

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRTE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU



Faculté Génie Electrique et Informatique  
Département d'Electrotechnique  
**Mémoire de fin d'études**

En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en  
Electrotechnique

## Thème

Diagnostic des structures assurant le  
transfert d'énergie photovoltaïque  
avec une meilleure efficacité  
énergétique

**Dirigé par :**

**Mr : Lh. ARAB**

**Réalisé par :**

**M<sup>elle</sup> : AISSAOUI NASSIMA**

**M<sup>elle</sup> : BOUGHRIS KARIMA**

**M<sup>elle</sup> : BENNABI NASSERA**

**Promotion 2010-2011**

# REMERCIEMENTS

Nous rendons grâce à ALLAH et exprimons nos remerciements les plus sincères à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidés, soutenus, et encouragés, bref, tous ceux qui ont cru en nous dans la réalisation de ce travail.

Nous tenons à remercier notre promoteur Monsieur Lh. ARAB pour avoir dirigé notre travail et pour ses conseils précieux.

Nous profitons de cette occasion pour remercier nos enseignants que nous avons eu la chance de rencontrer durant notre parcours, nous n'oublions surtout pas nos camarades de la promotion 2010-2011

Nous remercions également Monsieur le président et Messieurs les membres de jury qui ont voulu accepter d'apporter leurs réflexions et leurs critiques le jour de notre soutenance.

# DEDICACE

À...

La mémoire de mon très cher père que son âme repose en paix.

Ma chère mère ma source d'encouragement et de réussite ; pour son aide et son soutien.

Mes sœurs : YAMINA, MALIKA et NADIA et son mari RABAH pour leurs soutiens et leurs encouragements que vous trouviez en ce travail le fruit d'un amour fraternel.

Mon très cher frère : TAHAR que je ne cesserai jamais de remercier pour tous ce qu'il m'a donné et mon cousin LOUNES.

Son oublier mes amies OUIZA, AMEL pour leurs soutiens.

A mes chères binômes KARIMA et NASSIMA et leurs familles.

Tous ceux à toutes celles dont les acronymes n'apparaissent pas sur cette page, ils sont nombreux qu'ils demeurent convaincus, que nous les avons point oublié et qu'ils soient assurés de notre profonde gratitude

*BENNABI NASSERA*

# DEDICACE

*Je dédie ce travail à :*

✚ *Mes parent qui m'ont toujours aidé, que dieu les garde.*

✚ *La mémoire de ma chère grand-mère Ounissa*

✚ *Mon mari Zahir, et mon adorable fils Yanni.*

✚ *Mes chères sœurs : Anissa et Ticem.*

✚ *Mes chers frères : Hillal, Abderrahmène, et Nadjib.*

✚ *Ma belle famille Khelifi.*

✚ *Tout mes cousins et cousines.*

✚ *Mes binômes, Nassera et karima.*

✚ *Tous mes amis(es), sans citer les noms pour ne pas oublier d'autres.*

*Aissaoui Nassima*

# DEDICACE

À...

*La mémoire de ma très chère grand-mère que son âme repose en paix.*

*Mes chers parents : ma source d'encouragement et de réussite ; pour leurs aides et leurs soutiens.*

*Mes très chers frères : AHMED, SAID, ALI, MOUHAMED, LYES et ABDARRAHMANE.*

*Mes chères sœurs : OUERDIA et OUIZA.*

*Ma chère nièce MANISSA que j'aime beaucoup.*

*Mon prochain neveu : YANIS.*

*Mon cher mari ABD EL WAHAB que je ne cesserai jamais de remercier pour tous ce qu'il ma donné.*

*Toute ma belle famille BECHIRI.*

*Mes chers amis(es) : LYNDA, GHANIA, HAKIM et MENAD sans oublier les autres.*

*Tous mes proches surtout ma cousine MERIEM.*

*Mes chers binômes NASSIMA et NASSERA, ainsi que toutes leurs familles.*

**BOUGHRISS KARIMA**

# Sommaire

Introduction général .....	1
----------------------------	---

## **Chapitre I : Structure globale de transfert d'énergie photovoltaïque**

I-1) Introduction .....	4
I-2) Rayonnement solaire .....	4
I-2-1) Spectre solaire.....	5
I-2-2) Durée d'insolation .....	6
I-3) Différentes technologies solaires .....	6
I-3-1) Solaire à concentration thermodynamique .....	6
I-3-2) Solaire thermique .....	7
I-3-3) Solaire Photovoltaïque .....	7
I-4) Structure globale d'un système photovoltaïque .....	7
I-4-1) Les systèmes raccordés au réseau .....	7
- Le réseau interconnecté .....	8
- Les mini-réseaux ou réseaux isolés .....	8
I-4-2) Une installation photovoltaïque autonome .....	8
I-4-2-1) Panneaux solaires .....	9
1. La cellule photovoltaïque.....	9
2. Modules photovoltaïques .....	10
I-4-2-2) Système de stockage .....	10
I-4-2-3) Système de régulation .....	11
I-4-2-4) Système de conversion .....	12
1. Le convertisseur continu –continu.....	12
2. Le convertisseur continu- alternatif.....	12
3. Les caractéristiques de l'onduleur .....	12
I-4-2-5) La Charge.....	14
I-5) Montage et installation d'un système photovoltaïque : .....	14
I-6) Câblage souterrain .....	15
I-7) Durée de vie d'un système photovoltaïque : .....	16

I-8) Secteurs d'applications .....	16
I-8-1) Domaine spatial .....	16
I-8-2) Habitation isolée .....	17
I-8-3) Centrale de puissance .....	17
I-8-4) Résidence urbaine .....	17
I-9) Conclusion.....	18

## **Chapitre II : Etude des panneaux solaires**

II-1) Introduction.....	19
II-2) Historique des cellules solaires .....	19
II-3) Les technologies .....	20
II-3-1) Le silicium cristallin .....	20
II-3-2) Les couches minces .....	21
II-3-3) Cellules organiques et plastiques .....	22
II-4) Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	22
• Dopage n .....	23
• Dopage p.....	23
II-5) Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque : .....	23
II-5-1) Générateur photovoltaïque idéal.....	24
II-5-2) Générateur photovoltaïque réel .....	24
II-6) caractéristique d'une cellule photovoltaïque : .....	26
II-6-1) La courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque.....	26
• Tension de circuit ouvert $V_{CO}$ (pour $I_{CO} = 0$ ).....	27
• Courant de court-circuit $I_{CC}$ (pour $V_{CC} = 0$ ) .....	27
II-6-2) Puissance caractéristique d'une cellule photovoltaïque.....	28
II-6-2-1) Puissance maximale.....	28
II-6-2-2) Puissance crête d'une cellule PV.....	28
II-6-2-3) Facteur de qualité.....	29
II-7) Influence des différents paramètres sur les caractéristiques d'une cellule solaire : .....	29
II-7-1) Influence de l'éclairement .....	29
II-7-2) Influence de la température .....	30



III-3-2) Types de regulateurs .....	47
III-3-2-1) Régulation de décharge .....	47
III-3-2-2) Régulation de la charge .....	47
a. Régulateurs Série.....	48
b. Regulateurs Shunt .....	48
c. Régulateur PWM (pulse with modulation) .....	48
d. Régulateurs MPPT .....	48
III-4) Conclusion .....	49
<b><u>Chapitre IV : Etude du système de conversion</u></b>	
IV-1) Introduction .....	50
IV-2) Convertisseurs .....	50
IV-2-1) Etude des Hacheurs .....	51
IV-2-1-1) Hacheur série .....	51
1. Principe de fonctionnement .....	51
2. Equation régissant le circuit .....	51
3. Avantages et inconvénients du hacheur série.....	52
IV-2-1-2) Hacheur parallèle .....	53
1. Principe de fonctionnement.....	54
2. Equation régissant le circuit .....	54
3. Avantages et inconvénients du convertisseur « ost » .....	54
IV-2-1-3) Hacheur Buck-Boost .....	55
IV-2-2) Etude des onduleurs .....	56
IV-2-2-1) Concept .....	56
a) Onduleur autonome .....	56
b) Onduleurs pour le réseau .....	56
IV-2-2-2) Raccordement de générateurs photovoltaïques au réseau basse tension.....	57
IV-2-2-3) Etude d'un onduleur triphasé .....	58
IV-2-2-3-1) Paramètre de performance de l'onduleur .....	59
a. Facteur de la n <sup>ième</sup> harmonique $HF_n$ .....	59
b. Facteur de distorsion DF .....	59
c. Distorsion harmonique totale THD .....	60

d. Harmonique du plus bas ordre LOH .....	60
IV-2-2-3-1) Différents types de commande des onduleurs .....	60
1. Commande en pleine onde .....	60
2. La commande MLI .....	61
IV-3) Topologies de champs PV .....	62
IV-3-1) Convertisseur raccordés au réseau .....	62
IV-3-1-1) Onduleur central.....	62
IV-3-1-2) Onduleur string ‘rangée’.....	63
IV-3-1-3) Hacheur modulaire parallèle .....	64
IV-3-1-4) Hacheur modulaire série .....	65
IV-3-2) Convecteur autonome .....	65
IV-3-1-1) Onduleur à onde sinusoïdale- chargeur .....	65
IV-3-1-1) Onduleur à onde carrée .....	66
IV-3-1-1) Onduleur à onde pseudo-sinusoïdale .....	66
IV-4) Les filtres passifs .....	66
IV-4-1) Définition .....	66
IV-4-2) Fonction de transfert d’un filtre .....	66
IV-4-3) La fréquence de coupure .....	67
IV-4-3) Les types de filtres .....	67
IV-5) Conclusion .....	68

## **Chapitre V : Méthodes de recherche de point de puissance maximale**

V-1) Introduction .....	69
V-2) Connexion directe entre la source et la charge .....	69
V-3) Définition de l’étage d’adaptation entre une source et une charge .....	71
V-4) Principe de la recherche du point de puissance maximal .....	72
V-5) Les différents types d’MPPT solaires photovoltaïques .....	74
V-5-1) Les commandes MPPT destinées aux applications spatiales .....	74
V-5-1) Structure de la commande MPPT analogique .....	75
V-5-1) Les Commandes MPPT numériques performantes .....	75
V-6) Les méthodes de recherche des points du maximum de puissance (MPPT) .....	75

V-6-1) La méthode Perturb & Observe (P&O) .....	75
V-6-2) Incrément de conductance .....	77
V-6-3) Principe de commande Hill-Climbing .....	80
V-7) Performance d'un système photovoltaïque avec MPPT.....	81
V-8) Présentation des PI .....	82
V-8-1) Types de régulateurs .....	83
V-8-1-1) Régulateur proportionnel P .....	83
V-8-1-2) Régulateur intégral pur I .....	83
V-8-1-3) Régulateur dérivateur pur D .....	83
V-8-1-4) Régulateur proportionnel intégral PI .....	84
V-8-1-5) Régulateur proportionnel dérivé PD .....	84
V-8-1-6) Correcteur proportionnel dérivé intégral PID .....	84
V-9) Conclusion .....	84

## **Chapitre VI : Simulation d'un système photovoltaïque**

VI-1) Introduction .....	85
VI.2) caractéristiques et influence des conditions métrologique sur un GPV.....	85
VI-2-1) Modélisation et caractéristiques du générateur photovoltaïque.....	85
VI-2-2) Paramètres influençant sur le rendement de la chaine globale de transfert .....	90
VI-2-2-1) Influence de l'éclairement.....	90
VI-2-2-1) Influence de la température.....	91
VI-3) Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque autonome.....	93
VI-3-1) Modélisation d'un hacheur boost.....	94
VI-3-2) Schéma de simulation du GPV avec le hacheur.....	96
VI-4) Simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau.....	97
VI-4-1) Modélisation d'un onduleur triphasé.....	98
VI-4-2) Modélisation de l'interface réseau.....	99
VI-4-3) Simulation d'un onduleur commandé par MLI connecté au réseau.....	100
VI-5) Optimisation du transfert d'énergie.....	103
VI-5-1) Méthodes de recherche du PPM.....	103
VI-5-1-1) Méthode P&O.....	103

VI-5-1-2) Méthode Incrément de conductance.....	106
VI-6) conclusion.....	106
Conclusion générale.....	108

# Liste des figures

---

Figure I.1: Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil .....	5
Figure I.2 : Spectre solaire.....	6
Figure I.3 : Schéma général d'un système photovoltaïque.....	9
Figure I.4 : Cellule photovoltaïque (Monocristalline).....	9
Figure I.5 : Module photovoltaïque.....	10
Figure I-6 : système suiveur.....	14
Figure I-7 : Système fixe.....	15
Figure II.1: Evolution de la production mondiale des différentes technologies de cellules PV.	
Figure II.2 : Cellules monocristalline et multi-cristallin.....	21
Figure II.3 : Modules utilisant le Sia (Silicium amorphe).....	22
Figure II.4 : Cellule PV organique.....	22
Figure II.5 : Dopage de type n.....	23
Figure II.6 : Dopage de type p.....	24
Figure II.7 : Schéma de fonctionnent d'une cellule photovoltaïque.....	24
Figure II.8 : Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque idéal.....	25
Figure II.9 : Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque réel.....	26
Figure II.10 : Caractéristique courant - tension $I(V)$ .....	28
Figure II.11 : Notion de facteur de forme pour une cellule solaire.....	29
Figure II .12 : Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule solaire en fonction de l'éclairement	
Figure II.13 Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule solaire en fonction de la température	
Figure II.14 : Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule solaire en fonction de la résistance série.....	32
Figure II.15 : Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule solaire en fonction de la résistance parallèle.....	32
Figure II.16 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de $n_s$ cellules en série.....	34
Figure II.17 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de $n_p$ cellules en parallèle.....	34
Figure (II.18) : Schéma de connexion des cellules solaires en série et parallèle.....	35
Figure II.19 : Schéma d'un module solaire avec protection.....	35
Figure II.20 : Effet de la diode by-pass sur la caractéristique $I(V)$ d'un générateur.....	36
Figure III-1 : Principe d'un accumulateur électrochimique.....	40
Figure III.2 : Construction d'une batterie monobloc.....	41
Figure III-3: Principe de fonctionnement d'un accumulateur plomb/acide.....	42
Figure III-4: Courbes de charge et de décharge d'une cellule élémentaire de batterie au plomb	

