



Sommaire

Sommaire

Sommaire. Nomenclature.

Introduction Générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre I : Définitions et principes généraux sur l'énergie photovoltaïque

I.1. Introduction	03
I.2 .L'effet photovoltaïque.....	03
I.2.1. Géomètre terre soleil	03
I.2.2. Le rayonnement solaire.....	04
I. 2.3. Historiques des cellules photovoltaïques	07
I .2.4 . Technologie des cellules solaires	08
I.3 .Transfert d'énergie des photons aux charges électriques	10
I.3.1. Principe de fonctionnement de la jonction P-N.....	10
I.3.2. Modélisation de la jonction P-N.....	12
I. 4.Le module photovoltaïque	13
I.4.1. Constitution d'un générateur photovoltaïque.....	13
I.4.2. Caractéristiques électriques.....	14
I.4.3 .Les influences climatiques sur les caractéristiques électrique.....	15
I.4.4. Assemblage de panneaux PV	16
I.4.4.1. Assemblage en parallèle	17
I.4.4.2. Assemblage en série.....	17
I.5 .Propriété électrique du générateur photovoltaïque.....	18
I.6. Avantage et Inconvénients.....	19
I.6.1. Avantages	19
I.6.2. Inconvénients	19
I.7 .Secteur d'application.....	20
I.8. Conclusion	23

Chapitre II :Les composants D'un système photovoltaïque autonome

II.1. Introduction.....	25
II .2. Les différents systèmes photovoltaïques autonomes.....	25
II .2.1. Systèmes autonomes.....	25

a) Système au fil du soleil sans stockage	25
b) Système au fil du soleil avec stockage.....	26
II.2.2. Systèmes autonomes hybrides.....	26
II.3. Système de stockage	27
II.3.1. Les batteries	27
a) Principe général de fonctionnement d'une batterie.....	27
b) Caractéristiques du stockage par accumulateurs	28
II.3.2 Accumulateurs au plomb.....	29
a) Bref historique.....	29
b) Composition d'une batterie solaire plomb- Acid	29
c) Les caractéristiques d'une batterie au plomb	30
d) Charge de batterie	31
e) Risque de surcharge.....	33
II.4 Système de régulation	34
II.4.1 Régulation de décharge.....	34
II.4.2 Régulation de la charge.....	35
a) Régulations de charge série	35
b) Régulateur de charge de coupure	35
c) Régulateur de charge à découpage.....	36
d) Régulateur de charge série à coupure partielle.....	36
e) Régulateur de charge parallèle	36
II.4.3 Qualités d'un régulateur	37
II.5. Système de conversion	37
II.5.1 Le convertisseur continu -continu	37
II.5.2 Le convertisseur continu- alternatif	38
II.6 La Charge	40
II.7 Configuration du système retenu pour notre étude	40
II.8 Conclusion.....	42

Chapitre III : Techniques de commande des convertisseurs électroniques

III.1 Introduction.....	43
III.2. Couplage du convertisseur au générateur PV	43
III.3. Convertisseur DC / DC	44
III.3.1. Le hacheur survolteur Boost	45
III.4. Commande (MPPT) des convertisseurs DC/DC.....	47
III.4.1. Méthode de contre réaction de tension	49
III.4.1.1. Méthode à tension de référence fixe	49

III.4.1.2. Méthode PPM avec mesure de Voc du panneau	50
III.4.1.3. Méthode MPPT avec cellule pilot.....	50
III.4.2. Méthodes avec contre réaction de puissance	51
III.4.2.1. Méthode de la perturbation et l'observation la (P&O)	51
III.4.2.2 Méthode par incrémentation de conductance	53
III.4.3 Méthode avec contre réaction du courant.....	56
III.5. Les convertisseurs DC/AC	57
III.5.1.Principe de conversion DC/AC d'un onduleur PV	58
III.5.2. Principe du choix de l'onduleur.....	58
III.5.3. Type d'onduleurs	59
III.5.3.1. Onduleur d'onde sinusoïdale	59
III.5.3.2. Onduleur à onde carrée.....	59
III.5.3.3. Onduleur à onde pseudo-sinusoïdale	59
III.6. Commande de l'onduleur.....	60
III.6.1. Onduleur de tension.....	60
III.6.2. Stratégie de commandes triphasées.....	60
III.6.2.1. Commande par hystérésis.....	61
III.6.2.2. Commande par modulation de largeur d'impulsion	62
III.6.2.2.1. MLI échantillonnage naturel.....	63
III.6.2.2.2. MLI à échantillonnage optimisé (calculé)	64
III.7 Conclusion	65

Chapitre IV : Modélisation et simulation du système photovoltaïque autonome

IV.1 Introduction.....	66
IV.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	66
IV.2.1 Paramètres et caractéristiques d'une cellule photovoltaïque	69
IV.2.2 Résultats de la simulation.....	69
a) Influence de l'éclairement	70
b) Influence de la température	71
IV.3 Module photovoltaïque	73
IV.3.1 L'influence de la température et de l'éclairement sur un GPV	73
IV.3.1.1 Effet de l'éclairement sur le module photovoltaïque	74
IV.3.1.2 Effet de la température sur le module photovoltaïque	75
IV.4 Modélisation d'un hacheur boost.....	76
IV.4.1 Etude d'un hacheur parallèle en conduction continue.....	76

IV.4.2 Résultat de simulation.....	79
IV.5 Modélisation de l'onduleur de tension.....	79
IV.5 Modélisation de la batterie de stockage.....	84
a) Modèle de la charge de la batterie.....	84
b) Modèle de la décharge de la batterie.....	85
c) La tension de la batterie.....	86
d) Courant de batterie.....	87
e) Rendement de la Batterie.....	88
IV.7 Conclusion	88

Conclusion générale

Bibliographiques et Annexes

Liste des figures

Figure. I.1 : Plan de l'écliptique : l'orbite terrestre et les saisons	1
Figure .I.2 : Définition de la position de soleil (hauteur et azimut)	2
Figure : I .3 : Exemple de spectre solaire	3
Figure. I.4 : Le rayonnement solaire	4
Figure I.5 : Effet de cosinus	5
Figure I.6: Cellules monocristallines.....	6
Figure I.7: Cellules polycristallines.....	7
Figure I.8: Cellules Couche mince	7
Figure. I.9 : Schéma de principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	9
Figure I.10 : Caractéristique d'une jonction PN polarisée sous différents éléments	10
Figure .I.11 : circuit équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque et schéma conventionnel d'une cellule ou d'un module photovoltaïque.....	10
Figure : I.12 : Le module photovoltaïque.....	11
Figure. I.13 : Courbe $I=f(v)$ d'un panneau photovoltaïque	12
Figure I.14 : Influence de l'ensoleillement sur la courbe $I=f(v)$	16
Figure I.15 : Influence de la température sur la courbe $I=f(v)$	16
Figure I .16 : Association des modules en parallèle.....	17
Figure. I.17 : caractéristique $I=f(V)$ pour l'association en parallèle	18
Figure. I.18 : Association des modules en série	18
Figure. I.19: caractéristique $I(V)$ pour l'association en série $G=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$	19
Figure .I.20 : Les différentes zones de la caractéristique $I(V)$	20
Figure II.1 : principe de production d'électricité dans un convertisseur électrochimique..	28
Figure II.2 : Schéma d'une cellule acide plomb.....	30
Figure II.3 : Courbes de charge et de décharge d'une cellule élémentaire de batterie au plomb	30
Figure II.4 : Différentes phases de charge de la batterie	33
Figure II .5 : Schéma de principe d'un régulateur de charge série.....	35
Figure II.6 : Schéma de principe d'un régulateur de charge à découpage	36
Figure II.7 : Schéma de principe d'un régulateur de charge parallèle	37
Figure II.8 : Schéma de L'onduleur	39
Figure II.9: Schéma synoptique d'un générateur photovoltaïque autonome	41
Figure III.1: Schéma synoptique d'un système de conversion énergétique.....	43

Figure III.2 : Chaîne de conversion photovoltaïque	44
Figure III.3 : Circuit électrique de base du hacheur survolteur.....	45
Figure III.4 : Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur.....	47
Figure III.5 : Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur DC/DC contrôlé par une commande (PPM) surcharge DC	48
Figure III.6 : Intervalles de variation de la tension de fonctionnement optimale pour des ensoleillements et des températures variables	50
Figure III.7: Schéma de la méthode à contre réaction de puissance	51
Figure III.8: Organigramme de la méthode à contre réaction de puissance	53
Figure. III.9: Caractéristique de la puissance	54
Figure III.10 : Algorithme d'une commande MPPT basé sur la méthode incrément de conductance	55
Figure III.11: Fonctionnement d'une commande MPPT de type IncCond illustré sur une chaîne élémentaire de conversion PV	56
Figure III.12 : Méthode de la contre réaction en courant.....	57
Figure III.13 : Structure de l'onduleur triphasé.....	60
Figure III.14: Principe de commande des courants par hystérésis	61
Figure III.15: Commande des interrupteurs par hystérésis.....	62
Figure III.16 : Principe de fonctionnement de MLI	63
Figure III.17: Principe de commande des courants par MLI.....	63
Figure III.18 : MLI optimisé (Calculé)	64
Figure IV.1 : Cellule solaire idéale	67
Figure IV. 2 : Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle.....	68
Figure IV.3 : Caractéristique I-V d'une cellule PV ($G=1\text{kW/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$)	70
Figure IV.4: Caractéristique P-V d'une cellule PV ($G=1\text{kW/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$)	70
Figure IV.5: Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V d'une cellule PV.....	71
Figure IV.6: Influence de l'éclairement sur la caractéristique P-V d'une cellule PV.....	71
Figure IV.7: Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule.....	72
Figure VI.8: Influence de la température sur la caractéristique P-V d'une cellule.....	73
Figure IV.9: Caractéristique I-V d'un module photovoltaïque.....	73
Figure IV.10: Caractéristique P-V d'un module photovoltaïque	74
Figure IV.11 : Caractéristiques courant-tension pour différentes radiations incidentes	

température constante 25°C	75
Figure IV.12 : Caractéristiques puissance-Tension pour différentes radiations incidentes	
Température constante 25°C.....	75
Figure IV.13 : Caractéristique courant- tension pour différentes températures pour une radiation incidente de 1000W/m ²	76
Figure IV.14 : Caractéristiques puissance-Tension pour différentes températures pour une radiation incidente de 1000W/m ²	76
Figure IV.15: Schéma de principe du hacheur parallèle (élevateur de tension)	76
Figure IV.16 : allure de la tension aux bornes du thyristor	79
Figure IV.17 : La tension à la sortie du hacheur	79
Figure IV.18 : Schéma représentatif d'un onduleur de tension triphasé	80
Figure IV.19 : schéma simplifié d'un onduleur de tension commandé en tension	81
Figure IV.20 : représente le tracé des signaux de commandes des interrupteurs constituant l'onduleur	83
Figure IV.21: Tension à la sortie de l'onduleur.....	83
Figure IV.22 : Schéma électrique de batterie.....	86
Figure IV.23 : Variation de tension en mode de charge en fonction de l'état de charge .	86

Introduction générale

Clicours.COM

Introduction générale

Les énergies ont joué de tout temps un rôle important dans l'épanouissement des sociétés. Les énergies conventionnelles ont permis des progrès énormes. Néanmoins elles demeurent une source de préoccupation et posent plusieurs problèmes.

Les besoins croissants en énergie et la multiplication des dispositifs électroniques ont conduit à diversifier les sources d'approvisionnement. L'utilisation de l'énergie dépend de sa disponibilité et de sa facilité de mise en œuvre.

Le gisement de ressources énergétiques traditionnelles ; d'origine principalement fossiles, ne peuvent être exploitées que pour quelques décennies car non seulement, elles sont polluantes, mais elles ont un caractère limité ce qui laisse présager d'une situation de pénurie énergétique à l'échelle mondiale de façon imminente.

Ces deux dernières décennies, les énergies renouvelables surtout utilisées pour alimenter des sites isolés (montagnes ou zones désertiques) ou dans les pays où la production d'électricité à partir d'énergie renouvelable était subventionnaire.

Aujourd'hui ces énergies se présentent comme le meilleur candidat car le facteur favorisant de ses énergies propres est tout autre puisque c'est la protection du climat dont il s'agit. Du fait du Protocole de Kyoto les pays les plus industriels doivent réduire (au plus tard en 2012) leurs émissions de gaz à effet serre (GES) de 5% par rapport à leurs rejets en 1990. Le problème c'est que dans le même temps ; la consommation d'énergie va croître.

Pour produire plus tout en polluant moins il est donc indispensable d'avoir massivement recours aux énergies renouvelables (solaire, géothermique, biomasses, éolienne) qui sont les seuls (avec le nucléaire) à n'émettre aucun GES mais la lutte contre le réchauffement climatique n'est pas le seul élément qui plaide pour le développement des énergies renouvelables. Prisonnière d'une géographie difficile, de nombreuses régions du monde ne sont pas irriguées par des réseaux électriques. Au total, on estime que deux milliard de personnes sur la planète n'ont pas accès au courant car la majorité de ses défavorisés habite dans les pays en voie de développement où les situations économiques ne permettent pas de construire de puissantes centrales électriques. Les énergies renouvelables apportent des éléments de solutions, notamment en permettant la production d'électricité locale. Installées sur les maisons, ou à proximité immédiate des villages, les éoliennes ou les cellules photovoltaïques fournissent un courant directement à leur utilisateurs, sans qu'il soit nécessaire de tirer d'importants et coûteux réseaux.

Dans ce contexte général notre étude s'intéresse à l'énergie photovoltaïque qui est l'une des meilleures solutions adaptée au défi énergétique du XXI^e siècle sachant que l'énergie solaire reçue par la terre vaut environ 10 000 fois la quantité totale d'énergie consommée par l'ensemble de l'humanité, la densité du rayonnement solaire n'est pas du tout grande et ne cause aucun conflit entre les pays contrairement au pétrole.

Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants. Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer la tension continue fournie par les modules solaires pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative pour faire fonctionner des systèmes autonomes ou connectés au réseau .

Le présent travail a pour objet d'étudier et de modéliser un système permettant l'injection de l'énergie électrique photovoltaïque dans une alimentation autonome. Pour décrire cela ce mémoire est présenté en quatre chapitres.

- Le premier chapitre consiste à faire un aperçu général sur la conversion photovoltaïque ainsi que les équations de base qui caractérisent ce transfert énergétique et présenter l'influence des conditions de fonctionnement (éclairage et température) sur la réponse des cellules solaires. Les types de cellules existant, les avantages et les inconvénients de la technique photovoltaïque et les domaines d'application de ce type de source d'énergie.
 - Dans le deuxième chapitre nous allons présenter des topologies des installations photovoltaïques, celles qui sont non raccordées au réseau (systèmes autonomes) qui nécessitent une intégration d'un système de stockage (batteries). Le critère de haut rendement qui rend le système photovoltaïque plus rentable a été considéré.
 - Dans le chapitre trois nous nous intéresserons aux différentes techniques de commande des convertisseurs statiques et soulignerons les diverses méthodes de la recherche du point de puissance maximale lors du transfert énergétique qui nécessitent l'utilisation du hacheur et de l'onduleur commandé par la technique MLI.
 - Le chapitre quatre propose le schéma global de la chaîne de conversion pour le système photovoltaïque autonome, puis on s'intéresse à simuler les différents composants constituant notre système à l'aide d'un logiciel mathématique MATLAB.
- On clôture le mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude.



Chapitre I

*Définitions et principes généraux sur
l'énergie photovoltaïque*

I.1.Introduction :

Le soleil est la plus importante de toutes les sources d'énergie renouvelables. L'énergie de son rayonnement peut être utilisée soit directement, soit indirectement par exemple les installations photovoltaïques pour produire de l'électricité ou par le biais de l'énergie thermique emmagasinée par l'environnement. La surface terrestre reçoit le flux solaire, une quantité reste perdue lors de la traversée de l'atmosphère et la quantité restante demeure encore importante quand elle arrive au sol. Mais le rayonnement solaire acquis par le sol dépend de :

- L'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre
- L'altitude du lieu de collecte et ses degrés de pollution
- La période de l'année
- L'instant considéré dans la journée
- La nature des ondes nuageuses

Dans ce chapitre nous présentons quelques généralités qui concernent le flux solaire ainsi que les éléments de base du système photovoltaïque.

I.2. L'effet photovoltaïque :

I.2.1. Géométrie terre soleil

Le soleil est une petite étoile de forme pseudo- sphérique, une boule de gaz dont le diamètre est de 1391000 km. Il est situé à une distance moyenne de 149 600 000 km de la terre [1] il est le siège de réaction de fusion nucléaire permanente et sa température interne atteint 13000 000 °C et à la surface 600°C. [1]

Quant à son volume il pourrait contenir 13, 000,00 Terres c'est-à-dire $1412 \times 10^{15} \text{ km}^3$ avec une surface de $609 \times 10^{10} \text{ km}^2$.

Le soleil est donc une énorme boule de gaz composée de 70% d'hydrogène et de 28% d'hélium et les 2% restants représentent la plupart des autres atomes existants dans l'univers [2]

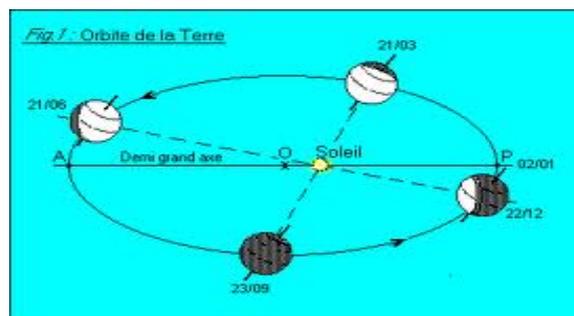


Figure. I.1 : Plan de l'écliptique : l'orbite terrestre et les saisons [3].

La terre décrit autour du soleil une trajectoire légèrement elliptique dont le soleil occupe un foyer (Figure I.1).

En fait la distance qui sépare la terre du soleil varie de $\pm 1,69\%$ au cours de l'année du fait de la légère excentricité de l'orbite terrestre ($e=0,007$). L'axe de rotation de la terre sur elle-même est incliné de $23^{\circ} 27'$ par

rappart au plan de l'écliptique (plan de l'orbite terrestre). On appelle déclinaison l'angle α formé par l'axe terre – soleil avec le plan de l'équateur à un moment donné de l'année. La déclinaison vaut donc $+23^{\circ} 27'$ au solstice d'été, $-23^{\circ} 27'$ au solstice d'hiver et elle est nulle aux équinoxes. Cette déclinaison est responsable des saisons, car dans l'hémisphère nord, les rayons nous parviennent avec un angle plus élevé en été, et plus bas sur l'horizon en hiver (c'est le contraire dans l'hémisphère sud). Elle explique aussi que les différences saisonnières soient plus marquées vers les hautes latitudes.

On sait également que l'activité solaire n'est pas constante et subit des éruptions solaires, mais leurs conséquences ne dépassent pas 4% de variation d'intensité du rayonnement émis [3]

➤ Trajectoire apparente du soleil

Pour un observateur situé sur la surface de la terre, le soleil décrit une trajectoire apparente qui dépend de la l'altitude et la longitude du lieu où il se trouve. Rappelons que l'altitude est la distance angulaire d'un point quelconque du globe par rapport à l'équateur (de 0 à 90° dans l'hémisphère nord) .

Quant à la longitude, c'est également un angle par rapport au milieu de Greenwich (arc de cercle passant par les 2 pôles et la ville de Greenwich en Angleterre) en se déplaçant vers l'est.

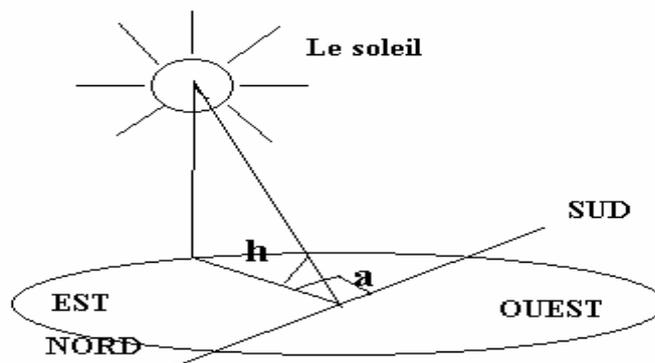


Figure I.2 : Définition de la position du soleil (hauteur et azimut).

La position du soleil est définie par deux angles :

Sa hauteur angulaire h - l'angle entre la direction du soleil et le plan horizontal du lieu – et son azimut α

L'angle entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil, compté négativement vers l'est. (figure I.2) [3]

I.2.2. Le rayonnement solaire

Le spectre solaire se définit comme la décomposition en longueurs d'onde ou « couleurs ». La lumière solaire est en effet composée de tous sorte de rayonnements de couleurs différentes caractérisées pour leur gamme de longueur d'onde. Les photons, grains de lumière qui composent le rayonnement électromagnétique sont porteurs, d'une énergie qui est reliée à leur longueur d'onde par la relation [3]

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

Dans laquelle ' λ ' représente la longueur d'onde, ' h ' la constante de Planck et ' C ' la vitesse de la lumière. D'après l'équation (I.1), l'énergie transportée par un photon est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde. Le flux d'énergie solaire est assez proche de celui émis par le corps noir. Il est à remarquer que le spectre de l'énergie solaire en atmosphère terrestre est décalé vers le rouge et l'infrarouge par rapport au spectre hors atmosphère [4]. La figure I.3 montre un exemple du spectre solaire [5].

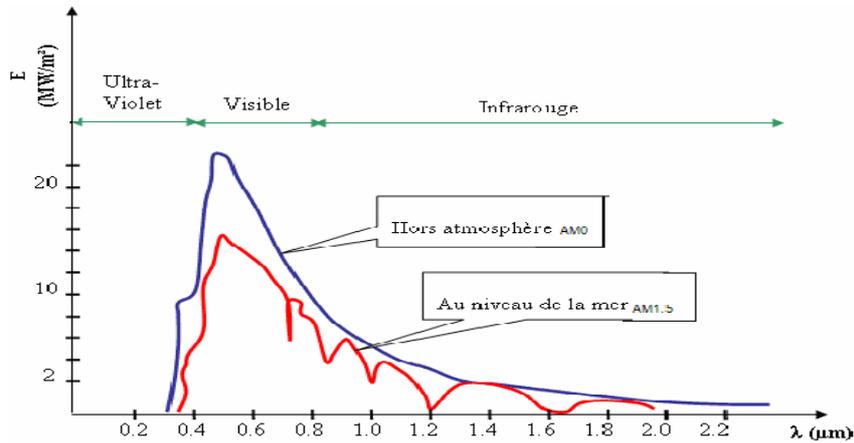


Figure : I .3 : Exemple de spectre solaire [5].

Les longueurs d'ondes du spectre solaire terrestre sont comprises entre 0,2 μm (ultra-violet) et 4 μm le maximum de l'infrarouge avec un pic d'énergie qui correspond à 0,5 μm ; 97,5% de l'énergie solaire est comprise entre 0,2 μm et 2,5 μm [0,2 μm , 2,5 μm], une partie de cette énergie qui intervient dans le spectre correspond au domaine du visible de 0,4 μm à 0,78 μm .

Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous formes de chaleur ou d'électrons et le tableau (I.1) donne la distribution énergétique des photons pour diverses longueurs d'ondes ainsi que les zones correspondant au spectre lumineux

$\lambda \mu\text{m}$	$E_{\text{ph}} \text{ (ev)}$	zone
0,2	0,2	Ultraviolet
0,4	3,1	Visible bleu
0,5	2,48	Visible jaune vert
0,78	1,59	Visible rouge
1	1,24	Infra rouge
2	0,62	Infra rouge
4	0,31	Infra rouge

Tableau I.1 : Valeurs énergétique des photons issus du spectre solaire [5]

Pour que le rayonnement produise un courant électrique dans un matériau donné qui est doté de capteurs, il faut que les photons soient tout d'abord absorbés par un ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'ondes des photons.

Ces derniers possèdent une certaine énergie avec laquelle les électrons du matériau sont excités et les électrons provoqués peuvent constituer un courant électrique global.

Rayonnement direct, diffus et global :

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes :

- Le rayonnement direct : est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, ils forment donc des ombres et peuvent être concentrés par des miroirs
- 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 » (Les rayons du soleil). Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques. Par temps couvert on admet que le rayonnement diffus est isotrope, c'est-à-dire que l'on reçoit un rayonnement identique dans toutes les directions de la voûte céleste. Par temps clair ou voilé, outre le ciel bleu relativement isotrope « diffusion sur l'air », on a une couronne plus brillante autour du soleil (composante appelée circumsolaire) et souvent un renforcement sur l'horizon, la bande horizon.
- L'albédo : est la partie réfléchiée par le sol. Il dépend de l'environnement du site. La neige, par exemple, renvoie énormément de rayons lumineux alors qu'un asphalte n'en renvoie pratiquement que sur plans inclinés. [3]

Le rayonnement global est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la (figure I.4)

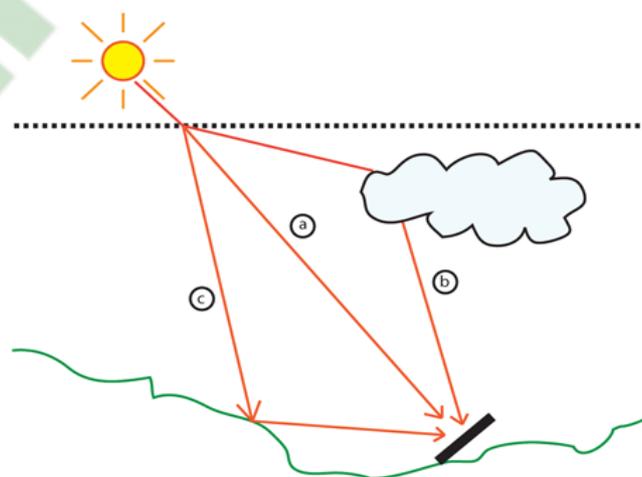


Figure. I.4 : Le rayonnement solaire [6].

➤ **L'effet du cosinus :**

Si on considère le rayonnement direct, on appelle rayonnement direct normal le rayonnement direct mesuré perpendiculairement aux rayons du soleil. Mesuré selon un plan non perpendiculaire, le même rayonnement irradie une plus grande surface elle est donc moins intense, c'est ce que l'on appelle l'effet cosinus.

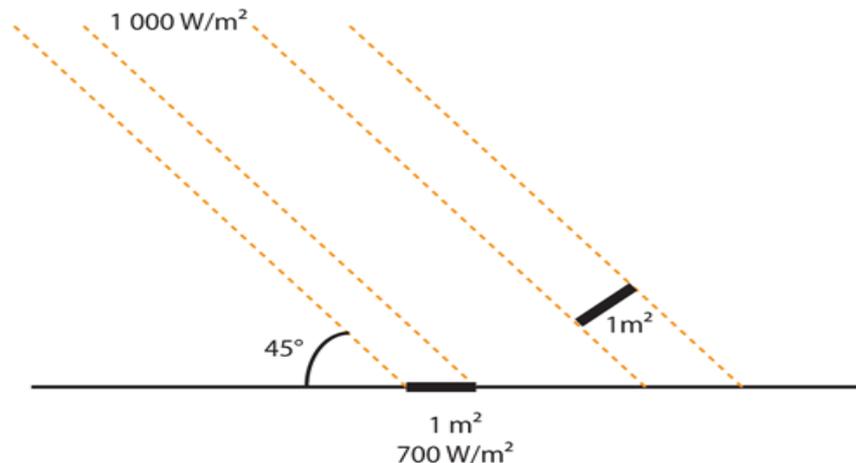


Figure I.5 : Effet de cosinus [14]

Le rayonnement direct sur plan horizontal est toujours inférieur au rayonnement dans le plan perpendiculaire au soleil, par contre, le rayonnement diffus peut être supérieur car le plan horizontal « voit » une plus grande part de la voûte céleste.

