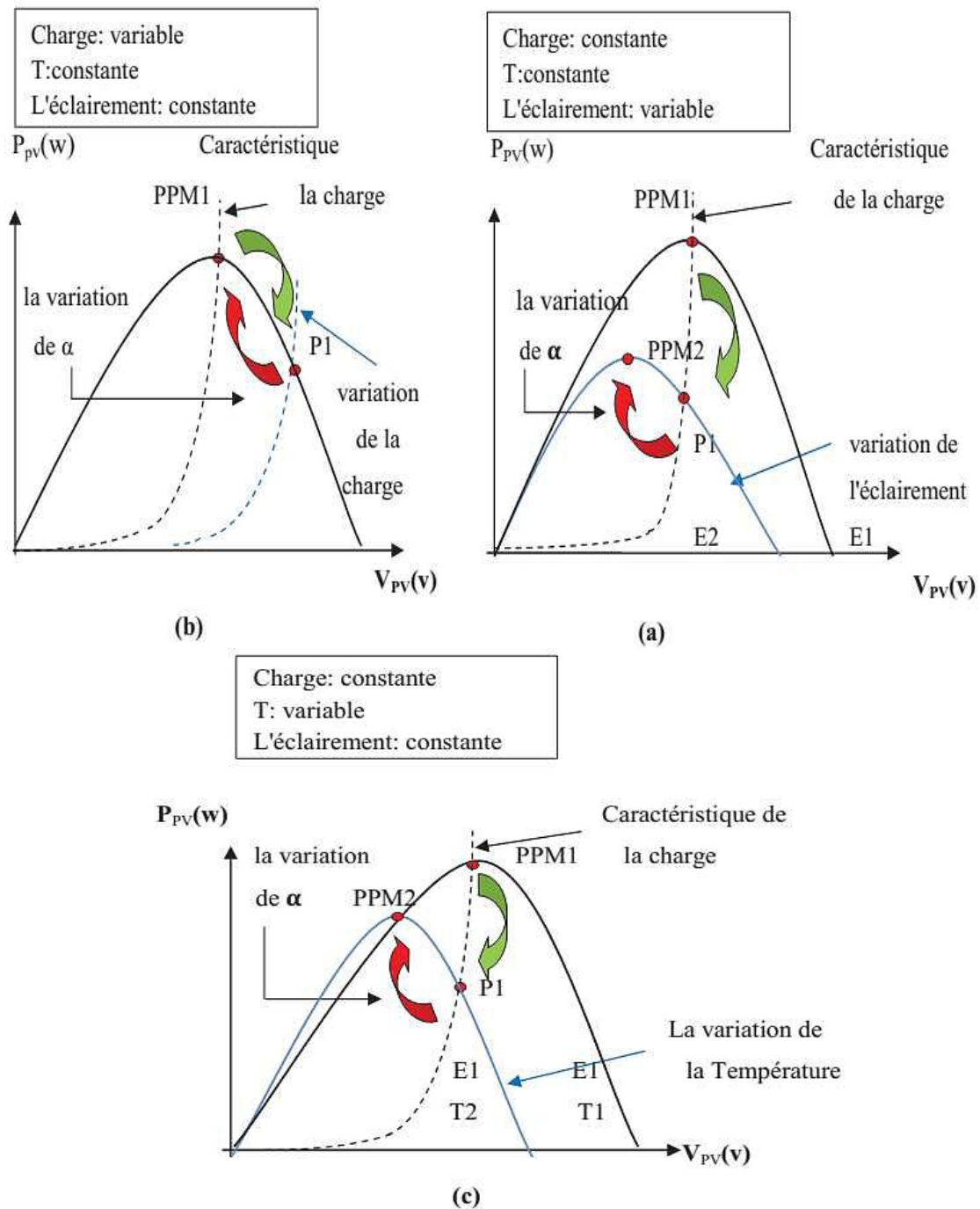
FigIII.1.La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM

Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé[30]



FigIII.2. Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

La figure (III.3) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.



FigIII.3. Recherche et recouvrement du Point Puissance Maximale (a) suite à une variation d'éclairement, (b) suite à une variation de charge, (c) suite à une variation de température

Dans ce cas est pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Dans le cas pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Enfin

dans le dernier cas c de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV. Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande[31].

III.3. Classification de l'algorithme de suiveur de la puissance max :

La classification des algorithmes du suiveur peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées: méthodes directes et indirectes.

III.3.1. Les méthodes indirectes :

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions climatiques (température ensoleillement...) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum. Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et donc difficile à généraliser : la méthode d'ajustement de courbe, la méthode « look-up table », la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit.

III.3.1.1. La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur :

Cette méthode, est basée sur la tension du générateur PV au point de puissance maximale qui est approximativement proportionnelle à sa tension à circuit ouvert V_{oc} . La constante proportionnelle k_1 , dépend de la technologie de cellules photovoltaïques, du facteur de forme et des conditions météorologiques.

$$K_1 = \frac{V_{MPP}}{V_{OC}} \text{cte} < \quad (III.1)$$

La tension de circuit ouvert du générateur PV est mesurée et stockée en arrêtant le système cette opération s'effectuant à une certaine fréquence. Le MPP est calculé suivant l'équation (III.1). et la tension de fonctionnement est ajustée sur le point de puissance maximale. Bien que cette méthode soit apparemment simple, il est difficile de choisir une valeur optimale de k_1 .

Cette méthode souffre donc d'inexactitude mais présente l'avantage d'être simple et à bas prix. Aussi, l'interruption de service à la limite des systèmes avec stockage où la déconnexion des panneaux est « transparente » pour l'utilisateur.

III.3.1.2. La méthode de court-circuit :

Cette méthode est similaire à la précédente et est basée sur la proportionnalité existant entre le courant de court-circuit et le courant au point de puissance maximale :

$$K_2 = \frac{I_{MPP}}{I_{OC}} \cong cte < 1 \quad (III.2)$$

Cette méthode présente les mêmes avantages et inconvénients que ceux de la méthode de la tension de circuit ouvert.

III.3.2. Les méthodes directes :

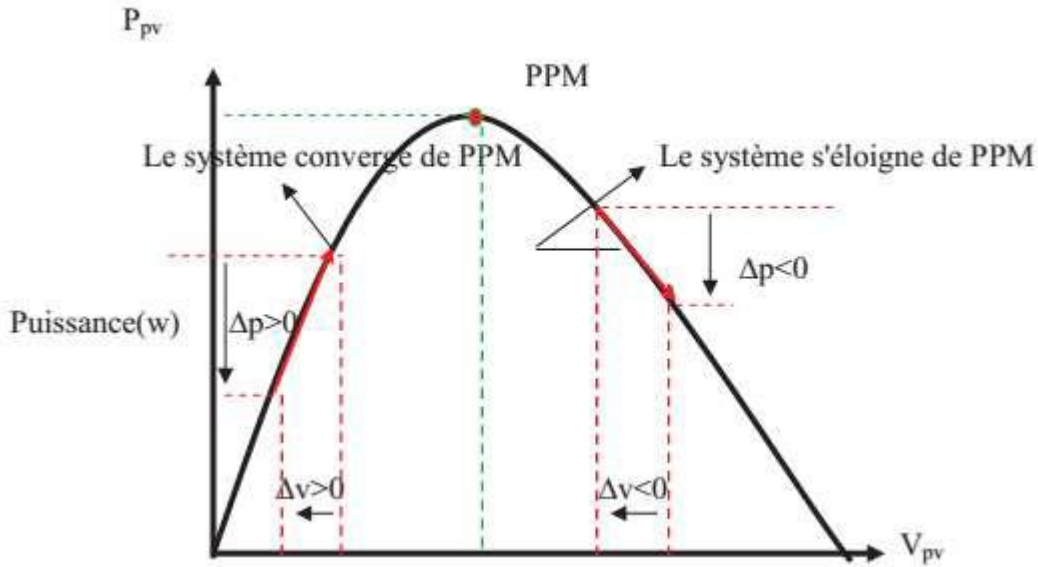
Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures.

L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance

III.3.2.1. La méthode Perturbe & Observe (P&O) :

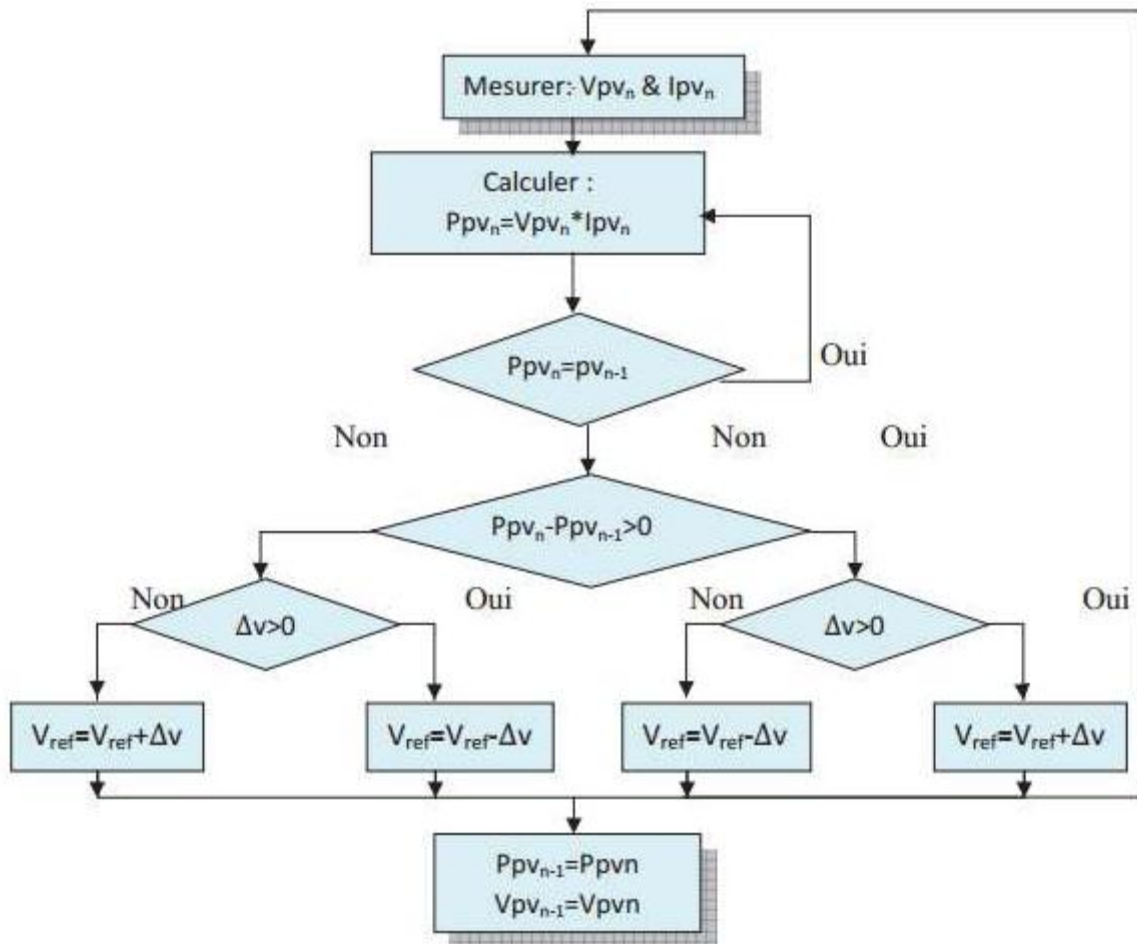
Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension VPV d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance PPV qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure (III.4), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension VPV engendre un accroissement de la puissance PPV, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique PPV(VPV), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande.



FigIII.4. Schéma de converge vers le PPM par P&O

La figure III.5 représente l’algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l’évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.