Figure IV-1: Schéma de montage d'un hacheur série.....	51
Figure IV-2: signaux typiques de convertisseur abaisseur.....	53
Figure IV-3 : Structure d'un hacheur Boost.....	53
Figure IV.3: signaux typiques de convertisseur boost.....	55
Figure IV-5: Structure d'un hacheur Buck-Boost.....	55
Figure IV-6: système PV raccordé directement au réseau.....	57
Figure IV-7: système PV raccordé au réseau par bus intermédiaire.....	58
Figure IV-8 : Circuit de puissance d'un onduleur triphasé.....	58
Figure IV-9 : Les tensions de sortie d'un onduleur.....	59
Figure IV-10: Allures des tensions du l'onduleur triphasé.....	62
Figure IV-11 : La topologie «Onduleur central» .....	63
Figure IV-12 : La topologie «Onduleur string».....	64
Figure IV- 13 : La topologie « hacheur modulaire parallèle ».....	64
Figure IV-14: La topologie « hacheur modulaire série ».....	65
Figure IV.15 : différents types du filtrage passif.....	68
Figure V.1 : Principe d'une connexion directe entre un GPV et une charge.....	69
Figure V.2 : Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de la charge.....	70
Figure V.3 : Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de P <sub>MAX</sub> du GPV.....	71
Figure V.4 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.....	73
Figure V.5 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal.....	74
Figure V.6 : Caractéristique P <sub>PV</sub> (V <sub>PV</sub> ) d'un panneau solaire.....	76
Figure V.7 : Organigramme Perturb end Observ.....	77
Figure V.8 : Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de dP <sub>PV</sub> /dV <sub>PV</sub> sur la caractéristique de puissance et de la valeur de ΔI <sub>PV</sub> /ΔV <sub>PV</sub> sur la caractéristique de courant..	79
Figure V-9 : Organigramme d'incrément de conductance.....	80
Figure V.10 : Relation entre PPV et le rapport cyclique D du convertisseur statique.....	81
Figure V.11: Algorithme type de la commande Hill Climbing.....	81
Figure VI.1: Modèle du générateur photovoltaïque.....	85
Figure VI.2 : Schéma de simulation d'un générateur photovoltaïque.....	88
Figure VI.3 : Caractéristique I =f(V) d'un générateur photovoltaïque.....	89
Figure VI. 4: Caractéristique P =f(V) d'un générateur photovoltaïque.....	89

## Liste des figures

---

Figure VI.5 : Schéma de simulation de l'influence de l'éclairement sur le GPV.....	90
Figure VI.6: Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ .....	91
Figure VI.7: Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$ .....	91
Figure VI.8 : Schéma de simulation de l'influence de la température sur le GPV.....	92
Figure VI.9: Influence de la temperature sur la caractéristique $I=f(V)$ .....	92
Figure VI.10: Influence de la temperature sur la caractéristique $P=f(V)$ .....	93
Figure VI.11 : Schéma de simulation du hacheur élévateur.....	94
Figure VI.12: circuit électrique équivalent.....	94
Figure VI-13 : circuits équivalents des deux phases de fonctionnement.....	95
Figure VI.14: schéma de simulation d'un panneau avec un hacheur boost sur psim.....	96
Figure VI.15: Allure du courant sortant du hacheur.....	97
Figure VI.16 : Allure de la tension de la sortie du hacheur.....	97
Figure VI-17: Représentation des composants bidirectionnels.....	98
Figure VI-18 : Schéma du signal de commande à MLI et la tension ( $V_A$ ) de sortie d'un onduleur monophasé.....	99
Figure VI-19 : Schéma équivalent monophasé du filtre RLC.....	99
Figure VI-20 : schéma de connexion PV-réseau via un onduleur MLI sans filtrage.....	100
Figure VI-21: Les courants des phases à la sortie de l'onduleur.....	101
Figure VI-22: la tension simple de la première phase.....	101
Figure VI-23 : Schéma de connexion PV-réseau via un onduleur MLI avec filtrage.....	101
Figure VI-24 : Les courants dans les phases après filtrage.....	102
Figure VI-25 : Allures des tensions simples filtrées.....	102
Figure VI- 26 : Optimisation de la puissance avec la méthode Perturb & Observ.....	103
Figure VI-27 : Caractéristique $I_{PV} -V_{PV}$ du GPV avec MPPT.....	103
Figure VI-28: Caractéristique $P-V$ du GPV avec MPPT.....	104
Figure VI.29: Optimisation de la puissance avec la méthode Inc/Cond.....	105
Figure VI-30 : Caractéristique $I_{PV} -V_{PV}$ du GPV avec MPPT.....	105
Figure VI-31 : Caractéristique $P_{PV} -V_{PV}$ du GPV avec MPPT.....	106

## Liste des tableaux

---

Tableau I.1 : Technologies et performances des cellules photovoltaïques .....	10
Tableau VI.1: Caractéristiques du modèle photovoltaïque (MSX-60-).....	104

# Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques ne cessent d'augmenter [6] à cause de l'industrialisation [43]. De nos jours une grande partie de la production électrique est produite à partir de ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium [42]. Le gisement de ces ressources énergétiques, ne peuvent pas être exploités que pour quelques décennies, ce qui laisse prévoir une situation de manque énergétique au niveau mondial de façon délicate [41]. En plus la consommation de ces ressources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution [6].

Aujourd'hui, les énergies renouvelables deviennent progressivement des énergies à part entière, rivalisant avec des énergies fossiles du point de vue coût et performance de production. Elles peuvent se définir comme étant non polluantes, ne produisant aucun gaz à effet de serre, et sont également réparties dans le monde. Les plus principales énergies renouvelables qui peuvent se développés à plus grande échelle dès aujourd'hui, sont l'hydroélectriques, le solaire, l'éolien et la géothermie [76].

L'énergie solaire photovoltaïque bien que connu depuis de nombreuses années pour pouvoir être une source d'énergie électrique ayant de grandes possibilités pouvant aller de quelques milliwatts aux mégawatts, ne se développe pas proportionnellement. [68]

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par l'intermédiaire d'une cellule dite photovoltaïque (PV) [3] basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire un courant électrique lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière [43]. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule [6].

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées telsque la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert [39].

La caractéristique I-V du GPV dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. De plus, son point de fonctionnement

dépend directement de la charge qu'il alimente. Afin d'extraire en chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV, nous introduisons un étage d'adaptation entre le générateur et la charge pour coupler les deux éléments le plus parfaitement possible.

Le problème du couplage parfait entre un générateur photovoltaïque et une charge de type continue n'est pas encore réellement résolu. Un des obstacles technologiques qui existe dans ce type de couplage est le problème du transfert de la puissance maximale du générateur photovoltaïque à la charge qui a souvent une mauvaise adaptation [43]. Le point de fonctionnement qui en découle est alors parfois très éloigné du point de puissance maximale (PPM). La littérature propose une grande quantité de solutions sur l'algorithme de contrôle qui effectue une recherche de point de puissance maximale lorsque le GPV est couplé à une charge à travers un convertisseur statique. [42]

Dans ce mémoire, l'ensemble constitué par un GPV, un étage d'adaptation et une charge DC est abordé par une approche du point de vue architecture de conversion et un générateur connecté au réseau via un onduleur triphasé.

Ainsi, nous avons étudié le problème de l'extraction du maximum de puissance d'un générateur.

Dans le premier chapitre, on fait une description générale d'un système photovoltaïque, en présentant les différentes notions qui entrent dans sa constitution.

Dans le deuxième chapitre, on étudiera la constitution, les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque et l'influence des différents paramètres climatiques et autres sur les caractéristiques I-V, P-V.

Dans le troisième chapitre, nous présentons le mode de stockage de l'énergie photovoltaïque et les différentes batteries électrochimiques utilisées dans ce domaine avec leurs régulations en charge et décharge.

Le quatrième chapitre sera consacré pour l'étude de différents convertisseurs statiques en continu-continu et en continu-alternatif pour l'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge soit en continu ou en alternatif ou pour la connexion au réseau.

Dans le cinquième chapitre on étudiera les différentes méthodes de poursuite du point de fonctionnement maximal d'un générateur photovoltaïque.

Le dernier chapitre est consacré à la modélisation et la simulation, en premier d'un générateur photovoltaïque et l'influence des différents paramètres climatiques sur les caractéristiques I-V et P-V, en suite de la connexion d'un générateur PV à un hacheur survolteur pour alimenter une charge en continu (résistive), et on fait une simulation d'un

ensemble PV et un onduleur commandé à MLI et sa connexion à un réseau via un filtrage passif.

Enfin on fait la simulation d'un ensemble PV hacheur (Buck) mené d'une commande de point de puissance maximale (P&O et Inc /Cond) dans le but d'extraire le maximum de puissance délivrée par le générateur.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

# Chapitre I : Structure globale de transfert d'énergie photovoltaïque

---

## **I-1) Introduction :**

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter [6].

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Elles regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie solaire photovoltaïque [2].

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

## **I-2) Rayonnement solaire :**

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre reçoit une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire.

La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM. Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de  $1000 \text{ W/m}^2$ , il est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "0" (ou AM0). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à  $1000 \text{ W/m}^2$  [8].

Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.5D. Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de  $45^\circ$  par rapport au zénith).

## Chapitre I : Structure globale de transfert d'énergie photovoltaïque

---

Le « G » représente le rayonnement "global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct.

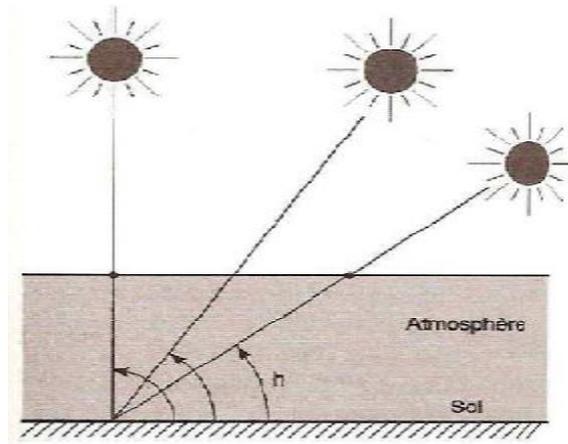


Figure I.1: Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil [8].

### I-2-1) Spectre solaire [7] :

Le rayonnement solaire est un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10  $\mu\text{m}$ .

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

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

Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie  $E_{\text{ph}}$  qui répond, elle même, à la relation suivante:

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

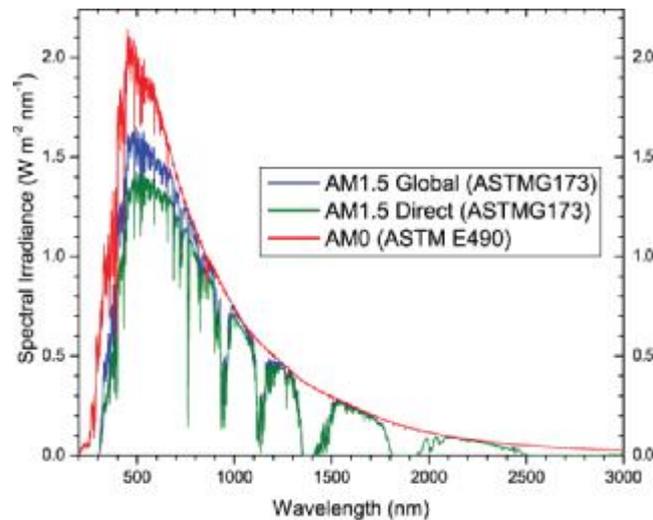
Où :

$E_{\text{ph}}$  : représente la quantité d'énergie ;

$\lambda$  : la longueur d'onde ;

$h$  : la constante de Planck ;

$c$  la vitesse de la lumière.



**Figure I.2 : Spectre solaire [35].**

### **I-2-2) Durée d'insolation :**

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell– Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés ; on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages [2].

### **I-3) Différentes technologies solaires :**

Il existe principalement trois façons d'utiliser directement l'énergie solaire : la thermodynamique, la thermique et le photovoltaïque.

#### **I-3-1) Solaire à concentration thermodynamique :**

Le solaire à concentration thermodynamique est une technologie qui utilise des miroirs qui concentrent l'énergie solaire vers un tube contenant un fluide caloporteur qui chauffe jusqu'à une température pouvant atteindre 500°C. La chaleur obtenue est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine couplée à un alternateur qui produit de l'électricité.

### **I-3-2) Solaire thermique :**

Le solaire thermique consiste à transformer les rayonnements solaires en chaleur, et à la récupérer par chauffage de l'eau. Différents types de capteurs solaires thermiques existent, le plus simple consiste à peindre en noir un ballon métallique contenant un fluide caloporteur, de l'eau par exemple. La couche noire absorbe l'énergie solaire et la transmet à l'eau. Les panneaux solaires plus performants reprennent ce principe, mais la surface qui reçoit l'énergie solaire, appelée absorbeur, est enfermée dans une enceinte transparente et parfaitement fermée, provoquant un effet de serre et augmentant le rendement de l'ensemble. L'extraction de la chaleur se fait grâce à la circulation du fluide caloporteur dans un conduit recevant l'énergie calorifique.

### **I-3-3) Solaire Photovoltaïque :**

La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons contenus dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque) capable de convertir le rayonnement solaire en électricité. Les électrons sont alors mis en mouvement, produisant ainsi un courant électrique. Ce type d'énergie solaire sera développé dans les chapitres suivants.

### **I-4) Structure globale d'un système photovoltaïque :**

Les systèmes photovoltaïques sont composés de cellules assemblées sous forme de modules (ensemble de cellules couplées) qui sont implantés sur des supports de fixations permettant d'assurer la résistance mécanique et l'étanchéité du système. Pour les sites non reliés au réseau électrique, un système de stockage (généralement des batteries) et un système de régulation sont adjoints aux sites. Dans le cas des sites raccordés au réseau, qui représentent aujourd'hui l'essentiel du marché mondial, le courant continu issu des modules est transformé en courant alternatif via un onduleur. Il est ensuite injecté sur le réseau de distribution d'électricité.