Ce phénomène conduit notamment les concepteurs d'alimentations solaires à installer à l'horizontale des panneaux solaires performants sous rayonnement diffus sur les sites géographiques qui sont très souvent à ciel couvert. En effet, lorsque le soleil est rarement visible, cela signifie que le rayonnement direct est peu intense, il vaut mieux regarder toute la voûte céleste pour récupérer un maximum de rayonnement diffus.

I. 2.3. Historiques des cellules photovoltaïques

L'effet photovoltaïque est découvert par le physicien Alexandre Edmond Becquerel en 1839 le mot "photo" vient du grec qui veut dire lumière et "voltaïque" vient du nom d'un physicien Italien Alessandro volta qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité et d'après qui on a aussi nommé l'unité de tension électrique le "volt". [6]

Plusieurs types de matériaux sont susceptibles d'être utilisés dans les captures PV, soit seul, ou associés sous forme de multicouches afin de mieux couvrir la totalité du spectre solaire. Les premières cellules PV ont été créées en 1930 à base d'oxyde cuivreux (Cu O) suivies de cellules en sélénium (Se).

Pendant des années, l'effet photovoltaïque n'était qu'une curiosité de laboratoire de la compagnie Bell téléphone aux Etats-Unis.

Depuis, les cellules PV ont commencé à faire l'objet de recherches plus intenses et se sont développées à l'échelle industrielle. Plusieurs raisons en sont à l'origine principalement liées aux ressources faibles et à l'environnement.

Pour les applications spatiales, répondant à des normes de poids et de durées de vie sévères, les cellules PV sont rapidement devenues des cellules multicouches basées sur divers matériaux, dont l'une des couches est souvent en Ga As. Elles présentent des rendements très élevés, une bonne fiabilité et une faible détérioration de leurs caractéristiques au cours du temps (sur au moins 20 ans). Les plus récentes sont formées de quatre couches de matériaux différents. Certaines recherches tendent même vers cinq couches.

Bien que leurs performances soient meilleures que celles en Si, ces dernières ne se développent pas pour des applications terrestres en raison de leur prix, 50 à 100 fois plus élevé [7]

I.2.4 . Technologie des cellules solaires

Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs et le silicium devient le matériau le plus utilisé pour recevoir les cellules PV en raison de sa disponibilité et de la connaissance acquise sur son comportement électrique.

Le silicium existe en grande quantité dans la nature, il est utilisé pour cela, sous de nombreuses formes, en fonction des performances recherchées.

- Les cellules monocristallines :

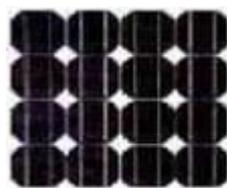


Figure I.6: Cellules monocristallines [4]

Les panneaux PV avec des cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal, (figure I.6).

Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium polycristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau, et lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium.

Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction

P-N, dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs), le wafer devient cellule.

Les cellules sont rondes ou carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme.

Elles ont un rendement de 12 à 18%, et la méthode de leur production est laborieuse.

- Les cellules polycristallines :

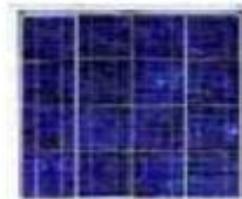


Figure I.7: Cellules polycristallines [4]

Les panneaux PV avec des cellules polycristallines sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes) (figure I.7).

Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui largement imposées.

L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication

- Couche mince (Amorphe) :



Figure I.8: Cellules Couche mince (Amorphe) [4]

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

Bien que le rendement de ces panneaux soit moins bon que celui des technologies polycristallines ou monocristallines, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première.

✓ Autres types de cellules :

De par le monde, un certain nombre de recherches sont encore effectuées pour créer de nouvelles cellules de rendement plus élevé, possédant une grande stabilité de leurs caractéristiques dans le temps et présentant de faibles coûts de fabrication. Si ce type d'énergie doit être développé à très grande échelle comme «Générateur électrique», il faut résoudre le problème du prix des capteurs. Aussi, depuis plusieurs années, on parle de matériaux organiques et de polymères qui présentent, sous certaines conditions, des propriétés photovoltaïques. Ceci suscite actuellement un regain de recherches dans divers laboratoires dans le monde, renouvelant d'autant les efforts portés sur la synthèse des matériaux [8]. Ces cellules, dites de troisième génération, bien qu'actuellement présentent de faibles rendements par rapport aux capteurs inorganiques [record mondial de 3,5% établi en 2001], sont intéressantes par leur très faible coût et sont donc prometteuses pour l'avenir.

I.3. Transfert d'énergie des photons aux charges électriques

On va s'intéresser maintenant à la lumière absorbée dans le matériau photovoltaïque et expliquer comment son énergie est convertie en électricité pour bien comprendre le fait de la cellule PV on étudiera l'élément de base qui constitue celle-ci appelé jonction P-N

I.3.1. Principe de fonctionnement de la jonction P-N

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et des transports dans un matériau semi conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière . Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électron et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p .Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopées p chargée négativement.

Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p une jonction (dite p-n) a été formé .En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p , une diode est obtenue .Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergies égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes , chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir , engendrant ainsi une paire électron-trou . Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zones n rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule (Figure I.9)

L'effet repose donc à la base sur les propriétés semi-conductrices de matériau et son dopage afin d'améliorer la conductivité.

Le silicium employé aujourd'hui dans la plupart des cellules a été choisi pour la présence de quatre électrons de valence sur sa couche périphérique (colonne IV du tableau de Mendeleïev).

Dans le silicium solide chaque atome-dit tétravalent- est lié à quatre voisins et tous les électrons de la couche périphérique participent aux liaisons. Si un atome de silicium est remplacé par un atome de la colonne V (phosphore par exemple) .Un de ses cinq électrons de valence ne participe pas aux liaisons ; par agitation thermique , il va très vite passer dans la bande de conduction et ainsi devenir libre de se déplacer dans le cristal laissant derrière lui un trou fixe lié à l'atome du dopant. Il ya conduction par un électron, et le semi-conducteur dit dopé de type N. Si au contraire un atome de silicium est remplacé par un atome de la colonne III (bore par exemple) à trois électrons de valence , il en manque un pour réaliser toutes les liaisons , et un électron peut rapidement venir combler ce manque et occuper l'orbitale vacante par agitation thermique, il en résulte un trou dans la bande de valence, qui va contribuer à la conduction ,et le semi-conducteur est dit dopé de type P.les atomes tels que le bore ou le phosphore sont des dopants du silicium. Les cellules PV sont assemblées pour former des modules [9]

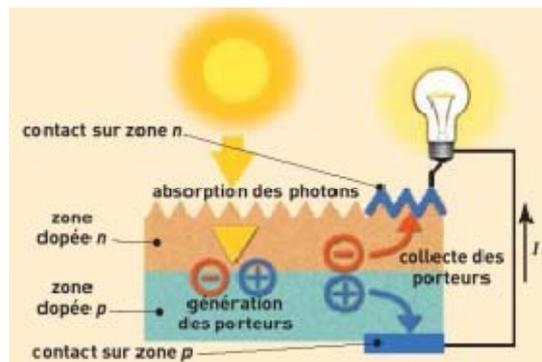


Figure. I.9 : Schéma de principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [9]

En polarisant électriquement une jonction P-N et en la soumettant à un éclairage solaire, on obtient les caractéristiques semblables à celle représentées la figure (I.10) sans éclairage, le comportement d'une cellule PV est semblable à celui d'une mauvaise diode. Ainsi, sous polarisation directe, la barrière de potentiel est abaissée et le courant des porteurs peut se développer sous polarisation inverse, seul un courant de porteurs minoritaires (courant de saturation) circule. Ce dernier varie peu avec la tension appliquée tant que cette tension est inférieure à la tension de claquage. Ces courants directs, ou inverses quand pour des jonctions classiques, sont sensibles à la température de jonction.

Si cette jonction P-n est soumise au rayonnement solaire, alors des paires électrons-trous supplémentaires sont créés dans le matériau en fonction du flux lumineux. Ce phénomène, aussi appelé effet photovoltaïque, ne se produit que si l'énergie des photons est supérieure ou égale à l'énergie de bande interdite du matériau E_g . La différence de potentiel qui en résulte aux bornes de la structure caractérise l'effet photovoltaïque et se situe, selon les matériaux et la structure de la jonction, entre 0,3 et 0,7 V [10]

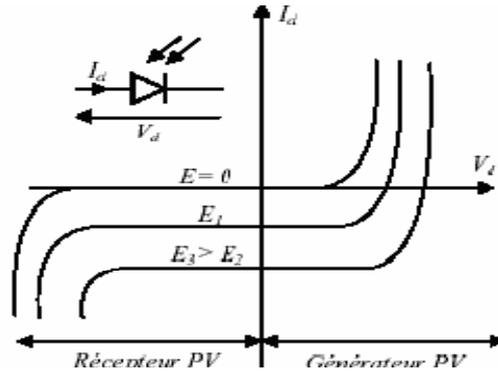


Figure : I.10 : Caractéristique d'une jonction PN polarisée sous différents éléments [10].

I.3.2. Modélisation de la jonction P-N

Si on soumet la jonction sous illumination, la cellule PV se comporte comme un générateur qui produit un courant de court-circuit, le comportement de la jonction peut être décrit par l'équation électrique suivante :

$$I_{PV} = \left[I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q \left(V + \frac{R_S I_{PV}}{N_S} \right)}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V + \frac{R_S I_{PV}}{N_S}}{R_{sh}} \right] N_p \quad (I.2)$$

Le modèle électrique correspondant à l'équation (I.2) est décrit ci-dessous

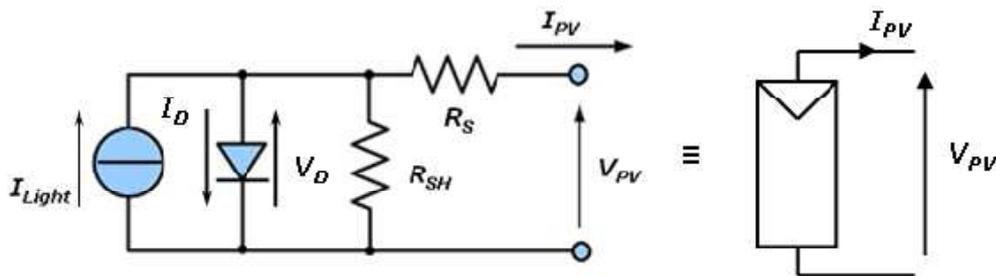


Figure .I.11 : circuit équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque et schéma conventionnel d'une cellule ou d'un module photovoltaïque [14]

I_{Light} = Photo courant(I_{ph}), dépendant de l'intensité de l'irradiation

-Si l'on suppose R_{sh} infini ($R_{sh}=\infty$) l'équation (I.2) devient

$$I_{PV} = \left[I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q \left(V + \frac{R_S I_{PV}}{N_S} \right)}{nKT} \right) - 1 \right] \right] N_p \quad (I.3)$$

Cette équation décrit le courant délivré par la cellule PV, I_{ph} représente le courant photo généré par la cellule PV sous éclairage donné.

I_{sat} le courant de la saturation (courant à l'obscurité) de la diode, q la charge de l'électron ($q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$) ; V la tension aux bornes de cette même cellule, R_s la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions, R_{sh} la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction, K la constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J / K}$), T la température effective (température absolue) en kelvin, n le facteur d'idéalité de la diode ($1 < n < 3$), N_s représente le nombre de cellules montées en série et N_p le nombre de cellules montées en parallèle

I. 4. Le module photovoltaïque

Le panneau solaire photovoltaïque étant une association de cellules solaires individuelles



Figure : I.12 : Le module photovoltaïque.

I. 4.1. Constitution d'un générateur photovoltaïque

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction P-N). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Le câblage série / parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées.

Afin d'obtenir en sortie du générateur PV des valeurs d'intensité et de tensions désirées on fait appel aux deux types d'assemblages série / parallèle, et la puissance disponible en sortie du générateur en fonction de N_s cellules en série et N_p en parallèle est donnée par :

$$P_{PV} = N_s \cdot V \cdot N_p \cdot I_{pv} \quad (I.4)$$

Si l'on désire avoir un générateur PV ayant un courant de sortie plus grand, on peut soit faire appel à des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement soit associer en parallèle plusieurs modules PV de

caractéristiques similaires. Pour qu'un générateur PV ainsi constitué puisse fonctionner de façon optimale, il faut que le (Ns.Np) cellules se comportent toutes de façon identique, elles doivent pour cela être issues de la même technologie du même lot de fabrication et qu'elles soient soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (radiation, température, vieillissement et inclinaison) [10]

I.4.2. Caractéristiques électriques

Le panneau solaire photovoltaïque étant un ensemble de cellules photovoltaïque élémentaires montées en série et/ou parallèle et sa caractéristique $I(V)$ est directement liée à la caractérisation de la cellule solaire . La figure ci dessus représente $I=f(v)$ d'un panneau PV typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température :

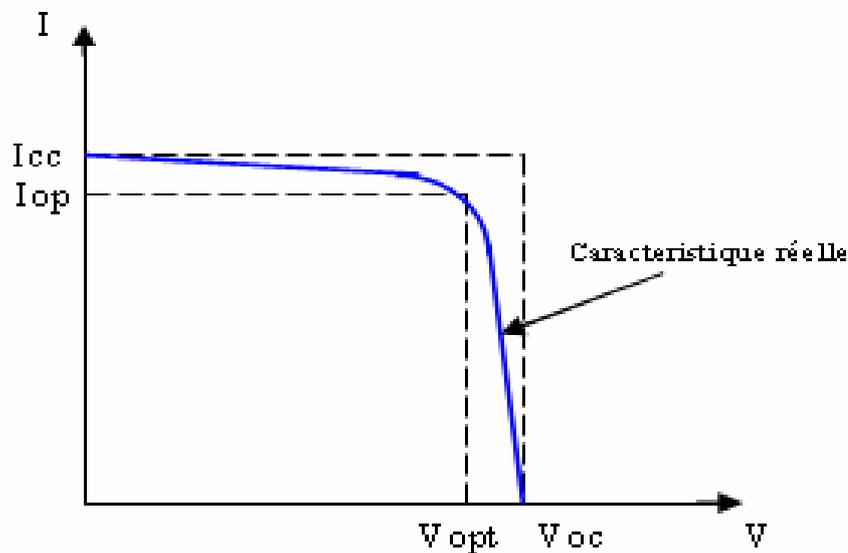


Figure. I.13 : Courbe $I=f(v)$ d'un panneau photovoltaïque [11].

D'après la courbe $I(V)$ on distingue deux points :

- Le courant de court-circuit I_{cc} , valeur du courant lorsque la tension $V=0$
- La tension de circuit ouvert V_{co} c'est la tension pour laquelle le courant débité par le générateur PV est nul

Les paramètres I_{cc} et V_{co} seront calculés à l'aide des équations (I.5) et (I.7)

Alors on obtient :

Pour le courant : $I_{cc} = N_p * I_{ph}$ (I.5)

Pour la tension : $0 = \left[I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q \left(V + \frac{RS I_{PV}}{NS} \right)}{nKT} \right) - 1 \right] \right] N_p$ (I.6)

$V_{CO} = \frac{nKT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right)$ (I.7)

La caractéristique courant-tension montre clairement que le panneau photovoltaïque est donc à considérer comme une source de puissance, et la puissance de générateur PV sera optimale pour un point de puissance maximale noté P_{max} de chaque cellule, et la caractéristique $P=f(v)$ correspond au produit d'une tension optimale notée V_{opt} et d'un courant optimal noté I_{opt} .

➤ **La puissance de crête :**

Exprimée en watt-crête (W_c), c'est la puissance maximale d'un élément ou d'un ensemble photovoltaïque, travaillant dans des conditions de température et d'ensoleillement normalisées, une irradiation de $1000W/m^2$, alors que la température des cellules est de $25^\circ C$ [38].

➤ **Le rendement de la conversion :**

Le rendement de la conversion est défini par le rapport suivant :

$$\eta = \frac{P_{opt}}{S \Phi} \quad (I.8)$$

P_{opt} : la puissance électrique optimale délivrée par le module photovoltaïque exprimée en watt.

Φ : Le flux reçu en W/m^2 .

S : la surface effective du générateur photovoltaïque en m^2 [38].

I.4.3 .Les influences climatiques sur les caractéristiques électriques

➤ **Influence de l'irradiation**

La puissance crête ou puissance maximale ou encore puissance optimale du module PV est le point idéal de la caractéristique courant- tension dans les conditions STC (Standard test continus) ; condition de référence qui sont le rayonnement solaire de $1000 w/m^2$, la température ambiante de $25 ^\circ c$ [3]. Cette puissance optimale qui est délivrée par le générateur PV est pratiquement proportionnelle à l'éclairement, la figure (I.14) montre comment agit l'ensoleillement sur la caractéristique

$I= f(v)$.

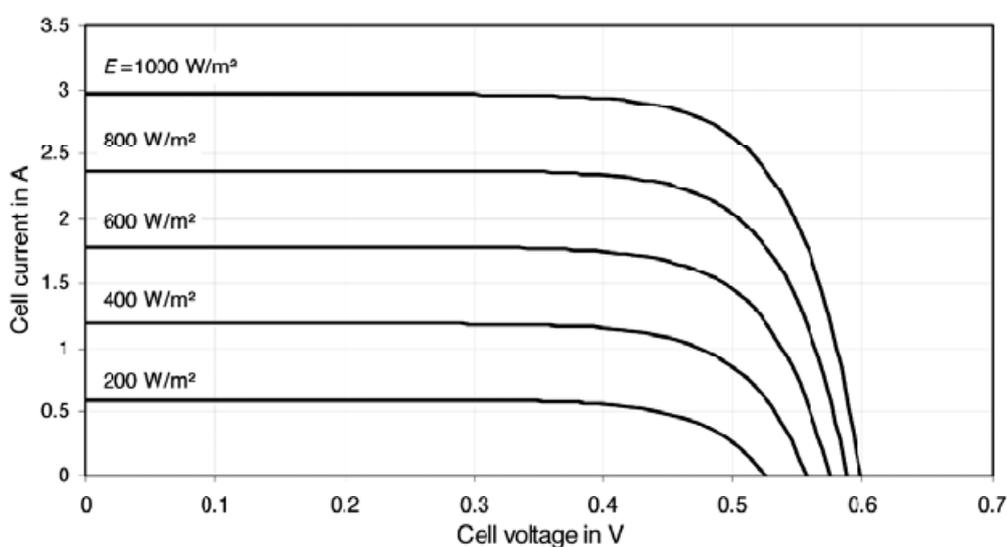


Figure I.14 : Influence de l'ensoleillement sur la courbe $I=f(v)$ [12] .

D'après la courbe on constate que le flux lumineux fait accroître le courant de court-circuit I_{cc} ainsi que la tension à circuit ouvert.

➤ Influence de la température

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules. La figure I.15 montre que l'augmentation de la température entraîne une diminution nette de la tension de circuit ouvert

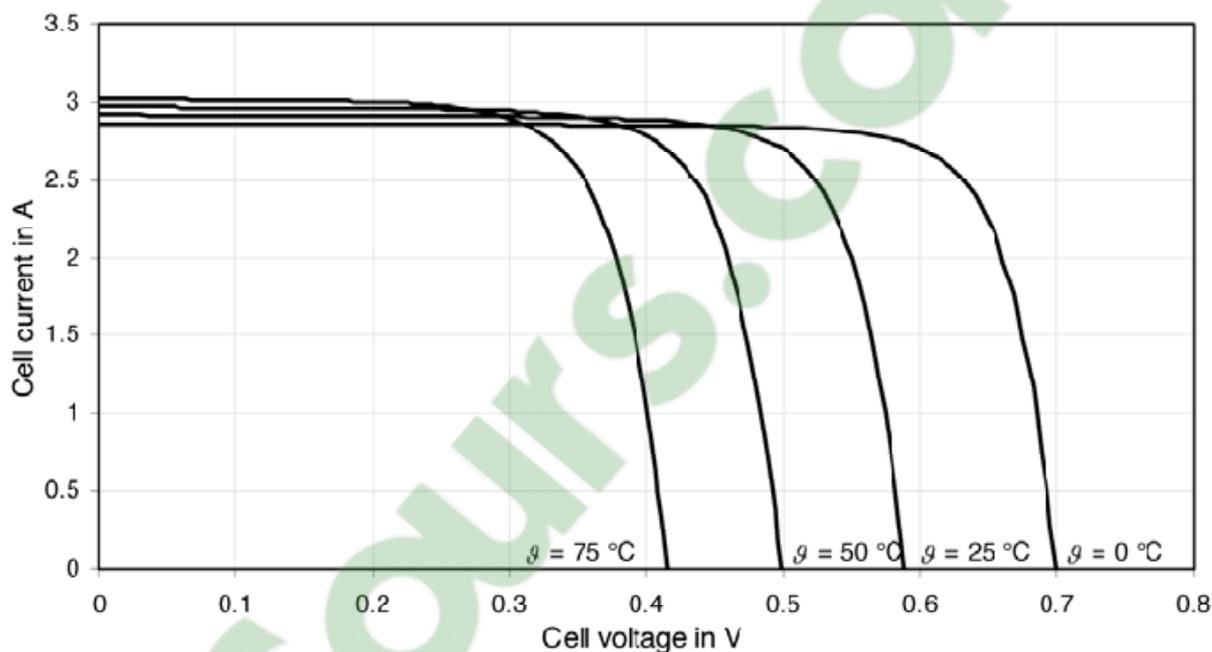


Figure. I.15 : Influence de la température sur la courbe $I=f(v)$ [12].

I.4.4 Assemblage des panneaux PV

Pour disposer d'une puissance installée de plusieurs centaines de watts ; de kilowatts ; voir de mégawatts, il faut nécessairement assembler les modules photovoltaïques. On réalise alors un champ photovoltaïque de surface variable.

On distingue deux types de groupements série et parallèle qui répondent aux règles connues de l'électricité quand les modules sont montés en série les tensions s'ajoutent et le courant reste constant, et quand ils sont montés en parallèle c'est l'inverse les courants s'ajoutent et la tension reste constante. Encore il faut que les courants des différents panneaux soient identiques dans une liaison série et que les tensions dans une liaison parallèle soient identiques, on retiendra donc la première règle suivante : on ne monte en série que des panneaux ayant le même courant de fonctionnement (mais ils peuvent ne pas avoir la même tension), et on ne monte en parallèle que des panneaux qui ont la même tension de fonctionnement (mais ils peuvent ne pas avoir le même courant). Dans la réalité il n'y a pas deux panneaux strictement

identiques, donc on peut être amené à les regrouper en tension ou en courant selon le cas. Cela consiste à mettre ensemble des panneaux dont les valeurs sont les plus proches possibles [3].

I.4.4.1 Assemblage en parallèle

Un module de 36 cellules en parallèle est suffisant pour augmenter le courant, on peut assembler "n" modules en parallèle comme il est montré en (figure I.16 et I.17) [13]

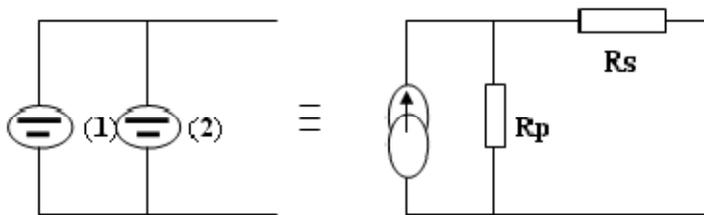


Figure I.16 : Association des modules en parallèle.

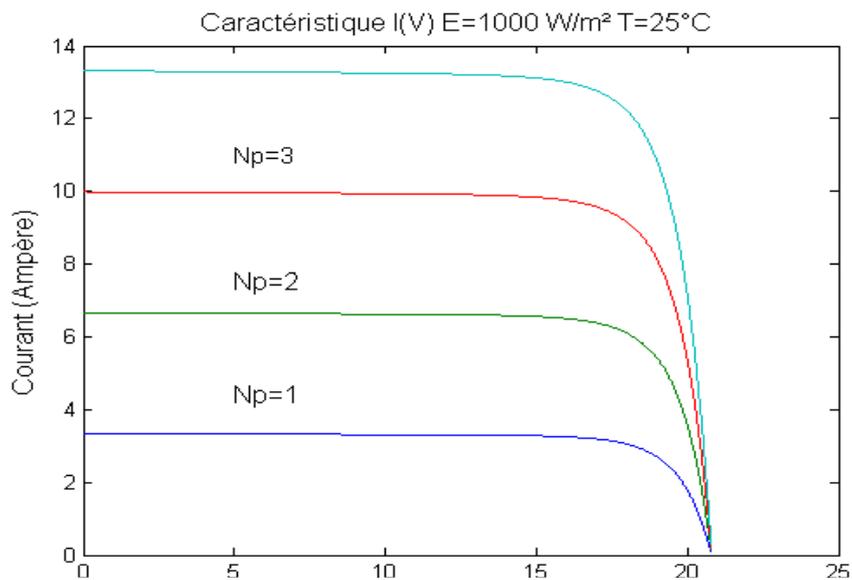


Figure. I.17 : caractéristique $I=f(V)$ pour l'association en parallèle

I.4.4.2. Assemblage en série

Un module de 36 cellules en série est suffisant pour obtenir une augmentation de la tension (voir figure I.18 et I.19) [13]

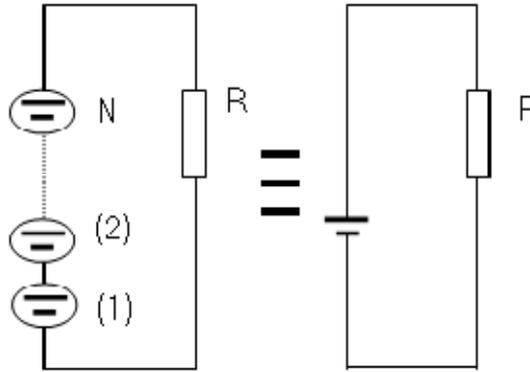


Figure. I.18 : Association des modules en série.

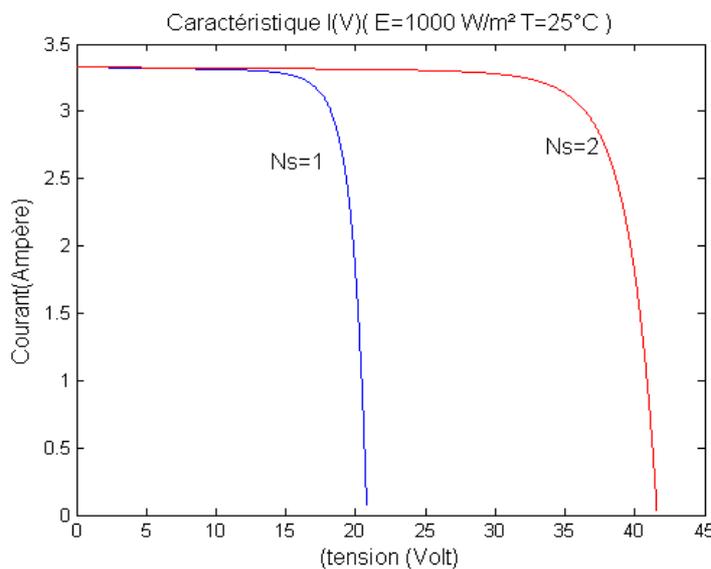


Figure. I .19: caractéristique I(V) pour l'association en série $G=1000W /m^2$ et $T=25^{\circ}C$.