FigIII.5. Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O la nouvelle puissance : Ppv_n

Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant[32].

P_{PVn-1} : l'enceint puissance dans le temps (t-1)

$$\Delta V = V_{PVn} - V_{PVn-1} \quad (III.3)$$

$$\Delta P = PV_{PVn} - P_{PVn-1} \quad (III.4)$$

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de part sa facilité d'implémentation cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralenti la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser[32].

III.3.2.2.La méthode incrémentation de la conductance :

L'avantage de cet algorithme est la vitesse de recherche du point de puissance maximale quand les conditions atmosphériques changent rapidement ; la description de l'algorithme sera présentée par la suite [33].

La puissance produite par le générateur PV peut être exprimé par:

$$P_{PVn} = I_{PV} \cdot V_{PV} \quad (III.5)$$

La conductance et l'incrément de la conductance peuvent être identifiées en dérivant l'équation par rapport à la tension Ppv:

$$\frac{1}{V} \frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{I_{PV}}{V_{PV}} + \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (III.6)$$

Ainsi on a noté avec G la conductance et avec G l'incrément de la conductance:

$$G = \frac{I_{PV}}{V_{PV}} \quad (III.7)$$

$$\Delta G = \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (III.8)$$

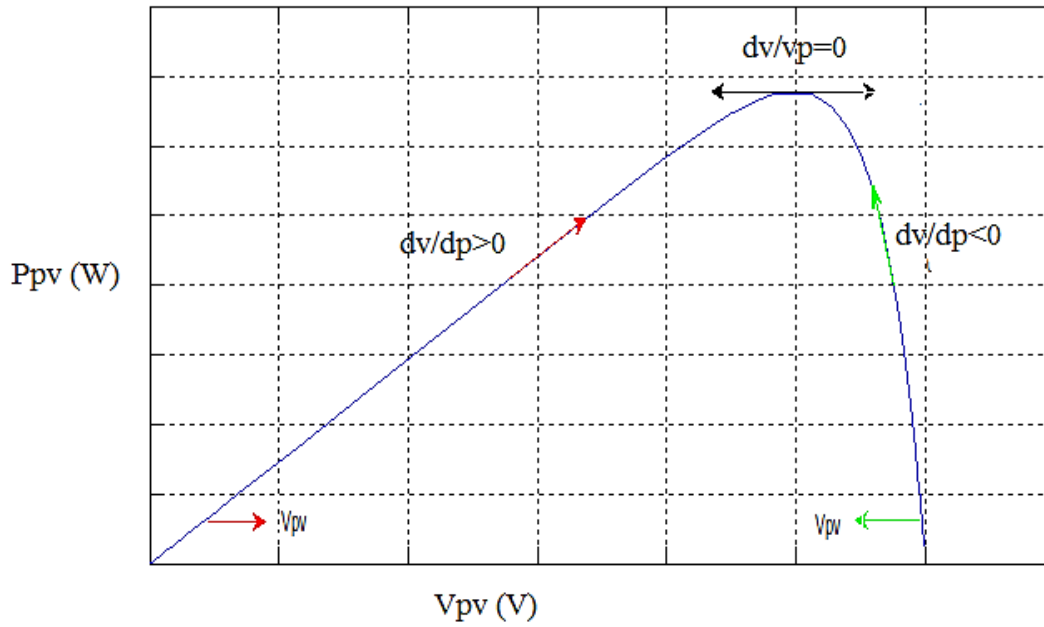
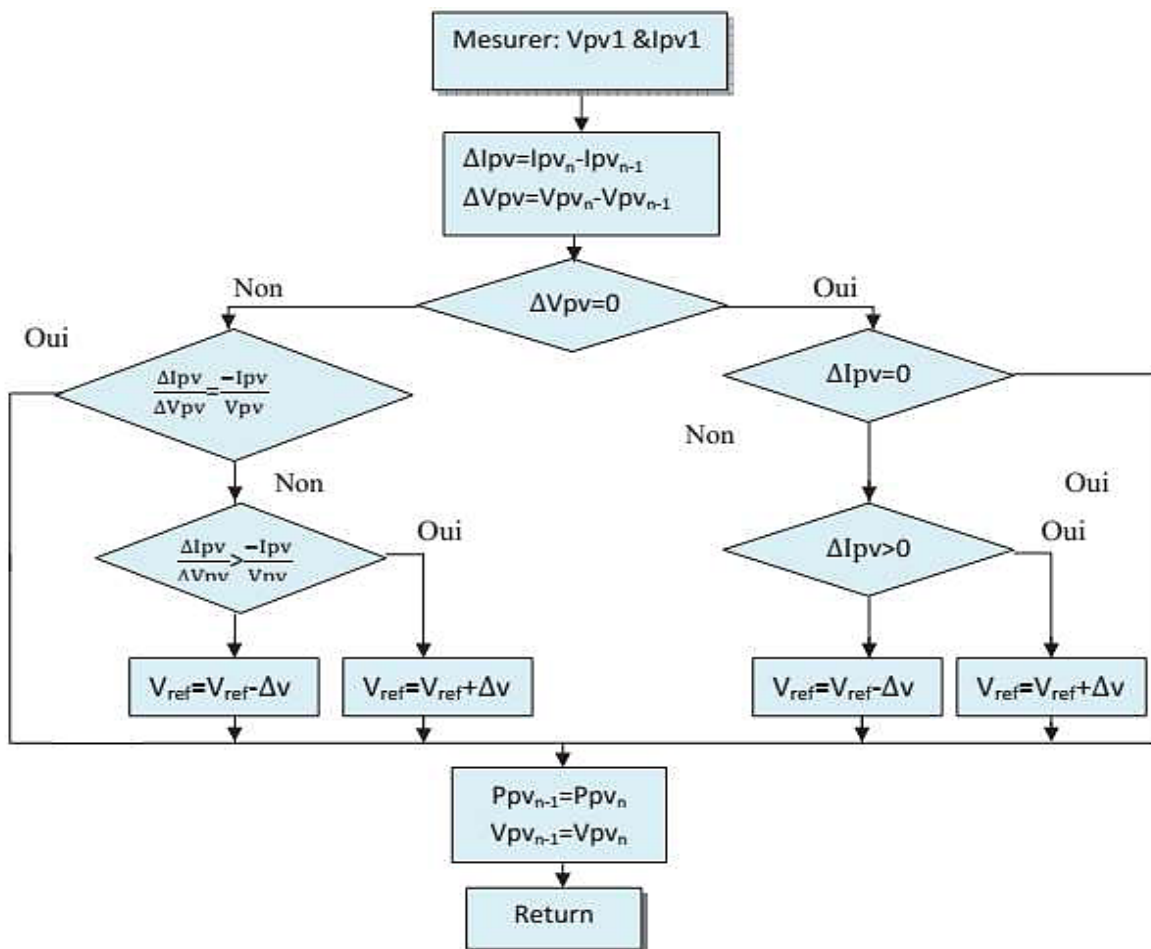


Fig III.6. Trajectoire par Incrémentation de Conductance



FigIII.7. Algorithme d'incrémentation de la conductance

$\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} > 0$:Le point de fonctionnement est à gauche du PPM.

$\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0$:Le point de fonctionnement sur le PPM

$\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} < 0$:Le point de fonctionnement est droit de PPM

III.4. Structure et simulation de la commande MPPT numérique « P&O » :

III.4.1. structure de la commande « perturbation et observation » :

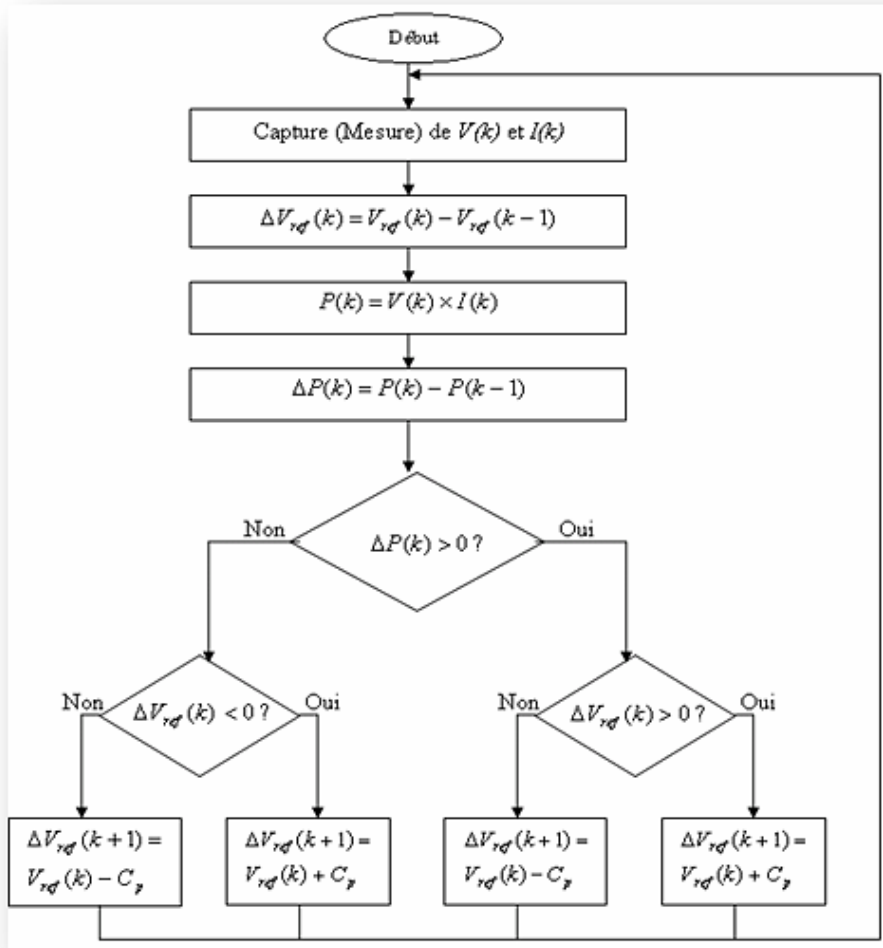
Pour avoir la meilleure connexion entre le « GPV » une source non linéaire et une charge pour produire la meilleure puissance, le Maximum Power Point Tracking (MPPT) est développé. Il forcera le générateur à travailler à son Maximum Power Point (MPP), induisant une amélioration globale du rendement du système. Le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de sa caractéristique électrique (I-V) avec celle de la charge.

Ce point de fonctionnement varie car les conditions de travail varient ou/et la charge varie à tout moment. C'est pourquoi, souvent, on n'opère pas au MPP, et la puissance fournie à la charge est inférieure à la puissance maximale [34].

La méthode de perturbation et d'observation « P&O » est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{pv} et I_{pv} respectivement.

Sur la figure (III.8), on a représenté le schéma la méthode MPPT « perturbation-observation » (p&o).[35]

Dans le cadre de ce travail, on analyse la conception et la simulation d'une commande MPPT numérique « perturbation-observation » qu'on applique aux convertisseurs DC-DC survolteur.