#### **I-4-1) Les systèmes raccordés au réseau :**

On peut distinguer deux types de réseaux : le réseau interconnecté et les mini-réseaux ou réseaux isolés. Dans chacun des cas, le stockage d'électricité est envisageable. Les bénéfices apportés par la présence d'unités de stockage dépendront directement de leur mode d'utilisation de leur implantation dans le réseau.

### - Le réseau interconnecté :

L'implantation de champs PV dans le réseau interconnecté peut se faire sans besoin particulier de stockage. Le réseau assure la fourniture à l'utilisateur en cas de déficit de la production photovoltaïque. L'excédent peut être réinjecté sur le réseau [44].

### - Les mini-réseaux ou réseaux isolés :

Les réseaux isolés sont composés d'unités de production d'électricité dont la puissance est comprise entre quelques centaines de kW et quelques dizaines de MW [9].

### **I-4-2) Une installation photovoltaïque autonome :**

Les systèmes autonomes sont des unités de production d'électricité généralement de petites tailles qui ne sont reliées à aucun réseau de distribution. Dans la majorité des cas, ce système est utilisé dans les sites isolés où il serait beaucoup trop coûteux de raccorder l'habitation ou le local que l'on souhaite alimenter en électricité. La différence majeure avec une installation photovoltaïque standard (raccordée au réseau), c'est la présence de batteries.

Une installation photovoltaïque autonome doit être capable de fournir de l'énergie, y compris lorsqu'il n'y a plus de soleil (la nuit ou en cas de mauvais temps). Il faut donc qu'une partie de la production journalière des modules photovoltaïques soit stockée.

Cette installation se compose d'un ou plusieurs modules photovoltaïques, d'un régulateur de charge, d'une ou plusieurs batteries, et éventuellement d'un onduleur. L'autonomie de ce système le rend utilisable dans de nombreuses situations pour lesquelles le solaire est souvent la seule possibilité [9].

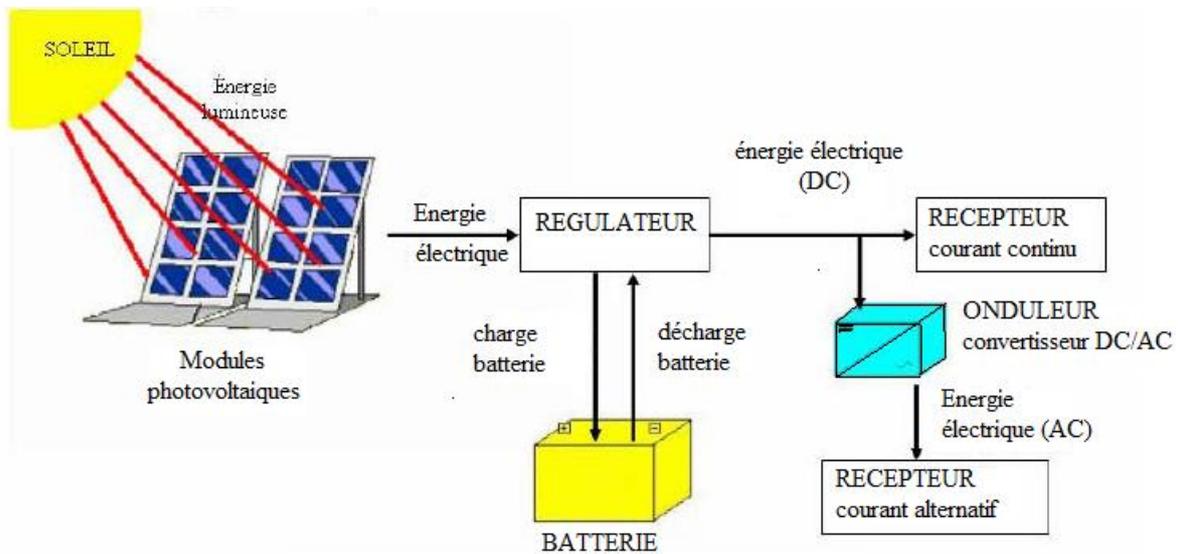


Figure I.3 : Schéma général d'un système photovoltaïque.

## I-4-2-1) Panneaux solaires :

### 1. La cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un composant optoélectronique qui, exposé à la lumière, génère de l'électricité [1]. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants [2].

Plusieurs technologies sont actuellement développées pour la réalisation de cellules photovoltaïques. Les performances et la durée de vie sont très différentes d'une technologie à une autre.

Le matériau de base est dans la plupart des cas le silicium. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, polycristalline, ou monocristalline. D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de Gallium (AsGa), Tellure de Cadmium (CdTe).



Figure I.4 : Cellule photovoltaïque (Monocristalline) [15]

Technologie	Rendement de conversion	Durée de vie
Silicium polycristallin	12 à 16% (industriel)	35 ans
Couche monocristallin	15 à 20 % (industriel)	35 ans
Couche mince Silicium amorphe	7% (industriel)	10 ans (en extérieur)
Couche mince CIS*	10 à 12% (industriel)	Non évaluée
Filière organique/inorganique	3 à 5%	Quelque mois

Tableau I.1 : Technologies et performances des cellules photovoltaïques [2].

## 2. Modules photovoltaïques :

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module (Figure I.5 -a-). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (Ethylène -Vinyl-Acétate) (Figure I.5 -b-) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une couche de polyéthylène [2].

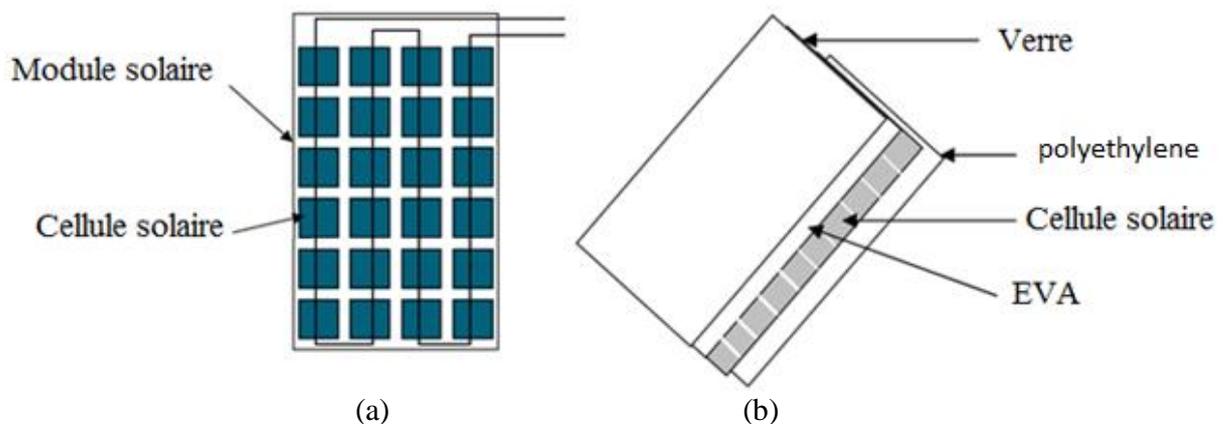


Figure I.5 : Module photovoltaïque [2].

### I-4-2-2) Système de stockage :

Les accumulateurs sont des systèmes électrochimiques servant à stocker de l'énergie. Ceux-ci restituent sous forme d'énergie électrique, exprimée en Wattheure (Wh), l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques.

## Chapitre I : Structure globale de transfert d'énergie photovoltaïque

---

Ces réactions sont activées au sein d'une cellule élémentaire entre deux électrodes baignant dans un électrolyte lorsqu'une charge, un moteur électrique par exemple, est branché à ses bornes.

L'accumulateur est basé sur un système électrochimique réversible. Le terme batterie est alors utilisé pour caractériser un assemblage de cellules élémentaires (en général rechargeables).

La technologie des accumulateurs est très diversifiée. On peut citer les principaux types :

- les accumulateurs au plomb ;
- les accumulateurs au nickel à électrolyte alcalin (KOH), nickel/cadmium, nickel/hydrure métallique, nickel/hydrogène, nickel/fer ;
- les accumulateurs alcalins nickel/zinc et MnO<sub>2</sub>/zinc ;
- les accumulateurs alcalins métal/air : air/zinc, air/fer, air/magnésium ;
- les accumulateurs scellés au sodium à électrolyte solide en alumine fonctionnant à haute température (300°C) : sodium/soufre, sodium/chlorure de nickel ;
- les accumulateurs au lithium à électrolyte sel fondu à 450°C : LiAl/FeS ou FeS<sub>2</sub>.

### **I-4-2-3) Système de régulation :**

Les systèmes de régulation de charge sont des éléments d'un système photovoltaïque qui ont pour but de contrôler la charge et la décharge d'une batterie afin d'en maximiser sa durée de vie. Son rôle principal est de réduire 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. A 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 [3].

Le régulateur de charge assure deux fonctions principales :

- la protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes.
- L'optimisation du transfert d'énergie du champ PV 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 prérègle : seuil haut et seuil bas.

Il existe plusieurs types de régulateurs :

- Régulation de décharge ;

- Régulation de la charge :
  - Régulateur MPPT ;
  - Régulateur PWM ;
  - Régulations de charge série ;
  - Régulateur de charge parallèle.

### **I-4-2-4) 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), soit entre la batterie et la charge. Si la charge est alimentée en continu, le convertisseur utilisé est de type continu-continu (hacheur), sinon le convertisseur sera de type continu-alternatif (onduleur) [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.

Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Son rendement se situe entre 90 et 95%.

#### **2. Le convertisseur continu- alternatif :**

C'est un dispositif statique destiné à convertir le courant continu en courant alternatif, on le désigne sous le nom d'onduleur. Ce dernier utilise des transistors de puissance ou des thyristors.

#### **3. Les caractéristiques de l'onduleur :**

Les critères de choix de l'onduleur sont nombreux et s'appuient sur l'exigence de la charge électrique et du système installé. En voici les plus courants :

##### **- Puissance nominale :**

C'est la puissance que peut délivrer l'onduleur en fonctionnement permanent. Techniquement la puissance nominale de l'onduleur doit couvrir la somme des puissances de toutes les charges électriques CA que l'on souhaite utiliser en même temps. Cependant en pratique il est rare que tous les appareils fonctionnent simultanément. Le choix de la puissance

## Chapitre I : Structure globale de transfert d'énergie photovoltaïque

---

nominale sera alors basé sur la puissance totale de tous les appareils susceptibles de fonctionner ensemble [10].

### - **Puissance de pointe :**

Certains appareils comme les réfrigérateurs ou les moteurs tirent un courant très important lors de leur démarrage (3 à 10 fois leur puissance nominale), produisant ainsi une puissance très élevée, appelée puissance de pointe ou surcharge. L'onduleur doit pouvoir supporter cette surcharge pendant un bref instant.

### - **Rendement :**

C'est le critère principal dans le choix d'un onduleur, car on souhaite maintenir élevé l'efficacité du système. Le rendement à pleine charge n'est pas un facteur pertinent de choix ; c'est le rendement à charge partielle qui est important, car la puissance requise par la charge est toujours inférieure à la puissance nominale de l'onduleur [11].

### - **Consommation à vide ou en attente :**

Dans un système où l'onduleur est branché en permanence sur toutes les charges, il arrive que la quasi totalité de la charge ne soit pas en fonction (par exemple la nuit). L'onduleur fonctionne donc à vide et consomme de la puissance inutilement. Il est intéressant qu'il soit doté d'un dispositif de détection de seuil de puissance pour arrêt et réenclenchement automatique ou détection de charge, afin que la consommation dans ce mode soit la plus faible possible [12].

### - **Tension d'entrée :**

Dans le cas d'un système autonome, la tension d'entrée correspond à la tension du système mis en place [11].

### - **Tension de sortie :**

Elle doit correspondre à la tension d'alimentation CA des appareils, et être réglée pour rester stable avec des écarts inférieurs à 5% quelque soit la tension à l'entrée et quelque soit la charge électrique [44].

### - **Forme d'onde:**

Les appareils qu'alimente l'onduleur doivent pouvoir supporter la forme d'onde de sortie de l'onduleur. Il faut donc connaître les tolérances sur la tension et la fréquence de chaque appareil susceptible d'être alimenté par l'onduleur [11].

### - Distorsion harmonique :

Certains appareils électroniques peuvent créer des harmoniques qui déforment le signal de sortie de l'onduleur; ce qui peut avoir pour effet de produire un dysfonctionnement de l'application (échauffements indésirables, surcharges, perturbation d'autres appareils etc...). L'onduleur doit pouvoir maintenir une distorsion harmonique la plus faible possible [13].

### I-4-2-5) La Charge :

La charge et l'équipement électrique alimenté par le système 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.

### I-5) Montage et installation d'un système photovoltaïque :

L'installation d'équipements photovoltaïques permet d'accéder à l'autonomie énergétique en investissant à long terme dans des matériels fiables et sans entretien.

Pour le montage des modules solaires, des cadres en acier zingué, aluminium ou bois sont utilisés. Concernant la mobilité des supports, une distinction est faite entre les installations pivotantes et les installations fixes.

- Les installations pivotantes (suivantes) autour d'un ou de deux axes suivent la course du soleil pendant la journée.

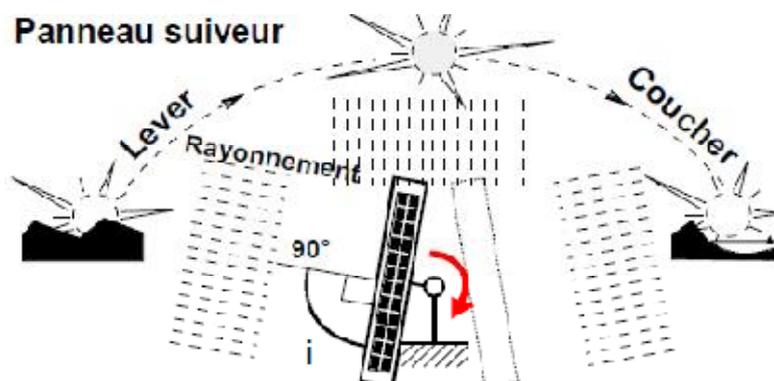


Figure I-6 : système suiveur.

## Chapitre I : Structure globale de transfert d'énergie photovoltaïque

---

- Les installations fixes sont montées en série sur des cadres, de la même façon que pour des installations de toiture. Dans le cas d'une installation en plaine, il convient de laisser une distance suffisante entre les rangées afin de réduire au minimum la projection d'ombre sur les modules par les rangées qui les précèdent. La surface de montage est donc en général nettement supérieure à celle des modules.