I.5. Propriétés électriques du générateur photovoltaïque :

On a vu précédemment que les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque varient en fonction de la température et de l'éclairement. Ces propriétés sont en effet nécessaires pour apprendre le comportement d'un générateur PV, ainsi la valeur de charge aux bornes du générateur qui détermine le point de fonctionnement du système photovoltaïque et selon l'association en série et/ou parallèle la caractéristique du générateur photovoltaïque n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement car ces valeurs sont moins importantes .Nous pouvons décomposer la caractéristique I(v) d'un générateur Photovoltaïque en 3 zones (figure I.20)

- Une zone assimilable à un générateur de courant ou le courant reste constant quelle que soit la tension
- Une zone correspondant au coude de la caractéristique, c'est dans cette région que le point de fonctionnement a la puissance maximale est situé. Il est caractérisé par le couple (I_{opt}, V_{opt}) , seule une charge dont la caractéristique passe par ce point va délivrer la puissance maximale

- Une zone assimilable à un générateur de tension où la variation du courant correspond à une température presque constante.

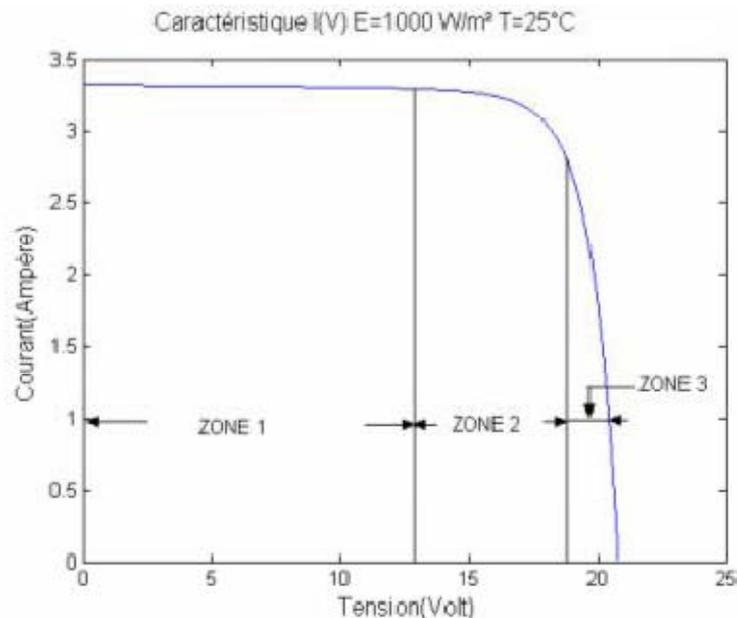


Figure .I.20 : Les différentes zones de la caractéristique I(V)[13].

I.6. Avantages et inconvénients (13)

I.6.1. Avantages

Comme tout système technique le photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages :

- La technologie photovoltaïque ne comporte aucune pièce mobile c'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux
- Les panneaux photovoltaïques sont faits sous forme de modules, ce caractère permet un montage simple qui s'adapte à tous les besoins énergétiques pour les réalisations de puissances. Le dimensionnement des systèmes PV peut atteindre le Mégawatt.
- Vu les entretiens réduits le coût de fonctionnement des systèmes PV sont très faibles, ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personne hautement spécialisé.
- Cette technologie 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.

I.6.2. Inconvénients

Toute fois le système PV présente des inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallisé est 28%).
- Les générateurs ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (Batterie) est nécessaire ; le coût du générateur photovoltaïque est accru .La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que pour les batteries et les composants de régularisation associés soient judicieusement choisis.

I.7. Secteur d'application

❖ Domaine spatial

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

Depuis lors, des recherches et développements nombreux ont été réalisés dans le domaine militaire (NASA aux Etats-Unis) et public (ESA en Europe) pour accroître les performances électriques tout en réduisant le poids des modules.

Le spectre du rayonnement solaire étant différent en dehors de l'atmosphère, on utilise pour les cellules et les modules spatiaux d'autres matériaux plus sensibles dans les ultra-violets et plus résistants aux rayonnements et aux bombardements divers (UV, électrons, protons, ions, oxygène atomique, micro-météoroïdes,...). L'arséniure de gallium (As/Ga), le phosphore d'indium (InP) et le tellure de cadmium (Cd/Te) sont les semi-conducteurs les plus prometteurs pour réaliser ces objectifs.

❖ Habitation isolée

L'approvisionnement en électricité dans les régions rurales isolées est un problème d'actualité, en particulier dans les pays en voie de développement. L'extension du réseau pour des demandes relativement faibles et isolées n'est pas rentable pour les sociétés d'électricité.

Bien que la solution des groupes électrogènes (Diesel) présente beaucoup d'inconvénients (peu fiables, peu autonomes, coûts cachés pour le combustible, les réparations et l'entretien), ils ont souvent été choisis pour leur coût d'investissement modéré. En effet, le coût initial élevé d'un générateur photovoltaïque est l'obstacle majeur à son expansion sur ce type de marché, en particulier dans les pays en voie de développement où les taux d'intérêt sont souvent très élevés.

Les dizaines de milliers d'unités photovoltaïques autonomes (au silicium cristallin ou amorphe) installées de par le monde ont pourtant démontré leur compétitivité en ce qui concerne de multiples applications de petite et moyenne puissance (inférieur à 100 kW).

De nombreuses organisations internationales d'aide aux pays en voie de développement ont choisi la technologie photovoltaïque comme outil de développement social et économique pour fournir des services de base à la population, tels que:

- ❖ Le pompage de l'eau pour la consommation des villages ou pour l'irrigation, la réfrigération pour la production de glace et la conservation de vaccins, sang, produits agricoles,...
- ❖ l'éclairage (lampe portative, éclairage public, électrification villageoise, ...)
- ❖ Industrie isolée

La technologie photovoltaïque est de plus en plus couramment intégrée dans les programmes nationaux d'électrification rurale (habitations domestiques, écoles, centres de santé, télécommunication, ...). Le débat reste ouvert quant au choix d'un système photovoltaïque centralisé (avec un générateur photovoltaïque unique pour un ensemble d'utilisateurs dispersés) ou décentralisé (petits générateurs photovoltaïques pour chaque consommateur). Le choix dépendra d'abord de la densité de l'habitat et ensuite du mode de financement possible (pouvoir d'achat du consommateur, aide de banques locales, aide internationale,...).

Beaucoup d'applications professionnelles exigent une source d'électricité hautement fiable, autonome, sans entretien et sans combustible. Le générateur photovoltaïque est de loin l'option la plus séduisante; on l'utilise avec succès dans les télécommunications (stations relais pour TV, radio, téléphonie, émetteur-récepteur,...), mais aussi pour d'autres applications telles que:

- ❖ protection cathodique,
- ❖ systèmes silencieux ou sans vibration,
- ❖ éclairage, balises et signaux pour la navigation,
- ❖ équipement de monitoring,
- ❖ télémétrie, etc.
- ❖ Centrale de puissance

Avec les applications photovoltaïques connectées au réseau d'électricité national, une nouvelle tendance se dégage; elle est caractérisée par un fort potentiel de diffusion dans les pays industrialisés.

Des centrales de production photovoltaïque sont expérimentées depuis quelques années en Europe (44 kW en Allemagne, 300 kW en Grèce, 340 kW en Corse), aux Etats-Unis (1 MW à Lugo, 8 MW à Carissa Plain) et au Japon (1 MW à Saijo), mais elles n'ont pas encore dépassé le stade pilote.

La plupart des projets utilisent des champs de capteurs plans, mais on expérimente aussi les systèmes à concentration dans les régions riches en rayonnement direct.

Seules les centrales photovoltaïques de moyenne et faible puissances (0,1 à 0,5 MW) semblent avoir une rentabilité économique. Elles seront vraisemblablement destinées à compléter le réseau en différents points critiques.

Par exemple, aux extrémités d'un réseau, la qualité de la puissance se détériore lorsque la demande en électricité augmente. Une centrale photovoltaïque placée en bout de ligne permet de redresser la tension et d'améliorer la puissance.

Lorsque la pointe de la demande est en phase avec l'ensoleillement, la centrale photovoltaïque connectée au réseau permet de fournir les pointes. C'est le cas dans le sud des E.U. où la demande est maximale aux heures les plus ensoleillées à cause du conditionnement d'air omniprésent.

Une autre application intéressante dans ce secteur est la combinaison hydro photovoltaïque pour des centrales au fil de l'eau (0,1 à 10 MW). L'apport énergétique du système photovoltaïque complète idéalement le creux saisonnier de certains cours d'eau, et la variation de la production sur l'année est atténuée. Cette application pourrait être développée dans nos régions dans un futur proche.

❖ Résidence urbaine

Le générateur photovoltaïque connecté au réseau est aussi envisagé en zone urbaine avec l'installation de modules sur les toits et façades de bâtiments.

Les premières réalisations datent de la fin des années 70 aux Etats-Unis, mais ce n'est que depuis quelques années que l'Europe s'est lancée dans un programme d'expérimentation de maisons photovoltaïques (2 à 3 kWc par toit), en particulier en Suisse et en Allemagne où la politique de protection de l'environnement est sévère. L'intérêt de telles réalisations est de produire de la puissance à l'endroit même de la demande, en s'affranchissant des problèmes du stockage. L'excès de production est injecté dans le réseau, et en période de non production (la nuit), l'électricité est prélevée sur le réseau.

Le compteur tourne alors dans les deux sens. L'enjeu est important mais la rentabilité est très faible, même si le Wc coûte moins cher qu'en région isolée. En Europe, la demande domestique en électricité est généralement déphasée par rapport à la contribution du photovoltaïque, la pointe se situant le soir.

La façade photovoltaïque suscite beaucoup d'enthousiasme en Europe et aux E.U.; le recouvrement des façades de bâtiments commerciaux - où la consommation est essentiellement diurne - correspond mieux aux heures d'ensoleillement. L'orientation verticale(ou quasi) peut être avantageuse dans nos régions de haute latitude pour rehausser la production au creux de l'hiver. Cependant, l'apport énergétique d'une façade recouverte de modules photovoltaïques risque d'être assez négligeable par rapport aux consommations de bâtiments commerciaux. En réalité, l'enthousiasme découle du fait que le revêtement à l'aide de panneaux solaires photovoltaïques reviendrait pratiquement au même prix qu'un recouvrement à l'aide de matériaux classiques.

❖ Biens de consommation

L'électronique moderne requiert de très petites puissances - du milliwatt à la dizaine de Watt de sorte que beaucoup de petits appareils peuvent être alimentés par une petite surface de cellules photovoltaïques. Les calculatrices et les montres sont de loin les applications les plus connues. Les chargeurs de batteries, radios, lampes de poche, luminaires de jardin, systèmes d'alarme, jouets, fontaines, tondeuses à gazon, etc., sont d'autres exemples et cette liste n'est pas limitative.

La plupart de ces mini-générateurs photovoltaïques utilisent des cellules au silicium amorphe, bon marché et mieux appropriées aux faibles illuminations et petites puissances. Ils constituent une alternative très intéressante aux piles qui comportent des risques divers de contamination de l'environnement par les métaux lourds principalement. Le Japon est le principal producteur et consommateur de ces articles .

I.8. Conclusion :

L'électricité solaire est l'une des technologies les plus importantes dans le développement durable. Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu global sur le photovoltaïque commençant par le rayonnement solaire jusqu'à la formation de l'unité de base de la cellule photovoltaïque (dite jonction PN)

On a aussi montré la caractéristique électrique du modèle de la photo pile, ensuite tous les éléments constituant le générateur PV. On a abordé dans ce chapitre les influences des différents paramètres climatiques sur la caractéristique $I(v)$. Enfin une synthèse d'assemblage des panneaux et les différentes zones qui caractérisent la courbe $I(V)$. On a clôturé ce chapitre par les avantages, les inconvénients et les domaines d'application de l'énergie photovoltaïque.

Chapitre II

Les composants
D'un système photovoltaïque
autonome

II.1.Introduction

Comme l'énergie solaire produite par un système photovoltaïque varie au cours du temps, cela implique qu'un tel système va se trouver en permanence en régime transitoire. Ce mode de fonctionnement entraîne des risques permanents de désadaptation de certains composants entre eux, dont il faut tenir compte lors de la conception.

Afin d'assurer un fonctionnement adéquat de l'installation photovoltaïque, une étude descriptive générale des différents composants du système PV est nécessaire. Dont l'un de ces composants est le dispositif de stockage qui est l'un des éléments le plus fragile du système. Pour augmenter la durée de vie de la batterie et assurer sa protection on lui associe un système de régulation.

Ce présent chapitre a pour but la présentation des différents systèmes PV autonomes ainsi que les stratégies de régulations de charge et de décharge des batteries solaires qui assurent le contrôle et la gestion du fonctionnement des installations PV.

II .2. Les différents systèmes photovoltaïques autonomes

Il existe différents types de générateurs variant selon le service souhaité et les applications recherchées : autonome et autonome hybride.

II .2.1 .Systèmes autonomes:

Il y a les systèmes autonomes au fil du soleil sans stockage et avec stockage :

a. Système au fil du soleil sans stockage

Ce sont les systèmes les plus simples puisque l'énergie photovoltaïque est utilisée directement à partir des panneaux. On peut les trouver dans deux cas suivants :

***Alimentation directe**

L'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence de la lumière et dès que l'éclairement sera suffisant pour atteindre la puissance demandée. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour les quelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de la lumière.

L'inconvénient de ce système, c'est qu'on ne profite pas toujours des éclaircissements les plus élevés : pas de stockage, donc pas de récupération des surplus des énergies solaires.

***Pompage au fil du soleil**

Il s'agit de stocker de l'eau dans un réservoir. La pompe solaire est branchée directement aux panneaux solaires par l'intermédiaire d'un régulateur. Le débit d'arrivée d'eau dans le réservoir est donc variable directement en fonction du rayonnement solaire.

b. Système au fil du soleil avec stockage

Ces installations se composent essentiellement de trois composants : des modules solaires, la batterie, et le régulateur de charge. La batterie d'un tel système se charge le jour, et sert de réservoir d'énergie en permanence ; elle peut sans problème à un instant donné, recevoir un courant de charge et débiter un courant de décharge de valeur différente. Les appareils alimentés sont donc câblés sur la batterie à travers le régulateur de charge, cela pour assurer le chargement optimal de l'accumulateur tel que lorsque la batterie est pleine, ce dernier coupe la charge pour éviter qu'elle ne souffre de surcharge.

II .2.2. Systèmes autonomes hybrides :

Une des limites d'un système autonome purement photovoltaïque, comme on vient de le décrire, est qu'il fournit une puissance donnée, variable selon la saison, mais que l'on ne peut pas dépasser, au risque de détruire la batterie ; or les consommateurs ont des besoins qui évoluent, et pas forcément en phase avec les saisons.

Avoir un système hybride, c'est disposer d'une autre source d'électricité qui vient compléter l'apport photovoltaïque. Cette autre source peut être un groupe électrogène (appelé aussi "génératrice") ou une éolienne. De tels systèmes ont habituellement des accumulateurs de stockage d'énergie et donc ils permettent en outre de recharger la batterie lorsque elle est faible.

Un tel système photovoltaïque hybride fournit une grande fiabilité du système et peut représenter la solution adéquate pour les sites isolés; il convient aussi lorsque la demande en énergie est élevée (pendant l'hiver ou tout le long de l'année).

II.3 .Système de stockage

Dans cette partie le stockage électrochimique à l'aide de batteries d'accumulateurs sera présenté. Le système de stockage est un élément crucial de l'installation photovoltaïque du point de vue technique, mais aussi du point de vue économique; car il représente 40 à 50 % du coût de l'installation [37].

II.3.1. Les batteries [37]

Parfois, appelée "accumulateur", destinée à emmagasiner de l'électricité (en courant continu).

Il existe quatre grandes familles d'accumulateurs :

- * Accumulateurs de démarrage pour véhicules à moteur à combustion interne.
- * Accumulateurs de traction pour la commande de véhicules de manutention au sol, les véhicules électriques, les sous-marins, etc.
- * Accumulateurs stationnaires : ils sont utilisés comme source stationnaire de courant continu de secours en cas de rupture du secteur, ou de courant continu de commande (Usines d'énergie électrique, télécommunications, appareils de signalisation, groupes de secours, éclairage de secours, etc.)
- * Accumulateurs au Nickel-Cadmium : les accumulateurs étanches et rechargeables au Nickel-Cadmium se présentent sous trois formes : éléments boutons, éléments ronds et éléments prismatiques. Grâce à leur construction d'une grande résistance, ils peuvent être rechargés des centaines de fois, ne réclament pas d'entretien, supportent très longtemps le stockage et peuvent être incorporés dans des appareils dont ils deviennent partie intégrante.

a) Principe général de fonctionnement d'une batterie

Deux électrodes, l'une positive et l'autre négative, sont séparées par un électrolyte. Aux deux interfaces électrode-électrolyte interviennent des réactions électrochimiques [39].

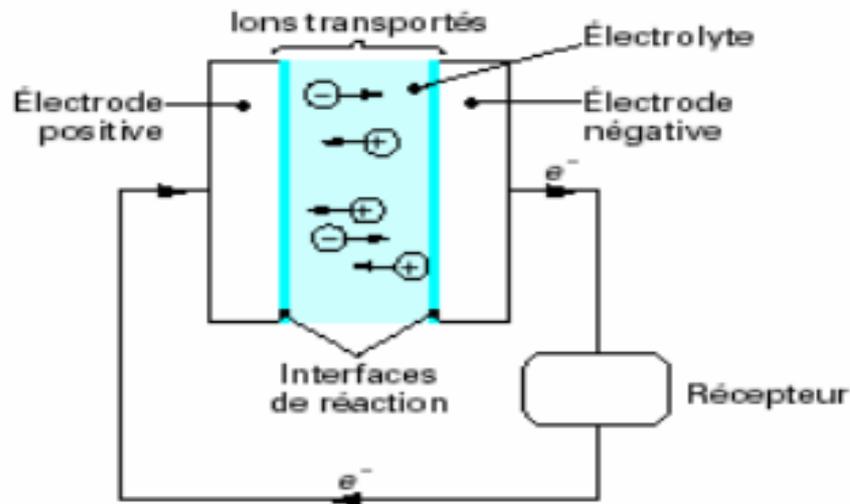


Figure. II.1 : principe de production d'électricité dans un convertisseur électrochimique [40].

b) Caractéristiques du stockage par accumulateurs

- * **Tension aux bornes de l'élément** : Elle est fonction de la charge ou de la décharge de l'élément et dépend de la technologie utilisée par le constructeur.
- * **Taux de décharge** : Il est normalisé par la capacité estimée de la batterie, pour des durées de décharge indiquées
- * **Profondeur de décharge** : C'est la quantité d'Ampère heure extraite d'une batterie pleinement chargée. Elle est exprimée en pourcents de la capacité estimée.
- * **Taux de charge** : Comme le taux de décharge, il est normalisé par rapport à la capacité estimée et la durée de charge. Le taux de charge est le rapport du courant consommé par la durée de temps nécessaire pour retrouver la charge complète de l'élément de batterie.
- * **Etat de charge** : C'est une grandeur qui caractérise la disponibilité énergétique d'un accumulateur. Il peut être exprimé en pourcents de la capacité estimée.
- * **Capacité de la batterie** : Lorsque l'on désire connaître l'autonomie d'un accumulateur, c'est-à-dire, le temps durant lequel il peut débiter, on se rend rapidement compte que cette grandeur varie suivant le courant débité: on parle alors de régime de décharge.
- * **Capacité estimée**: c'est une estimation faite par le constructeur quant à la quantité d'Ampère heure (Ah) que l'on pourrait extraire de la batterie.

* **Rendement** : Deux types de rendement peuvent être exprimés:

-Rendement faradique: rapport des ampères-heures déchargés aux ampères- heures chargés

-Rendement énergétique: rapport des wattheures déchargés aux wattheures chargés.

II.3.2. Accumulateurs au plomb

La batterie la plus simple et la moins coûteuse.

a) Bref historique

L'histoire de l'accumulateur au plomb est plus que centenaire et remonte à la découverte du premier générateur électrochimique non réversible (pile) en 1800.

* La réversibilité (cas de l'accumulateur), a été observée pour la première fois en 1801 par le physicien Gautherot.

* En 1859, Gaston Plante reconnaît l'intérêt du plomb pour la construction de l'accumulateur.

* En 1881, l'accumulateur connaît un perfectionnement très important en constituant les matières actives par des oxydes de plomb, rapportés sur des grilles supports.

* Nombreux furent les techniciens qui apporteront ensuite leur contribution pour aboutir à l'accumulateur actuel.

b) Composition d'une batterie solaire Plomb- Acide

Ces batteries sont composées de plusieurs plaques de Plomb dans une solution d'acide sulfurique. La plaque consiste en une grille d'alliage de Plomb avec une pâte d'oxyde de plomb marquée sur la grille. La solution acide sulfurique et l'eau est appelée électrolyte. [38]

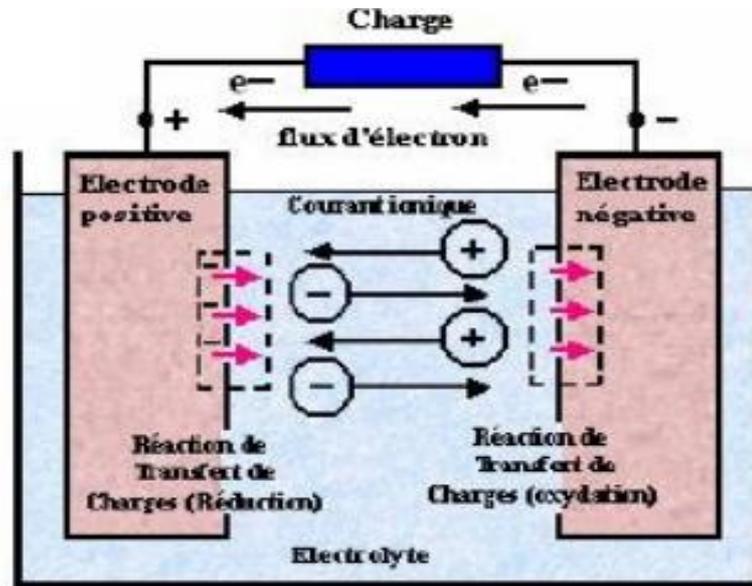


Figure. II.2 : Schéma d'une cellule acide plomb.

Typiquement, la tension de cellule évolue en charge et en décharge de la manière suivante:

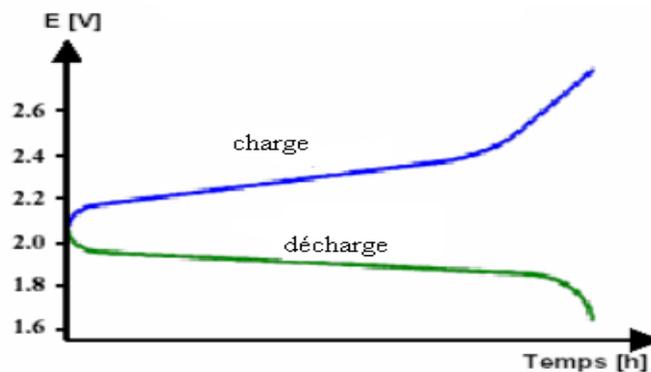


Figure .II.3 : Courbes de charge et de décharge d'une cellule élémentaire de batterie au Plomb

c) Les caractéristiques d'une batterie au Plomb

* La tension

La tension nominale d'un élément au Plomb est de 2V, et varie en fonction de l'état de charge. Un élément chargé présente une tension de 2,1V et peut être déchargé jusqu'à une tension de 1,9V sans risque, le minimum absolu étant fixé à 1,65V [3].

Une batterie est constituée de plusieurs cellules reliés en série afin d'assurer un niveau de tension convenable aux applications électriques.

* **La capacité**

La capacité des batteries au Plomb peut aller de 1Ah à plus de 1000 Ah pour les batteries à électrolyte stabilisé et de 2Ah jusqu'à 4000Ah pour les batteries à électrolyte liquide [3].

* **La résistance interne**

La résistance des accumulateurs au Plomb est négligeable dans le cas des fortes capacités. Ces derniers sont capables de fournir des courants très importants >2000A sous 12V. Ce sont presque des générateurs parfaits d'où leur résistance interne très faible (inférieure au milli Ohm) [3].

* **L'autonomie**

C'est la durée pendant laquelle le récepteur reste correctement alimenté par la batterie. Elle dépend de la capacité de l'accumulateur et de l'énergie requise par le récepteur, indépendamment du photo générateur [3].

d) Charge de batterie

La durée de vie des batteries dépend fortement des cycles de charge subis, une charge insuffisante restant la principale cause de défaillance. De ce fait, la puissance du chargeur doit être adaptée à la capacité de la batterie utilisée et au temps de charge disponible. Une batterie déchargée totalement ou partiellement doit pouvoir être rechargée complètement durant le temps disponible. Pendant la charge, la tension des éléments va augmenter en fonction du courant de charge appliqué et de la température. Dans le cas d'une charge normale, la tension des éléments passe d'environ 2 Volts/élément à environ 2,65Volts/élément.

Les méthodes de charge utilisées sont :

- * Charge normale : La charge normale sert à récupérer 100% de la capacité d'une batterie déchargée entièrement ou partiellement. En général, un courant de charge de 1/10 de la capacité est sélectionné. Il est important de réduire le courant de charge pendant le dégagement de gaz et de déconnecter le chargeur quand la batterie est pleine.
- * Charge rapide : Dans ce cas, le courant de charge adopté peut être notablement

supérieur à celui nominal (environ 3 à 5 fois) Pour empêcher la surcharge qui peut endommager de manière irréversible la batterie, il est nécessaire de basculer sur un courant de charge réduit lorsque la tension de dégazage (2,35 à 2,4 Volts/élément) est atteinte. La charge rapide reste de ce fait utilisée de manière exceptionnelle.

- * Charge tampon : Dans ce cas, la batterie est connectée à la fois au consommateur et au chargeur. Ce dernier fournit un courant tel que la batterie reste pratiquement pleine. Celle-ci pouvant prendre en charge les pics de courant.
- * Charge goutte à goutte : Lorsque la batterie est pleine, mais n'est pas utilisée à court terme, une autodécharge se produit. Celle-ci peut être de 0,015% à 0,03% par jour. Cette autodécharge est compensée par une charge goutte à goutte. Le courant de charge est dans ce cas d'environ 0,1 A par 100 Ah. Les batteries déchargées sont tout d'abord chargées (6 heures); une fois que la tension de dégazage (2,35 à 2,4 Volts/élément) est atteinte (état de charge 80%), le chargeur bascule automatiquement sur une charge tampon, d'entretien.
- * Charge d'égalisation : Les batteries utilisées pour la traction sont soumises à des charges cycliques. Si celles-ci sont chargées à l'aide des chargeurs régulés, il est important pour les batteries à électrolyte liquide d'être rechargées entièrement au moins quatre fois par an avec un chargeur allant au-delà de la tension de dégazage. L'objectif de cette charge est de bien faire circuler l'acide dans la batterie.