FigIII.8. Algorithme de la méthode MPPT « perturbation-observation » (p&o)

III.4.2. Simulation de la méthode MPPT:

La figure III.9représente Schéma block de la commande MPPT :

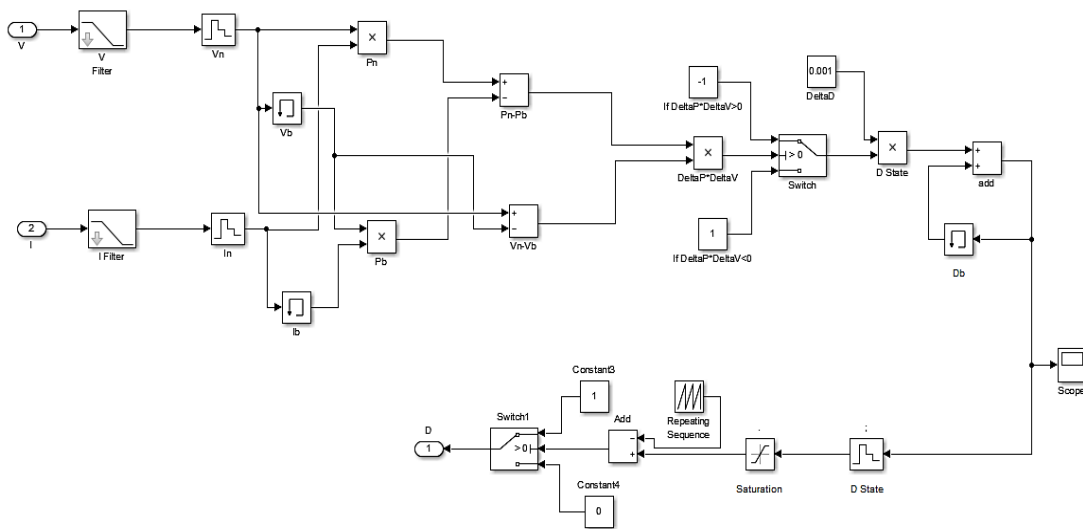


Figure (III.9): Schéma block de la commande MPPT

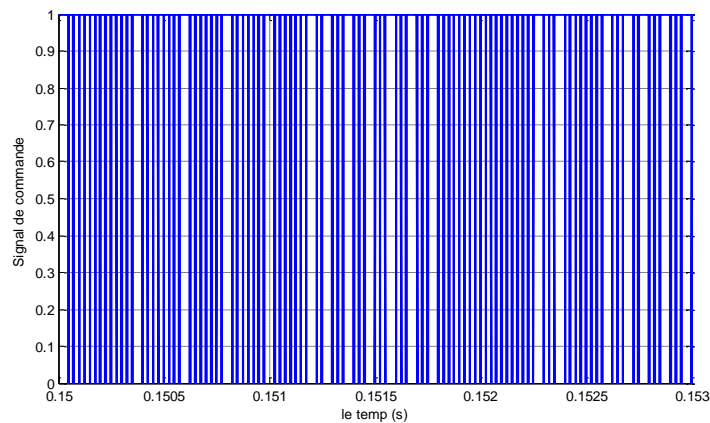


Figure (III.10): *Signal commande MPPT*

III.5.Conclusion:

La caractéristique I-V d'un panneau photovoltaïque n'est pas linéaire. Il existe un MPP (Maximum power point) où la puissance est maximale. On utilise donc des régulateurs qui font la poursuite de ce point (MPPT) afin de délivrer le plus de puissance possible à batterie.

Cette fonction est souvent réalisée par microcontrôleurs. Dans une boucle, l'algorithme mesure la tension et le courant du générateur pour calculer la puissance fournie, puis fait varier le signal MLI du régulateur à découpage afin de maximiser la puissance délivrée par le panneau solaire à la batterie.

Chapitre IV

Systeme photovoltaïque connecté au Réseaux électrique

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons deux modèles pour un système photovoltaïque connecté au réseau électrique qui est représenté sur la figure (IV-1) :

Le premier modèle montre un système photovoltaïque connecté au réseau électrique à travers des convertisseurs de puissance survolteur DC/DC et d'un onduleur DC/AC, dans ce modèle on a fixé les conditions météorologiques tel que (l'éclairement solaire incident et la température), ainsi les variables de référence I_{pvref} au côté DC/DC et I_{rmsref} au côté DC/AC sont fixés.

Le deuxième, c'est un modèle global ou comportemental, dans ce cas on a utilisé le logiciel MATLAB pour la modélisation des différents composants d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau électrique (à savoir le modèle du générateur photovoltaïque PV), à partir du système des équations simulées sur l'environnement MATLAB, on peut déduire les points de puissances maximales. La réponse d'un tel système dépend dans une grande mesure du lieu géographique, où l'installation sera réalisée et des facteurs aléatoires, tels que des conditions atmosphériques variables (éclairage solaire incident, température), donnera directement l'énergie électrique produite par la centrale photovoltaïque connectée au réseau électrique. 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[15].

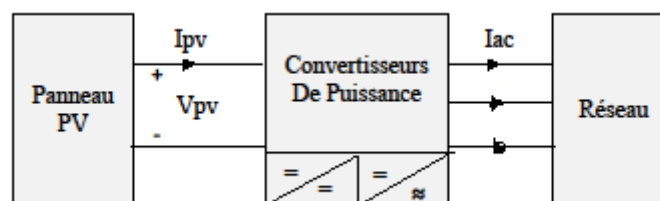


Fig.IV.1 : Système PV connecté au réseau électrique.

IV.2. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) :

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs. Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance [25].

Trois topologies de base de circuit de conversion seront décrites dans les paragraphes suivants (DC-DC) : Dans cette partie nous présentons le principe des trois types de convertisseurs DC/DC (Buck, Boost et Buck-Boost), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseurs n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement [36].

Dans ces études, l'interrupteur du convertisseur est attaqué par un signal MLI (Modulation Large Impulsion), avec une fréquence F_s fixe et un rapport cyclique D variable.

IV. 3.Hacheur survolteur:

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (IV.2). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [26].

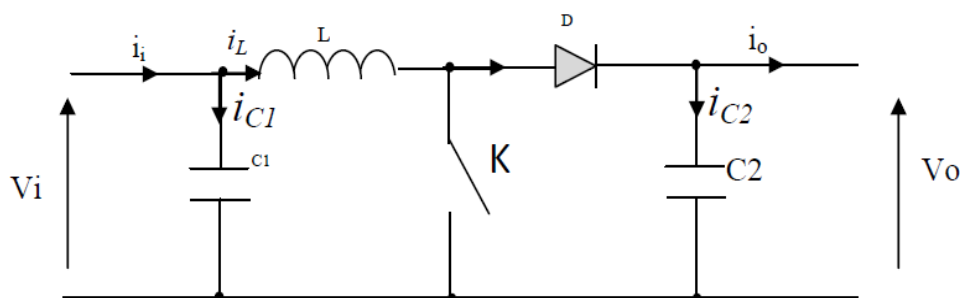


Fig.IV.2 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost

Comme pour le convertisseur dévolteur, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (voir figureIV.2) des deux phases de fonctionnement donne [26] :

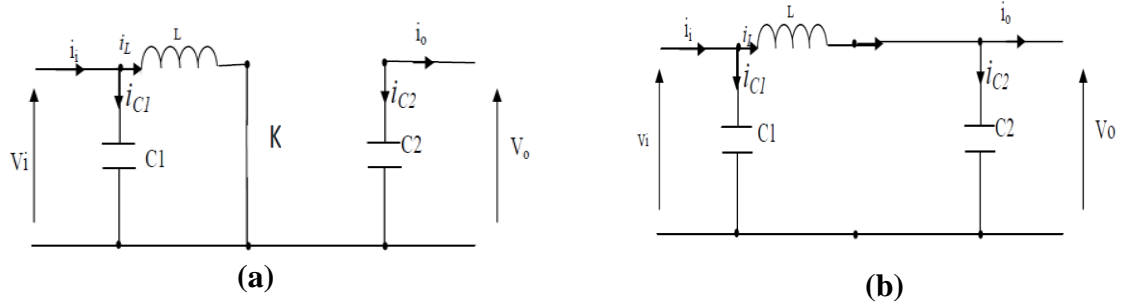


Fig.IV.3: Schémas équivalents du hacheur survolteur,
(a) : K fermé, (b) : ouvert

Pour la première période $d.T_s$:

$$\begin{aligned}
 i_{C1}(t) &= C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\
 i_{C2}(t) &= C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\
 V_L(t) &= L \frac{dI_L}{dt} = -V_i(t)
 \end{aligned}
 \tag{IV-1}$$

Pour la deuxième période $(1-d).T_s$

$$\begin{aligned}
 i_{C1}(t) &= C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\
 i_{C2}(t) &= C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\
 V_L(t) &= L \frac{dI_L}{dt} = V_i(t) - V_o(t)
 \end{aligned}
 \tag{IV-2}$$

En appliquant la relation (II.20) qui trouve le chapitre II sur les systèmes d'équations (IV-1) et (IV-2), Comme pour le convertisseur dévolteur, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [11] :

$$\begin{aligned}
 i_L &= i_i - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} \\
 i_o &= (1 - d)i_L - C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} \\
 V_i &= L \frac{dI_L}{dt} + (1 - d)V_o
 \end{aligned}
 \tag{IV-3}$$

IV.4.1. Modélisation de hacheur survolteur :

C'est un convertisseur DC/DC parallèle inséré entre le générateur photovoltaïque GPV et le reste de la chaîne de conversion. Il est caractérisé par son rapport cyclique $dd(0 < dd < 1)$ avec lequel on peut exprimer les valeurs moyennes des grandeurs de sortie avec celles de l'entrée. Le schéma électrique du hacheur survolteur est donné par la figure (IV.4) [37].

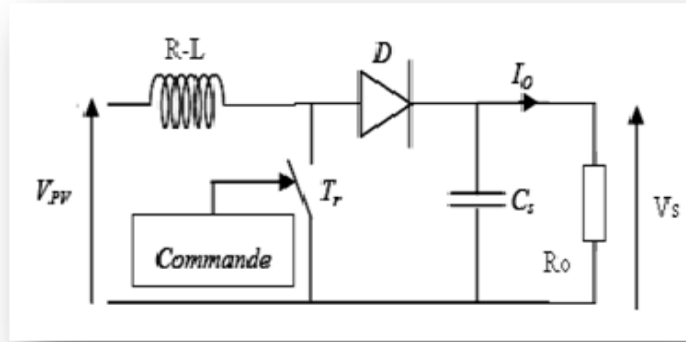


Fig. IV.4 : Convertisseur (DC/DC) survolteur de tension (type boost)

Pour une étude en régime continu, en éliminant les dérivées des variables dynamiques, dans le système d'équations (IV-2), et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes. Le système d'équations devient:

$$\begin{aligned} I_L &= I_e \\ I_S &= (1 - d)I_L \\ V_e &= (1 - d)V_S \end{aligned} \tag{IV-4}$$

Alors, les grandeurs électriques de sorties (V_S et I_S) dans le convertisseur survolteur sont liées à celles d'entrées (V_{pv} et I_{pv}) en fonction du rapport cyclique d du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur par le système d'équations:

$$\begin{aligned} V_S &= \frac{V_e}{1-d} = \frac{V_{pv}}{1-d} \\ I_S &= (1-d)I_e = (1-d)I_{pv} \end{aligned} \tag{IV-5}$$

A partir le système d'équations (IV-5), on peut déduire la résistance à la sortie du panneau PV (R_{pv}) en fonction de α et R_s

$$R_{pv} = \frac{V_{pv}}{I_{pv}} = \frac{(1-d)V_S}{I_S(1-d)} = R_s(1 - d)^2 \tag{IV-6}$$

Alors, le rapport cyclique α s'écrit en fonction des résistances R_{pv} et R_s

$$\frac{R_{pv}}{R_s} = (1 - d)^2 \Rightarrow d = 1 - \sqrt{\frac{R_{pv}}{R_s}} \tag{IV-7}$$

Puisque le rapport α est vérifié l'inégalité $0 < d < 1$, le convertisseur ne joue le rôle d'un élévateur que si la charge R_s remplit la condition suivante :

$$R_s > R_{pv} \tag{IV-8}$$

Dans les conditions optimales et pour une charge R_s donnée, la résistance interne du

panneau ($R_{pv} = R_{opt}$) et le rapport cyclique ($d = d_{opt}$) obéissent donc à l'équation:

$$R_{opt} = (1 - d_{opt})^2 R_s \tag{IV-9}$$

La relation (IV-9) montre que, pour une puissance incidente P, la puissance optimale transférée à la charge ne pourrait être maximale que pour un rapport cyclique bien défini (d_{opt}) (point PPM).