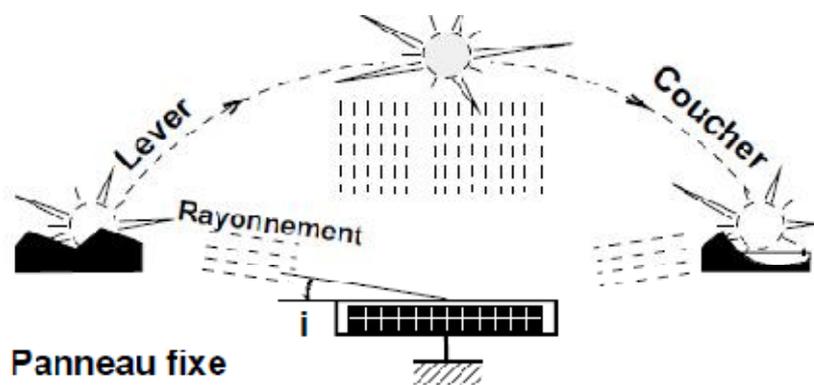


Figure I-7 : Système fixe.

On recherche également à réduire la hauteur des supports afin de minimiser la consommation de matériaux. Dans le cas d'installations photovoltaïques au sol en rangées fixes, les modules se trouvent en général entre 0,70 et 1,5 m au-dessus du sol.

Des installations pivotantes sur un ou deux axes ont une distance par rapport au sol de 0,6 à 3 m [14].

La fixation des panneaux doit assurer correctement les fonctions suivantes :

- Maintient de l'orientation ;
- Résistance contre le vent et les autres intempéries ;
- Résistance contre les agressions mécaniques ;
- Protection contre les salissures, et agressions venant du sol ;
- ventilation des panneaux afin de limiter leur échauffement.

### I-6) Câblage souterrain :

En général, les raccordements entre les cadres des modules et les onduleurs sont réalisés à l'aide de câbles enterrés. Les câbles sont posés sur une couche de 10 cm de sable au fond d'une

## Chapitre I : Structure globale de transfert d'énergie photovoltaïque

---

tranchée dédiée aux câbles d'une profondeur de 70 à 90 cm. Les câbles sont posés côte à côte de plain-pied, la distance entre les câbles et la largeur de la tranchée dépendant de l'intensité du courant à prévoir.

L'installation des modules peut se faire sur un toit si son orientation et son inclinaison sont bonnes ou sur le sol pourvu que l'endroit soit bien dégagé, aéré et protégé. On les place habituellement avec la pente vers l'équateur (vers le sud dans l'hémisphère nord). L'inclinaison des panneaux n'est pas critique, son angle peut varier de 30° à 90°.

### **I-7) Durée de vie d'un système photovoltaïque :**

Comme tout produit, les modules photovoltaïques ont une durée de vie qui dépend de la qualité intrinsèque des matériaux le constituant, de son utilisation et de l'environnement dans lequel il est installé.

Selon les fabricants, les modules photovoltaïques bénéficient de garanties entre 2 et 5 ans. Cependant, la plupart des fabricants garantissent 90% de la puissance initiale des modules au bout de 10 ans et 80% au bout de 20 à 25 ans. Cette garantie ne fonctionne uniquement que si le module est intact.

Par contre, la durée de vie des onduleurs est généralement moins de 10 ans. La garantie fabricant est de 5 ans. Donc, il faut prévoir de changer les onduleurs au cours de la vie du système.

### **I-8) Secteurs d'applications :**

#### **I-8-1) Domaine spatial :**

C'est de loin le secteur le plus ancien puisque les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes,...) remontent aux années soixante. Depuis lors, des recherches et développements nombreux ont été réalisés dans le domaine militaire (NASA aux Etats-Unis) et public pour accroître les performances électriques tout en réduisant le poids des modules [16].

### **I-8-2) 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.

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 du village ou pour l'irrigation,
- la réfrigération pour la production de glace et la conservation de vaccins, sang, produits agricoles,...
- l'éclairage (lampe portable, éclairage public, électrification villageoise, ...).

### **I-8-3) Centrale de puissance :**

Les centrales de production photovoltaïque sont expérimentées depuis quelques années en Europe, aux Etats-Unis et au Japon, mais la puissance fournie ne dépasse pas 8MW (aux Etats-Unis).

La plupart des projets utilisent des champs de capteurs plans, mais on utilise 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 destinées à compléter le réseau en différents points critiques.

Lorsque la pointe de la demande est en phase avec l'ensoleillement, la centrale photovoltaïque connectée au réseau permet de fournir les pointes.

### **I-8-4) 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.

## Chapitre I : Structure globale de transfert d'énergie photovoltaïque

---

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.

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 [16].

### **I-9) Conclusion :**

Nous avons présenté dans ce présent chapitre les différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système de captage photovoltaïque, qui sont quelque peu primaires, mais suffisantes à l'introduction du modèle qui sera présenté dans les chapitres suivants.

**II-1) Introduction :**

La technologie photovoltaïque (PV) est une solution attrayante comme remplacement ou complément des sources conventionnelles d'approvisionnement en électricité en raison de ses nombreux avantages.

Généralement, les systèmes de conversion d'énergie renouvelable souffrent d'un manque d'optimisation qui en font des systèmes chers et présentant encore des déficiences importantes en rendement et en fiabilité. Les problèmes qui restent à résoudre concernent autant le matériau de conversion qui reste cher que la chaîne de conversion qui présente beaucoup de pertes.

Sur la partie matériau, beaucoup d'équipe de recherche travaillent depuis de nombreuses années pour obtenir des rendements élevés associés à des prix de réalisation bas et une tenue des performances en vieillissement sur les durées importantes.

Sur la partie système de conversion lui-même, les recherches se résument sur le développement d'un modèle mathématique exacte qui représente la cellule photovoltaïque réelle, et qui reflète l'influence des différentes conditions atmosphériques sur les paramètres de la cellule solaire.

Dans ce chapitre, des notions générales sur les systèmes photovoltaïques seront présentées, l'influence des conditions de fonctionnement (éclairage, température, facteur de qualité, résistance série...) sur la réponse de cellules solaire ainsi que les différentes spécifications électriques du générateur.

**II-2) Historique des cellules solaires :**

En 1839, Becquerel découvre pour la première fois l'effet photovoltaïque. Il s'agit de convertir directement l'énergie solaire en énergie électrique.

En 1982, les dispositifs photovoltaïques introduits les semi-conducteurs. Le matériau utilisé était le sélénium avec une efficacité de conversion d'énergie qui n'a jamais excédé approximativement 2%.

En 1954, les chercheurs américains de Bell Labs ont produit le premier type pratique de la cellule solaire, une cellule de silicium de type monocristalline avec une efficacité de conversion d'énergie jusqu'à 6%.

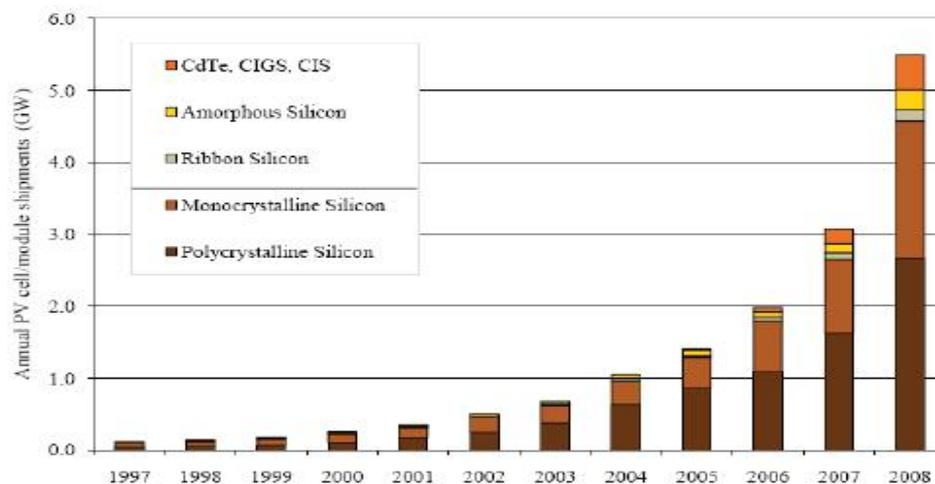
Le développement de la nouvelle technologie d'énergie a été plutôt modéré jusqu'au milieu des années 70 et a été limité par les technologies conventionnelles d'énergie dominantes, les combustibles fossiles, particulièrement le charbon, le pétrole et le gaz naturel.

Des grandes améliorations ont permis l'augmentation de l'efficacité de la conversion d'énergie, réduisant ainsi les coûts des cellules, par l'utilisation de différents matériaux de semi-conducteurs. Un rendement maximum de conversion de l'énergie photovoltaïque pour les cellules solaires monocristallines à base de silicium, a été atteint en 1988 avec une valeur de 22.8%. Le rendement le plus élevé a été obtenu pour une cellule cristalline de l'arséniure de gallium (GaAs) avec une efficacité de 31% avec un éclairage solaire équivalent à 350 W/m<sup>2</sup> (1988).

Les cellules solaires les plus récentes sont celles appelées couches minces qui se composent de CuInSe, et cellules amorphes de silicium. Ces deux types ont permis une efficacité de plus de 14%. Les nouvelles technologies de production ont réduit le prix de vente des cellules photovoltaïques, ce qui a permis à l'industrie PV de se développer. L'avantage de l'énergie produite par les cellules photovoltaïques est la production d'énergie propre et durable et son avenir est prometteur [7].

### II-3) Les technologies :

En réalité il existe aujourd'hui trois principales filières technologiques : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques. Ces filières se partagent inégalement le marché comme le montre la Figure (II.1).



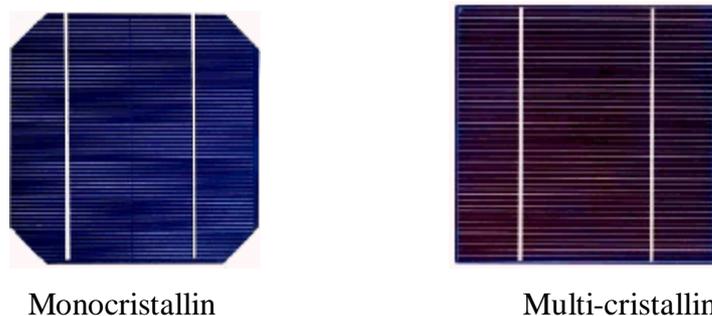
**Figure II.1: Evolution de la production mondiale des différentes technologies de cellules PV [32].**

#### II-3-1) Le silicium cristallin :

Le silicium cristallin domine le marché à plus de 80%. La fin de cette technologie utilisant une grande quantité en matière première est annoncée depuis de nombreuses années mais les

progrès technologiques réalisés par cette filière aux cours des 10 dernières années lui ont permis de garder sa place prédominante sur le marché. Cette filière, de part de son très fort développement actuel, semble partie pour garder cette place encore quelques années. Elle comporte deux technologies : le silicium monocristallin et le silicium multi-cristallin.

Le silicium mono cristallin est difficile à obtenir. En effet, il nécessite un taux de pureté très élevé et donc plusieurs étapes de purification. Ces étapes sont délicates et donc coûteuses. Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre 12 et 20% pour les cellules industrielles. Son coût élevé est aujourd'hui un handicap et le silicium monocristallin perd du terrain devant le silicium multi-cristallin [32].



**Figure II.2 : Cellules monocristalline et multi-cristalline [18]**

Le silicium multi-cristallin est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. A elle seule elle représente près de 50% du marché. Ces cellules sont obtenus par coulage de cristaux de silicium ce qui rend sa structure hétérogène. Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin il est compris entre 10 et 14% selon les fabricants. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de production sont donc plus faibles.

L'un des points faibles de ces deux technologies est la quantité de matière utilisée, même si actuellement la taille des lingots et des cellules augmentent continuellement. Les lingots de silicium, mono ou multi-cristallin, sont sciés en tranche de 150 à 300 microns, par des scies à fils. Le diamètre du fil de découpe étant de 180 microns d'épaisseur, il entraîne une perte en matière première de près de 50%.

### **II-3-2) Les couches minces :**

Les cellules amorphes ou à couche mince sont fondamentalement différentes. Le silicium ne se présente pas sous forme cristalline, bien qu'il ait des propriétés voisines du silicium cristallin. Les cellules sont composées d'un support en verre ou en matière synthétique sur

lequel est déposée une fine couche de silicium, processus ne nécessitant que très peu d'énergie. Bien que le rendement de telles cellules soit plus bas que celui des cellules cristallines, de 5 à 10%, le courant produit est relativement bon marché [17].



**Figure II.3 : Modules utilisant le Sia (Silicium amorphe) [32].**

### **II-3-3) Cellules organiques et plastiques :**

Les cellules organiques sont aujourd'hui un sujet d'étude très actif et restent actuellement un sujet de laboratoire. Ces cellules comprennent deux voies : la voie des cellules humides et la voie des cellules polymères organiques dites aussi cellules plastiques. Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6%). Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures).



**Figure II.4 : Cellule PV organique [14]**

### **II-4) Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :**

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 du transport 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'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p.

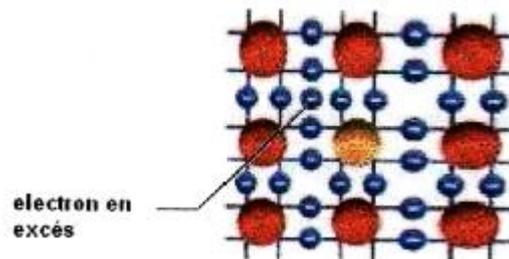
Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue [19].

- **Dopage n [75] :**

On incorpore un élément « donneur » d'électrons, plus précisément un élément pentavalent (qui possède 5 électrons sur sa couche périphérique), ces derniers appartiennent au groupe V de la classification périodique des éléments.

Sur ces cinq électrons, quatre vont participer à la structure cristalline et un va être libre, et va avoir la possibilité de se déplacer dans le cristal. On dit que cette partie du cristal est porteuse de charges mobiles.

Exemple : le phosphore(P), l'arsenic (AS), le bismuth (Bi) et l'antimoine (Sb).