Les batteries sont chargées idéalement en 3 différentes phases :

- * **Phase 1** : Le courant est limité à un taux d'environ 1/5 de la capacité nominale. La tension augmente jusqu'à atteindre son seuil maximum régulé à 2,35V/élément
- * **Phase 2** : La tension de charge est régulée à 2,35V/élément, le courant de charge diminue alors jusqu'à devenir inférieure à C/100. La batterie est chargée à l'issue de cette phase.
- * **Phase 3** : Une fois la batterie chargée (après environ 20h de charge) on passe en mode charge d'entretien (Floating) pour la maintenir à 100% de charge. La tension appliquée alors à la batterie sera autour de 2,26V/élément.

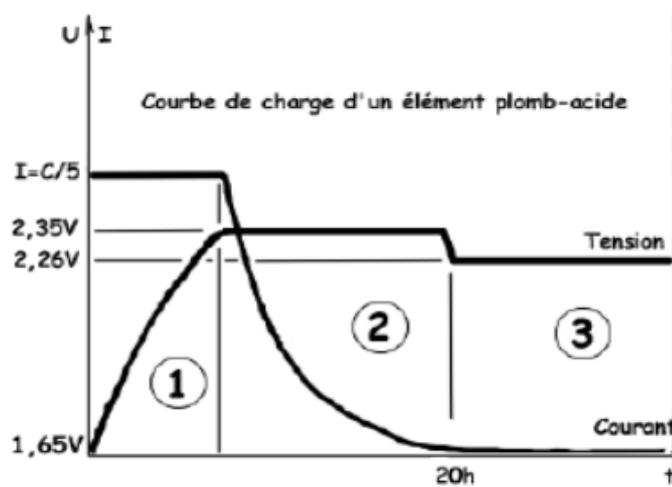


Figure .II.4 : Différentes phases de charge de la batterie [39].

e) Risque de surcharge

La surcharge immodérée est non seulement un gaspillage d'énergie mais elle peut également induire des dommages irréversibles de la batterie dont :

La batterie n'est jamais bien chargée car le courant intense qui produit le bouillonnement n'est employé qu'à détruire l'eau de l'électrolyte et non à désulfater.

Le niveau de l'électrolyte baisse rapidement. En effet un ampère-heure de surcharge détruit un tiers de gramme d'eau, avec un régime de surcharge double ou triple du régime normal le niveau du liquide baisse de plus d'un millimètre à l'heure ce qui fait qu'après dix heures de surcharge la partie supérieure des plaques commence à se découvrir et se désagrège rapidement.

La concentration de l'électrolyte augmente du fait de la disparition de l'eau. L'élévation de température qui résulte de la surcharge aggrave l'usure des plaques en augmentant la solubilité du sulfate de plomb. Le violent dégagement gazeux qui accompagne la surcharge accélère par effet mécanique la désagrégation des plaques.

II.4. Système de régulation :

Le système de régulation de charge, est l'un des composants du système photovoltaïque, son rôle est de contrôler la charge et la décharge d'une batterie afin de prolonger sa durée de vie, tout en réduisant le courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée. Lorsqu'une batterie se rapproche d'un état de charge complète, de petites bulles commencent à se former sur les électrodes positives, à partir de ce moment, il vaut mieux réduire le courant de charge non seulement pour éviter des dégâts mais aussi afin de mieux atteindre l'état de charge complète. Un courant trop élevé peut provoquer une déformation des électrodes à l'intérieur, ce qui pourrait créer un court-circuit.

Le régulateur de charge assure deux fonctions principales :

- la protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes.
- permettre d'effectuer un transfert optimal d'énergie du champ photovoltaïque à l'utilisation.

La tension aux bornes de la batterie est l'indication sur la quelle s'appliquera le régulateur pour assurer sa fonction. Le régulateur mesure en permanence cette tension et la compare à deux seuils de tension pré-réglés : seuil haut et seuil bas.

Il existe plusieurs types de régulateurs :

II.4.1. Régulation de décharge :

La régulation de décharge s'effectue par un comparateur qui compare la tension de la batterie à un seuil de tension pré-réglé bas et transmet l'information à un circuit de commande. Ce dernier arrête la décharge lorsque la tension par élément dépasse la tension de seuil.

II.4.2. Régulation de la charge :

La régulation de la charge s'effectue par une réduction du courant lorsque la batterie est chargée, on évite la charge lorsque la tension par élément dépasse la tension de surcharge.

Il existe plusieurs types de montage de régulation de charge pour les batteries au plomb.

a) Régulations de charge série :

Le principe consiste à intercaler entre le panneau PV et la batterie un dispositif qui

module le courant. Le dispositif fonctionne de la manière suivante :

Tant que la tension U_{bat} aux bornes de la batterie est inférieure à la tension de la diode Zener U_Z , le courant délivré par le panneau charge la batterie à travers un transistor si non il se bloque, et le courant ne passe qu' à travers la résistance.

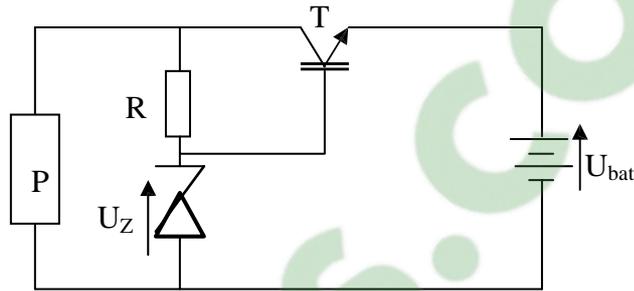


Figure .II.5 : Schéma de principe d'un régulateur de charge série[41].

b) Régulateur de charge de coupure :

La tension des batteries est mesurée et comparée à une tension de référence. Un dispositif actionne un relais et isole le générateur P si la tension est supérieure ou égale au seuil haut ; il rétablit le contact lorsque la tension devient inférieure ou égale au seuil bas.

c) Régulateur de charge à découpage

Ce type de régulateur utilise un convertisseur continu - continu qui délivre à la batterie sa tension de floating chaque fois que la tension de la batterie atteint le seuil haut.

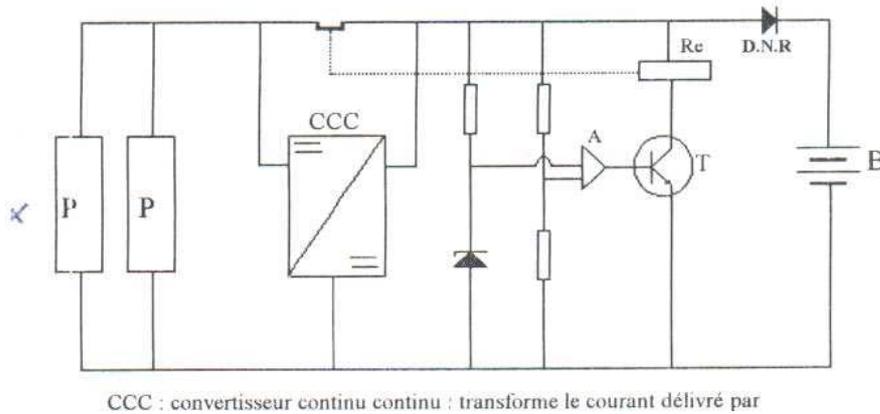


Figure .II.6: Schéma de principe d'un régulateur de charge à découpage [41]

d) Régulateur de charge série à coupure partielle :

Ce type de régulateur permet de fractionner le panneau PV en deux parties. Chacune délivre une même tension selon le principe suivant : une partie du panneau charge la batterie à travers un régulateur de charge série à coupure tandis que l'autre partie est branchée directement pour la charge de la batterie en permanence.

e) Régulateur de charge parallèle :

Ce type de régulateur est utilisé en dérivation sur le panneau solaire. Il permet de dissiper l'énergie excédentaire sous forme calorifique grâce à des composants de puissances selon le principe suivant [41]:

Lorsque la tension de la batterie est faible, le transistor T est bloqué, le courant et la tension aux bornes de la résistance est faible alors tout le courant délivré par le générateur charge la batterie. Si la tension aux bornes de la diode Zener atteint la valeur de référence, le courant I augmente brusquement, le transistor T devient passant et il délivre une partie du courant de charge .

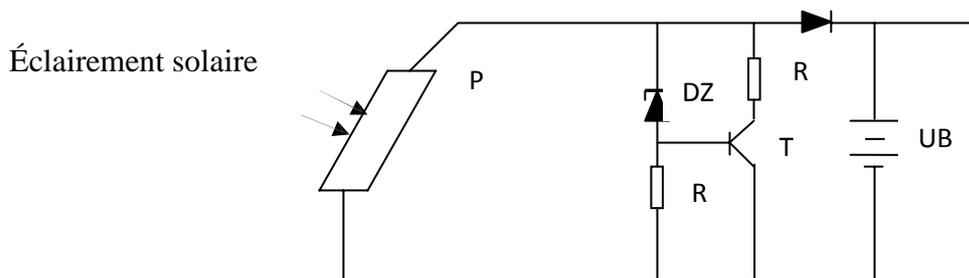


Figure .II.7 : Schéma de principe d'un régulateur de charge parallèle

II.4.3. Qualités d'un régulateur :

Un bon régulateur doit avoir les qualités suivantes :

- Simplicité.
- Faible consommation propre.
- Faible coût.

II.5. Système de conversion :

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu-continu), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif).

L'onduleur est généralement associé à un redresseur qui réalise la transformation du courant continu en courant alternatif et dont le rôle sera de charger les batteries et d'alimenter le circuit en continu de l'installation en cas de longue période sans soleil [46].

II.5.1 Le convertisseur continu -continu :

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal [46]. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95%.

Ce système présente deux inconvénients pour un PV de faible puissance :

- Prix élevé.
- Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension) n'est pas important.

II.5.2 Le convertisseur continu- alternatif :

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif. La formation d'onde de sortie peut être assurée par deux dispositifs :

- **Rotatif** : c'est un moteur à courant continu couplé à un alternateur, son rendement varie de 50% à 60% pour 1kW jusqu'à atteindre 90% pour 50kW.

Ses avantages sont : simplicité, onde sinusoïdale, bonne fiabilité.

Ses inconvénients sont : cherté, faible rendement (surtout pour les faibles puissances).

- **Statique** : connu par le nom d'onduleur. C'est un dispositif utilisant des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charges, des pertes à vide considérables surtout pour des faibles puissances. Les onduleurs peuvent être améliorés à l'aide d'un filtrage ou par utilisation des systèmes en PWM (pulse width modulation) qui permettent grâce à la modulation de largeur des impulsions d'obtenir une onde de sortie sinusoïdale. Avec ce système, on obtient :

- Un rendement élevé sur une plage du taux de charge.
- De faibles pertes à vide.

La figure suivante illustre un onduleur triphasé à fréquence variable à commutation commandée de type MLI (modélisation, de largeur d'impulsion) opéré en source de tension. Il est alimenté à partir de la tension continue générée conjointement par le redresseur et le hacheur série, il est réalisé à base de transistors IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Le choix de ce type de composant relève, d'une part de sa particularités à pouvoir commuter de très grandes valeurs des courants et des tensions à des fréquences de découpage de plusieurs dizaines de KHz et d'autre part, parce qu'il permet la suppression de tout les circuits d'aide à la commutation des montages à thyristors.

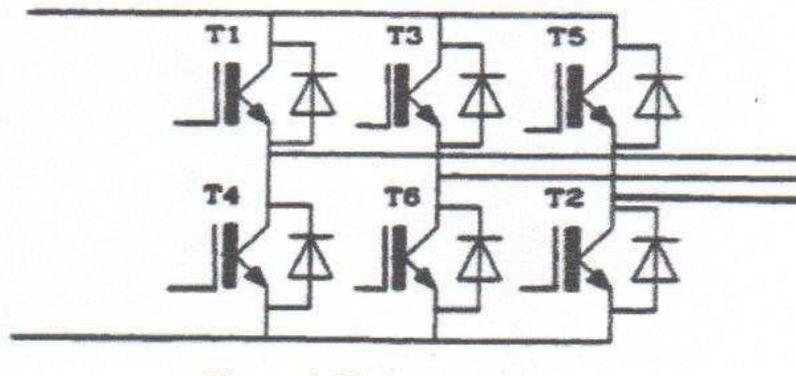


Figure II.8 : Schéma de L'onduleur [30].

- *la puissance nominale* : C'est la puissance exprimée en VA que le convertisseur est capable de délivrer en fonctionnement permanent. Théoriquement, le choix de la puissance à délivrer doit être la somme des puissances des équipements installés ou à installer, mais en pratique, il est rare que tous les appareils fonctionnent en même temps et le choix de la puissance nominale résultera de la valeur maximale du profil moyen de la consommation.

- *Le rendement* : c'est un critère très important, car il influe sur le dimensionnement du champ PV et de la batterie. Celui-ci varie en fonction du taux de charge (rapport de la puissance de sortie et de la puissance nominale), et varie d'un onduleur à un autre. Le rendement de l'onduleur est aussi donné entre l'énergie consommée par la charge et l'énergie fournie par la source continue.

- *La consommation à vide* : Une consommation importante à vide va réduire l'énergie emmagasinée par la batterie (cas de nuit) [47]. Pour cette raison, il est important de limiter les pertes représentant un faible pourcentage de la puissance nominale (1 à 5%). Pureté de la tension sinusoïdale (220v – 50Hz).

Un système de régulation sert à maintenir la tension et la fréquence aux valeurs nominales, quelle que soit la tension d'entrée.

II.6. La Charge :

La charge est l'équipement électrique alimenté par le système, elle peut être de type continue comme des équipements de télécommunications, le pompage d'eau, ou de type alternative dans les cas d'usage domestique (maison solaire), ce cas nécessite un onduleur.

II.7. Configuration du système retenu pour notre étude

Le schéma de principe du type de système que nous allons étudier est représenté sur la figure II-8 ; il comprend les composants suivants :

- Module photovoltaïque (captage) ;
- Un convertisseur de type DC-DC (un hacheur);
- Un convertisseur de type DC-AC (un onduleur) ;
- Une batterie d'accumulateurs électrochimique ;
- Un régulateur de charge ;

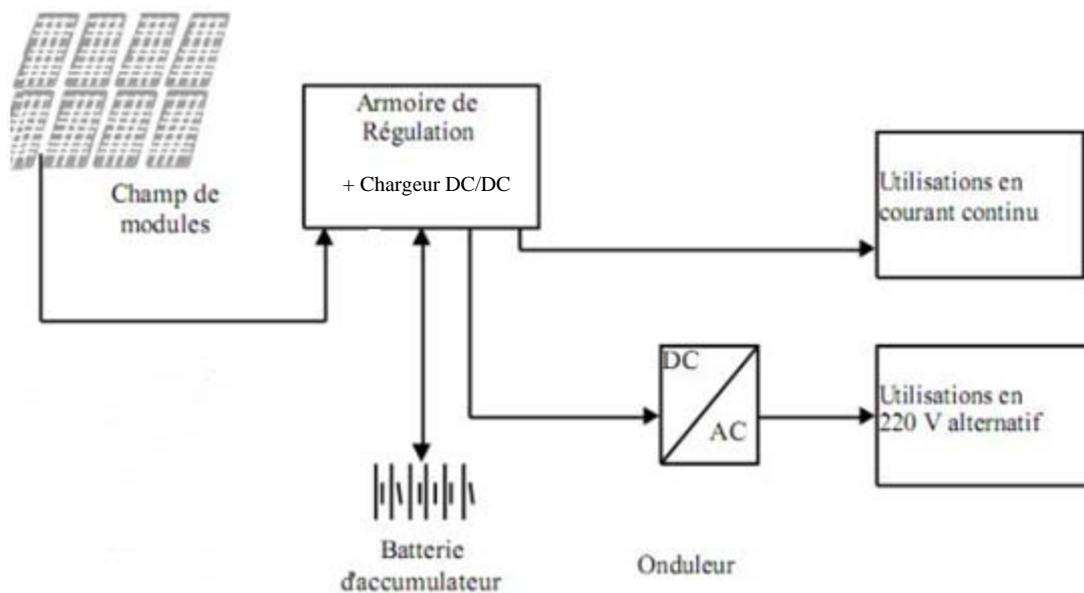


Figure II.9 schéma synoptique d'un générateur photovoltaïque autonome

II.8. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents composants qui entrent dans la constitution d'un système de captage photovoltaïque. Ainsi que les principes de fonctionnement de chaque composant, tout en concluant que :

La durée de vie maximale des meilleures batteries en usage photovoltaïque est très inférieure à celle des modules. Elle constitue donc un maillon faible dans les systèmes PV. C'est pourquoi leurs protections contre les surcharges et les décharges profondes et leur entretien doivent faire l'objet de soins attentifs.

La régulation électronique est pratiquement toujours indispensable dans les systèmes PV avec stockage. La régulation de charge adaptée à base de régulateurs classiques tel : les régulateurs de charge série ne permettent pas une bonne charge de la batterie, d'où l'utilisation des régulateurs MPT, ce qui rend leur conception plus rentable.



Chapitre III

*Techniques de commande des
convertisseurs électroniques*

III.1.Introduction :

L'énergie électrique que fournissent les générateurs PV dépend entre autres de l'éclairement, de leur position par rapport au soleil, de la température et du vieillissement d'où une irrégularité dans la fourniture d'énergie qui peut ne pas être compatible avec les besoins d'énergie. Il est donc important de contrôler l'approvisionnement en électricité à l'aide du système de stockage ainsi développé dans le chapitre II.

Il est aussi recommandé de modifier la nature du courant dans certaines applications DC /DC et dans ce qui suit on va détailler la partie de fonctionnement du convertisseur DC/AC, pour assurer un bon control. La tâche accordée aux convertisseurs statiques nécessite une stratégie de commande qui est résumée par l'association d'un bloc de puissance et d'un bloc de commande afin de régler le transit d'énergie électrique de la source vers le récepteur.



Figure III.1: Schéma synoptique d'un système de conversion énergétique [10]

On peut dire que les systèmes PV ont besoin des convertisseurs DC/DC et DC/AC et des batteries d'accumulateurs pour s'adapter à l'autonomie souhaitée (pour un système non raccordé au réseau électrique).

La dernière partie de ce chapitre consiste à introduire le rôle qui est joué par l'onduleur et sa technique de commande qui se résume en deux grandes sections :

Commande par hystérésis et commande par MLI.

III.2.Couplage du convertisseur au générateur PV

Les règles classiques d'association des circuits électriques impliquent que chacune des structures des convertisseurs est apte à régler le transfert d'énergie entre les circuits électriques présentant des propriétés instantanées données sur le plan de leur impédance instantanée (source de tension ou de courant) et de leur réversibilité instantanée (réversibilité en tension ou en courant). De fait, le générateur PV ne présente, naturellement, aucune de ces propriétés.

De plus, en raison de leur fonctionnement en commutation ces convertisseurs statiques sont 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 $I=f(V)$ autour du point de puissance optimale qui est une dégradation de la conversion photovoltaïque.

Aussi est-il indispensable de disposer en sortie du générateur en tête du convertisseur adaptateur, un filtre de puissance convenablement choisi et dimensionné en fonction de la nature de convertisseur. Notons que son dimensionnement reste délicat, car le calcul doit prendre en compte d'une part l'oscillation renvoyée par le convertisseur qui dépend, notamment du point de fonctionnement de celui-ci, et d'autre part, l'impédance différentielle du générateur PV qui varie très fortement autour du point de fonctionnement optimal et en fonction de l'éclairement [15]

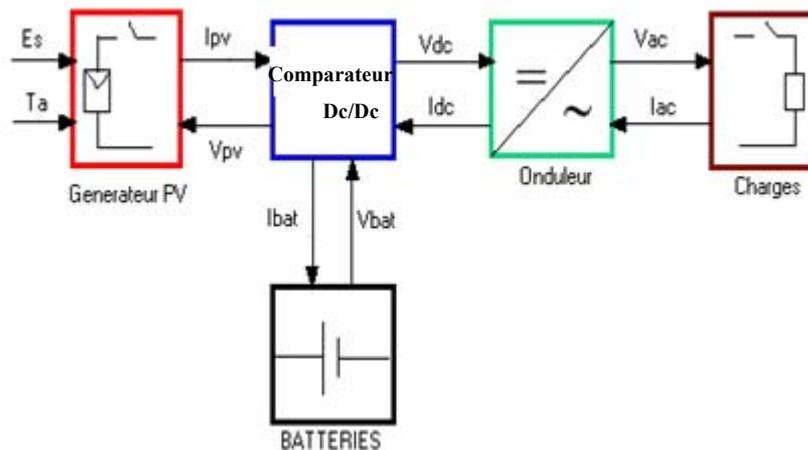


Figure III.2 : Chaîne de conversion photovoltaïque [16].

III.3. Convertisseur DC / DC :

Le système PV doit être doté d'une chaîne de conversion de puissance qui sert à transférer toute l'intensité utile du générateur PV à une charge. Sur la caractéristique $I(V)$, il existe un point maximal de fonctionnement où la puissance débitée soit maintenue élevée. L'optimisation consiste à se fixer sur ce point en agissant automatiquement sur la charge vue par le générateur. Cette adaptation de charge s'effectue à l'aide d'un convertisseur statique dont les pertes doivent être aussi faibles que possible. Ce convertisseur assure un fonctionnement de mise en forme d'une grandeur de sortie DC/DC.

Le transfert de puissance échangée doit être réalisé autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateur) et des 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 si la puissance est 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 [17]

Il existe trois topologies de base de circuits de conversion (DC/DC) :

- Le hacheur dévolteur (Buck)
- Le hacheur survolteur (Boost)
- Le convertisseur Buck-Boost

Notre étude se focalise sur le hacheur Boost

III.3.1. Le hacheur survolteur (Boost)

Le convertisseur Boost est un hacheur à transistor de type parallèle donc élévateur de tension le schéma de la (figure III.3) représente le circuit électrique du Boost.

Ce modèle de hacheur Boost ou hacheur survolteur, est utilisé pour augmenter la tension de sortie par rapport à la source. Son rapport de transformation est, en appelant α le rapport cyclique (rapport du temps pendant lequel le transistor est fermé, à la période de hachage). Pour une puissance incidente ; la puissance optimale transférée à la charge ne pourrait être maximale que pour un rapport cyclique bien défini [18]

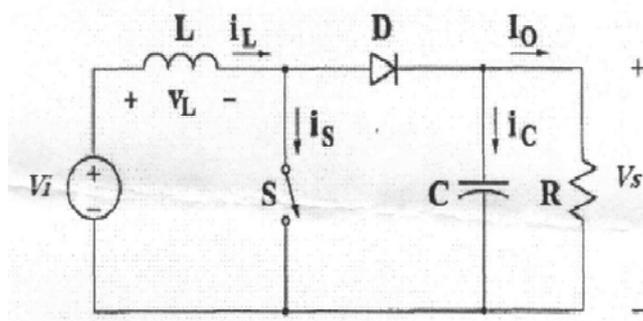


Figure III.3 : Circuit électrique de base du hacheur survolteur [17]

Clicours.COM

Ce hacheur comporte quatre composants : une inductance L , une capacité C , une diode D et un interrupteur S qui peut prendre deux états, off ou on. Son principe peut être expliqué de la manière suivante :

Au premier temps (αT), le transistor (S) est fermé le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie pendant ce temps, la capacité maintient la tension de sortie en utilisant l'énergie précédemment stockée, jusqu'à la fin de la première période. En suite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L), s'opposant à la diminution de courant (iL), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D), c'est-à-dire, la source DC et l'énergie stockée dans l'inductance vont ensemble alimenter le circuit de droite, d'où une augmentation de la tension de sortie [18]

La tension et le courant de la charge du convertisseur Boost dans le cas de la conduction continue sont donnés par [17] :

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} * V_i \quad (\text{ III.1})$$

et

$$I_0 = (1 - \alpha) * iL \quad (\text{ III.2})$$

Comme le présente la (figure III.4), lorsque l'interrupteur du transistor (S) est sur la position (on), le courant de l'inductance du hacheur augmente linéairement et à cet instant la diode (D) est bloquée (off) et lorsque (S) tourne sur la position (off), l'énergie emmagasinée par l'inductance est dissipée dans le circuit (R_c) bien que la diode (D) est passante on peut dire que la diode dans ce cas élimine le retour du courant vers le circuit de gauche.

Les caractéristiques de tension et du courant de charge du convertisseur Boost dans le cas de la conduction continue sont décrites par la (figure III.4) comme suit

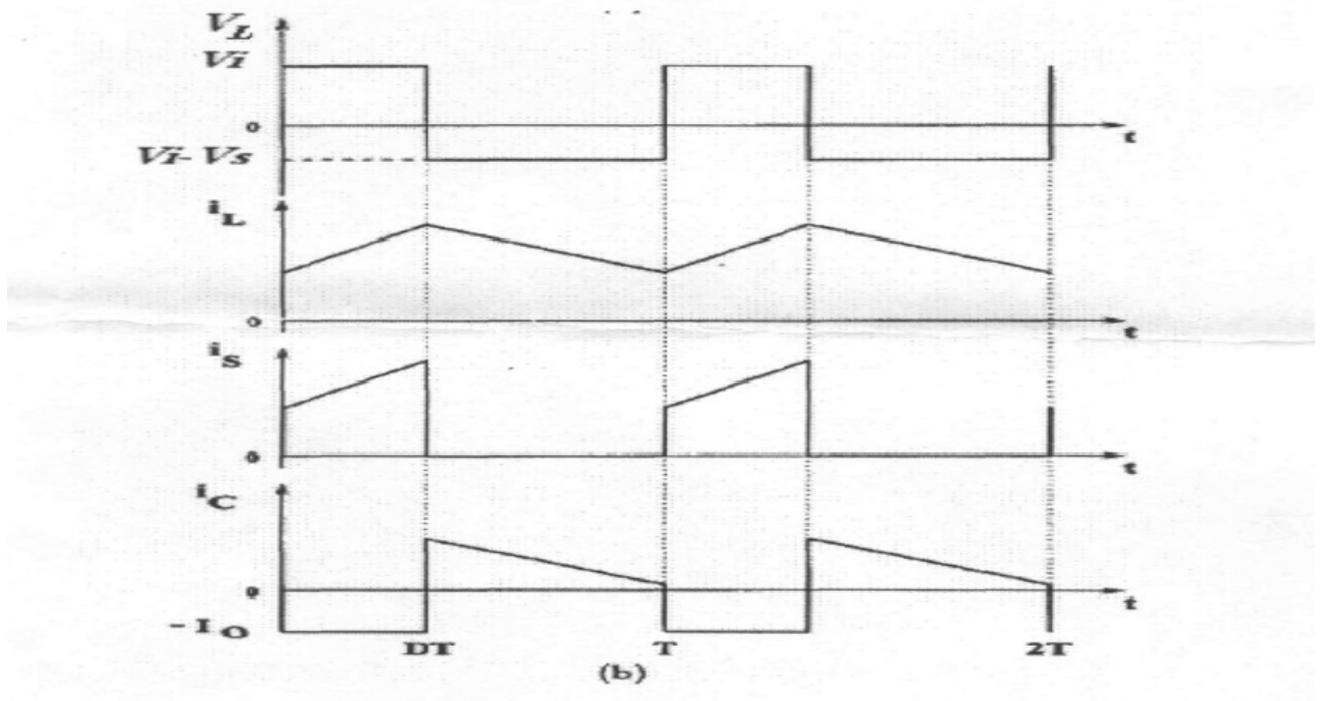


Figure III.4 : Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur [17]

III.4.Commande (MPPT) des convertisseurs DC/DC :

La poursuite du point de puissance maximale (MPPT) permet au module photovoltaïque de fonctionner à son point de puissance maximale. Il est donc conçu généralement avec un convertisseur qui règle la puissance tirée du panneau solaire. En changeant la commande des commutateurs, l'énergie transférée par le convertisseur peut être commandée avec précision.