IV.4.2. simulation de hacheur survolteur:

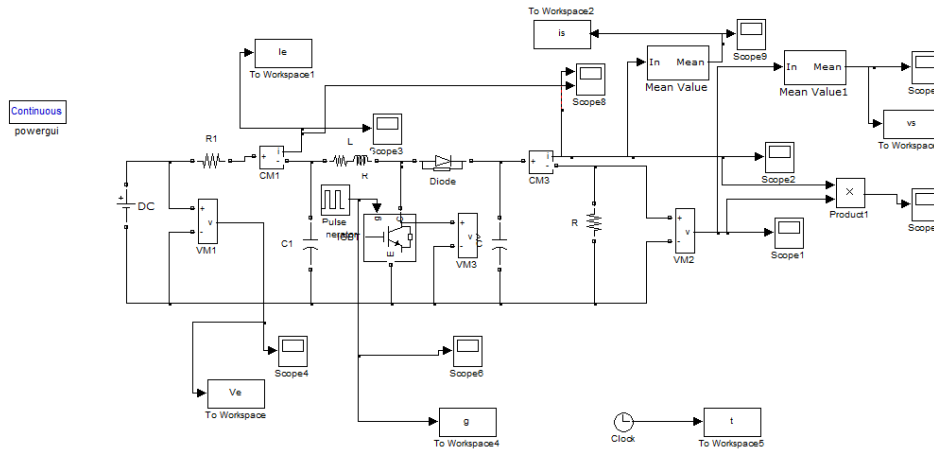


Fig. IV.5: Schéma block d'un convertisseur survolteur

On commande le rapport cyclique (d) à partir la valeur $V_{pv} = V_s$ à l'aide d'un comparateur on fait la comparaison avec signal de la porteuse et un autre en dent de scie figure (IV.5), on obtient en sortie le signal de commande illustré dans la figure (IV.6).

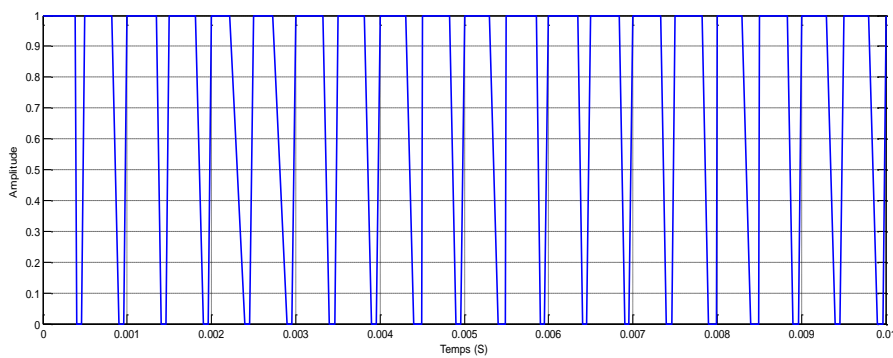


Fig. IV.6: Signal commande DC/DC (gâchette- d'hacheur).

Les résultats de simulation du convertisseur survolteur représentent par les figures (IV.7) à (IV.9). Ces figures représentent les tensions d'entrée et de sortie d'hacheur survolteur ainsi le courant de sortie d'hacheur. Ces résultats montrent que la tension de sortie d'hacheur survolteur est supérieure à celle d'entrée. Donc l'hacheur survolteur effectue correctement

son rôle.

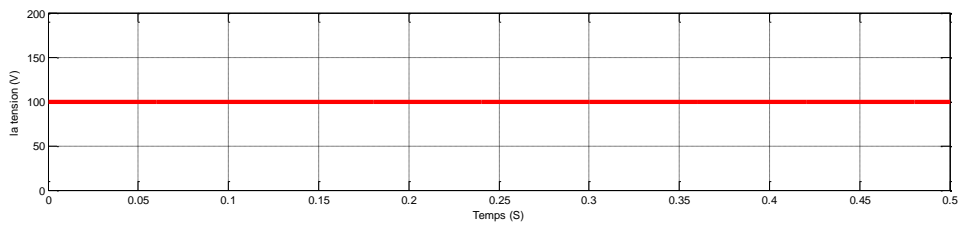


Fig.IV.7 : Résultats de simulation de la tension d’entrée du hacheur survolteur

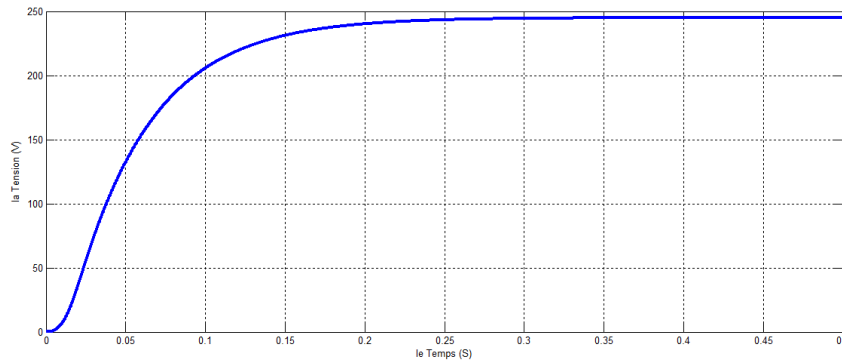


Fig.IV.8: Résultats de simulation de la valeur moyenne de la tension de sortie du hacheur survolteur

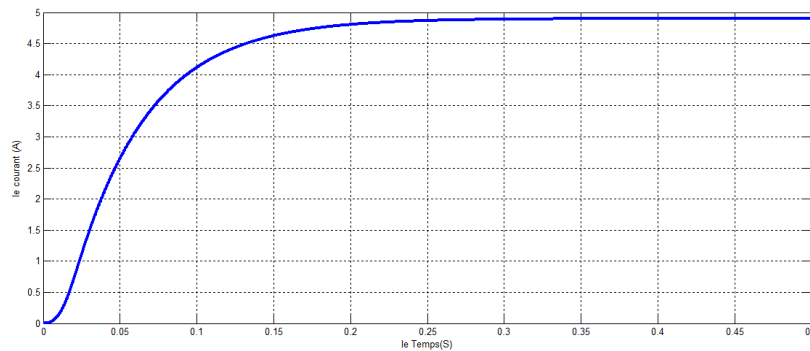


Fig.IV.9: Résultats de simulation de la valeur moyenne du courant de sortie du hacheur survolteur

IV.5. Convertisseurs Continu-Alternatifs :

Les convertisseurs «Continu-Alternatif» 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 [15].

Le plus souvent, on utilise deux ou trois phases. Ces convertisseurs continu-alternatif 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 : Les

commutateurs du courant sont connectés à une source de tension alternative (Figure IV.11) : Les onduleurs de tension sont connectés à une source de courant alternatif (FigureIV.10) [15].

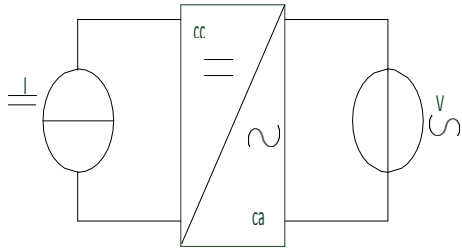


Fig.IV.10 : Onduleur de courant.

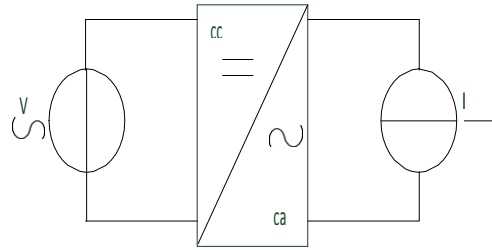


Fig.IV.11 : Onduleur de tension.

IV.5.1. L’onduleur de tension :

L’onduleur triphasé est constitué d’interrupteurs bidirectionnels en courant. Ils sont réalisés par des semi-conducteurs commandables à l’ouverture et à la fermeture (de type IGBT dans la majorité des cas) montés en antiparallèle avec une diode. Pour cette structure, on doit respecter les contraintes suivantes:

- A un instant donné, un seul interrupteur d’un même bras doit conduire afin d’éviter tout court-circuit de la source de tension,
- Le courant de ligne doit toujours trouver un chemin possible d’où la mets-en antiparallèle de diodes au niveau des interrupteurs.

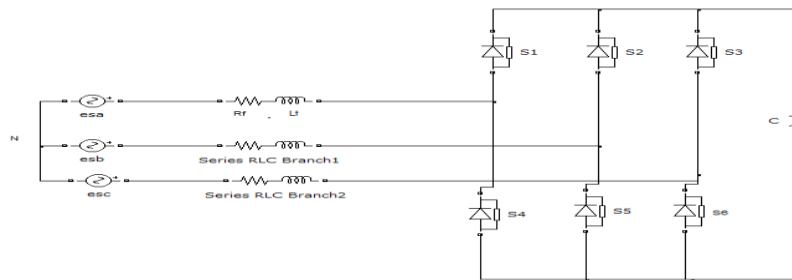


Fig.IV.12 :Filtre actif à structure tension

En théorie, nous commandons les deux semi-conducteurs d’un même bras de façon complémentaire : la conduction de l’un entraîne le blocage de l’autre. Avec cette hypothèse, l’ouverture et la fermeture des interrupteurs de l’onduleur de la figure(IV.12) dépendent de l’état de trois signaux de commande (T1, T2, T3), définis ci-dessous :

$$T_1 = \begin{cases} 1 & S1 \text{ fermé et } S4 \text{ ouvert} \\ 0 & S4 \text{ fermé et } S1 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$T_2 = \begin{matrix} 1 & S_2 \text{ fermé et } S_5 \text{ ouvert} \\ 0 & S_5 \text{ fermé et } S_2 \text{ ouvert} \end{matrix}$$

$$T_3 = \begin{matrix} 1 & S_3 \text{ fermé et } S_6 \text{ ouvert} \\ 0 & S_6 \text{ fermé et } S_3 \text{ ouvert} \end{matrix}$$

En pratique, les deux semi-conducteurs d'un même bras ne doivent jamais conduire en même temps afin d'éviter de court-circuiter la source de tension ; il faut donc générer un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande au blocage d'un interrupteur et la commande à l'amorçage de l'autre interrupteur du même bras. Ainsi, à partir des états des interrupteurs présentés par les variables T_1 , T_2 et T_3 , on obtient huit cas possibles pour les 3 tensions de sortie du filtre actif V_{fi} (référencées par rapport au point de mi-tension continue), comme le montre le Tableau(5.1).

Tableau (IV.1):Tensions en sortie de l'onduleur.

V_{fa}	V_{fb}	V_{fc}	T_1	T_2	T_3	CasN°
0	0	0	0	0	0	0
$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	1	0	0	1
$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	0	1	0	2
$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	1	1	0	3
$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	0	0	1	4
$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	1	0	1	5
$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	0	1	1	6
0	0	0	1	1	1	7

IV.5.2. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) :

La technique de commande par MLI : *la commande par modulation de largeur d'impulsion* résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur.

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, dite *MLI intersective*. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la

fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le Schéma de principe est donné par la figure (IV-13).