**Figure II.5 : Dopage de type n [75].**

- **Dopage p [75] :**

On incorpore un élément « accepteur », plus précisément un élément trivalent.

Ces derniers appartiennent au groupe III de la classification périodique des éléments.

Trois atomes participent à la structure cristalline et non quatre. Ces déficits d'électrons créent ce qu'on appelle des « trous ». C'est-à-dire des lacunes en électrons. Ces « trous » se déplacent dans la couche (P) comme des particules de charge positive.

Exemple : le bore (B), l'aluminium (Al), le gallium (Ga), l'indium (In).

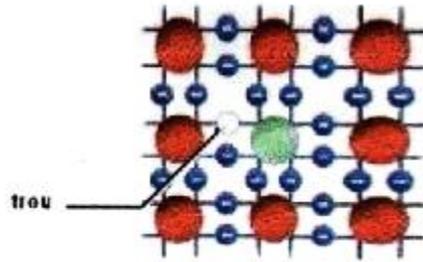


Figure II.6 : Dopage de type p [75].

Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie 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, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel [19].

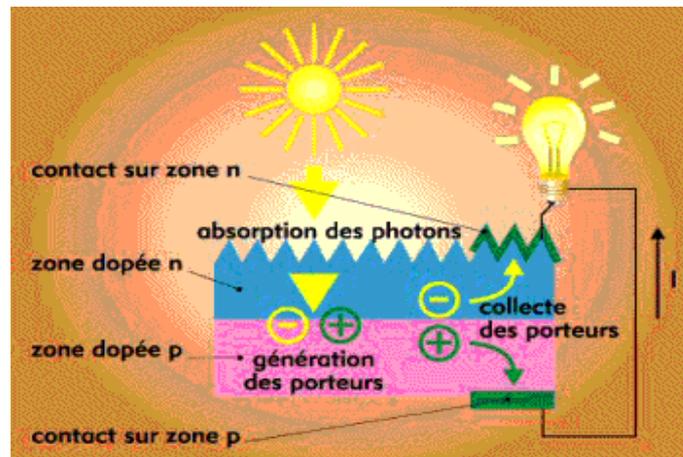


Figure II.7 : Schéma de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [23,19, 36]

## II-5) Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque :

### II-5-1) Générateur photovoltaïque idéal:

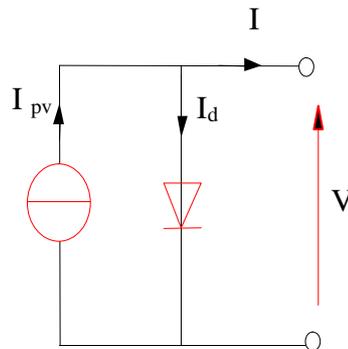
Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{PV}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV.

Si l'on connecte une charge résistive aux bornes du générateur photovoltaïque, ce dernier y débite une part de courant  $I$  et le reste, le courant  $I_d$ , dans la diode. On a alors la relation :

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

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :

$$V = V_d \quad (\text{II-2})$$



**Figure II.8 : Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque idéal**

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_d = I_0 \left( \exp\left(\frac{V_d}{a \cdot V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II - 3})$$

Avec :

$I_0$  : courant de saturation inverse de la diode ;

$V_t$  : Tension thermique avec  $V_T = \frac{T \cdot K}{q}$  ;

$K$  : Constante de Boltzmann ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K) ;

$q$  : Charge élémentaire d'électrons ( $1.6 \cdot 10^{-19}$  C) ;

$a$  : Facteur d'idéalité de la jonction ;

$T$  : Température de jonction de la cellule photovoltaïque.

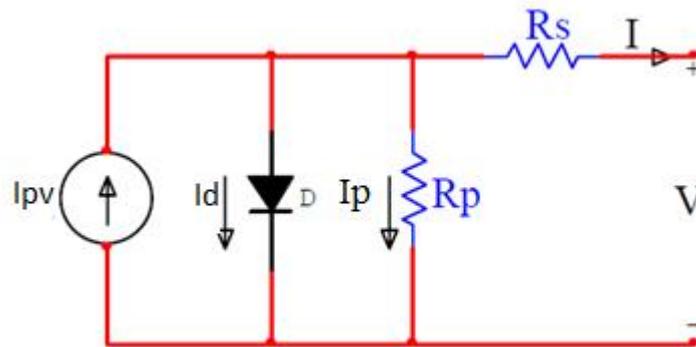
Le courant débité équivaut à :

$$I = I_{pv} - I_d = I_{pv} - I_0 \left( \exp\left(\frac{V_d}{a \cdot V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II - 4})$$

Ce modèle reste théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellule photovoltaïque dans des conditions réelles. Toutefois, il reste valable sous certaines hypothèses. Il existe d'autres modèles, certes théoriques, mais qui rendent plus fidèlement compte du comportement de la cellule photovoltaïque.

**II-5-2) Générateur photovoltaïque réel :**

Le modèle photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série  $R_s$  et les courants de fuite par une résistance en parallèle  $R_p$ .



**Figure II.9 : Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque réel [41]**

On a :

$$I = I_{pv} - I_d - I_p \quad (\text{II-5})$$

$$I_p = \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (\text{II-6})$$

$$I = I_{pv} - I_0 \left( \exp\left(\frac{V + I R_s}{a \cdot V_t}\right) - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (\text{II-7})$$

**II-6) Caractéristique d'une cellule photovoltaïque :****II-6-1) La courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque:**

La courbe caractéristique d'une cellule PV représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule PV depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule).

Cette courbe est établie dans des conditions ambiantes de fonctionnement données (répartition du rayonnement donnée, cellule PV à une température donnée). En effet, le fonctionnement des cellules photovoltaïques dépend des conditions d'ensoleillement et de

température à la surface de la cellule. Ainsi, chaque courbe courant-tension correspond à des conditions spécifiques de fonctionnement [37].

- **Tension de circuit ouvert  $V_{CO}$  (pour  $I_{CO} = 0$ ) :**

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse [40].

- **Courant de court-circuit  $I_{CC}$  (pour  $V_{CC} = 0$ ) :**

Le courant court-circuit est directement fonction de la surface de la cellule.

Dans les cellules PV au silicium, la tension  $V_{CO}$  est de l'ordre de 0,4 à 0,6 V et le courant  $I_{CC}$  est de l'ordre de 12 mA/cm<sup>2</sup> pour des conditions de test standard (STC) en laboratoire, c'est-à-dire une répartition du rayonnement de type solaire AM = 1.5, un rayonnement incident normal sur la cellule PV de 1000 W/m<sup>2</sup>, et une température de cellule à 25 °C [38].

La figure (II.10) représentant cette caractéristique contient trois zones essentielles [39, 41, 13, 58] :

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

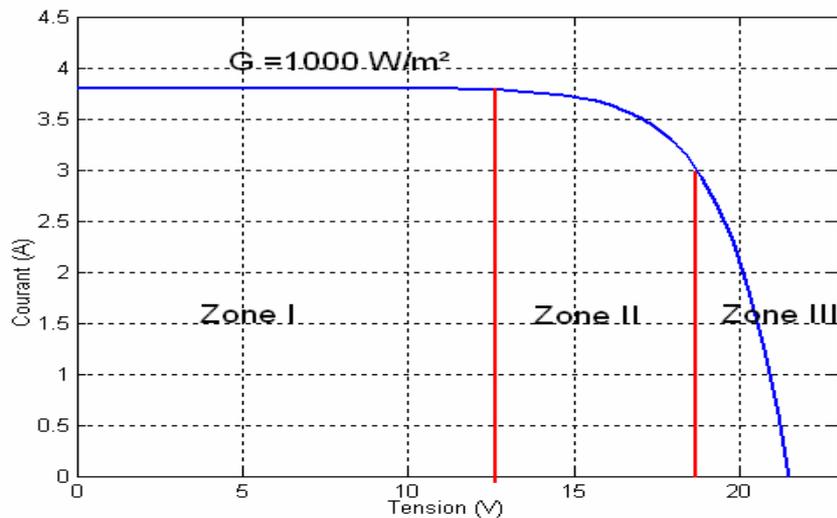


Figure II.10 : Caractéristique courant - tension I(V) [39, 58]

### II-6-2) Puissance caractéristique d'une cellule photovoltaïque:

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, etc..), la puissance électrique  $P$  disponible aux bornes d'une cellule PV est égale au produit du courant continu fourni  $I$  par une tension continue donnée  $V$  [37] :

$$P = V \cdot I \quad (\text{II-8})$$

#### II-6-2-1) Puissance maximale:

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximum  $P_{\text{max}}$  idéale correspondrait donc à la tension de circuit ouvert  $V_{\text{CO}}$  multipliée par le courant de court-circuit  $I_{\text{CC}}$  :

$$P_{\text{maxidéale}} = V_{\text{CO}} \cdot I_{\text{CC}} \quad (\text{II-9})$$

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie", et la tension au point de puissance maximum  $V_{\text{Pmax}}$  est inférieure à la tension de circuit ouvert  $V_{\text{CO}}$ , de même que le courant fourni  $I_{\text{Pmax}}$  est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit  $I_{\text{CC}}$  [37].

#### II-6-2-2) Puissance crête d'une cellule PV :

Dans le cas d'utilisation de cellules photovoltaïques avec le rayonnement solaire, la puissance crête d'une photopile, aussi nommée puissance "catalogue", notée  $W_c$  ou  $W_p$ ,

représente la puissance électrique maximum délivrée dans les conditions standards. C'est toujours sous cette forme qu'on trouve les informations dans les catalogues [37].

### II-6-2-3) Facteur de qualité :

C'est un facteur de performance des cellules solaires. Il compare la puissance maximale délivrée ( $P_{op}$ ) au produit de court-circuit ( $I_{cc}$ ) et de la tension à circuit- ouvert ( $V_{oc}$ ) [23].

$$FF = \frac{V_{OP} \cdot I_{OP}}{V_{CO} \cdot I_{CC}} \quad (II-10)$$

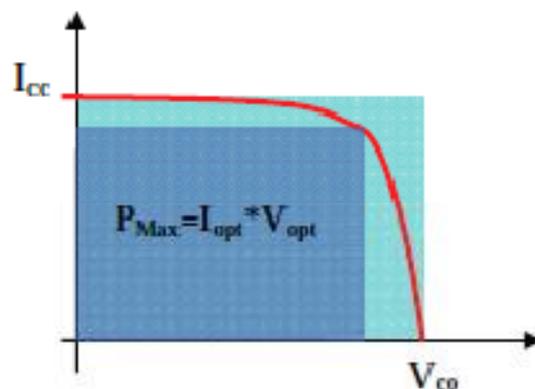


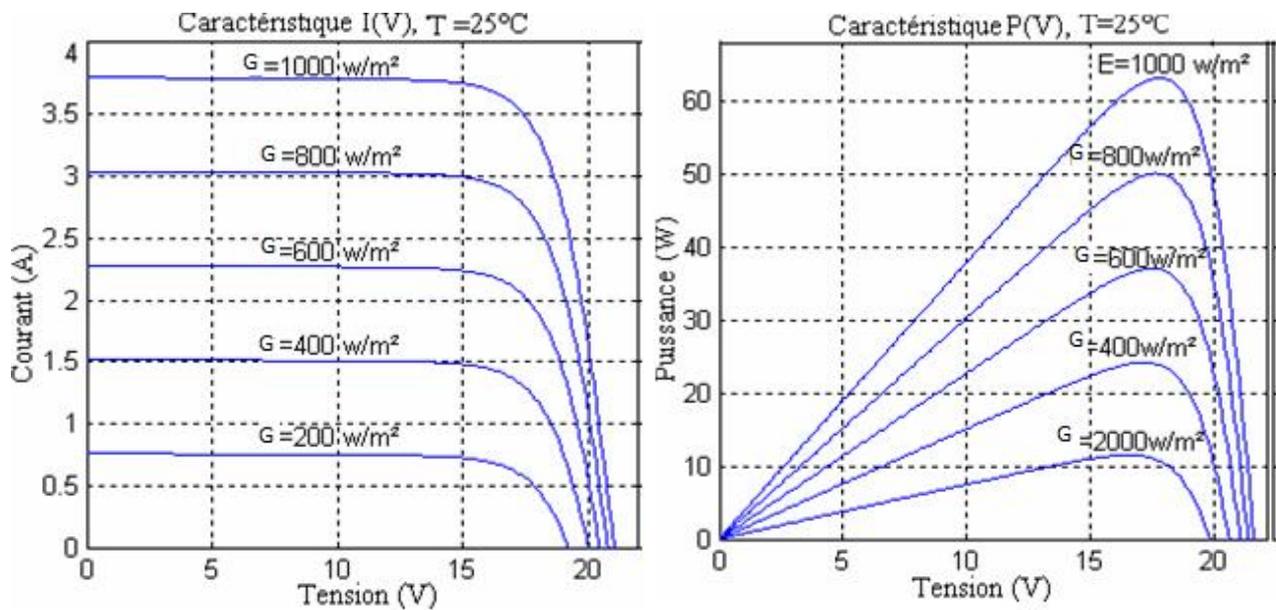
Figure II.11 : Notion de facteur de forme pour une cellule solaire [35].

## II-7) Influence des différents paramètres sur les caractéristiques d'une cellule solaire :

### II-7-1) Influence de l'éclairement :

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface.

La figure (II-11) représente la caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes : le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement [58].



**Figure II .12 : Caractéristiques I (V) et P(V) d'une cellule solaire en fonction de l'éclairement [40].**

### II-7-2) Influence de la température :

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

$$T_c = T_a + \frac{G_m}{1000} (T_{UC} - 25) \quad (\text{II-11})$$

ambiante ( $T_a$ ).