Le point de puissance (MPP) est habituellement contrôlé par deux variables de commande : La tension ou la puissance est à chaque fois mesurée, et employée à nouveau dans une boucle pour déterminer si le module solaire est au point de puissance maximale [20]. Pour que le système photovoltaïque soit optimisé et fonctionne toujours au point maximal de la puissance, il faut intégrer un MPPT qui a pour rôle de détecter ce point et obliger le système d'opérer précisément sur ce dernier dont le fonctionnement est optimal [13].

L'optimisation est effectuée par l'intégration entre le panneau PV et la suite de la chaîne de conversion photovoltaïque d'un convertisseur DC/DC appelé étage d'adaptation. Cet étage d'adaptation dispose d'une commande (MPPT) (Maximale Power Point Tracking) présenté par la (figure III.5).

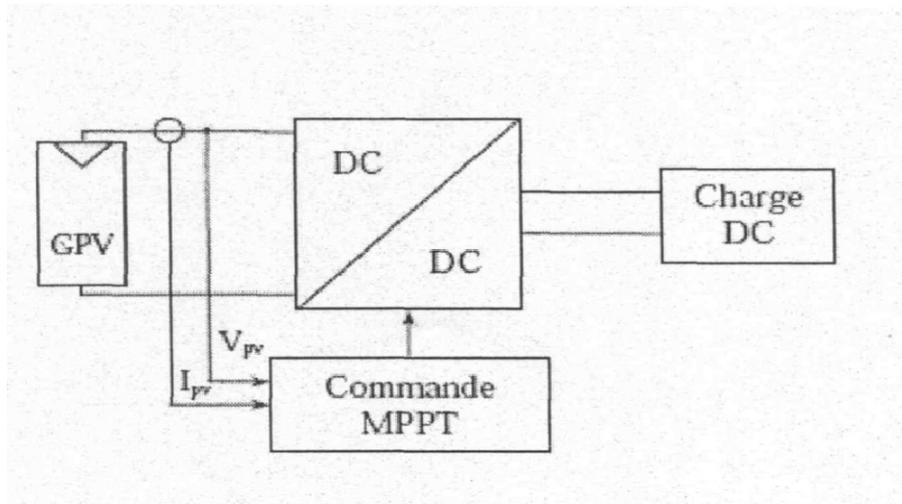


Figure III.5 : Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur DC/DC contrôlé par une commande (MPPT) sur charge DC [17]

L'algorithme de recherche (MPPT) peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisie et des performances recherchées. Ce pendant, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé. De nombreuses recherches sur les commandes (MPPT) ont été effectuées afin de trouver un système optimal permettant une recherche du (PPM) selon l'évolution de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque.

La technique de cette recherche sert à obtenir un meilleur rendement dans le fonctionnement des générateurs photovoltaïques. Elle est aussi appelée la poursuite de la puissance maximale. Dans ce qui suit, nous allons rappeler les différentes approches pour faire fonctionner un panneau solaire au voisinage de son point de puissance maximale. Pour cela on dispose de plusieurs méthodes :

- Méthodes avec contre réaction de tension
- Méthode avec contre réaction de puissance
- Méthode avec contre réaction de courant.

III.4.1. Méthodes de contre réaction de tension :

Quand le système emploie comme paramètre la tension, il règle le module solaire à une tension spécifique qui devrait donner le point maximum de la puissance et parmi les méthodes proposées pour la recherche de ce point, la méthode dite méthode de rétroaction de tension ou contre réaction de tension. Dans ce cas le MPP est habituellement changeable en se basant sur un rapport fixe de la tension du circuit ouvert [13]. Ceci enlève dans la plupart du temps la dépendance de ce point à la température et l'éclairement. Mais la précision de l'ajustement de la tension de fonctionnement dépend du choix de ce rapport [21]. Autrement dit ce mécanisme repose sur le contrôle de la tension des panneaux par comparaison avec une référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la MLI de commande afin d'annuler cette erreur comme le montre la (figure III.5). Selon la nature de cette référence (fixe ou variable, interne ou externe), on distingue trois types de méthodes :

III.4.1.1. Méthode à tension de référence fixe

C'est la méthode basée sur une simple comparaison entre la tension de sortie du panneau avec une tension de référence prédéfinie, pour ajuster continuellement le rapport cyclique du convertisseur DC-DC. Cette tension correspond à la tension moyenne de l'intervalle des points des puissances maximales (figure III.6), relevées par des tests sous différentes conditions d'ensoleillement et de température en agissant simplement sur les différents facteurs de pondération lors de la mise au point afin de générer le maximum de puissance. A cause de la dépendance de la tension du panneau avec l'ensoleillement et la température, la tension de puissance maximale est déviée, alors la tension de référence doit être corrigée pour différents ensoleillements et températures le long des périodes de l'année.

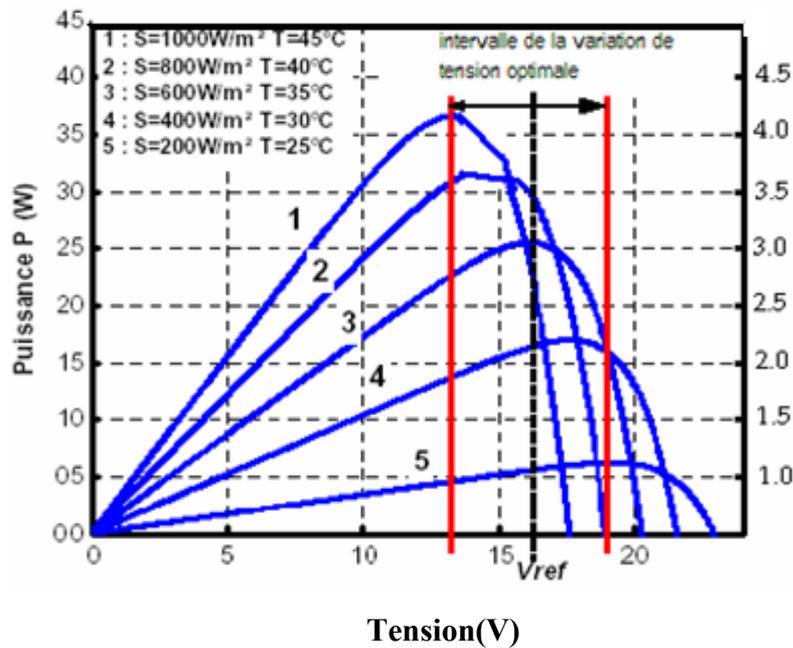


Figure III.6 : Intervalles de variation de la tension de fonctionnement optimale pour des ensoleillements et des températures variables [25].

III.4.1.2. Méthode PPM avec mesure de V_{oc} du panneau

La tension à vide du panneau V_{oc} est mesurée en interrompant le fonctionnement normal du système avec une certaine fréquence, stockant la valeur mesurée, et puis ajustant la tension de référence V_{ref} sur une certaine fraction de la tension du circuit ouvert qui a été expérimentalement déterminée pour être 76% de V_{oc} . Cette tension de référence est comparée à la tension de fonctionnement du panneau V et le signal d'erreur résultant V_{comp} est employé comme entrée dans la commande MLI du convertisseur DC-DC (Figure III.5).

Cette augmentation permet la commande de la tension de fonctionnement du panneau photovoltaïque avec la considération de facteurs importants comme l'insolation et la température. En plus, le vieillissement et l'accumulation de la poussière sur la surface de cellules sont aussi pris en compte.

III.4.1.3. Méthode MPPT avec cellule pilote

Pour éviter les inconvénients liés à l'interruption fréquente de l'exploitation du système, on propose l'utilisation d'une cellule pilote. C'est une cellule photovoltaïque simple qui est électriquement indépendante du reste de la rangée photovoltaïque. Sa tension V_{oc} est constamment mesurée, elle fournit donc l'information implicite du reste des conditions de fonctionnement

courantes du panneau. V_{oc} de la cellule pilote est multipliée par un certain facteur constant pour être comparée à la tension de référence de la boucle de contre réaction.

Puisque cette méthode emploie toujours un facteur fixe pour estimer la tension optimale V_{mp} d'une valeur mesurée de V_{oc} , le point de puissance maximal n'est toujours pas vraiment obtenu. Cette technique est fondée sur la connaissance des caractéristiques de la rangée photovoltaïque pour estimer le lieu du point de puissance maximale.

Ces trois méthodes ne donnent pas des résultats exacts, et ils peuvent donner des points loin du point maximal. [23][24][25][26]

Pour cette raison deux autres méthodes sont les plus utilisées dans les applications photovoltaïques elles seront détaillées dans les paragraphes suivants.

III.4.2. Méthodes avec contre réaction de puissance

Cette méthode est basée sur la recherche de l'extremum de la courbe de puissance $P_v = f(V_p)$ obtenue directement de la caractéristique du (GPV). Le point de puissance maximale (PPM) est obtenu lorsque la dérivée de la puissance par rapport à la tension s'annule, c'est-à-dire Lorsque

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \quad [17] .$$

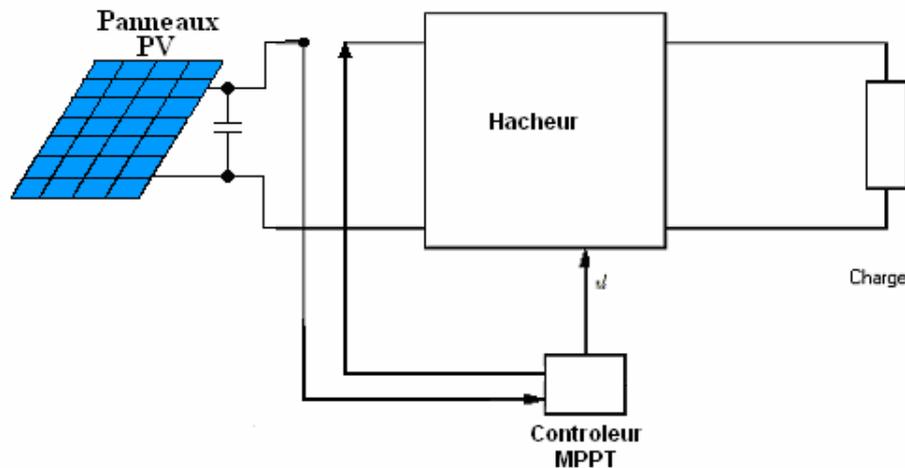


Figure III.7: Schéma de la méthode à contre réaction de puissance [10].

III.4.2.1. Méthode de la perturbation et l'observation la (P&O)

La méthode de perturbation et 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, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température.

Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension V_{pv} et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du panneau PV.

La figure (III.8) représente l'algorithme de la méthode P&O. À chaque cycle, V_{pv} et I_{pv} sont mesurés pour calculer $P_{pv}(k)$. Cette valeur de $P_{pv}(k)$ est comparée à la valeur $P_{pv}(k-1)$ calculée au cycle précédent. Si la puissance de sortie a augmenté, V_{pv} est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance de sortie a diminuée, V_{pv} est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent. V_{pv} est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT.

Quand le point de puissance maximale est atteint, V_{pv} oscille autour de la valeur optimale $V_{pv\ mp}$, Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas de l'incrémention de la perturbation. Si ce pas d'incrémention est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement.

D'autre part, si le pas est petit, les pertes, lors des conditions de changements atmosphériques lents ou stables, seront inférieures mais le système ne pourra pas répondre rapidement aux changements rapides de la température ou de l'éclairement.

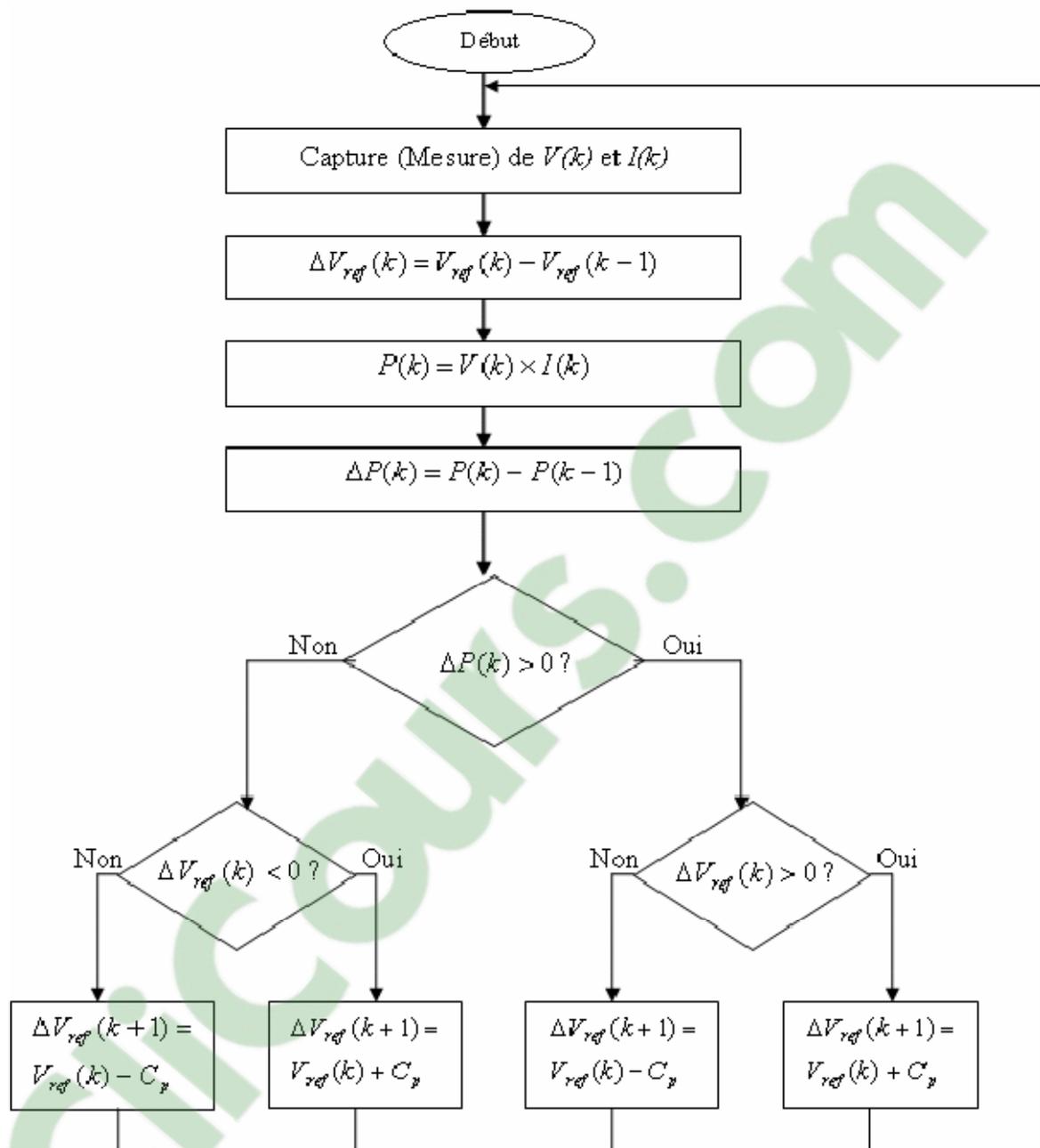


Figure III.8: Organigramme de la méthode à contre réaction de puissance.[27]

III.4.2.2 Méthode par incrémentation de conductance :

La méthode d'incrément de la conductance a été proposée pour éviter les inconvénients de la méthode P&O de recherche du MPPT

Elle est basée sur le fait que la dérivée de la puissance de sortie P_{pv} par rapport à la tension de panneau V_{pv} est égale à zéro au point maximum de puissance.

La caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ du panneau PV sur la figure (III.9) montre que cette dérivée

est positive à gauche du point maximum de puissance et négative à droite du point maximum de puissance[13].

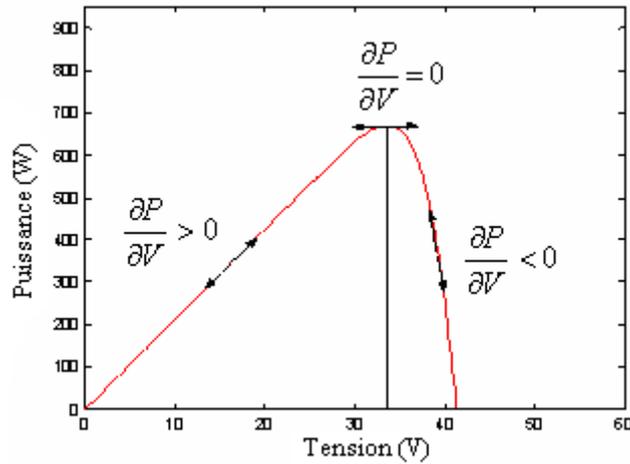


Figure III.9: Caractéristique de la puissance [13].

Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous [28] :

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (\text{III.3})$$

et une variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par :

$$dG = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (\text{III.4})$$

La figure (III.9) permet d'écrire les conditions suivantes :

$$\text{- si } \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0, \text{ le point de fonctionnement est à gauche du PPM.} \quad (\text{III.5})$$

$$\text{-si } \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0, \text{ le point de fonctionnement est sur le PPM.} \quad (\text{III.5})$$

$$\text{-si } \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0, \text{ le point de fonctionnement est sur la droite du PPM.} \quad (\text{III.5})$$

Le lien entre la conductance donnée par l'équation (III.4) et la dérivée de la puissance dP_{PV}/dV_{PV} peut être décrit par l'équation suivante [28] :

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(I_{PV} \cdot V_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} * \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \cong I_{PV} + V_{PV} \frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} \quad (\text{III.6})$$

D'où on peut alors écrire de nouvelles conditions sur la variation de conductance comme celles données par (III.4) sur la dérivée de puissance [28].

$$\text{Si } \frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} > \frac{-I_{PV}}{V_{PV}}, \text{ le point de fonctionnement est à gauche du PPM.} \quad (\text{III.7})$$

Si $\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} = \frac{-I_{PV}}{V_{PV}}$, Le point de fonctionnement est sur PPM (III.7)

Si $\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} < \frac{-I_{PV}}{V_{PV}}$, le point de fonctionnement est sur la droite du PPM (III.7)

Le maximum de puissance peut être alors trouvé en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance (I_{PV}/V_{PV}) avec celle de l'incrément de conductance ($\Delta I_{PV}/\Delta V_{PV}$) comme l'illustre l'algorithme de la (figure III.10).

V_r correspondant à la tension de référence du GPV. Si on est au PPM alors la tension V_r correspond bien à la tension optimale V_{OPT} . Une fois le PPM atteint, le point de fonctionnement peut être maintenu sur cette position jusqu'à la détection d'une variation de ΔI_{PV} . Cela indique alors un changement de conditions climatiques, donc un nouveau PPM à rechercher. Pour cela, l'algorithme incrémente ou décrémente la valeur de V_r jusqu'à atteindre le PPM. Le schéma de principe de cette méthode est illustré sur la (figure III.11) [28]

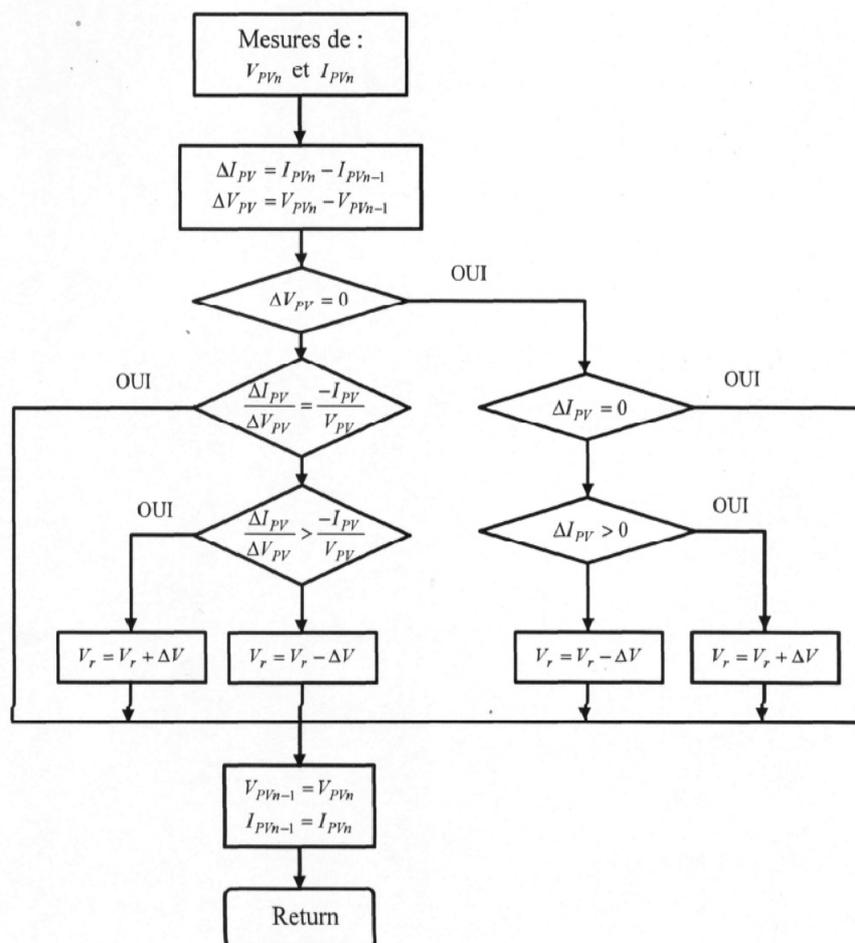


Figure III.10. Algorithme d'une commande MPPT basé sur la méthode incrément de conductance

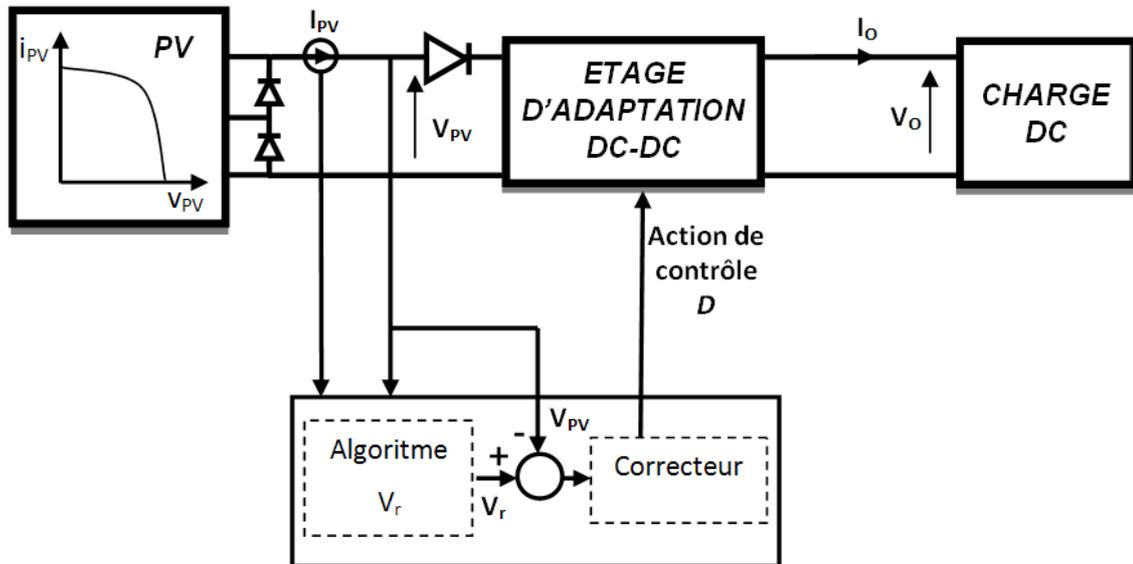


Figure III.11: Fonctionnement d'une commande MPPT de type Incrémentation de Conductance illustré sur une chaîne élémentaire de conversion PV [28].

Théoriquement, avec la méthode de contrôle de type Incrémentation de Conductance, il est possible de trouver un PPM et de s'y immobiliser en stoppant la perturbation. Dans ce cas le ΔV_{pv} est nul et on peut atteindre un nouveau PPM.

Ceci constitue en soit une propriété intéressante par rapport aux deux types de MPPT précédents car en régime établi, il n'y a pas de pertes par rapport au PPM. De plus, cette méthode ne présente pas de risque de divergence au PPM.

En pratique, le système présente une oscillation comme la commande P δ O autour du PPM, à cause de bruit aux niveaux des acquisitions des paramètres d'entrée (I_{pv}, V_{pv}) et la difficulté au système de bien analyser si la relation $\frac{I_{PV}}{V_{PV}} + \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0$ est bien remplie ou non.

Ainsi, en réalité, cette condition n'étant jamais obtenue, le système est toujours en train de la rechercher. Par rapport à la commande P δ O, le temps d'exécution de l'algorithme est plus long car ce dernier est plus complexe. De ce fait, l'intervalle de temps entre deux échantillons de tension et de courant est augmenté engendrant un retard sur la détection des variations climatiques.

III.4.3 Méthode avec contre réaction du courant :

Dans toutes les méthodes MPPT présentées jusqu'ici, une mesure de I et V a été employée pour obtenir des informations sur la puissance actuelle de sortie du panneau. Basé sur cette

information, le mécanisme MPPT ajuste la tension V de sortie du panneau pour déplacer le point de fonctionnement des piles solaires plus près de leur MPP. Cette nouvelle méthode MPPT utilise seulement une mesure de courant pour obtenir l'information sur le point opérationnel actuel du système. [25]. La figure (III.12) illustre le schéma de principe de cette méthode

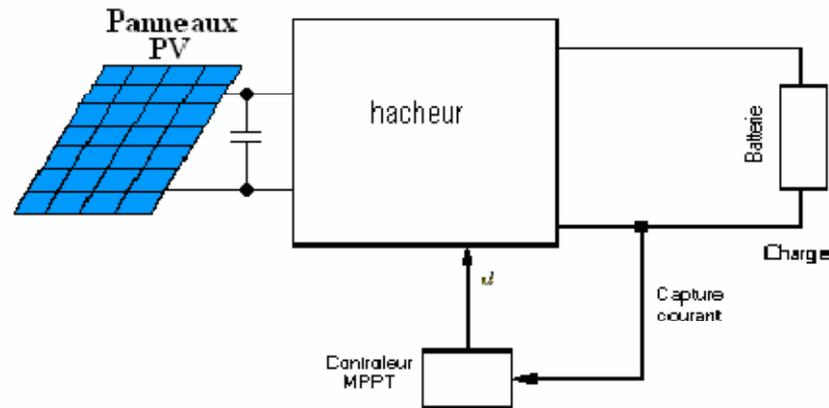


Figure III.12 : Méthode de la contre réaction en courant [10]

L'avantage de cette méthode est qu'elle est simple, contrairement aux méthodes motionnée, précédemment [25].

L'analyse de ces différentes méthodes de recherches, montre qu'elles ne sont pas trop éloignées sur leur fonctionnement en pratique ni sur les compromis à effectuer entre précision et rapidité au niveau de la valeur d'incrémentatation.

Les divers essais extraits de la littérature montre que ce type de commande peut être performant dans certaines conditions mais ne permettent pas de dire que tel mode de recherche est plus performant qu'un autre car les conditions de test et les valeurs de la variable d'incrémentatation ne sont pas similaires. En revanche, ils donnent une estimation d'un rendement qui peut être élevé et du temps de réponse selon le pas d'incrémentatation choisi.

III.5. Les convertisseurs DC/AC

Les charges alimentées en courant alternatif nécessitent donc un convertisseur de type continu/alternatif (DC/AC) adopté à leurs caractéristiques. Ce convertisseur transforme en énergie électrique alternative, une énergie de type continu qui provenait soit de la batterie d'accumulateur, soit directement du générateur photovoltaïque via le dispositif de régulation et de contrôle.