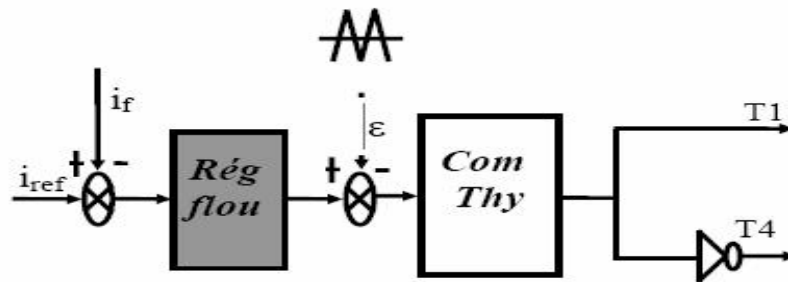


Fig.IV.13: Principe de commande par MLI

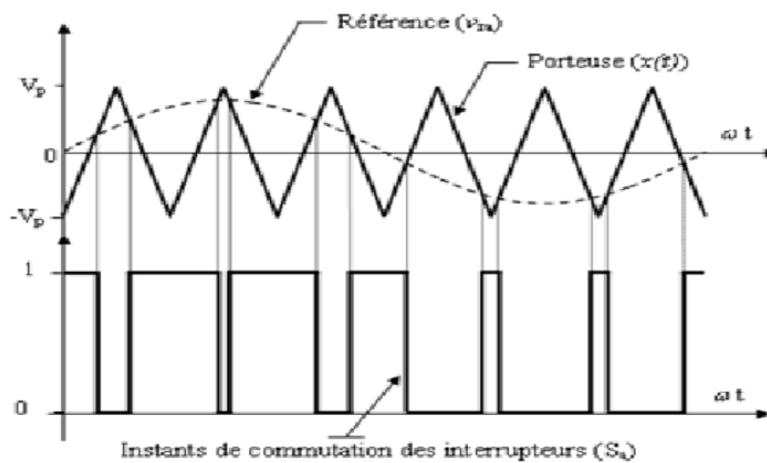


Fig.IV.14:Signal de commande et référence

- **Les filtres :**

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).[38]

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

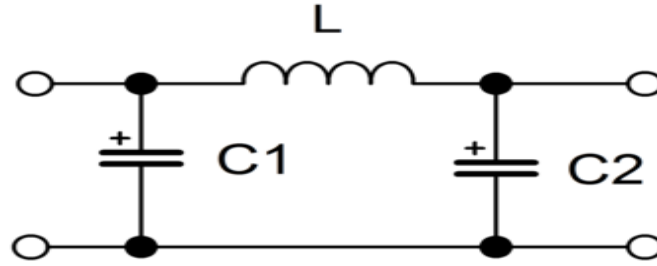


Fig.IV.14 : Le filtre LC

- **La charge :**

Nous avons choisi une charge équilibrée (R) sur le côté alternatif (AC).

- **Le réseau électrique :**

On représente le réseau électrique de distribution publique d’amplitude $V_{réseau}=220$ V et de fréquence $f=50$ HZ.

IV.5.3.Modélisation de l’onduleur :

L’onduleur connecté au réseau est spécifié principalement par un courant injecté dans le réseau électrique produit par le générateur photovoltaïque caractérisé par un facteur de puissance égal à 1, cette modélisation est représentée par la figure (IV.17) suivante [39].

- V_{inv} : La composante fondamentale du rendement d'onduleur.
- V_L : Chute de tension à travers l’inductance de la liaison.
- V_{ac} : La tension de réseau.

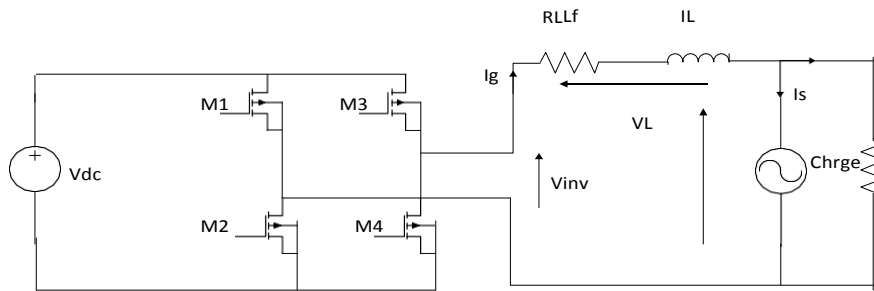


Fig.IV.16 : Position d’un onduleur en pont-H dans la chaîne PV connectée au réseau

Supposant que les pertes sont négligeables, on a :

$$V_{inv}=V_{ac}+V_L \tag{IV-10}$$

Tel que toutes les variables sont des vecteurs de la forme: $V =Ve^{j\phi}$

Donc:

$$V_{inv}=V_{ac}+jLfwI_g \tag{IV-11}$$

L'une des conditions pour laquelle l'injection au réseau se fait avec un facteur d'unité (FP=1) qui peut être déduit dans la figure (IV-16), représentée par l'équation (IV-12).

$$I_j = \frac{V_{inv} - V_{ac}}{jL_f \omega} \tag{IV-12}$$

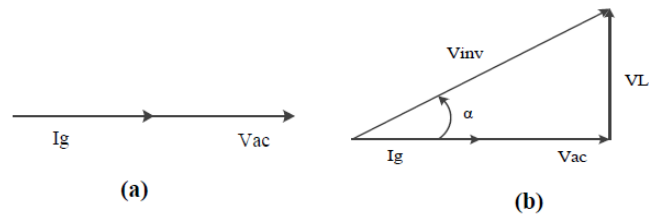


Fig.IV.17 : Diagramme de phase.

La phase ci-dessus dans la figure (IV.17(b)) montre l'importance de la direction de l'écoulement du courant (flux de puissance) peut être commandée par l'angle α de déphasage.

IV.6. Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge) :

La figure (III.22) illustre le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation » :

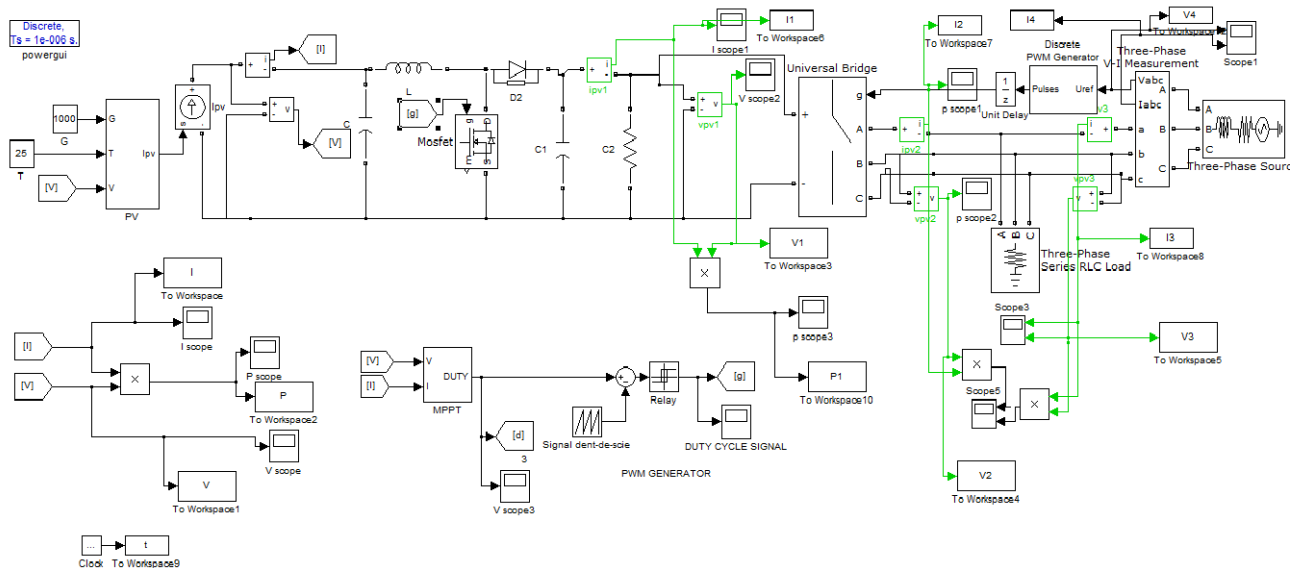


Fig.IV.18 : Schema block global

IV.6.1. un système photovoltaïque sans la commande MPPT (P&O) :

$E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$:

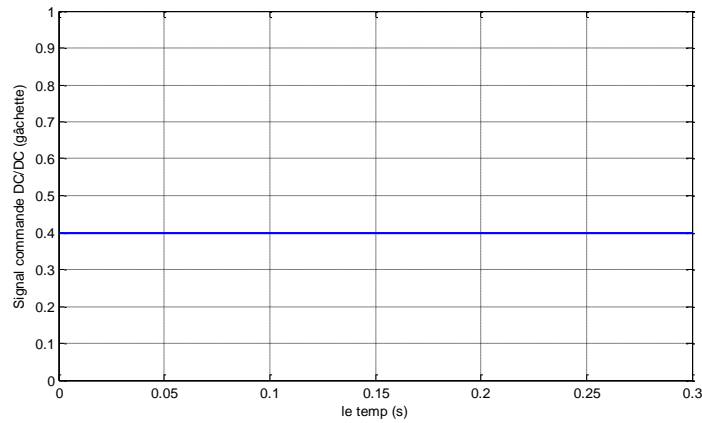


Fig.IV.19: *Signal commande DC/DC (gâchette- d'hacheur).*

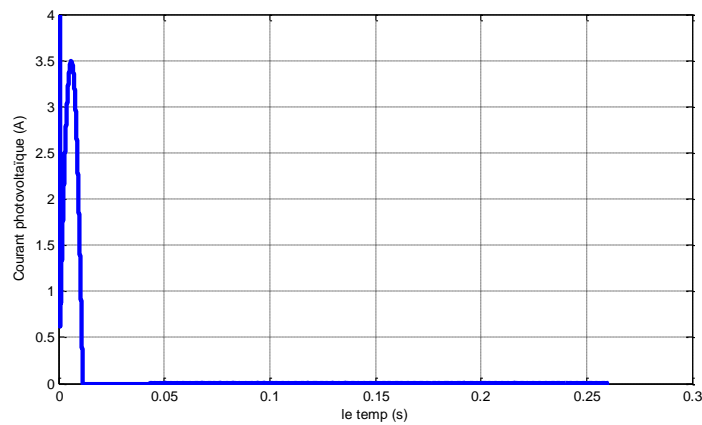


Fig.IV.20: *Courant généré par le générateur photovoltaïque*

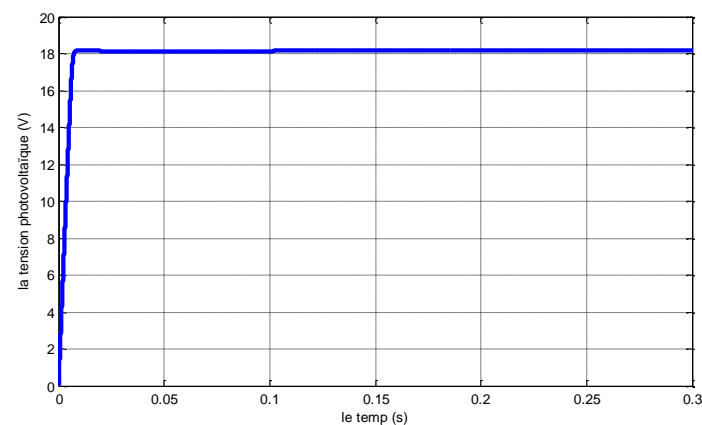


Fig.IV.21: *la tension générée par le générateur photovoltaïque*

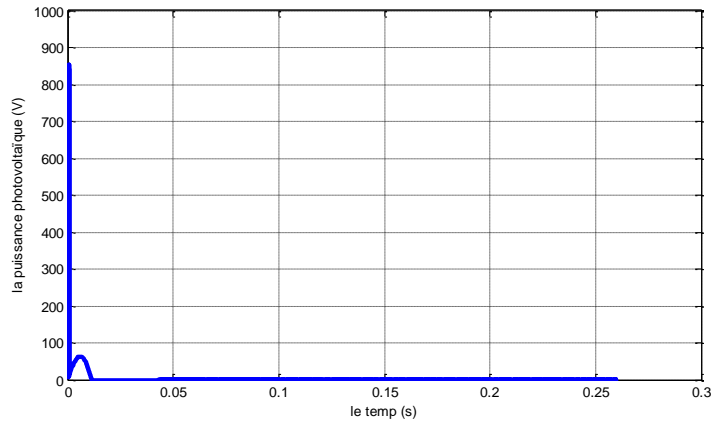


Fig.IV.22: Résultats de simulation de la puissance générée par le générateur photovoltaïque