Avec :

$T_c$  : température de la cellule ( $^{\circ}\text{C}$ ) ;

$T_a$  : température ambiante ( $^{\circ}\text{C}$ ) ;

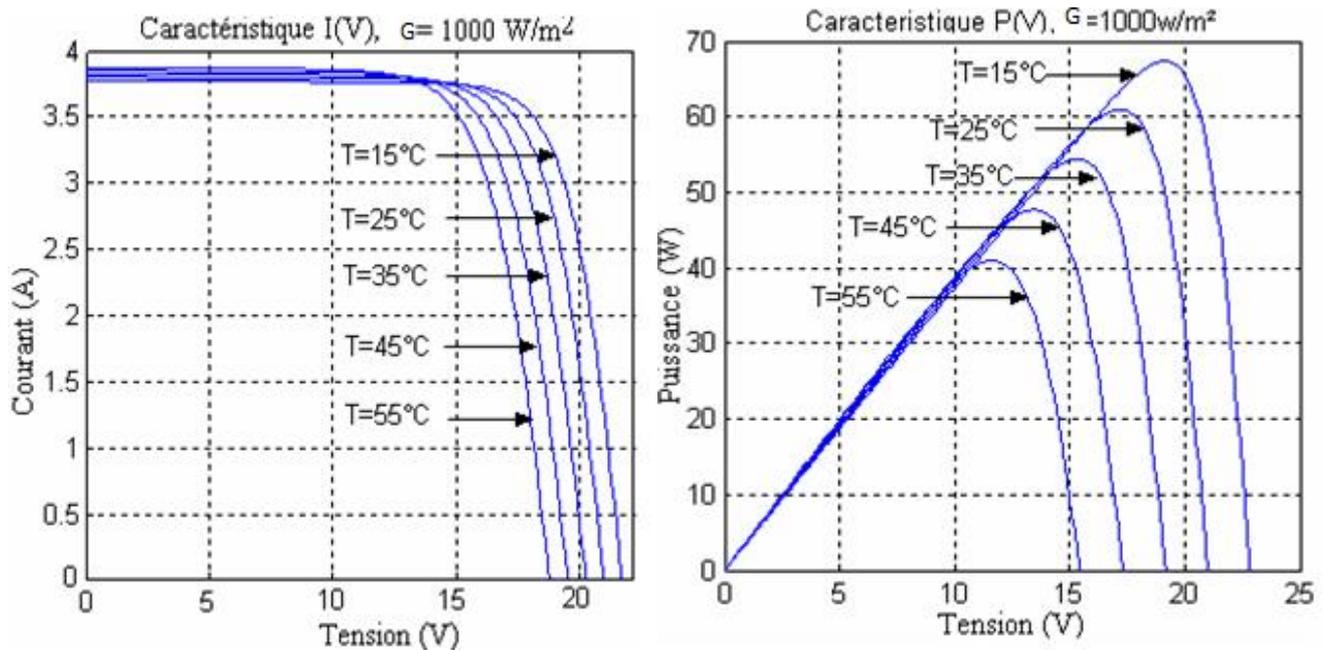
$G_m$  : éclairement moyen ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) ;

$T_{UC}$  : température d'utilisation de la cellule ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Le graphe de la figure (II-13) montre que la tension d'une cellule baisse fortement avec la température. Plus la température augmente et moins la cellule est performante. En revanche, le courant augmente légèrement en intensité : cette augmentation reste néanmoins négligeable au point de puissance maximale.

Le comportement global de la cellule en température est une perte de 0,4 à 0,5 %/ $^{\circ}\text{C}$ .

Lors du calcul d'une installation solaire, il faut savoir que l'éclairement et la température varient simultanément et en permanence. Ce point est très souvent négligé lors du dimensionnement de l'installation : il est donc recommandé de bien connaître les conditions et la variation climatique du site choisi dès la conception du projet photovoltaïque [9].

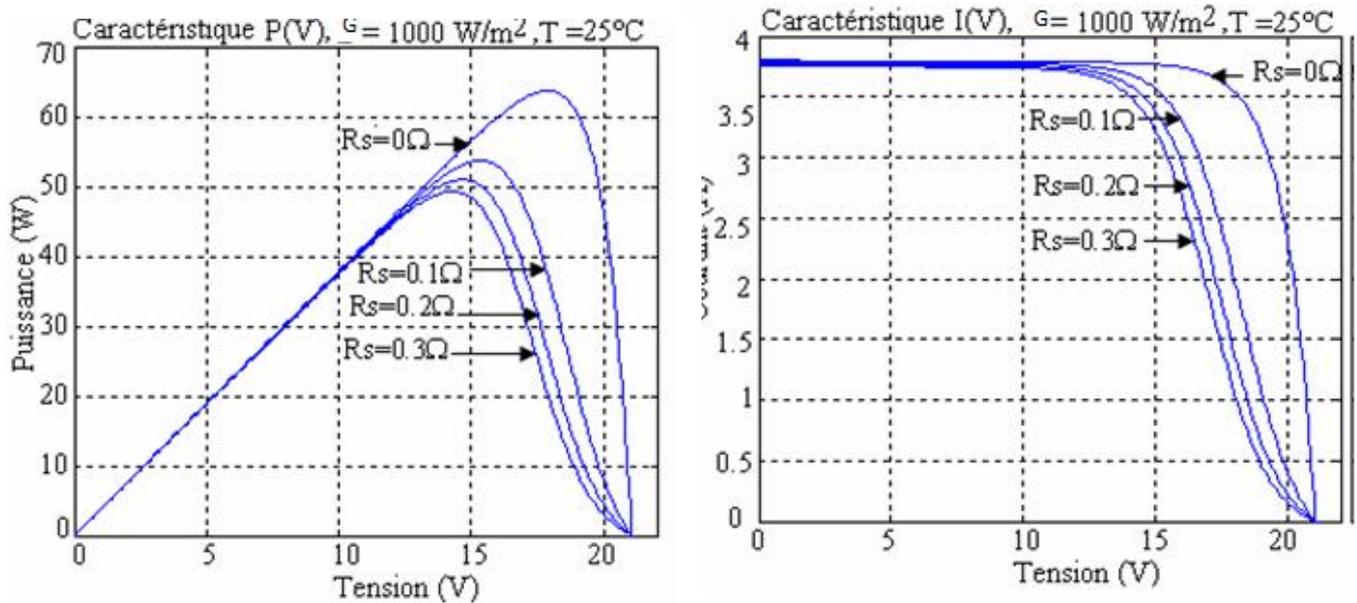


**Figure II.13** Caractéristiques I (V) et P(V) d'une cellule solaire en fonction de la température [40].

### II-7-3) Influence de la résistance série :

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

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique de la zone de la cellule photovoltaïque, dont elle se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court circuit [23].

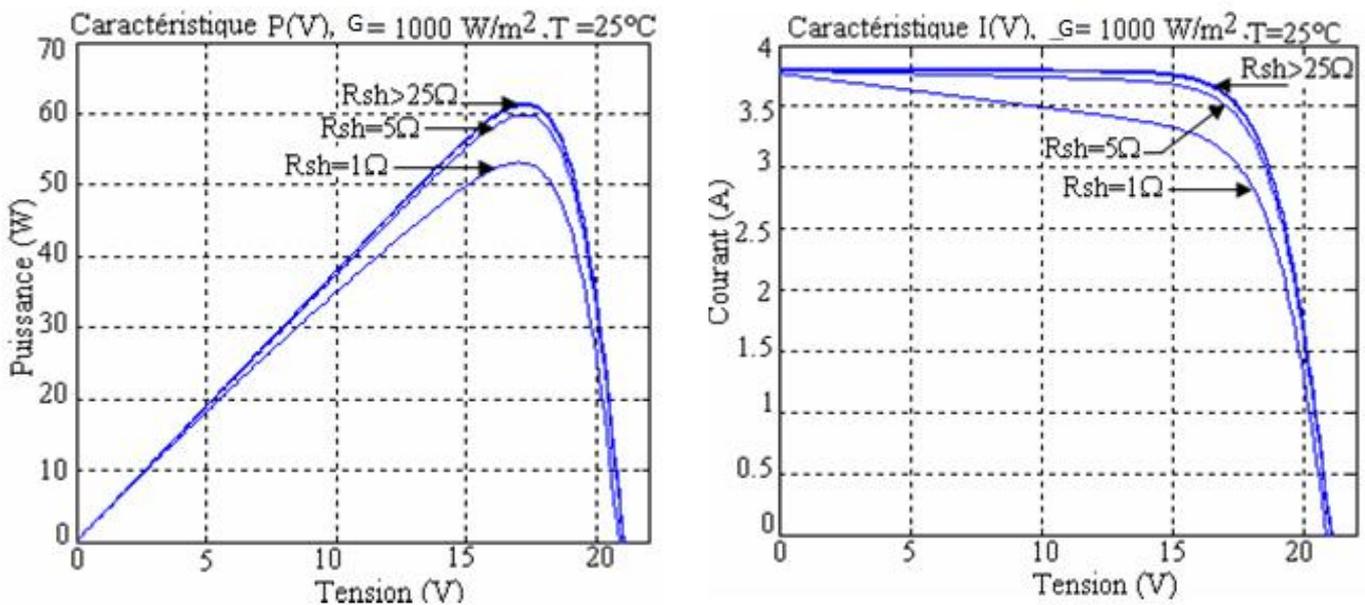


**Figure II.14 : Caractéristiques I(V) et P (V) d'une cellule solaire en fonction de la résistance série [40].**

**II-7-4) Influence de la résistance parallèle (shunt) :**

La résistance parallèle est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes opposées positives d'une cellule photovoltaïque.

En générale, la résistance shunt est très élevée, son effet se fait sentir surtout dans la partie génération du courant.



**Figure II.15 : Caractéristiques I (V) et P(V) d'une cellule solaire en fonction de la résistance parallèle [40].**

**II-8) Association des cellules:**

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur électrique de très faible puissance par rapport aux besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles.

En effet, une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension très faible, par principe, puisqu'il s'agit d'une tension de jonction. Les générateurs photovoltaïques sont, par conséquent, réalisés par association d'un grand nombre de cellules élémentaires.

Ces cellules sont commercialisées sous la forme de modules photovoltaïques associant, généralement en série pour élever la tension, un certain nombre de cellules élémentaires de technologie et caractéristiques identiques.

Suivant les besoins de l'utilisation, ces modules sont ensuite associés en réseau série-parallèle de façon à obtenir la tension et le courant désirés. Cette association doit être réalisée en respectant des critères précis, en raison des déséquilibres apparaissant dans un réseau de cellules photovoltaïques en fonctionnement.

En effet, bien que choisies théoriquement identiques, les nombreuses cellules qui constituent le générateur présentent des caractéristiques différentes du fait des dispersions de construction inévitables, mais aussi d'un éclairage et d'une température non uniformes sur l'ensemble du réseau.

La mise en place de dispositifs de protection efficaces contre les effets négatifs de ces déséquilibres sur le comportement et la fiabilité doit être prévue.

**II-8-1) Association série :**

Une association de  $n_s$  cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, Figure (II.16). L'équation (II-12) résume les caractéristiques électriques d'une association série de  $n_s$  cellules [43].

$$V_{co_{ns}} = n_s \cdot V_{co} \quad \text{avec} \quad I_{CC} = I_{CCns} \quad (\text{II-12})$$

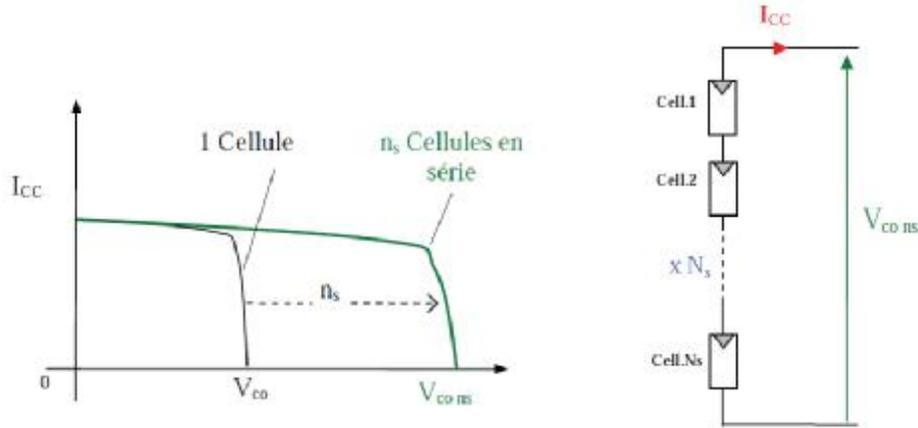


Figure II.16 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de  $n_s$  cellules en série [43].

II-8-2) Association parallèle :

D'autre part, une association parallèle de  $n_p$  cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants, Figure (II.17). L'équation résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de  $n_p$  cellules [35].

$$I_{cc\ np} = n_p \cdot I_{cc} \quad \text{avec} \quad V_{cc\ np} = V_{cc} \quad \text{(II-13)}$$

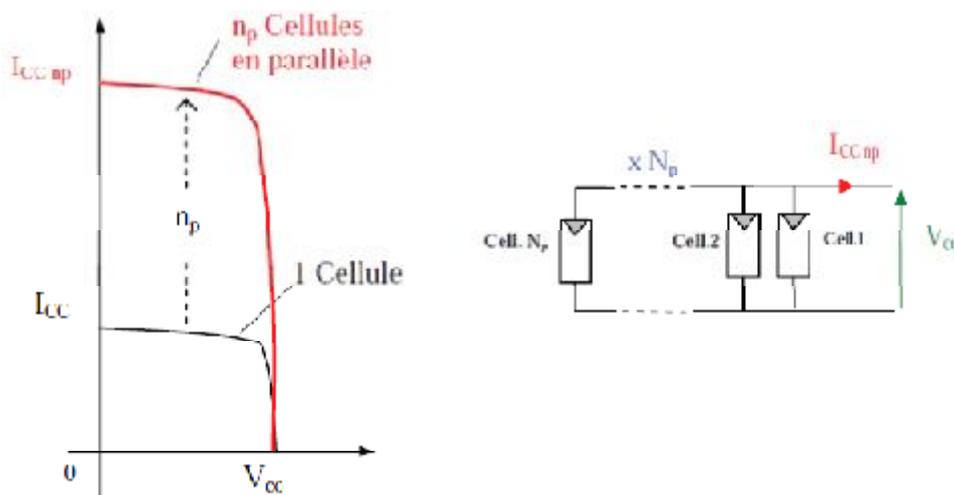
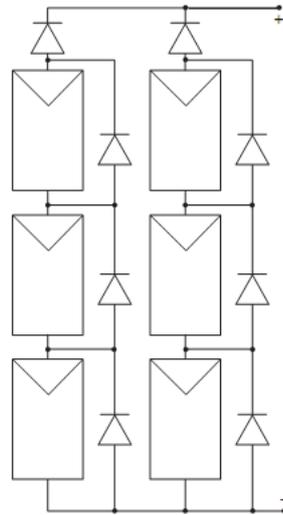


Figure II.17 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de  $n_p$  cellules en parallèle [35].