Le convertisseur DC/AC est couramment un onduleur. C'est un dispositif électronique qui utilise les composants de puissance, tels que les MOSFET, BJT, IGBT etc. Il doit délivrer un signal le plus proche possible du signal sinusoïdal avec une fréquence fixe. En effet pour les

fonctionnements de la plus part des charges, il y a présence de certaines harmoniques néfastes. A cet effet, toute approche de commande doit prendre en compte les contraintes suivantes :

- La distorsion harmonique en régime permanent doit être rigoureusement minimisée
- Le terme fondamental de la tension de sortie doit être réglé à une valeur de référence.

Les trois principaux éléments constituant un onduleur sont les suivants :

- ✓ La source de tension continue,
- ✓ L'onduleur DC/AC,
- ✓ Le filtre LC,

III.5.1.Principe de conversion DC/AC d'un onduleur PV

L'onduleur a pour rôle de convertir le courant continu des panneaux photovoltaïques en courant alternatif identique à celui de Sonelgaz (réseau triphasé 220V et 50 Hz) .C'est un appareil électronique de haute technologie conçu pour répondre à toute l'exigence du réseau, comme la qualité, la sécurité et la fiabilité. Il permet un contrôle parfait du fonctionnement.

Il se présente sous la forme d'un boîtier métallique de petite dimension, muni d'un radiateur et doit être placé sur un support vertical (mur par exemple). Il n'émet aucun parasite électromagnétique et ne génère quasiment aucun bruit. Afin de limiter les pertes, il doit être placé le plus près possible des panneaux photovoltaïques [17].

III.5.2. Principe du choix de l'onduleur

Dans les installations photovoltaïques, où les récepteurs fonctionnant en courant alternatif, on fait appel à l'onduleur photovoltaïque

Un onduleur photovoltaïque est caractérisé par :

- Puissance apparente nominale de sortie ;
- Tension d'entrée continue nominale (12V, 24V, 48V...etc.) avec une plage de variation admissible tolérée par le constructeur ;
- Tension de sortie nominale (220V monophasée 380V triphasée) ;
- Fréquence de sortie nominale (50Hz) ;
- Rendement nominale (0,85).

Le choix d'un onduleur photovoltaïque doit satisfaire le critère suivant : la puissance de sortie de l'onduleur doit être supérieure à la puissance du récepteur [30]

III.5.3. Type d'onduleurs :

Les onduleurs ont pour but de transformer le courant continu produit par les modules photovoltaïques en courant alternatif afin de pouvoir alimenter tous les dispositifs et les appareils électriques.

On peut distinguer deux typologies d'onduleurs, on fonction de leurs applications :

- Onduleur pour installation raccordées au réseau
- Onduleur pour installation isolées

Ces dernières années on a pu noter une forte augmentation de la demande d'installation d'onduleurs sur des installations photovoltaïques pour alimenter des besoins isolés. La motivation principale est le désir de la part des usagers d'avoir les mêmes commodités que celles dont ils disposent dans leurs maisons principales (dans le cas par exemple de chalets de montagne) [31].

Voici les typologies principales [17] [31] :

III.5.3.1. Onduleur d'onde sinusoïdale

Les onduleurs modernes sinusoïdaux pour les installations indépendantes utilisent les mêmes techniques que celles développées par la liaison au réseau, mais avec des circuits plus simples, sans protection ni synchronisation avec le réseau, ils sont caractérisés par leurs grands rendements. Ils conviennent pratiquement à tous les types d'utilisateurs. On trouve ainsi sur le marché de petits onduleurs (100 à 500W) utilisant la technique HF intermédiaire sans filtre, le signal haute fréquence toujours présent peut ainsi éventuellement perturber la charge, des appareils puissants utilisent pour cette technique un filtre éliminant les harmoniques HF.

III.5.3.2. Onduleur à onde carrée :

C'est la technologie la plus simple pour générer une onde alternative. Dans ce cas, on commande deux transistors dans le primaire d'un transformateur par un oscillateur de 50Hz.

Le signal généré va produire une somme d'harmoniques impaires qui ne pouvant souvent pas alimenter sans problèmes des charges inductives.

Les appareils utilisant cette technique n'ont pas de réglage de tension de sortie alors on doit varier la charge et la tension d'entrée.

III.5.3.3. Onduleur à onde pseudo-sinusoïdale :

Sont appelés aussi onduleurs à onde sinusoïdale modifiée ce sont en général les appareils qui ont un meilleur rendement et moins d'harmoniques que la carrée. La technique utilisée part d'un oscillateur à modulation de largeur d'impulsion à 50Hz commandant deux transistors dans le

primaire d'un transformateur. Le signal produit est un double carré (positif et négatif) avec passage par zéro, à chaque commutation réduit les harmoniques par rapport au signal carré. Le carré de largeur variable en fonction de la charge et de la tension d'entrée permet un réglage précis de la tension de sortie. Ces onduleurs sont appropriés pour l'alimentation de nombreux appareils (TV, moteur, scies).

III.6. Commande de l'onduleur :

III.6.1. Onduleur de tension :

Les onduleurs de tension sont des convertisseurs de l'électronique de puissance, ils sont présents dans les domaines d'applications les plus variés. La forte évolution de ces convertisseurs s'est appuyée d'une part, sur le développement des composants à semi-conducteurs (entièrement commandables, puissants, robustes, et rapides). D'autre part sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de modulation de largeur d'impulsion. La (Figure III.13) présente un onduleur triphasé à structure de tension, il est constitué de trois bras. Chaque bras comprend deux interrupteurs. Pour chaque interrupteur, une diode de récupération est montée en tête-bêche avec le semi-conducteur contrôlable qui est un transistor (GTO ou IGBT). Les interrupteurs sont réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture [30]

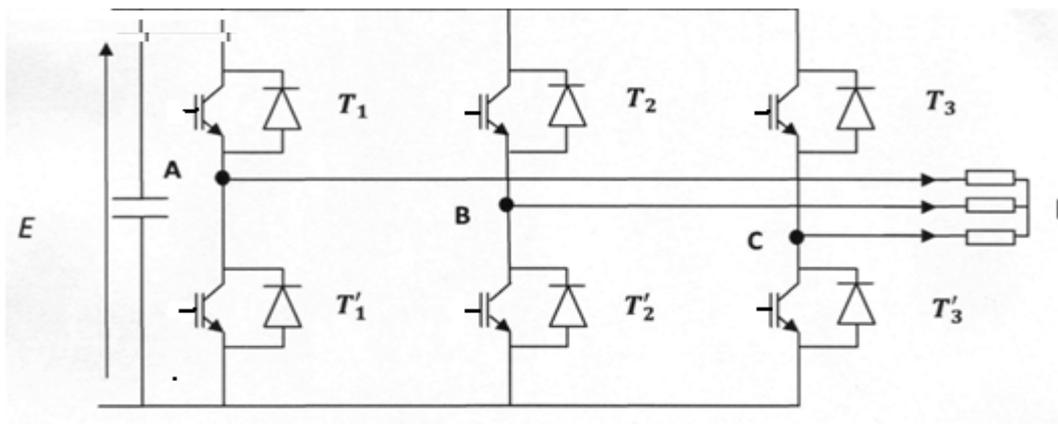


Figure .III.13. Structure de l'onduleur triphasé [30]

III.6.2. Stratégie de commandes triphasées

En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre.

Afin d'éviter un court-circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre. Avec l'hypothèse de la commutation instantanée, ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en compte et par conséquent aucun risque de court-circuiter le condensateur n'est à craindre [33].

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension référence [34]. D'une façon générale, il existe deux moyens d'action pour réaliser la conversion DC/AC

- La première : dite la commande interne revient à contrôler les signes des courants du bras et des tensions aux bornes des semi-conducteurs. Cette méthode est appelée aussi commande par hystérésis.
- La seconde, appelée commande externe s'appuie sur l'utilisation directe de la cellule de base et consiste à régler la fréquence et la durée des inters connections de la source avec la sortie .Il est donc temporelle et débouche sur la technique de modulation de largeur d'impulsion (commande par MLI).

III.6.2.1. Commande par hystérésis :

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien est une commande non linéaire qui consiste à maintenir chacun des courants générés dans une bande en développant les courants de référence.

Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation. En pratique, c'est la technique schématisée sur la (figure III.14) que l'on utilise. La différence entre le courant de référence et celui mesuré est appliquée à l'entrée d'un comparateur à hystérésis dont la sortie fournit directement l'ordre de commande des interruptions du bras correspondant de l'onduleur [17]

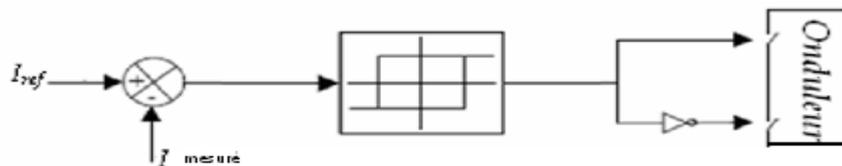


Figure III.14. Principe de commande des courants par hystérésis [10]

Dès que l'erreur atteint la limite inférieure, un ordre de commande est transmis de manière à rester à l'intérieur de la bande, la simplicité de la mise en œuvre de cette stratégie est le principal atout de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande

d'hystérésis, ne permettent pas de maîtriser correctement le spectre haute fréquence dû aux fréquences de commutations.

A fin de résoudre ce problème de la maîtrise des fréquences de commutation et de sa répercussion sur les interrupteurs, une autre stratégie de commande, peut être composée à savoir : la commande par hystérésis modulée. Mais dans cette stratégie de commande, il est difficile de définir la largeur de la bande de l'hystérésis. De plus, le fonctionnement avec une fréquence de commutation toujours fixe nous empêche de conserver l'avantage d'une rapidité illimitée obtenue par la commande par hystérésis [10].

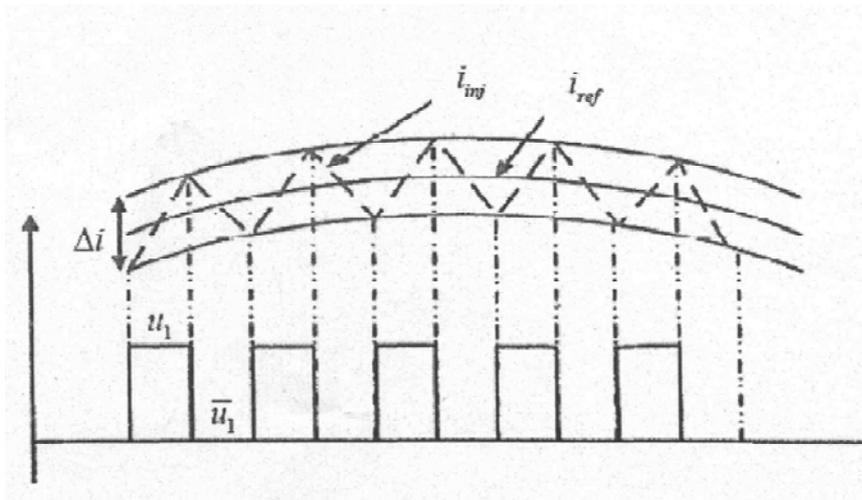


Figure III.15. Commande des interrupteurs par hystérésis [36]

III.6.2.2. Commande par modulation de largeur d'impulsion :

On commande l'onduleur par la technique à MLI qui présente plusieurs avantages :

- Elle permet de générer les ordres de commande des interrupteurs de manière simple et extrêmement rapide (un processus peu coûteux est donc suffisant).
- Elle repousse vers des fréquences plus élevées des harmoniques de la tension de sortie
- Elle permet d'obtenir un fondamental de tension variable en amplitude et en fréquence [32]

Dans cette technique de commande on peut distinguer :

- ✓ MLI à échantillonnage naturel
- ✓ MLI optimisée (calculée)

III.6.2.2.1. MLI à échantillonnage naturel

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsions est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, dite MLI intersective, la méthode basée sur cette technique met en œuvre d'abord un régulateur qui à partir de l'écart entre le courant et sa référence, détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice). Cette dernière est ensuite comparée avec un signal en dent de scie à fréquence élevée (porteuse). (figure III.16) [10] [35] [36]

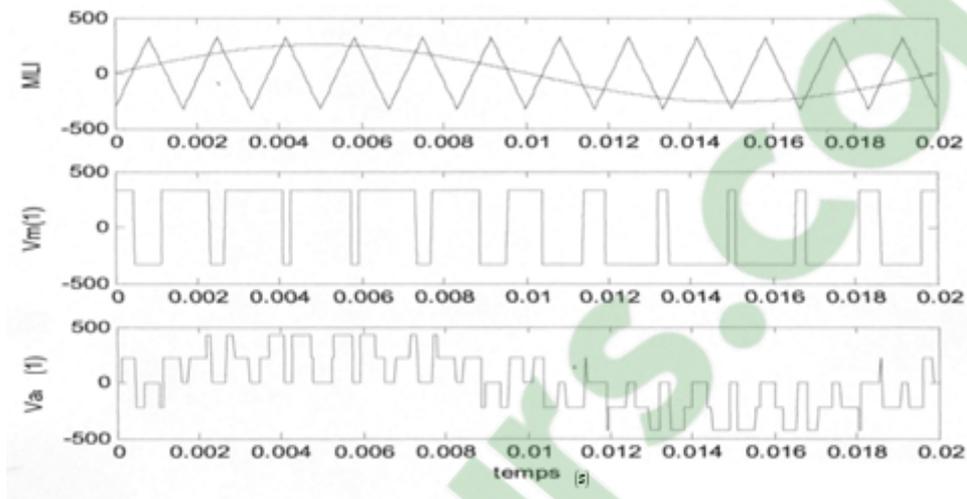


Figure III.16. Principe de fonctionnement de MLI [32]

La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe de cette méthode est donné sur la (figure III.17)

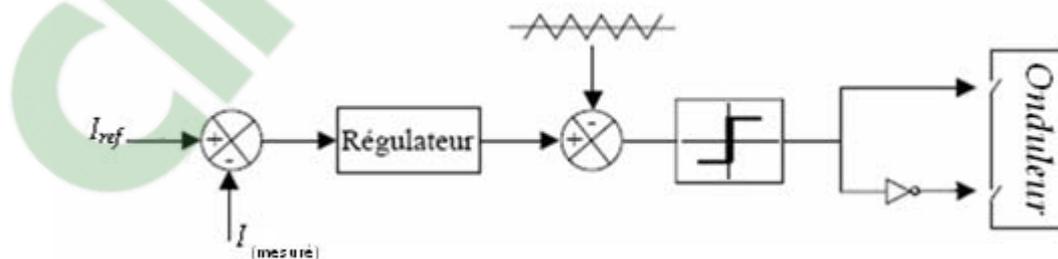


Figure III.17 : Contrôle de courant par MLI [10]

Cette modulation présente l'inconvénient de générer des impulsions dissymétriques par rapport à la période de la porteuse. Ainsi, les instants de commutation ne peuvent être exprimés sous forme analytique simple, ce qui rend délicate la mise en œuvre, dans les applications

numériques. D'autres techniques de MLI à échantillonnage naturel existent également dans la littérature comme la MLI à échantillonnage régulier où on peut distinguer deux méthodes :

- Echantillonnage régulier symétrique où l'échantillonnage des tensions de référence se fait à des instants périodiques égaux à la période de la porteuse.
- Echantillonnage régulier asymétrique : contrairement à l'échantillonnage symétrique chaque transition de l'impulsion de commande est défini à partir d'une valeur différente du signal échantillonné et la référence est échantillonnée à la demi-période de la porteuse.

III.6.2.2.2. : MLI à échantillonnage optimisé (calculé) :

Le principe consiste à définir une onde MLI avec des caractéristiques particulière à partir de la prédétermination des différents angles de commutation. Ces caractéristiques sont obtenues à partir de l'optimisation de certains critères tels que l'élimination d'harmonique et la minimisation du taux de distorsion d'harmonique etc. [10]

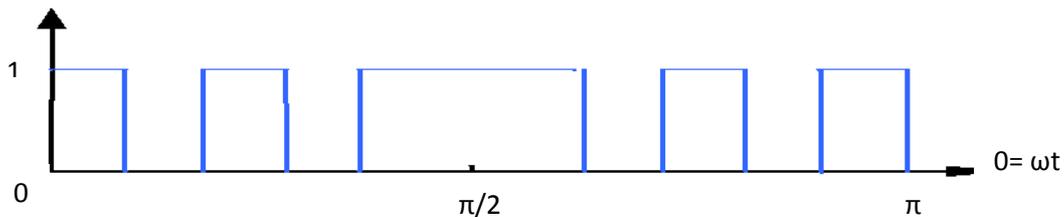


Figure III.18: MLI optimisée (Calculée)[10]

III.7.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit généralement les principes de fonctionnement des convertisseurs statiques pour adaptation DC/DC qui nécessitent le hacheur Boost et le transfert DC/AC qui est doté d'un onduleur triphasé ainsi que les techniques de recherche du point de puissance maximal et leurs modèles mathématiques.

Nous avons présenté en détail les différents types de commande des convertisseurs électroniques utilisés dans les systèmes photovoltaïques.

Chapitre IV

Clicours.COM

*Modélisation et simulation du système
photovoltaïque autonome*

IV.1.Introduction

Après avoir étudié et cité les différents composants du système photovoltaïque, ainsi que l'influence des paramètres de ses composants sur le système, nous procédons à la modélisation et la simulation du système.

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié. A ce niveau, la condition qui s'impose; c'est de connaître les critères d'entrées (données de base) c'est-à-dire les données météorologiques au site, les données relatives aux utilisations, et les données relatives aux équipements.

De nombreux articles publiés dans la littérature scientifique portent sur le développement de modèles pour chacun des composants du système

La simulation joue un rôle très important dans l'étude et la conception des systèmes. Depuis quelques années, la simulation du fonctionnement et du comportement des systèmes quelque soit leur complexité est rendue possible, et ce grâce à l'arrivée des calculateurs (logiciels) très performants. Ceci a permis de gagner de temps énorme dans la vérification et l'examen d'une conception.

Dans l'étude de notre système, nous avons accompli la partie simulation dans un environnement Matlab développé par la société Américaine Mathworks, ce calculateur est un logiciel de calcul numérique et de visualisation très raffiné et convivial.

Matlab est considéré comme un environnement des applications à part entière, car il permet à l'utilisateur d'élaborer ses propres fonctions, de fiables programmes et des interfaces graphiques très performantes.

IV.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

a- Cas idéal :

D'après ce qui précède, il apparaît que la cellule photovoltaïque est équivalente à un générateur de courant I_{ph} induit par le flux lumineux, shunté par une diode représentant la jonction p-n du semi-conducteur.

L'équation caractéristique d'une cellule solaire idéale est de la forme :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qv}{KT}} - 1 \right) \quad (\text{IV.1})$$

-Le circuit équivalent correspondant à une cellule solaire est le suivant :

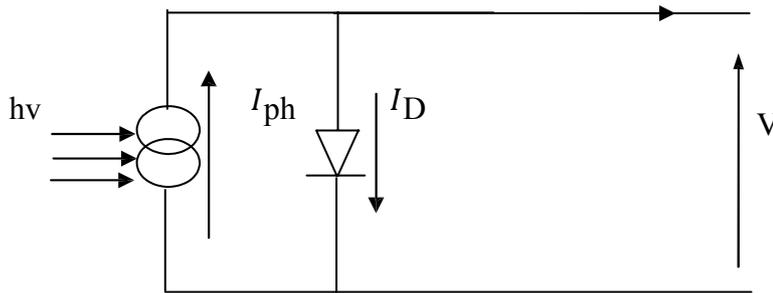


Figure.IV .1 : Cellule solaire idéale

I_{ph} : courant généré par les photons ou photo-généré.

I_{PV} , V : courant et tension fournis par la cellule.

I_D : courant de la diode donné par [25] :

$$I_D = I_{sat} \left(e^{\frac{qv}{nKT}} - 1 \right) \quad (\text{IV-2})$$

q : Charge de l'électron = $1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$.

K : Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23} \text{JK}^{-1}$.

b-Cas réel :

Lorsque les résistances de contact et les pertes Ohmiques ne peuvent être négligeables par rapport à la résistance de charge, on doit associer au schéma équivalent une résistance série (R_s) et une résistance shunt (R_{sh}).

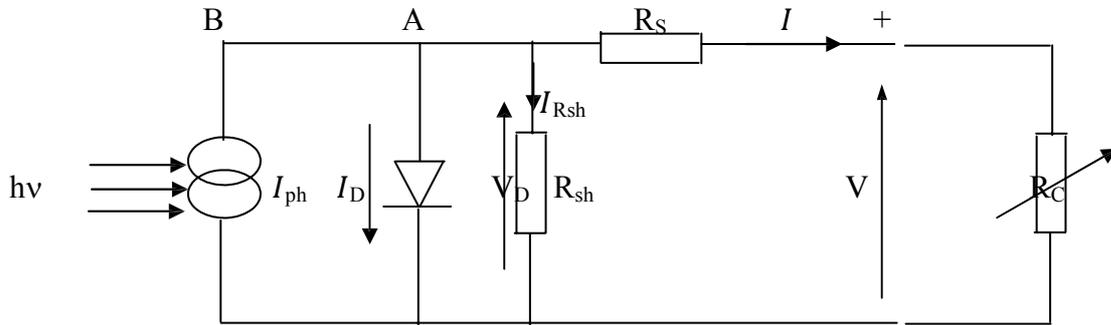


Figure.IV.2 : Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle.

Appliquant la loi de Kirchhoff aux nœuds A, B :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_D - I_{Rsh} \quad (IV-3)$$

Le courant débité par la cellule est la somme de trois courants :

I_{ph} : courant généré par les photons ou photo-généré.

I_{Rsh} : courant traversant R_{sh} . Si R_{sh} est très grande, il devient très faible et est indépendant de la tension

$$I_{Rsh} = \frac{V_D}{R_{sh}} = \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (IV-4)$$

Car:
$$V_D = R_{sh} \cdot I_{Rsh} = V + R_s \cdot I \quad (IV-5)$$

Remplaçant dans (II-3) les équations (II-4) et (II-2). L'équation caractéristique deviendra :

$$I_{PV} = \left[I_{Ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q \left(V + \frac{R_s I_{PV}}{N_s} \right)}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V + \frac{R_s I_{PV}}{N_s}}{R_{sh}} \right] N_p \quad (IV-6)$$

n est le facteur d'idéalité. Pour les cellules actuellement commercialisées au silicium, on prend $n=1$.

-Si l'on suppose R_{sh} infini ($R_{sh}=\infty$) l'équation (IV.6) devient

$$I_{PV} = [I_{ph} - Isat \left[\exp \left(\frac{q \left(V + \frac{RS I_{PV}}{NS} \right)}{nKT} \right) - 1 \right]] Np \quad (IV-7)$$

VI.2.1. Paramètres et caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :

Ces paramètres sont caractérisés par ceux des modules constituant le champ PV.

➤ **Courant de court-circuit I_{cc} :**

Il est obtenu pour tension de sortie nulle à partir de l'équation (IV.6) :

$$I_{cc} = I_{ph} - Isat \left[e^{\frac{qRs.Icc}{KT}} - 1 \right] - \frac{Rs.Icc}{Rsh} \quad (IV-8)$$

➤ **Tension en circuit ouvert :**

Elle est obtenue pour un courant de sortie nul à partir de l'équation (IV.6).

$$0 = I_{ph} - Isat \left[e^{\frac{qVco}{nKT}} - 1 \right] - \frac{Vco}{Rsh} \quad (IV-9)$$

Dans le cas d'une cellule idéale ($Rs \rightarrow 0$, $Rsh \rightarrow \infty$, $I_{ph} = I_{cc}$ et $n=1$)

$$V_{co} = \frac{NKT}{q} \log \left[1 + \frac{I_{cc}}{Isat} \right] \quad (IV-10)$$

V_{CO} augmente quand I_{SAT} diminue elle dépend que de la nature du cristal et de la jonction.

IV.2.3. Résultats de la simulation :

Les figures IV.3, IV.4 montrent les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'une cellule photovoltaïque au silicium monocristallin avec $Rs = 0.04\Omega$

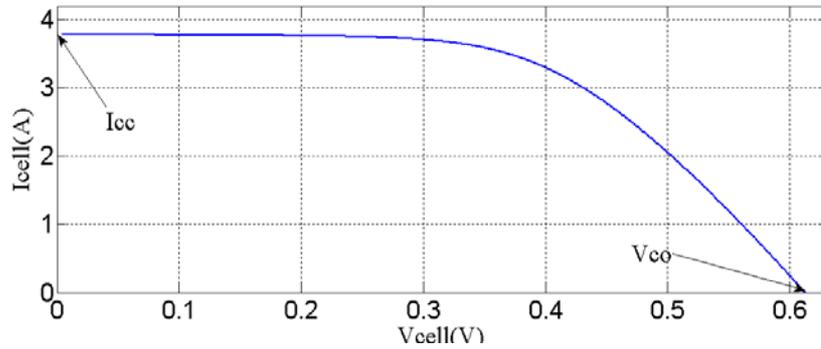


Figure .IV.3: Caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule PV ($G=1\text{kW/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).

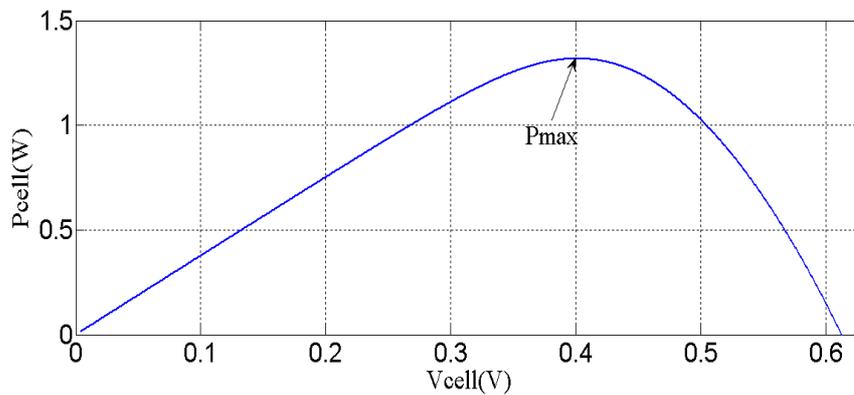


Figure .IV.4: Caractéristique $P=f(V)$ d'une cellule PV ($G=1\text{kW/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).

a) Influence de l'éclairement

Les figures IV-5, IV-6 montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque à une température constante ($T=25^\circ\text{C}$).

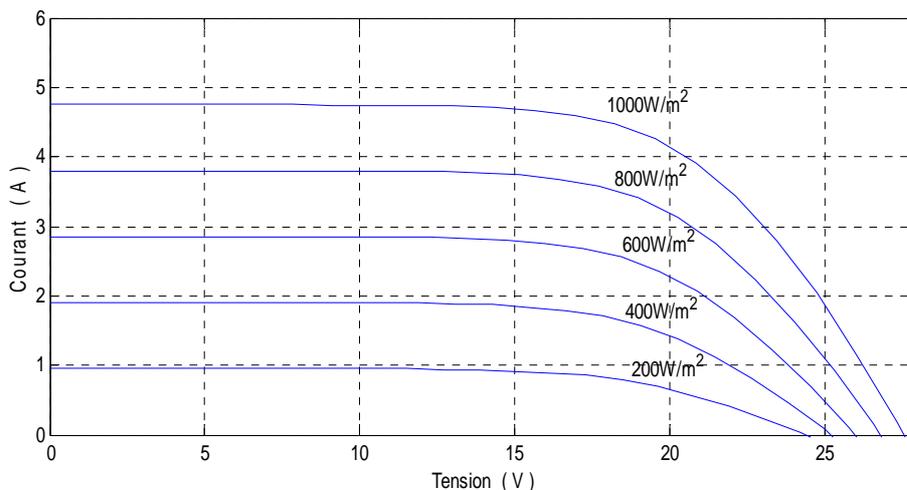


Figure. IV.5: Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V d'une cellule PV.