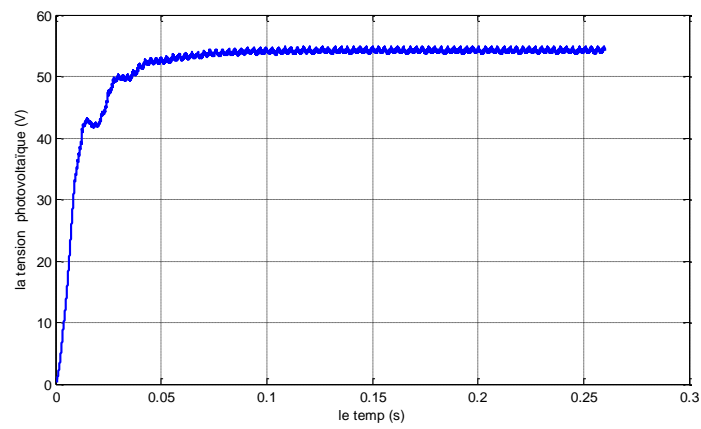


Fig.IV.23: Résultats de simulation de la tension de sortie hacheur du système PV

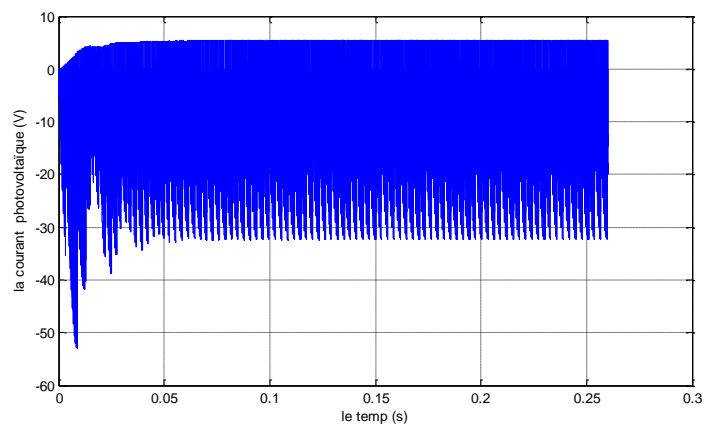


Fig.IV.24: Résultats de simulation du courant de sortie hacheur du système PV

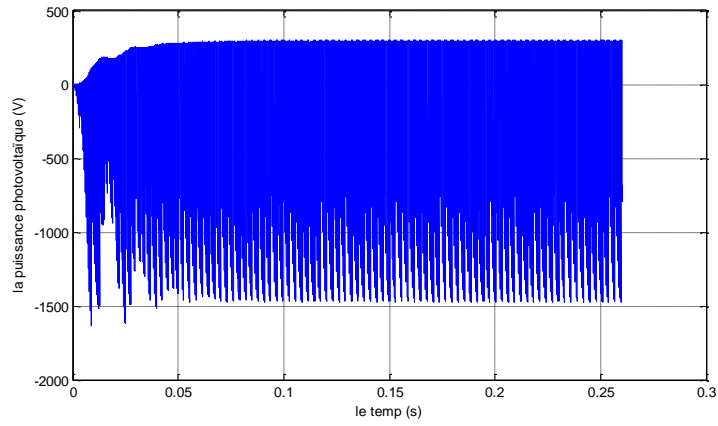


Fig.IV.25: Résultats de simulation de la puissance hacheur de sortie du système PV

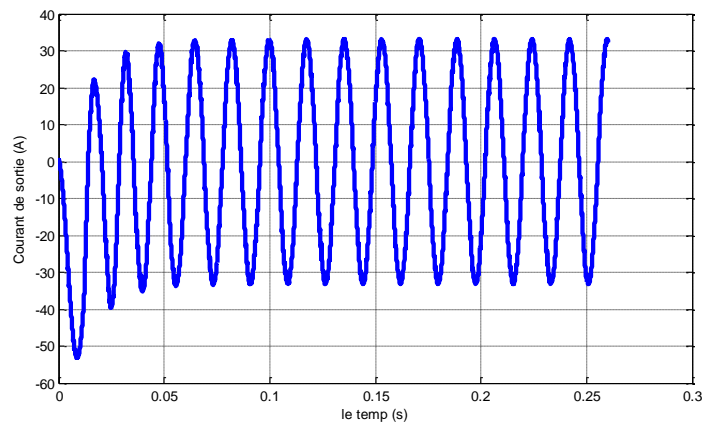


Fig.IV.26: Résultats de simulation du courant de sortie onduleur du système PV

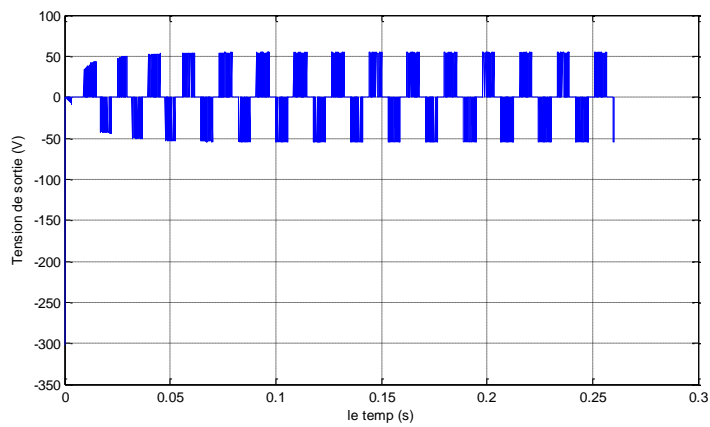


Fig.IV.27: Résultats de simulation de la tension sortie onduleur du système PV

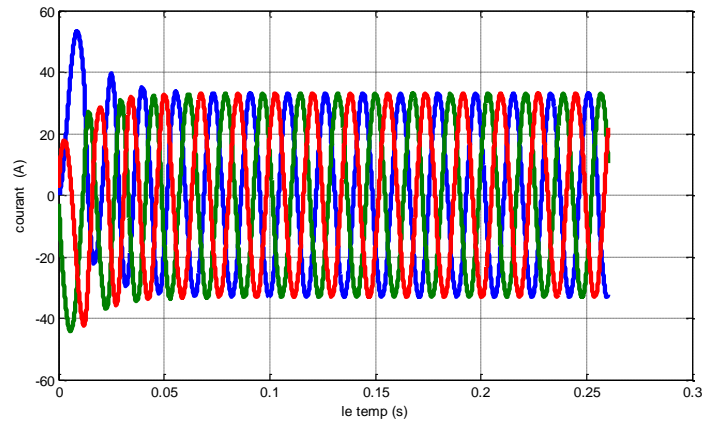


Fig.IV.28: Résultats de simulation de la courant de réseau électrique 3Φ

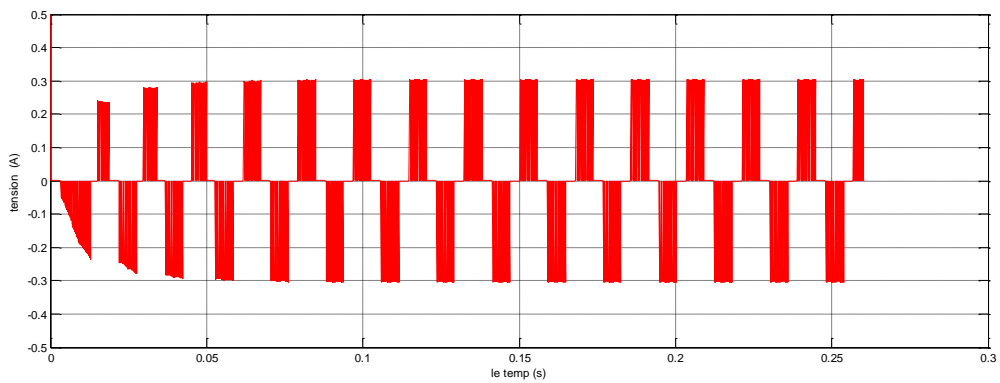


Fig.IV.29: La tension de référence

IV.6.2. un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O) :

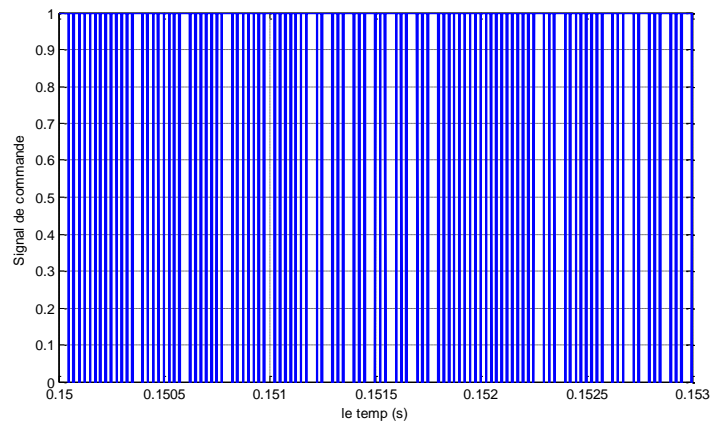


Fig.IV.30: Signal commande DC/DC (gâchette- d'hacheur).