II-8-3) Association série-parallèle :

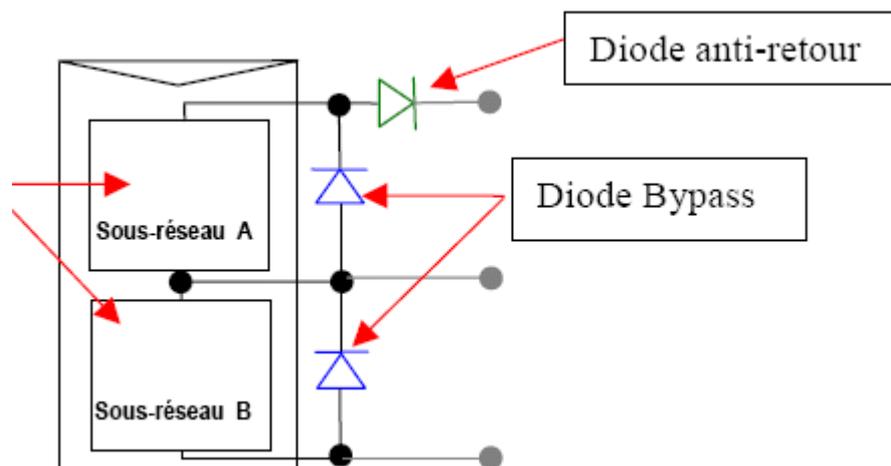
Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques, regroupés en panneaux photovoltaïques constitués de modules identiques uniformément exposés et protégés par les diodes by pass comme le montrent la figure (II.18) [44].



**Figure (II.18) : Schéma de connexion des cellules solaires en série et parallèle [44].**

### II-9) Protections classiques d'un générateur photovoltaïque :

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en séries et de panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles (figure II.19).



**Figure II.19 : Schéma d'un module solaire avec protection [6].**

§ la diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une

charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit [42].

§ les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur, comme illustré sur la figure (II.20), par la perte d'une partie de la production d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance locale [42].

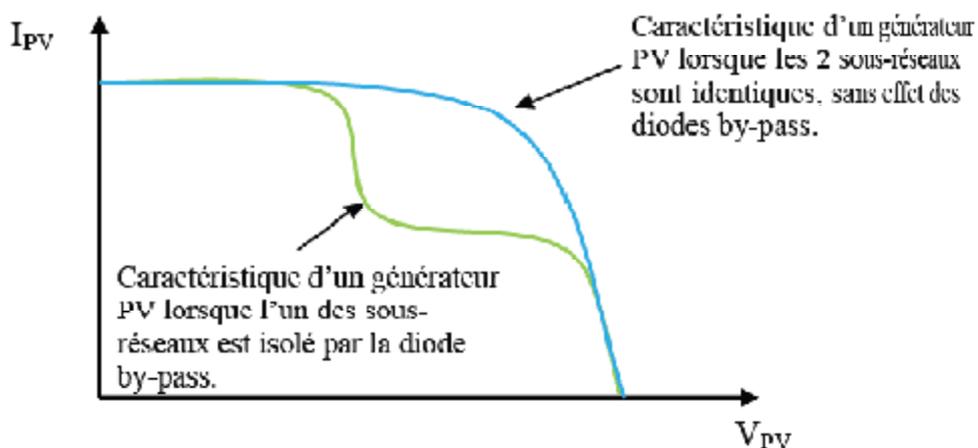


Figure II.20 : Effet de la diode by-pass sur la caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque [42,45].

### II.10) Rendement :

Le rendement d'une photopile est le rapport entre l'énergie électrique qu'elle fournit et l'énergie solaire reçue sur l'ensemble de sa surface.

$$\eta = \frac{\text{Energie électrique}}{\text{Energie lumineuse}}$$

Le rendement théorique de la cellule est d'environ 22 % pour le silicium monocristallin. Pratiquement les photopiles, actuellement les plus utilisées pour des raisons de coût, ont un rendement typique de l'ordre de 10 à 14 % [45].

### **II-11) Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons étudié la constitution, les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque, l'influence des différents paramètres climatiques et autres sur les caractéristiques  $I(V)$ ,  $P(V)$  a été abordée, et une spécification des différentes zones de fonctionnement. Enfin une synthèse d'assemblage des cellules et leurs protections ont été élaborées.

**III-1) Introduction :**

La production d'énergie par les systèmes photovoltaïque est très fluctuante et dépend énormément des conditions météorologiques. C'est pourquoi il faudra penser à stocker cette énergie pour la restituer pendant la nuit et les jours "sans soleil" et pour mieux adapter le générateur PV en fixant la tension du système. Le système de stockage est un élément important 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. Vue l'importance du stockage électrochimique de l'énergie solaire, la première partie est consacrer a l'étude théorique des différents types de batteries, en particulier la batterie au plomb qui est la moins coûteuse comparativement aux autres batteries [47], la deuxième partie est consacrée au régulateurs.

**III-2) Système de stockage :****III-2-1) Généralités :**

Dans une installation PV, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur PV, en attente pour une utilisation ultérieure. La gestion de l'énergie solaire nécessite d'envisager des stockages suivant les conductions météorologiques et qui vont répondre à deux fonction principales:

- Fournir à l'installation de l'électricité lorsque le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou par mauvais temps par exemple)
- Fournir à l'installation des puissances plus importantes que celles fournies par le générateur PV [49].

**III-2-2) Caractéristiques d'une batterie :**

Les Caractéristiques principales d'une batterie sont :

- **Capacité en Ampère heure :** Les Ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule le courant. Il existe des facteurs qui peuvent faire varier la capacité d'une batterie tels que :
  - **Rapports de chargement et déchargement :** Si la batterie est chargée ou déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer. Généralement, si la batterie est déchargée à un rythme

plus lent, sa capacité augmentera légèrement. Si le rythme est plus rapide, la capacité sera réduite.

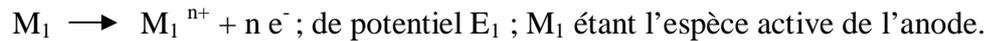
- **Température** : Un autre facteur qui influence la capacité est la température de la batterie et celle de son atmosphère. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie.
- **La durée de vie** : Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent. Par ailleurs, quelque soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles).
- **Profondeur de décharge** : La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge. Les batteries de "cycle peu profond" sont conçues pour des décharges de 10 à 25% de leur capacité totale dans chaque cycle. La majorité des batteries de "cycle profond" fabriquées pour les applications photovoltaïques sont conçues pour des décharges jusqu'à 80% de leur capacité, sans les endommager.
- **La tension d'utilisation** : C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.
- **Le rendement** : C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.
- **Le taux d'autodécharge** : L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.

### III-2-3) Principe général de fonctionnement d'une batterie :

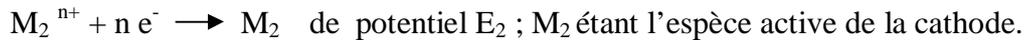
Il existe de nombreux moyens de stocker de l'électricité, qui passent quasiment tous par sa conversion en une autre forme d'énergie plus facile à utiliser, telle l'énergie chimique par exemple. Le stockage électrochimique est largement employé dans les applications stationnaires.

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

A l'anode (électrode négative en décharge) s'opère une réaction d'oxydation selon la formule suivante :



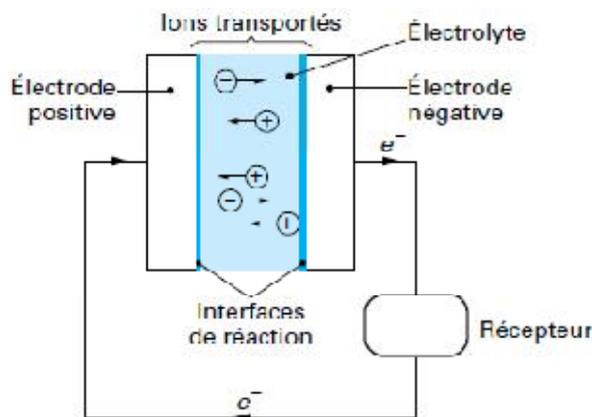
Les électrons libérés transitent dans le circuit extérieur pour atteindre finalement la cathode (Électrode positive en décharge) où s'opère une réaction de réduction selon :



L'électrolyte assure le transport des espèces ioniques mises en jeu dans la réaction globale d'oxydoréduction, qui s'écrit :



La force électromotrice  $E$  de ce convertisseur se calcule selon :  $E = E_2 - E_1$  [62].



**Figure III-1 : Principe d'un accumulateur électrochimique [62]**

La Figure (III-1) présente le fonctionnement d'un accumulateur en décharge.

La capacité (en Ah) du convertisseur électrochimique est directement liée à la quantité des matières actives mises en jeu dans la réaction d'oxydoréduction. Elle confère en outre au convertisseur son rôle d'accumulateur d'énergie, dont l'expression est, en chaque instant, le produit de la capacité (chargée ou déchargée) et de la tension aux bornes de l'accumulateur.

Un assemblage série / parallèle des cellules élémentaires à surface variable permettra d'ajuster la tension et la capacité de la batterie.

**III-2-4) Types de batteries :**

La technologie des accumulateurs est très diversifiée. On peut citer les principaux types :

- les accumulateurs au plomb ;
- accumulateurs au nickel-cadmium ;
- les accumulateurs au nickel à électrolyte alcalin (KOH), nickel/cadmium ;
- nickel/hydrure métallique, nickel/hydrogène, nickel/fer ;
- les accumulateurs alcalins nickel/zinc et  $MnO_2$ /zinc.

**III-2-5) Batterie au Plomb :****III-2-5-1) Batteries plomb-acide pour installations solaires photovoltaïques en sites isolés :**

On distingue deux catégories de batteries pour installation photovoltaïque :

**a. Batteries ouvertes :**

Les batteries au plomb ouvertes sont a priori plus fiables et plus durantes que les batteries à recombinaison.

Deux types de batteries peuvent être utilisés, selon le type d'usage :

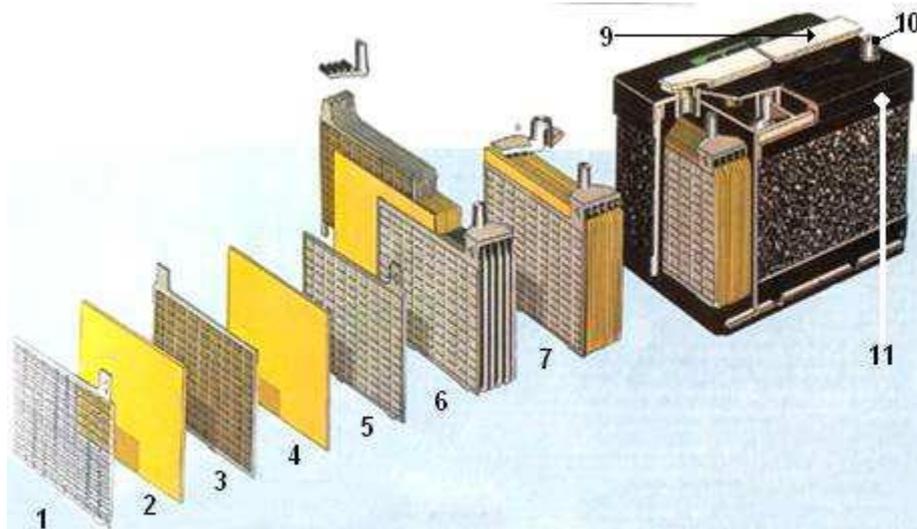
- les batteries dites stationnaires, qui assurent en général une fonction de secours dans diverses installations ; ces batteries, adaptées à un cyclage faible, sont utilisées pour les installations photovoltaïques sans aide de générateur de courant, de très longue autonomie, qui servent, notamment, pour des signalisations; l'autonomie de ces installations est, par exemple, de l'ordre d'un moi et le cycle quotidien mobilise seulement quelques pour-cent de la capacité totale ;
- les batteries dites de traction lourde utilisées, par exemple, pour les chariots de manutention et qui supportent un cyclage profond quotidien ; ces batteries sont utilisables pour les installations d'alimentation en énergie de bâtiments, d'habitations, etc., qui utilisent quotidiennement une part importante, voire la totalité, de l'énergie stockée [10].

**b. Batteries à recombinaison :**

Quoique a priori plus fragiles. Leur consommation d'eau est, en effet, négligeable lorsqu'elles sont correctement gérées en charge. Pour un usage à basse température, on utilisera la technologie à recombinaison [52].

**III-2-5-2) Composition d'une batterie au plomb:**

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.



- |                       |                        |
|-----------------------|------------------------|
| 1 : Grille.           | 7 : Élément complet    |
| 2 : Séparateur.       | 8 : Pont               |
| 3 : Plaque positive.  | 9 : Rampe de bouchons. |
| 4 : Plaque négative.  | 10 : Borne.            |
| 5 : Barrette.         | 11 : Bac.              |
| 6 : Faisceau négatif. |                        |

**Figure II.2 : Construction d'une batterie monobloc [2, 50, 51]**

Le matériel de la grille est un alliage de plomb avec 2-6% d'Antimoine (parce que le plomb pur est un matériel physiquement faible, et pourrait se casser pendant le transport et le service de la batterie).

Une petite quantité d'Antimoine réduit la production d'hydrogène et d'oxygène pendant la charge, et par conséquent la consommation d'eau. D'autre part, une plus grande proportion d'Antimoine permet des décharges plus profondes sans endommager les plaques, ce qui implique une plus grande durée de vie des batteries. Ces batteries plomb- Antimoine sont de type de "cycle profond".

Les plaques sont alternées dans la batterie, avec des séparateurs entre elles, qui sont fabriqués d'un matériel poreux qui permet l'écoulement de l'électrolyte. Ils sont

électriquement non conducteurs, ils peuvent être des mélanges de silice et de matières plastiques ou gommées.

Les séparateurs peuvent être des feuilles individuelles ou des "enveloppes".