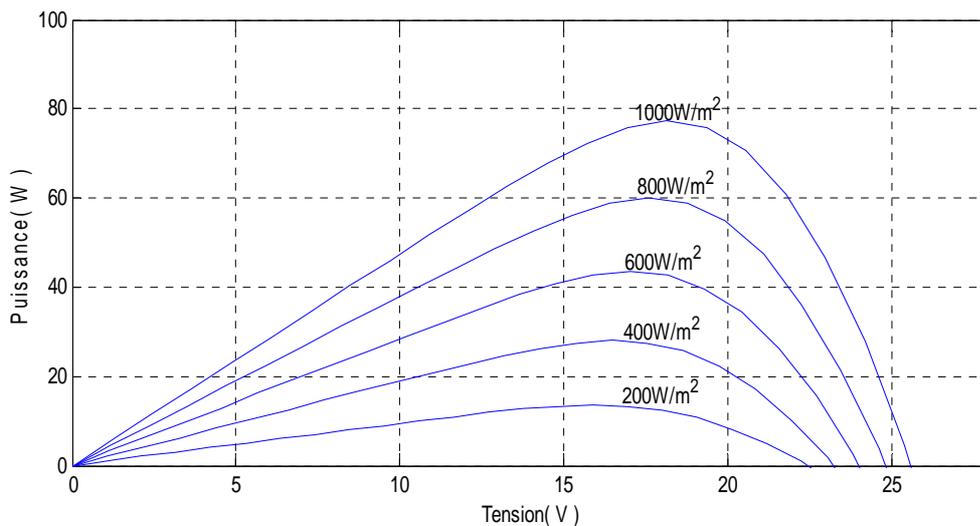


Figure. IV.6: Influence de l'éclairement sur la caractéristique P-V d'une cellule PV.

On remarque que la tension de circuit ouvert (V_{co}) ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant de court-circuit (I_{cc}) qui augmente fortement avec ce dernier. Ceci implique que la puissance optimale de la cellule est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.

b) Influence de la température

Les figures IV.7,IV.8 montrent l'influence de la température sur les caractéristiques I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque pour un éclairement de 1000 W/m^2 . On remarque que lorsque la température augmente, la tension du circuit ouvert V_{co} diminue alors que le courant de court-circuit I_{cc} augmente.

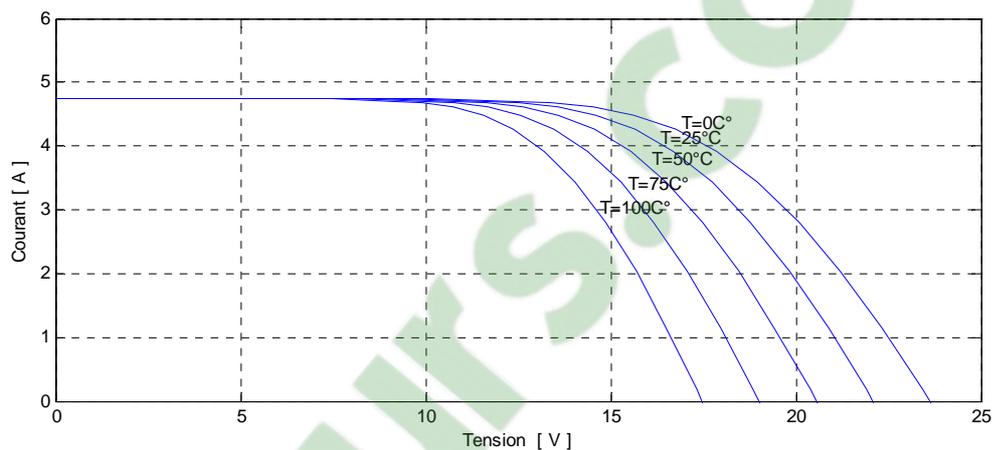


Figure. IV.7: Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule PV.

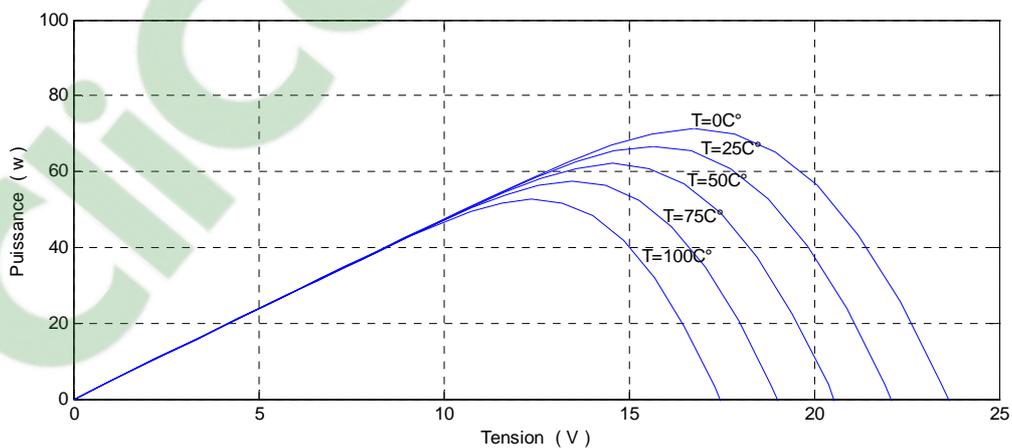


Figure .IV.8: Influence de la température sur la caractéristique P-V d'une cellule.

IV.2.Module photovoltaïque

Un module photovoltaïque est constitué généralement de 36 cellules mises en série. Le courant de ce dernier sera dans ce cas équivalent à celui d'une seule cellule alors que sa

tension correspond à la somme des tensions correspondantes (figure IV.10). C'est sur cette base qu'un premier modèle du module a été établi initialement.

Les figure ci-dessous représentent les courbes $I=f(V)$, et $P=f(V)$, d'un panneau photovoltaïque dans des conditions typiques d'irradiation et de température :

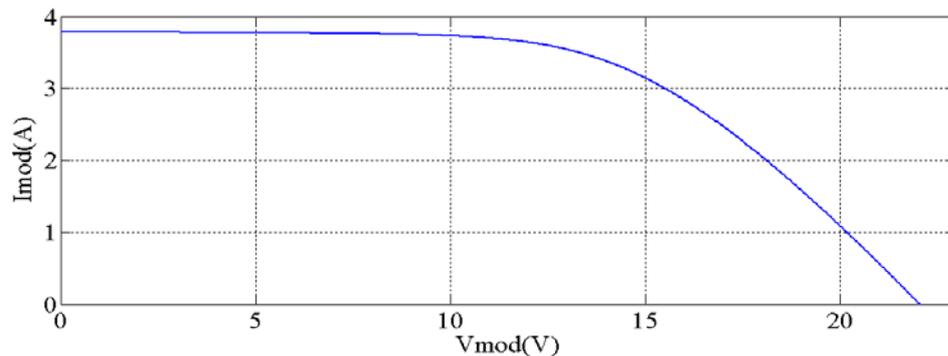


Figure. IV.9: Caractéristique $I=f(V)$ d'un module photovoltaïque.

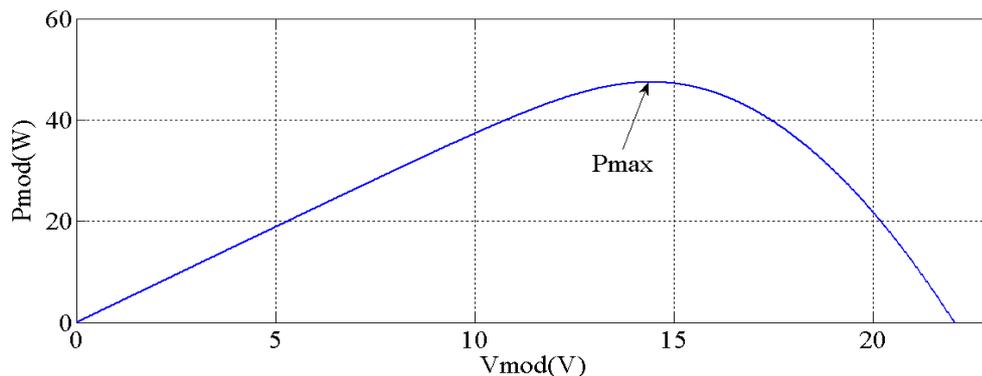


Figure .IV.10: Caractéristique $P=f(V)$ d'un module photovoltaïque.

IV.2.1. L'influence de la température et de l'éclairement sur un GPV :

La caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque peut, en outre varier en fonction de l'éclairement, la température, du vieillissement des cellules et les effets d'ombrage ou d'inhomogénéité de l'éclairement [27].

VI.2.1.1. Effet de l'éclairement sur le module photovoltaïque :

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.

De même, la figure IV.11 montre que la puissance optimale extractible d'un panneau photovoltaïque est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.

La figure suivante représente la caractéristique courant-tension pour différentes radiations incidentes pour une température de 25°C.

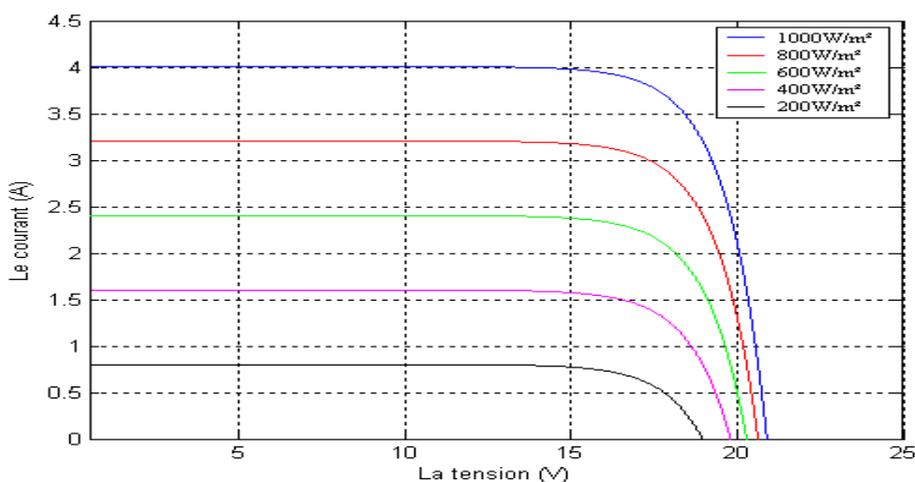


Figure.IV.11 : Caractéristiques courant-tension pour différentes radiations incidentes température constante 25°C

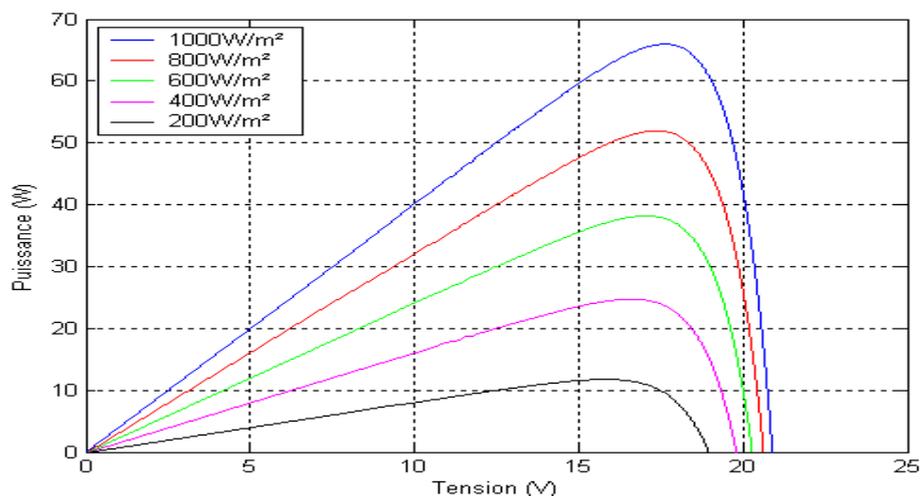


Figure.IV.12 : Caractéristiques puissance-Tension pour différentes radiations incidentes Température constante 25°C.



IV.2.1.2 .Effet de la température sur le module photovoltaïque :

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, comme le montre la figure IV.13 la puissance extractible diminue.

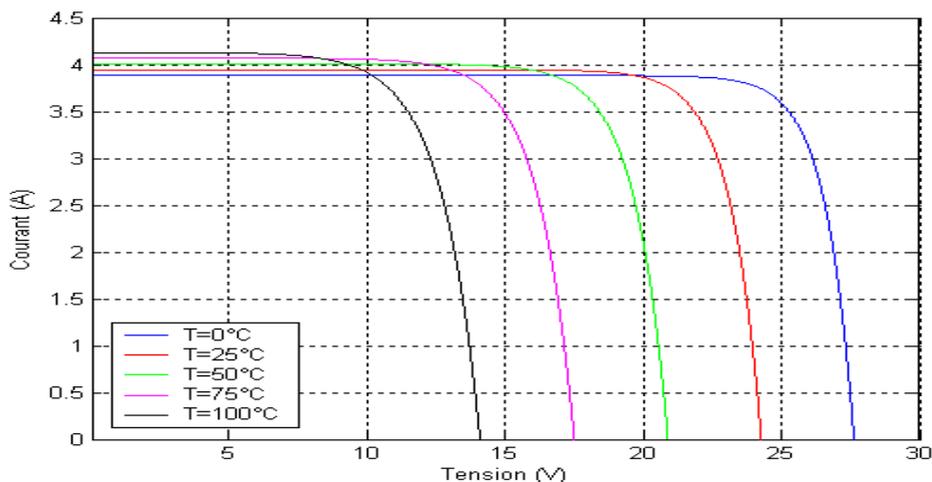


Figure.IV.13 : Caractéristique courant- tension pour différentes températures pour une radiation incidente de 1000W/m².

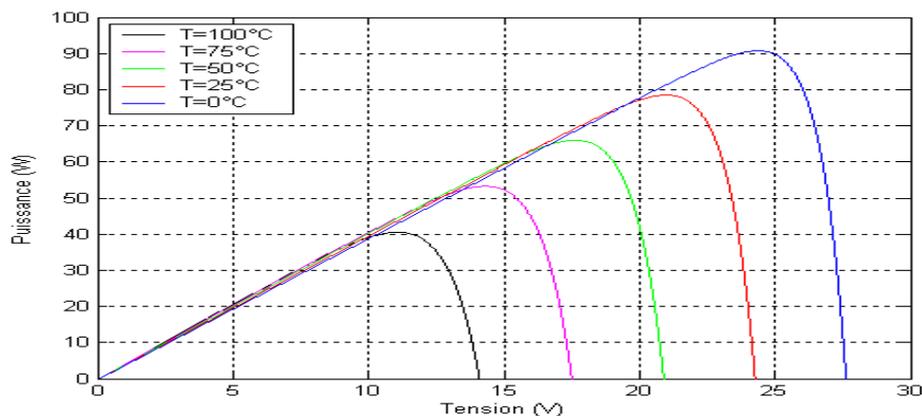


Figure. IV.14 : Caractéristiques puissance-Tension pour différentes températures pour une radiation incidente de 1000W/m².

IV.3.Modélisation d'un hacheur boost :

Un convertisseur boost ou parallèle, est une alimentation a découpage qui convertie une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur [6].

Ce montage permet de fournir une tension moyenne V_C a partir d'une source de tension continue $E < V_C$.

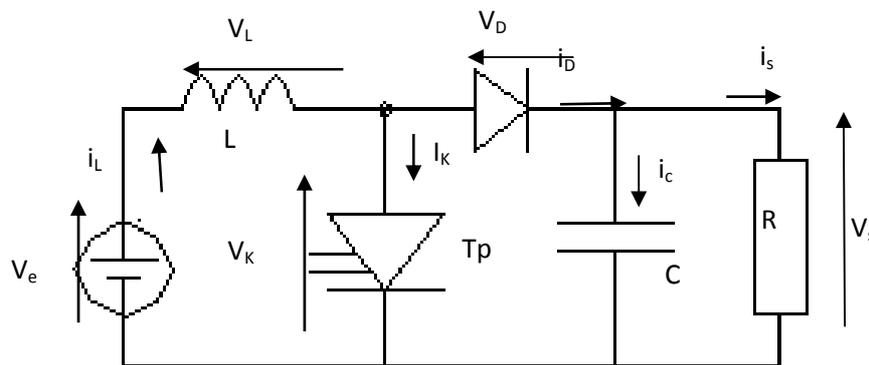


Figure.IV.15: Schéma de principe du hacheur parallèle (élevateur de tension)

VI-3-1 Etude d'un hacheur parallèle en conduction continue :

On distingue deux phases de fonctionnement :

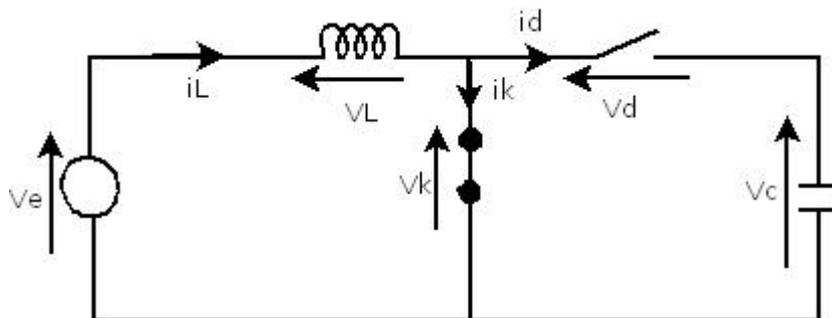
- Lorsque l'interrupteur du transistor K est fermé, la diode est polarise en inverse $V_d = -V_c$;

La charge est donc isolée de la source. La source fournie de l'énergie à l'inductance L.

- Lorsque l'interrupteur de transistor k est ouvert, étage de sortie (C+ charge) reçoit de l'énergie de la source et de l'inductance L.

Pour l'analyse en régime permanent, le condensateur de filtrage C à une valeur de capacité suffisamment élevée pour que l'on puisse considérer la tension disponible en sortie constante.

Pour $t \in [0 \text{ à } \alpha T]$ k conduit, d ouverte :



$$\begin{cases} id = ic = 0 \\ V_k = 0 \end{cases} \quad (\text{IV-12})$$

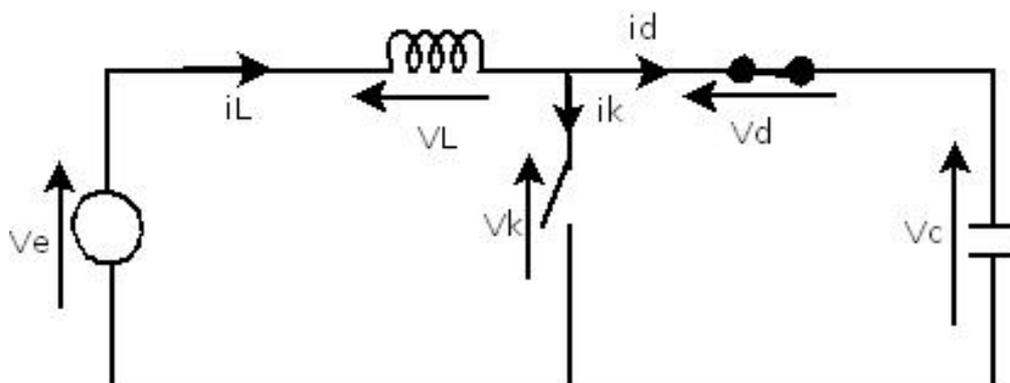
$$\begin{cases} V_d = V_k - V_c = -V_c \\ V_k = V_e - L \frac{di_L}{dt} = 0 \end{cases} \quad (\text{IV-13})$$

$$i_L = id + ik = ik \quad (\text{IV-14})$$

$$\text{Donc } i_L = ik = \frac{V_e}{L} t + I_1 \quad (\text{IV-15})$$

$$i_L = \frac{V_e}{L} \alpha T + I_1 \quad (\text{IV-16})$$

Pour $t \in [\alpha T \text{ à } T]$ d conduit, K ouvert :



$$\begin{cases} i_K = 0 \\ V_d = 0 \end{cases} \quad (\text{IV-17})$$

$$V_k = V_d + V_c = V_c \quad (\text{IV-18})$$

$$iL = id = ic \quad (\text{IV-19})$$

$$Vc = Ve - L \frac{diL}{dt} \quad (\text{IV-20})$$

$$iL = \frac{Ve - Vc}{L} t + I2 \quad (\text{IV-21})$$

Détermination de $I1$ et $I2$:

$$iL(0) = I0 \Rightarrow I1 = I0 \quad (\text{IV-22})$$

$$iL(\alpha T^-) = iL(\alpha T^+) \quad (\text{IV-23})$$

$$\Rightarrow \frac{Ve}{L} \alpha T + I0 = \frac{Ve - Vc}{L} \alpha T + I2 \quad (\text{IV-24})$$

$$I2 = I0 + \frac{Vc}{L} \alpha T \quad (\text{IV-25})$$

➤ **Chronogramme de la tension de sortie :**

$$Vk = \begin{cases} 0 & t \in [0, \alpha T] \\ Ve & t \in [\alpha T, T] \end{cases} \quad (\text{IV-26})$$

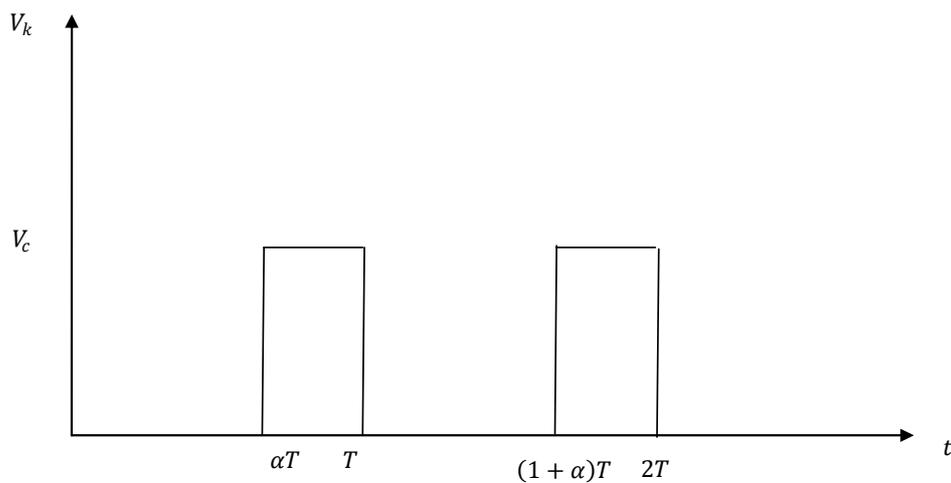


Figure.IV.16 : Allure de la tension aux bornes du thyristor.

$$V_{kmoy} = (1 - \alpha)V_c \quad (\text{IV-27})$$

$$V_{kmoy} = V_e \quad (\text{IV-28})$$

Car on a : $V_k = V_e - L \frac{di_L}{dt} \Rightarrow V_{kmoy} = V_e$ parce que la valeur moyenne de $L \frac{di_L}{dt} = 0$

$$V_c = \frac{V_e}{1-\alpha} \quad (\text{VI-29})$$

IV.3.2. Résultat de simulation

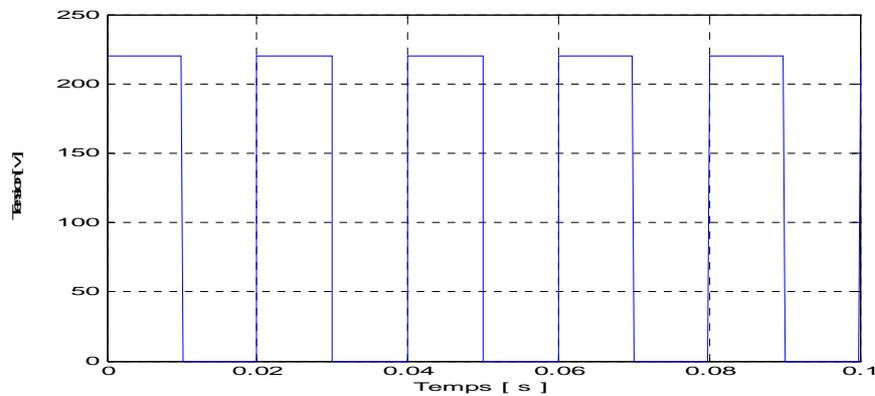


Figure.IV.17 : La tension à la sortie du hacheur.

IV.4. Modélisation de l'onduleur de tension :

La représentation schématique d'un onduleur de tension est donnée par la figure (IV-18) [48].

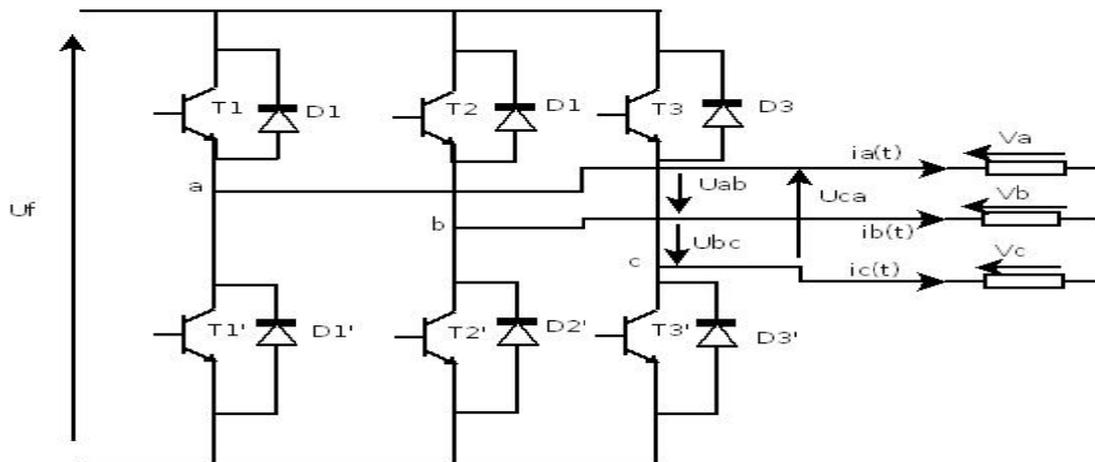


Figure. IV.18 : Schéma représentatif d'un onduleur de tension triphasé

V_a, V_b, V_c : les tensions simple délivrées d'un par l'onduleur.

U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} : les tensions composées par l'onduleur.

$$\begin{cases} U_{ab} = V_a - V_b \\ U_{bc} = V_b - V_c \\ U_{ca} = V_c - V_a \end{cases} \quad (IV.30)$$

Ou les tensions simples ont données par :

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{\sqrt{3}}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = \frac{1}{\sqrt{3}}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_c = \frac{1}{\sqrt{3}}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (IV.31)$$

Etant donné que chaque bras de l'onduleur est le résultat d'un transistor et d'une diode shuntée en antiparallèle, cela correspondrait à un composant bidirectionnel.