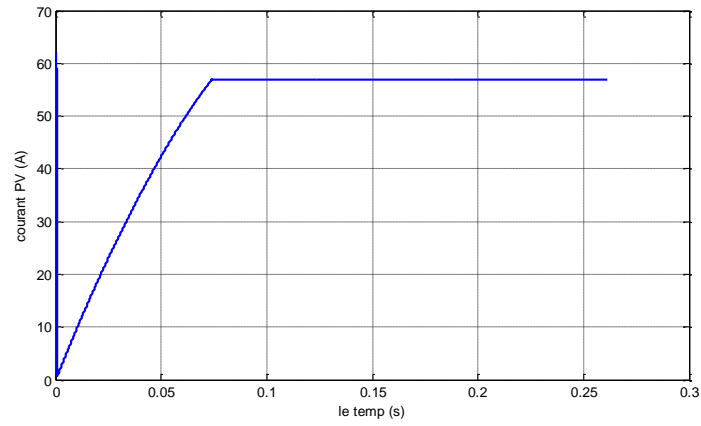


Fig.IV.31: *Courant généré par le générateur photovoltaïque*

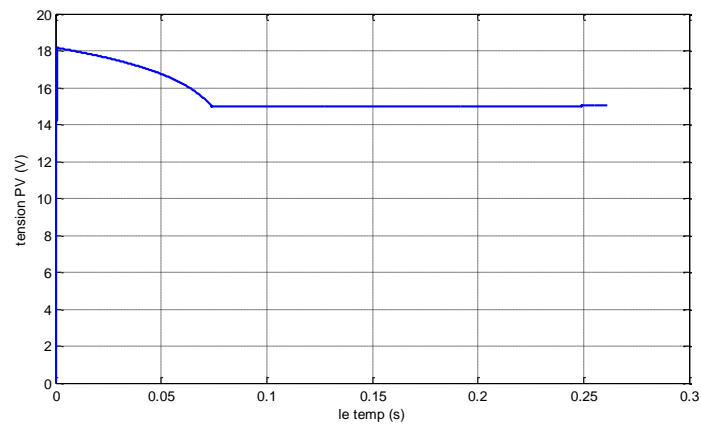


Fig.IV.32 : *La tension générée par le générateur photovoltaïque*

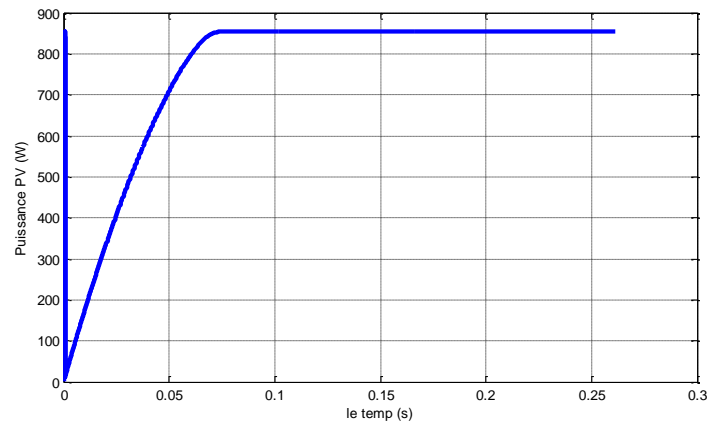


Fig.IV.33: *La puissance générée parle générateur photovoltaïque*

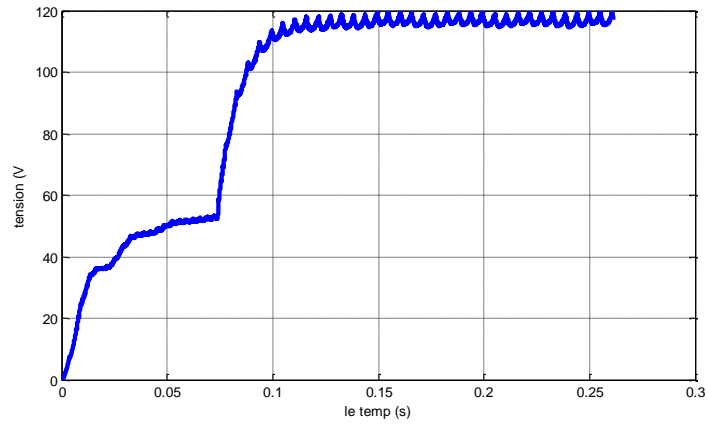


Fig.IV.34: La tension de sortie hacheur du système PV

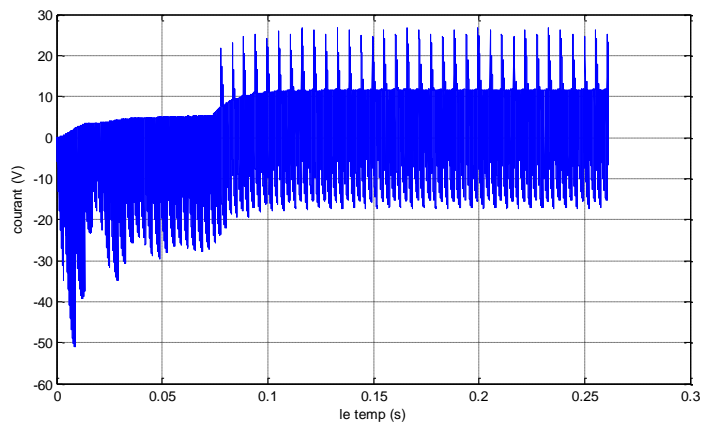


Fig.IV.35: Courant de sortie hacheur du système PV

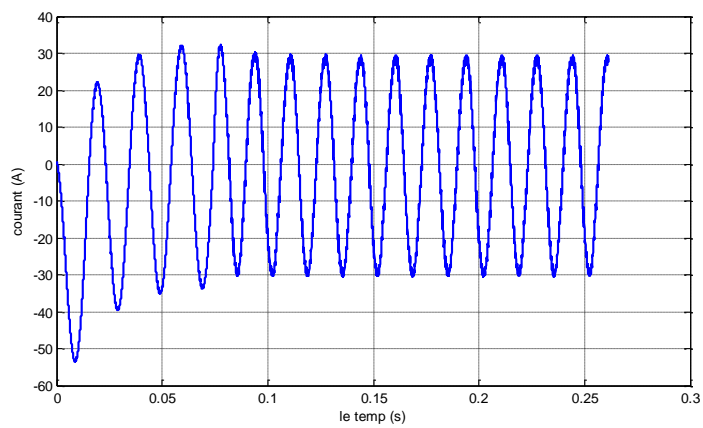


Fig.IV.36: Courant de sortie onduleur du système PV

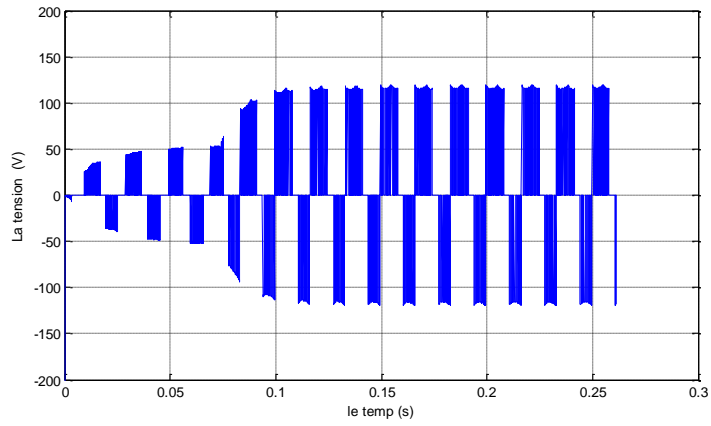


Fig.IV.37 : La tension sortie onduleur du système PV

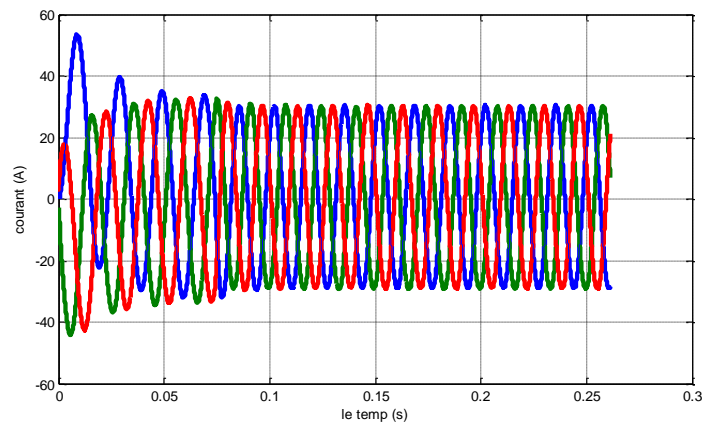


Fig.IV.38: La courant de réseau électrique 3 Φ

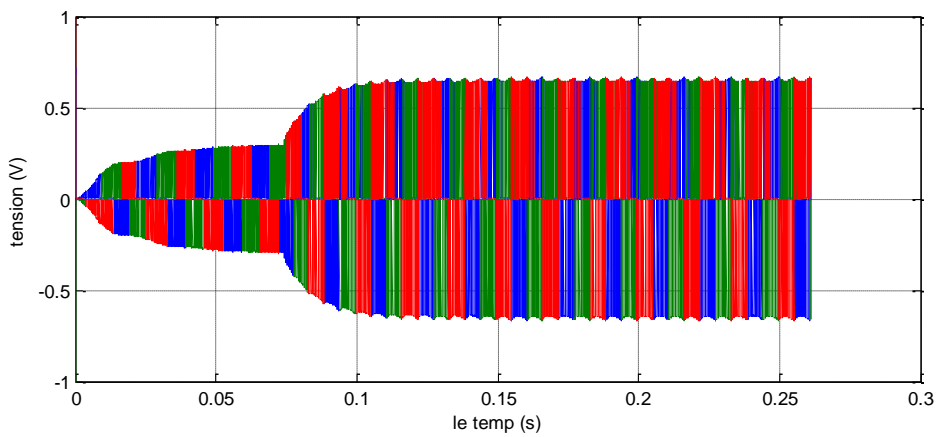


Fig.IV.39: La tension référence

- Pour l'Éclairement Step: $t=0-0.15 \rightarrow E=600 \text{ w/m}^2$ et $t = 0.15- 0.3 \rightarrow E=1000\text{w/m}^2$

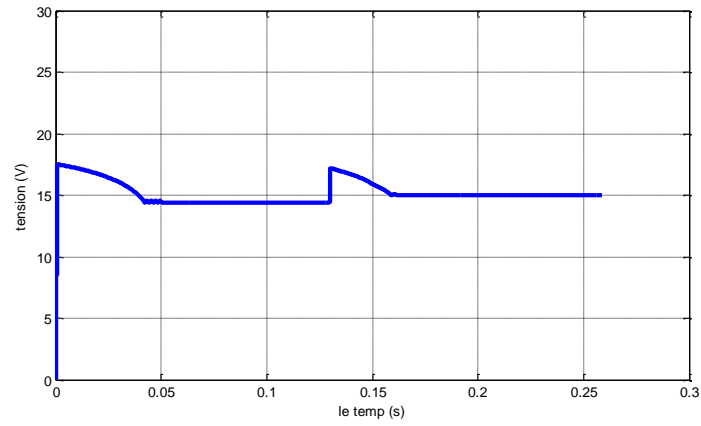


Fig.IV.40: La tension générée par le générateur photovoltaïque

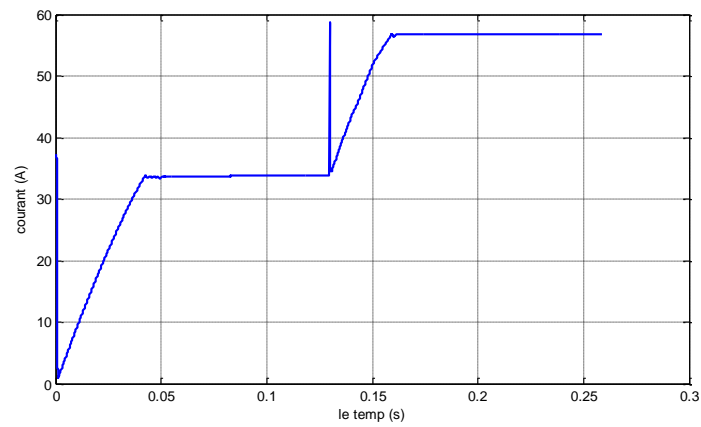


Fig.IV.41: Courant généré par le générateur photovoltaïque

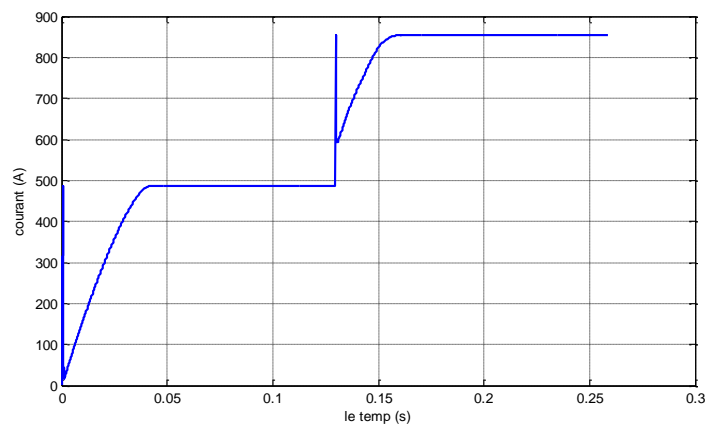


Fig.IV.42: La puissance générée par le générateur photovoltaïque

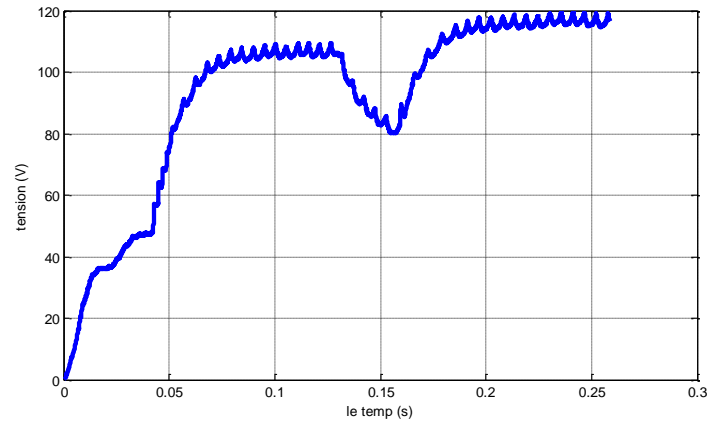


Fig.IV.43:La tension de sortie hacheur

IV.7.Conclusion:

Dans ce chapitre, les composants proposés de système sont mis en application dans des environnements de logiciel MATLAB/SIMULINK et nous avons présenter la simulation du système photovoltaïque connecté au réseau avec l'illustration des différentes opération que subit la tension produite par le générateur PV à fin de satisfaire les 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 :

L'amélioration de la tension au bout d'un réseau électrique est une préoccupation du distributeur d'électricité. Dans le réseau BT rural, la qualité de la tension sera inacceptable lorsque la chute de tension excède 10 %. Parmi les moyens qui améliorent la qualité du réseau, nous citons le renforcement des sections des conducteurs, l'installation de nouveaux postes MT/BT, etc. Le raccordement des mini-centrales photovoltaïques au réseau électrique BT, est une solution très adoptée pour résoudre ce problème en produisant l'énergie électrique à l'endroit du déficit.

Ce travail a donc porté sur la modélisation et la simulation d'un système : photovoltaïque connecté au réseau électrique moyennant le logiciel MATLAB (Simulink). Nous avons procédé à cette étude en cinq étapes : état de l'art des énergies renouvelables appropriées (photovoltaïque), la modélisation du système photovoltaïque, les convertisseurs statiques, la méthode de poursuite de point de puissance maximale et système photovoltaïque connecté au réseau électrique enfin : la simulation de tout l'ensemble.

L'état de l'art des énergies renouvelables (photovoltaïque) joue un rôle prépondérant dans un tel travail. Nous avons commencé par une étude théorique des caractéristiques d'une source primaire (ensoleillement), ensuite nous avons intéressé aux modes d'intégration d'un système photovoltaïque au réseau électrique.

La modélisation du système PV consiste à la mise en équations des différentes parties les constituant : la source primaire (température et ensoleillement), les convertisseurs statiques : l'hacheur survolteur (Boost) et dévolteur (Buck), permettant la commande en tension du panneau photovoltaïque. Il s'agit donc d'optimiser le traitement global de l'énergie électrique au sein du système et en particulier au niveau du générateur, en plaçant celui-ci à chaque instant à son point optimal de fonctionnement grâce à un système de poursuite de type MPPT. De plus, en raison de leur fonctionnement en commutation, ces convertisseurs statiques sont des générateurs de perturbations susceptibles de nuire au bon fonctionnement du générateur tant sur le plan électrique qu'énergétique. Sur le plan énergétique, les ondulations de la tension ou du courant à l'entrée de certains convertisseurs se traduisent par une oscillation du point de fonctionnement sur la caractéristique autour du point de puissance optimale, qui implique une dégradation de la conversion photovoltaïque.

Pour avoir l'échange d'énergie entre le générateur photovoltaïque et le réseau électrique pendant une journée, et de faire une comparaison entre les grandeurs simulées et celles mesurées où les conditions météorologiques (éclairage et température) sont variables.

Annexes

caractéristique PWX 500 PV module (49 W)

%close all;

clear all;

clc;

% Boltzmann constant (J/K)

k = 1.381e-23;

% electron charge (C)

q = 1.602e-19;

% a constant which depends on PV cell technology

% Ideality factor (A) Huan-Liang et al., 2008.

A = 1.3; %Si-poly

% PWX 500 PV module (49 W) characteristics

Pmp = 49; %(W)

Imp = 2.88; %(A)

Vmp = 17; %(V)

Iscref = 3.11; %(A)

Voc = 21.8; %(V)

Rs = 0.45; % the series resistance (?)

Rp=310.0248;

Noct = 45; %°C

u_sc = 1.3e-3; %(K°)

Kd = -72.5e-3; %(K°)

Ns = 1;%36; %% the number of PV cells connected in series

Np=1;

% at the standard test conditions (STC)

Gref = 1000; % (w/m2)

Tcref = 298; % (K°)

% Material band gap energy

Eg = 1.12; %(eV)

Caractéristique du hacheur survolteur :

$$E=100 \text{ V ;}$$

$$R_1=1 \text{ } \Omega \text{ ;}$$

$$r=1 \text{ } \Omega \text{ ;}$$

$$L=0.01 \text{ H ;}$$

$$R=50 \text{ } \Omega \text{ ;}$$

$$C_1=2e-3 \text{ F ;}$$

$$C_2=2e-3 \text{ F ;}$$

$$R_{SD}=500 \Omega \text{ ;}$$

$$C_{SD}=250e-9 \text{ F ;}$$

$$R_{SI}=1e+5 \Omega \text{ ;}$$

Bibliographie

- [1] Touil Nacer Eddine et Ghenbazi Slimane , Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque ,Mémoire de master académique , UNIVERSITE El Oued , 2015
- [2] .(2010)<http://www.solarserver.de/gclid=CJWA1ruS-K4CFS4NtAodSzY7xw>
- [3] "BOUALEM DENDIB" Technique conventionnelles et avancées de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative." Université Ferhat Abbas-Sétif, mémoire de magister, Département d'électronique TS4/6338, 2007.
- [4] S. NAOUAL, "modélisation et extraction automatique des Paramètres d'un générateur," université Ferhat Abbas de Sétif mémoire de magister, département d'électrotechnique 2010.
- [5] baroud kendo li, « état de l'art et modélisation des microcentrales », magister en électrotechnique de l'université mentouri de Constantine 2007.
- [6] Olivier Giraud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat en Electrotechnique de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2002.
- [7] Belhadj Mohammed, « Modélisation d'un Système de captage photovoltaïque autonome », Mémoire de Magister en Microélectronique –Photovoltaïque, centre universitaire de Bechar, 2008
- [8] <http://www.scribd.com/doc/46661921/Les-energies-renouvelables>, consulté le 12/06/2013.(Site Internet).
- [9] B .Flèche, D. Delagnes, « énergie solaire photovoltaïque », STI ELT, juin 2007, énergie solaire photovoltaïque.pdf, consulté janv. 2014
- [10] M. Dahbi « Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne», Thèse de Doctorat, Université de Bechar, 2007.
- [11] F. HEROGUEL, "les cellules photovoltaïques," Ecole Normale Supérieure, Lyon Epreuve de projet, 2007.
- [12] Djarallah, Mohamed, "CONTRIBUTION A L'ETUDE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES RESIDENTIELS COUPLES AU RESEAU ELECTRIQUE," UNIVERSITE DE BATNA Thèse de Doctorat en Science,

- 2008.
- [13] B. Mohammed, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque autonome," Centre Universitaire De Bechar Mémoire de Magister, 2007-2008
- [14] A. C. Pastor, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ," Institut National de Science Appliquée de Toulouse Thèse de doctorat.
- [15] Salama fateh , Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique, Mémoire de Magister , UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF , 2011
- [16] Y. JAUTARD, T. BOUDOL, L'électricité photovoltaïque, Site Internet "Architecture et énergies renouvelables", 2000.
- [17] Anne, Labouret, Michel, Villos., Energie photovoltaïque. (Dunod 3eme édition 2006). Bernard Eque, Energie solaire photovoltaïque (Ellipses 2004).
Sheik Mohammed, S., 2011. Modeling and simulation of photovoltaic module using MATLAB/ Simulink . Int. J. Chem. Environ. Eng. 2
- [18] Huan-Liang Tsai., Ci-Siang Tu., Yi-Jie Su., 2008. Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/Simulink. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science October 22 - 24, San Francisco, USA.
- [19] Chouder, A. Rahmani, L. Sadaoui, N. Silvestre, S. 2012. Modeling and simulation of a grid connected PV system based on the evaluation of main PV module parameters. Simul. Model. Pract. Theory 20, 46–58.
- [20] Beckman, W.A. Klein, S.A. Kou, Q. A method For Estimating The Long-Term Performance Of Direct-Coupled PV Pumping Systems, University Of Wisconsin Solar Energy Laboratory. 1500 Engineering Drive, Madison, U.S.A.
- [21] De Soto, W. 2006. Improvement And Validation Of A Model For Photovoltaic Array Performance By Solar Energy, 80, 78-88.
- [22] Bryan F. 1999, Simulation of grid-tied building integrated photovoltaic systems. MS thesis. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison.
- [23] Townsend, T.U. 1989, Method For Estimating The Long-Term Performance Of Direct-Coupled Photovoltaic Systems. M.S. Thesis, Mechanical Engineering, U. Of Wisconsin-Madison.
- [24] BOUALEM, DENDIB, "Technique conventionnelles et avancées de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative." Université

- Ferhat Abbes-Sétif Mémoire de Magister, Département d'électronique TS4/6338, 2007.
- [25] A. Lyes, "Etude de connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque," UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU Mémoire de Magister, 2011
- [26] N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie Buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.
- [27] S. M. Ait-Cheikh, «Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [28] S. Issaadi, « Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones », Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2006.
- [29] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, «Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné a une installation photovoltaïque », Mémoire d'ingénieur, université de Ouargla, Algérie, 2005.
- [30] S.ABADA "Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic" Mémoire Maître es Sciences, Université Laval, 2011.
- [31] C. CABAL "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque" Thèse de doctorat université de Toulouse III ,2008
- [32] M.ARROUF "Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branche sur un générateur photovoltaïque", thèse doctorats université de Constantine,2007.
- [33] V. Boitier, P. Maussion , C. CABAL "Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques", université de Toulouse, revue 3E.I, N°54, pp 90-96, septembre 2008.
- [34] A. Meflah, « Modélisation et commande d'une chine de pompage photovoltaïque», Mémoire de Magistère, Université de Tlemcen, Algérie, 2011.
- [35] BENSACI Wafa , Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT, Memoire de Master , Université Kasdi

- Merbah–Ouargla, Algérie, 2012
- [36] A. Saadi, "Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque" Université de Biskra Mémoire de Magister, 2000.
- [37] L. Abbassen, «Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque»,Mémoire de Magistère, Université de Tizi-Ouzou, Algérie,2011.
- [38] Zeidane, Bouna Ould, "Contribution to the Study of the Grid Connected Photovoltaic System," université de Batna Faculté des Sciences de l'Ingénieur Mémoire de Magister, 2006.
- [39] A. Chouder¹, S. Silvestre ¹ and A. Malek ², "Simulation of photovoltaic grid connected inverter in case of grid-failure," *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 9, no. 4, pp. 285-296, 2006.