Le schéma simplifié d'un onduleur de tension commandé en tension peut être représenté comme suit : [48]

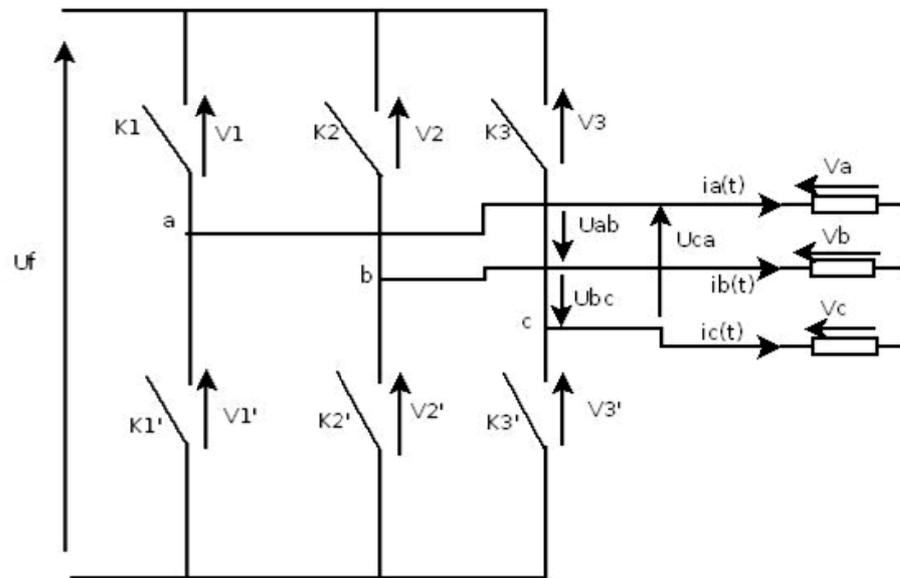


Figure. IV.19 : Schéma simplifié d'un onduleur de tension commandé en tension.

Soit F_i une fonction logique associée à l'interrupteur K_i définie comme suit :

$$F_i = \begin{cases} 1 & \text{si } K_i \text{ fermé} \\ 0 & \text{si } K_i \text{ ouvert} \end{cases}, \quad i=1, 2, 3$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Si } F_1=1 \Rightarrow V_1=0 \\ \text{Si } F_1=0 \Rightarrow V_1=U_f \end{array} \right\} \Rightarrow V_1 = (F_1 - 1) U_f$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Si } F_2=1 \Rightarrow V_2=0 \\ \text{Si } F_2=0 \Rightarrow V_2=U_f \end{array} \right\} \Rightarrow V_2 = (F_2 - 1) U_f$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Si } F_3=1 \Rightarrow V_3=0 \\ \text{Si } F_3=0 \Rightarrow V_3=U_f \end{array} \right\} \Rightarrow V_3 = (F_3 - 1) U_f$$

Nous avons :

$$U_{ab} = V_1 - V_2 \Rightarrow U_{ab} = (F_1 - F_2) U_f$$

$$U_{bc} = V_2 - V_3 \Rightarrow U_{bc} = (F_2 - F_3) U_f$$

$$U_{ca} = V_3 - V_1 \Rightarrow U_{ca} = (F_3 - F_1) U_f$$

Ce qui donne sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} = U_f \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (IV.32)$$

En considérant que (V_a, V_b, V_c) forment un système équilibré, nous avons :

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (IV.33)$$

Ce qui nous permet d'écrire :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} \quad (VI.34)$$

En remplaçant la formule (II.32) dans (II.34), on aura :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_f \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (IV.35)$$

➤ **Signaux de commandes de l'onduleur :**

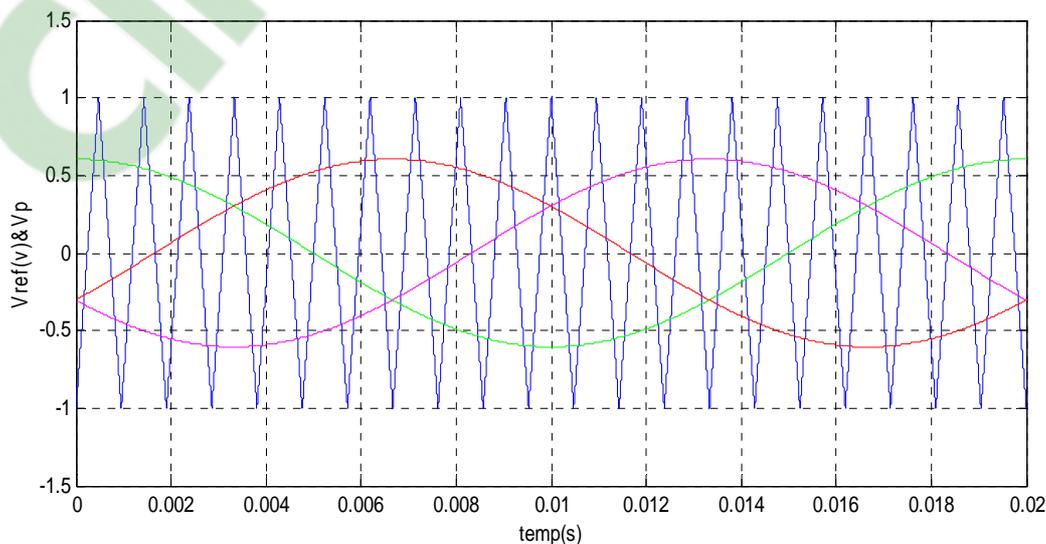


Figure.IV.20 : Tracé des signaux de commandes des interrupteurs constituant l'onduleur.

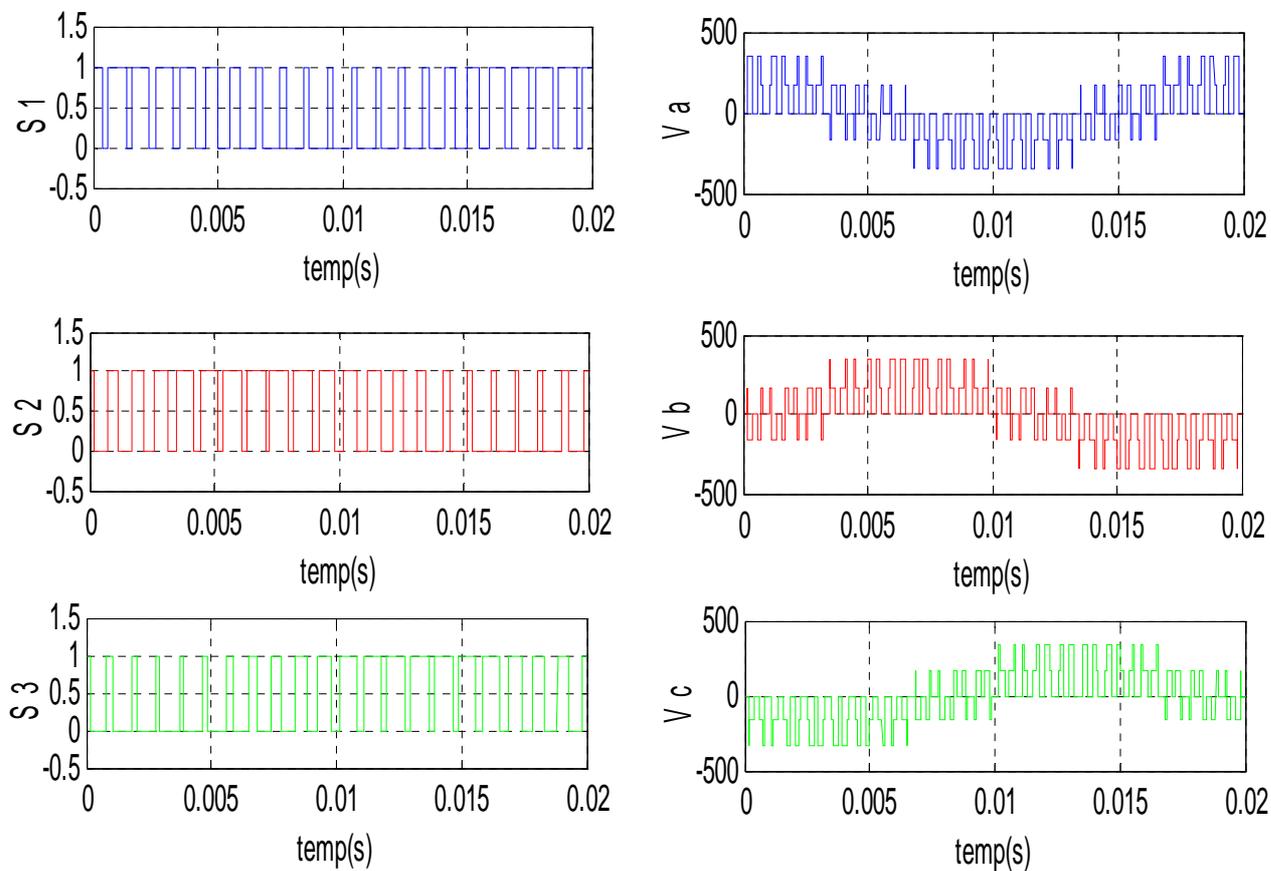


Figure .IV.21 : Tension à la sortie de l'onduleur

Chapitre IV Modélisation et simulation du système photovoltaïque autonome

IV.5. Modélisation de la batterie de stockage :

Vue la grande diversité de type d'éléments de batteries ainsi que le nombre très varié de paramètres qui interviennent, une représentation très empirique du comportement de la batterie peut être établie. Le système de stockage utilisé dans une installation photovoltaïque est une batterie d'accumulateur au plomb. Jusqu'à maintenant, il existe plusieurs modèles de la charge de la batterie qui ont été proposés.

Dans cette étude, nous avons utilisé un modèle qui a été utilisé par (*Bogdan et Salameh, 1996*) qui permet de calculer la capacité de stockage en fonction de la puissance produite par le générateur photovoltaïque et la charge demandée.

a) Modèle de la charge de la batterie :

Quand la puissance du générateur PV est plus grande que la charge, les batteries sont à l'état de charge, la capacité des batteries au temps t peut être décrite par [42] :

$$C_{Bat}(t) = C_{Bat}(t-1) \cdot (1 - \sigma) + (P_{pv}(t) - P_L(t) / \eta_{ond}) \cdot \eta_{Bat} \quad (\text{IV.35})$$

$C_{Bat}(t)$ et $C_{Bat}(t-1)$ sont les quantités de la charge et la décharge des batteries au temps (t) et $(t-1)$ respectivement, σ est le taux horaire de la charge spontanée, P_{pv} est la puissance du générateur PV, P_L est la charge demandée au temps t , η_{ond} et η_{Bat} sont le rendement de l'onduleur et de la batterie successivement

Pendant la charge de la batterie, le rendement est de 0.65–0.85 selon le (courant chargé), par contre pendant le processus de décharge, le rendement de la batterie est supposé égal à 1

b) Modèle de la décharge de la batterie :

Quand la demande de la charge est plus grande que la puissance produite, la capacité des batteries au temps t peut être exprimée comme suit [42] :

$$C_{Bat}(t) = C_{Bat}(t-1) \cdot (1-\sigma) + (P_L(t) / \eta_{ond} + P_{pv}(t)) \quad \text{(IV.36)}$$

A tout moment, la quantité de charge des batteries est sujette aux contraintes suivantes :

$$C_{Bat\ min} \leq C_{Bat}(t) \leq C_{Bat\ max}$$

Ici, la capacité de la batterie maximale prend la valeur de la capacité nominale de la batterie ($C_{Bat\ max} = C_{Bat\ min}$), et la capacité minimale est déterminée par la profondeur de la charge (DOD) [38]:

$$C_{Bat\ min} = DOD \cdot C_{Bat\ .N}$$

La valeur maximale de l'état de charge (SOC) est égale à 1, et le minimum est déterminé par le maximum de profondeur de décharge, $SOC_{min} = 1 - DOD$

Selon les caractéristiques des fabricants, la durée de vie des batteries peut être prolongée au maximum si DOD prend les valeurs de 30-50% [38].

La capacité de stockage est une fonction de la charge demandée et de son autonomie. Elle peut être estimée par la relation suivante:

$$C_{Bat} = \frac{E_L \cdot N_a}{\eta_{Bat} \cdot F_{dech} \cdot DOD} [Wh] \quad \text{(IV.37)}$$

$$C_{Bat} [Ah] = \frac{C_{Bat} [Wh]}{V_b} \quad \text{(IV.38)}$$

C_{Bat} : La capacité de stockage de la batterie.

N_a : Le nombre de jours d'autonomie.

V_b : La tension du système.

DOD : Le profondeur de décharge.

c) La tension de la batterie :

Le modèle suivant, décrit la relation entre le voltage, courant et l'état de charge. Ce modèle basé sur le schéma électrique de la figure (II-7) [43].

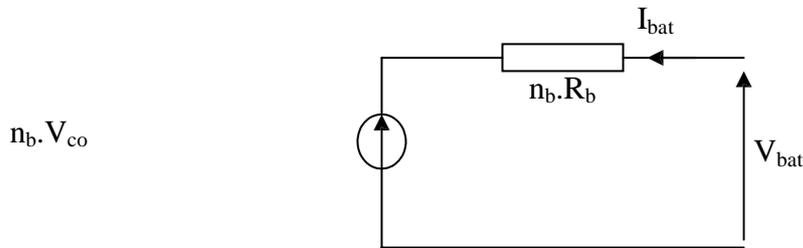


Figure (IV.22) : Schéma électrique de batterie.

Pour n batteries en séries, nous pouvons écrire l'équation [43]:

$$V_{bat}(t) = n_b \cdot V_{co}(t) + n_b \cdot I_{bat}(t) \cdot R_{bat}(t) \quad (\text{IV.39})$$

Où $V_{bat}(t)$ est la tension de circuit ouvert au temps t, $R_{bat}(t)$ est la résistance interne de batterie ; et V_{co} la tension de circuit ouvert est exprimée comme un logarithme de la fonction de l'état de charge

$$V_{co}(t) = VF + b \cdot \log(SOC(t)) . \quad (\text{IV.40})$$

Où VF est la force électromotrice ; b est une constante empirique.

La variation de V_{co} en fonction de l'état de charge (SOC) est représentée par la figure suivante :

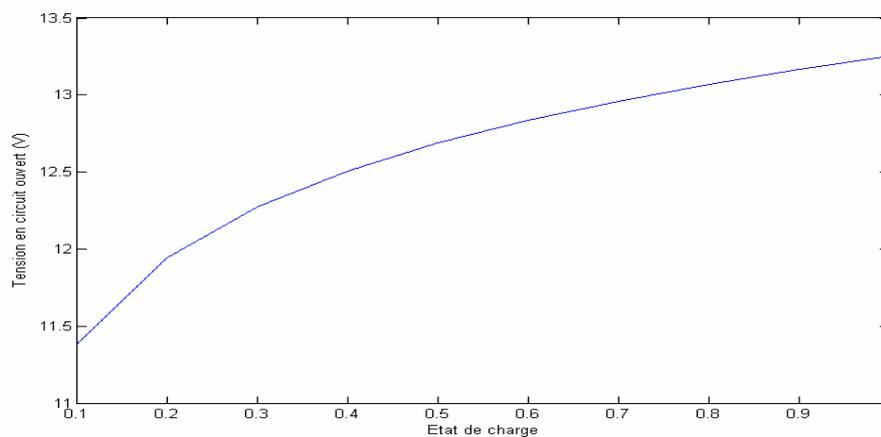


Figure (IV.23) : Variation de tension en mode de charge en fonction de l'état de charge.

Chapitre IV Modélisation et simulation du système photovoltaïque autonome

La variation de la résistance interne d'une batterie, $R_{bat}(t)$, est principalement due à deux composants, à savoir, la résistance de l'électrode, $R_{electrode}$, et la résistance de l'électrolyte

$$R_{bat}(t) = R_{electrode} + R_{electrolyte}$$

La variation de $R_{electrode}$ et $R_{electrolyte}$ en fonction de l'état de charge SOC peut être exprimée

$$\text{par : } R_{electrode} = r_1 + r_2 \cdot (SOC(t)) \text{ Et } R_{electrolyte} = [r_3 - r_4 \cdot (SOC(t))]^{-1} \quad (\text{IV.41})$$

Où r_1, r_2, r_3 , et r_4 sont des constantes empiriques, ces constantes ont des valeurs différentes pour le mode de charge et décharge. Pour une batterie de plomb acide, les paramètres sont regroupés dans le tableau suivant [43]:

Paramètres	Mode de charge	Mode de décharge
VF	13.250 V	12.662 V
b	0.810	0.724
r_1	0.062 Ohms	0.055 Ohms
r_2	0.046 Ohms	-0.010 Ohms
r_3	⁻¹ 95.638 Ohms	4.270 Ohms ⁻¹
r_4	⁻¹ 52.671 Ohms	-100.730 Ohms ⁻¹

Tableau (IV-1) : Caractéristique de batterie plomb acide.

d) Courant de batterie :

Quand la puissance du générateur PV est plus grande que la charge, les batteries sont à l'état de charge, le courant de charge des batteries au temps t peut être décrit par [44] :

$$I_{bat} = \frac{P_{pv}(t)}{V_{bat}(t)} - \frac{E_L(t)/\eta_{ond}}{V_{bat}(t)} \quad (\text{IV.42})$$

Quand la puissance du générateur PV ne peut pas répondre à la demande de la charge, le courant de décharge des batteries est [44] :

$$I_{bat} = \frac{E_L(t)/\eta_{ond}}{V_{bat}(t)} - \frac{P_{pv}}{V_{bat}(t)} \quad (\text{IV.43})$$

e) Rendement de la Batterie :

Le rendement de la batterie se calcule par la relation suivante

$$\eta_{Bat} = \frac{P_{fourni}}{P_{incid}} \quad (\text{IV.44})$$

en pratique, le rendement est considéré constant égal à 85%, la tension nominale est de 2V et la capacité de l'ordre de 100A/h. donc la puissance fournie par une batterie peut s'écrire comme suit :

$$P_{fourni} = \eta_{bat} \cdot P_{incid} \quad (P_{incid} : \text{Puissance du générateur}). \quad (\text{IV.45})$$

IV.7. Conclusion :

La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet a été élaborée à partir de modèles de la littérature (champ PV, convertisseurs, stockage batteries); cette modélisation est une étape essentielle qui permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres constitutants.

L'implémentation de ces modèles dans un environnement de simulation adapté nous a permis d'étudier le comportement des composants en fonction de certains paramètres.

Conclusion générale

Conclusion générale

Aujourd'hui, l'énergie photovoltaïque devient progressivement une source d'énergie à part entière, de plus en plus sollicitée pour produire de l'électricité allant du domestique à des grandes centrales connectées au réseau.

Cette étude s'est focalisée sur la conversion photovoltaïque pour une application autonome ou la demande en énergie électrique doit être munie d'un système de stockage dont le choix de la technologie se pose généralement sur des batteries au Plomb. Nous avons pu montrer que ce système est composé d'un convertisseur DC/DC qui fournit une tension continue réglable, ainsi nous avons envisagé les différents modes de poursuite du PPM adoptés initialement et les évolutions successives de la commande MPPT.

Parallèlement à ce travail nous étions intéressés par le transfert DC/AC qui est assuré par la commande de l'onduleur. La technique de commande par MLI est sans doute la plus favorisée puisque elle répond aux critères de rapidité et simplicité.

Nous avons pu montrer par simulation que les différents composants de ce système de conversion d'énergie se comportent comme prévu dans la littérature ; de plus nous avons pu étudier l'influence de quelques paramètres (Température, ensoleillement) sur le comportement de ce système.

Bibliographie et Annexe

- [1] .Atlas de poche. Troisième édition publiée en 1970 par le livre de poche .Librairie Générale Française.
- [2].Benoit brousse, « Réalisation et caractérisation des cellules PV organiques obtenues par dépôt physique » Thèse de doctorat (université de limoges).
- [3].Anne Labouret, Michel Viloz,« Energie solaire photovoltaïque, le manuel du professionnel », édition Dunod, 2003.
- [4].from herz, F.padingeer, D.Gebeychu, C.barbec, J.chummelen, Saricifci, « Comparison of photovoltaic devices containing various blends of polymeraud fullerenc derivatives »solar energy materiel and solar cells,vol 63.Iss.I,pp.61-68.2000.
- [5].Nichiporuk Oleksiy, « Simulation, fabrication et analyse des cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités » Thèse de doctorat. Institut national des sciences appliquées de Lyon Génie Electrique. 03 mai 2005.
- [6] .WWW.wikipedia.com
- [7]. P.Rueda, E.fernandez ,«Multi jonction Ga/As solar cell capacitance and its impact upon solar Arry regulators » 6th european space power conference, porto, Portugal 6-10 May 2002
- [8]. M.Angel Cid paster, « Conception et réalisation du module photovoltaïque électronique » Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes ».Thèse de doctorat de l'Institut National des sciences appliquées de Toulouse, septembre 2006.
- [9].Florence Mattera, Direction de la recherche technologique CEA centre de Cadarache CLEFS CEA –N° 50/51-Hiver 2004-2005, «le stockage de l'électricité PV».
- [10].Adouane Mabrouk, « Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique ». Mémoire de magister .Ecole Nationale Polytechnique .Année 2008.
- [11]. D-L.King,s .Igari ,W;Watra , « Solar efficiency tables » version 19 ,progress in photovoltaic research and applications space power conference,Porto,Portugal,6-10 May 2002.
- [12] Volker Quosching, Earthscan,london.Sterling,VA ,« Understanding renewable energy systems »
- [13] Makhlof Messaoud ,« Etude et optimisation d'un module de conversion d'énergie photovoltaïque application pompage» Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique. Université Mentouri Constantine .2006.
- [14] Dariga Meekhun, « Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteur dans les fils

autonomes pour l'application aéronautique ».Thèse de doctorat. Université de Toulouse .Génie Electrique.

[15].Ludovic Protin et stéphan astier, «Convertisseurs photovoltaïques » Technique de l'Ingénieur, Traité Génie Electrique .Centre Français .Doc .D 3.360.Edité par système solaire .1996.

[16].O.Amrani, D .Rekioua, «Etude et identification et identification des différents modèles électriques photovoltaïques » Dept d'électrotechnique université de Bejaia.

[17].Abbassen Iyes,« Etude de la connection au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque» mémoire de magister UMMTO .Année 2011

[18].Journal des sciences, vol 9, N°2.2009, pg 45-55, «Modélisation et simulation sous matlab /simulinc de la chaine d'alimentation d'une station relais de télécommunication en énergie solaire dans une zone isolé du réseau électrique»

[19].J.David Irwin, Muhammad H.Rashid, « power electronic Hund book »University of west florida Joint Program and Computer Engineering, Copyright #2001 by ACADEMIC PRESS.

[20].C. Hua and C. Shen, «Study of maximum Power Point Tracking Techniques and Control of DC/DC Converters for Photovoltaic Power Systems», IEEE 29th Annual Power Electronics Specialists Conference, p.86-93, 1998.

[21].R.Moraes, «Description and Modeling of the Individual Components of a Photovoltaic Pumping System», <http://docserver.bis.unidenburg.de/publikationen/dissertation/2000/Morana00/pdf/kap03.pdf>, retrieved on 10/10/02.

[22].Toshihiko Noguchi, Shigenori Togashi, Ryo Nakamoto, «Short-Current Pulse-Based Maximum-Power-Point Tracking Method for Multiple Photovoltaic-and-Converter Module System», IEEE Transactions on Industrial Electronics. vol. 49, p.217-223, 2002.

[23].W. Kleinkauf, F. Raptis, O. Haas ,« Electrification with Renewable Energies, Hybrid Plant Technology for Decentrali- zed, Grid-Compatible Power Supply », Excerpt from Themes 96/97 Solar Energy Association, Germany.

[24] SANDIA REPORT,«Status and Needs of Power Electronics for Photovoltaic Inverters», SAND2002-1535, Unlimited Release, Printed, June 2002.

[25] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo, C. Nikita, «Etat de l'art des aérogénérateurs », L'électronique de puissance, vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables, Ed. Novelect-ecrin, pp. 97-154, 2002.

[26]YUN TIAN TAN, « Impact on the power system with large penetration of photovoltaic generator ». Thèse de doctorat, the university of Manchester institute of science and technology, february 2004.

- [27].T.Tafticht, K.Agbossou, « Development of a MPPT Method for Photovoltaic Systems », Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Volume 2, 2-5 May 2004
Page(s):1123 - 1126 Vol 2.
- [28].Cédric Cabal,«optimisation énergétique d'analyse de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque», thèse préparée au laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes CNRS en vue de l'obtention de doctorat de l'université de Toulouse.Année 15 Décembre 2008
- [29].F.Bouchtouche Cherfa,«Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution BT ».Mémoire de magister de l'Ecole National Polytechnique ,2004.
- [30] Luc Chancelier et Eric Laurent ,« L'électricité solaire »livre GRET, ministère de la coopération.
- [31].WWW.enerpoint .fr ; enerpoint your solar link .
- [32] Drareni. Rfika ,« Commande d'un aérogénérateur à base d'une machine asynchrone à cage connectée au réseau à travers un convertisseur AC-DC-AC», projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique , Ecole Nationale Polytechnique . 2009.
- [33].M.A .E.Alali ,« Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension».Automatisation des systèmes de puissances électriques, thèse de doctorat, université de Louis pasteur ,2002 .
- [34].E .Gholipour Shahraki, « Apport de l'UPEC à l'amélioration de la de la stabilité transitoire des réseaux électriques», thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré , Nancy-I ,octobre 2003 .
- [35].M .Boudjaimi, « Commande d'un onduleur par des approches basées sur des réseaux de neurones artificiels», mémoire de magistère, UMMTO ,2009.
- [36.]J .X U «Filtrage active shunt des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité ».Thèse de doctorat de L'INPL, Nancy, Janvier 1994.
- [37].N. Achaïbou , « Introduction à l'Etude du Système de Stockage dans un Système Photovoltaïque»,CDER,1997.
- [38].M.Chikh, « Étude analytique conceptuelle des systèmes PV de puissance adopté aux sites isolés de L'Algérie », thèse de magister, CDER, 1994.
- [39].MAKHEB.I.C, TOUMERT.M, « Etude et réalisation d'un régulateur analogique et numérique de la charge/décharge d'une batterie associée à un système photovoltaïque». Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en GE, Ecole National Polytechnique ,2008.
- [40].Julien LABBÉ, «L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité

pour systèmes photovoltaïques isolés », Ecole des Mines de Paris, 2006.

[41].Z.Bachi, S.Elfodil, « Conception et réalisation d'un système de régulation de charge semi statique a sortie fixe pour installation photovoltaïque », université de Blida

[42].The Bogdan, S.B., Salameh, Z.M., 1996,« Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system ». IEEE Transactions on Energy Conversion 11 (2), 367–375.

[43].Chaurey,C andS Deambi. 1992,« Battery storage Power systems: an overview» Renewable Energy 2 (3):227-235.

[44].X.Yong,LU,J.Burnett, « Weather data and probability analysis of hibrid PVwind power generation systems in Hong Kong ». Renewable Energy 28 (2003) :1813-1824.

[45].AZAZ,« propriétés Electriques des Composants Electroniques Minéraux et Organiques, Conception et Modélisation d'une Chaîne Photovoltaïque pour une Meilleure Exploitation de l'Energie Solaire», Doctorat en Sciences , Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 2006.

[46]. D.Thévenard, and M.Ross, « validation and Verification of Component Models and System Models for the PV », CETC-internal report 2003-035, Canada,2003

[47].D.Turcotte,M.Ross and F.Sheriff. « Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools» PV Horizon, Canada, 2001.

[48].M^{elle}H.Alleg, M^{elle}N.Chaouche , « Identification des paramètres et commande vectorielle d'une machine asynchrone ».Diplôme d'ingénieur en électrotechnique, 2005.