Un groupe de plaques positives et négatives, avec des séparateurs, constituent un "élément". Un élément dans un container plongé dans un électrolyte constitue une "cellule" de batterie.

Des plaques plus grandes, ou en plus grand nombre, entraînent une plus grande quantité d'ampères heure que la batterie peut fournir.

Indépendamment de la taille des plaques, une cellule fournira une tension varie entre 1,7 et 2 volts suivant l'état de charge en conceptions nominales de fonctionnement, et un rendement énergétique de l'ordre de 70% à 85% (pour plomb- Acide).

Une batterie est constituée par plusieurs cellules ou des éléments reliés en série, pour augmenter le voltage à des valeurs normales aux applications électriques.

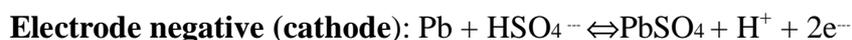
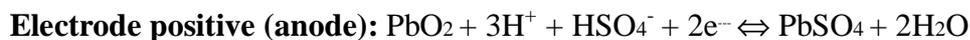
Les éléments des batteries sont souvent montés dans des bacs isolés du sol pour éviter le refroidissement de l'électrolyte par l'intermédiaire de support de bois, ces bacs sont réalisés en plastique transparent afin de bien visualiser le repérage de niveau de l'électrolyte.

### III-2-5-3) Principe de fonctionnement de la batterie au plomb :

Une réaction chimique intervient lorsque la batterie alimente une charge connectée à ces deux électrodes. Pendant la décharge, il y a une oxydation de plaque négative qui se traduit par une perte d'électrons et réduction de plaque positive ou gain d'électrons.

L'électrolyte en présence dans la batterie facilite le déplacement des charges électrochimiques sous forme d'ions. Le processus inverse se produit quand la batterie se recharge on voit apparaître une force électromotrice entre les deux électrodes [54,55].

Les équations des réactions suivantes décrivent la réaction principale:



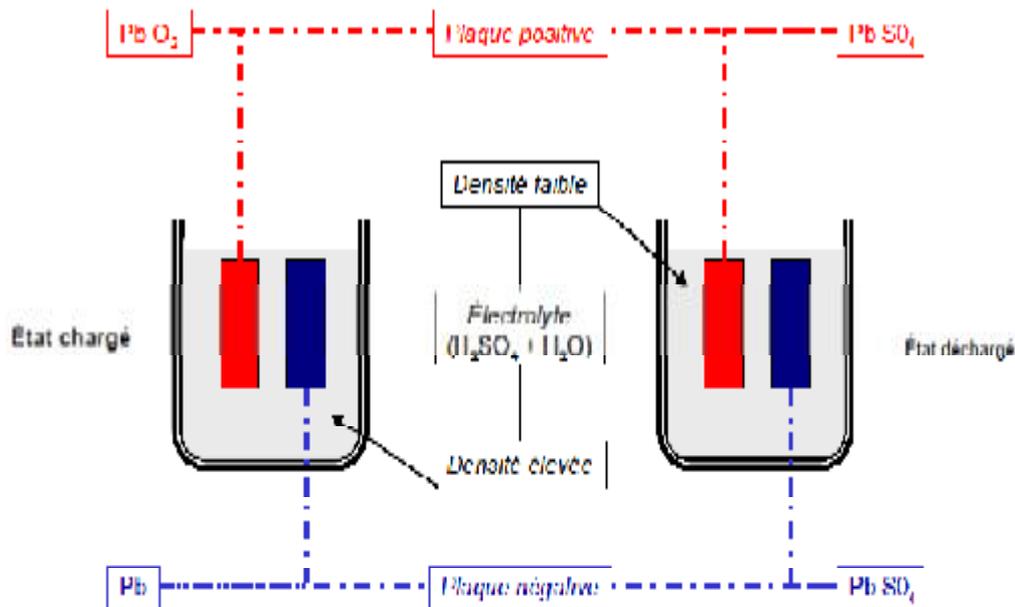


Figure III-3: Principe de fonctionnement d'un accumulateur plomb/acide [53]

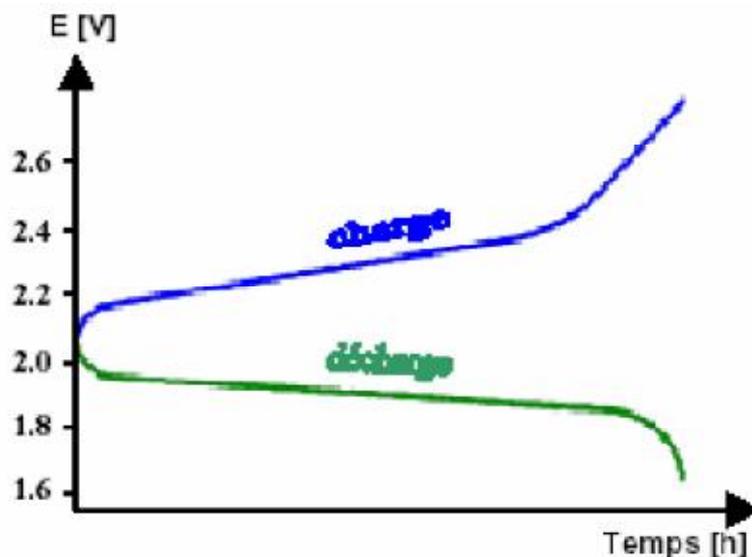


Figure III-4: Courbes de charge et de décharge d'une cellule élémentaire de batterie au plomb [62].

### III-2-6) Accumulateurs au nickel-cadmium :

Les accumulateurs au nickel-cadmium (Ni-Cd) sont conçus pour les cas où l'on a besoin d'un dispositif de stockage d'énergie robuste et de longue durée, exigeant peu d'entretien.

Le matériau actif de l'électrode positive (cathode) est une plaque d'oxi-hydroxyde de nickel (NiOOH) qui, pendant la décharge, accepte les électrons provenant du circuit externe.

L'électrode négative (anode) est constituée d'une plaque de cadmium, et l'électrolyte est une solution d'hydroxyde de potassium (KOH) à concentration variant entre 20 % et 35%. La tension de l'accumulateur est de 1,2 volt. La réaction réversible est [48, 56,55] :



**En recharge**

**en décharge**



**Recharge**

**décharge**



**Recharge**

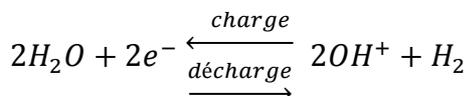
**décharge**

### III-2-7) Les accumulateurs Nickel Hydrogène (Ni-H<sub>2</sub>) :

Depuis 1964, les piles H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> sont couramment utilisées dans les applications spatiales (satellite et navette). Sur les satellites, ils servent d'accumulateur pour stocker le surplus d'électricité fournit par des panneaux solaires pour le restituer lors des éclipses (grand nombre de cycles).

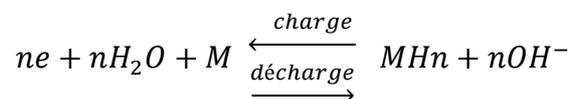
Cet accumulateur est plus utilisé part apport au Ni-Cd car il offre une très grande résistance au cyclage (plus de 10000 cycles avec des décharges à 40% de la capacité). Les ions actifs pour les échanges sont les ions hydrogène H<sup>+</sup> et l'électrode positive est à base d'hydroxyde de nickel.

Durant la décharge, l'hydrogène se recombine en eau avec l'oxygène de l'hydroxyde de nickel. Mais durant la recharge, il se produit un fort dégagement d'hydrogène sous forme gazeuse [61].



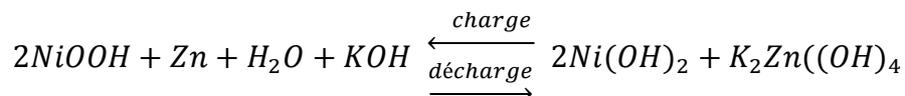
### III-2-8) Les accumulateurs Nickel-Metal-Hybride (Ni-MH) :

Ils ont une forme dérivée des batteries Nickel-Hydrogène. La batterie Ni-MH recombine les gaz comme l'hydrogène sur des alliages métalliques pour former des oxydes. Ils offrent des performances encore supérieures au Ni-Cd (capacité environ 1,8 fois supérieure) mais son prix est encore décourageant pour les applications industrielles habituelles.



### III-2-9) Les accumulateurs Nickel-Zinc (Ni-Zn) :

Ce couple a l'avantage d'être moins coûteux que le Ni-Cd et d'avoir une tension d'utilisation 25% plus élevée. En revanche, son plus gros défaut est une mauvaise résistance au cyclage (environ 600 à 1000 cycles) [60].



### III-2-10) Les accumulateurs à négative de lithium (LiNiO2) :

Ils fournissent une tension élevée par cellule (3,9V), mais sont très coûteux et réservés aux applications militaires. L'utilisation du lithium semble limitée et le nombre de cycle est compris entre 100 et 150 [57].

### III-3) Système de régulation :

Le régulateur de charge protège toute l'installation photovoltaïque, et notamment la batterie qui est l'élément le plus sensible. Il est branché à la fois sur le module solaire, la batterie et les appareils qui consomment l'électricité.

Comme son nom l'indique, le régulateur de charge/décharge régule les charges et les décharges de la batterie. Si la batterie était à pleine charge et que les modules continuaient de lui fournir de l'énergie, il y aurait alors surcharge et la batterie se détériorerait. De même, il est recommandé de ne pas vider entièrement une batterie. Ainsi, même s'il s'agit d'une batterie à décharge profonde, il vaut mieux ne pas descendre en dessous de 50% à 80% de décharge pour ne pas trop la dégrader. Le régulateur augmente donc la durée de vie de la batterie en lui évitant des états extrêmes.

- Une charge trop élevée entraînera une électrolyse de l'eau en hydrogène et oxygène, ce qui pourra éventuellement amener les plaques en contact avec l'air et provoquera un vieillissement prématuré de la batterie. La formation d'hydrogène représente également un risque certain d'explosion dans un local peu ventilé.

- Une décharge profonde répétée provoque une sulfatation irréversible des plaques et, par conséquent, une diminution de la capacité de la batterie. Cette sulfatation peut également provoquer des courts-circuits entre les plaques et rendre l'accumulateur inopérant.

### III-3-1) Caractéristiques des régulateurs :

Une fois la technologie la plus adaptée est identifiée, il faut s'attacher aux caractéristiques du régulateur photovoltaïque. Celles-ci dépendent des critères principaux suivants:

- Û **Tension nominale** : Elle doit pouvoir supporter la tension en circuit ouvert du module PV.
- Û **Courant d'entrée** : C'est le courant de charge maximum provenant des modules et que le régulateur peut contrôler sous une tension donnée. Choisir 1.5 fois le courant de court-circuit des modules PV pour un régulateur shunt et 1.5 fois le courant nominal des modules PV pour un régulateur série [11].
- Û **Courant de sortie** : C'est le courant maximum que tirent les appareils branchés simultanément.
- Û **Courant de pointe** : c'est le courant transitoire de certains appareils (Ex : les réfrigérateurs) que doit supporter le régulateur. Généralement il est égal à 3 fois le courant transitoire [11].
- Û **Protection** : Les conducteurs arrivant au régulateur doivent être protégés contre les surcharges, l'inversion de polarité et l'augmentation de température.

### III-3-2) Types de régulateurs :

Il existe plusieurs types de régulateurs :

#### III-3-2-1) Régulation de décharge :

La régulation de décharge s'effectue par un comparateur qui compare la tension de la batterie à un seuil de tension préétabli bas et transmet l'information à un circuit de commande. Ce dernier arrête de décharger lorsque la tension par élément dépasse la tension de seuil [2].

#### III-3-2-2) Régulation de la charge :

La régulation de la charge s'effectue par une réduction de 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 on cite les plus courants :

##### a. Régulateurs 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:

Le dispositif va mesurer la tension aux bornes de la batterie si cette tension atteint un seuil prédéfini le dispositif va déconnecter la batterie du système de charge, ceci évite l'échauffement du régulateur solaire, dès que la tension aux bornes de la batterie tend à descendre le régulateur reconnecte la batterie au système.

#### **b. Régulateurs Shunt :**

Pour contrôler la charge de la batterie, le régulateur shunt provoque des courts-circuits au niveau du module photovoltaïque. Quand la tension aux bornes de la batterie devient assez élevée, le courant est dérivé (shunté) vers une résistance puis renvoyé vers le module. La conception du module lui permet de bien supporter ces courts-circuits. Il s'agit cependant d'une technologie assez ancienne, qui ne permet pas une charge optimale de la batterie à 100%, mais plutôt 70 à 80% de sa capacité.

Toute la régulation se fait grâce à la mesure de la tension aux bornes de la batterie. Une batterie déchargée possède une tension faible, alors qu'une batterie chargée possède une tension forte. Le régulateur de charge doit donc avoir une lecture précise de la tension aux bornes de la batterie, afin de savoir si elle se trouve dans une période de fin de charge ou en fin de décharge. C'est pour cela que l'on place toujours le régulateur à proximité des batteries, pour éviter les chutes de tension dues à la distance et pouvoir prendre en compte la température environnante.

#### **c. Régulateur PWM (pulse with modulation) :**

Un circuit va mesurer la tension aux bornes de la batterie, et va délivrer des impulsions qui vont charger la batterie. Ces impulsions haute fréquence, vont être d'autant plus larges que la batterie sera déchargé, si la batterie arrive en fin de charge, les impulsions seront très fines, autre avantage de ce type de régulateur, vu qu'il génère **des pulses haute fréquence**, ils vont avoir tendance à empêcher la sulfatage des plaques de la batterie.

#### **d. Régulateurs MPPT :**

Le régulateur MPPT (« Maximum Power Point Tracking ») est encore plus performant que le régulateur PWM. Il ne permet pas de recharger la batterie au-delà de 100%, mais il peut la recharger beaucoup plus vite en optimisant les caractéristiques de tension et de courant du module et de la batterie. En effet, pour diverses raisons liées à la température, aux chutes de tensions dans les câbles électriques, les modules photovoltaïques sont toujours conçus avec

une tension supérieure à ce qui serait nécessaire. Autrement dit, un module sensé produire du 12V produira en réalité 17V voir plus. De même, la tension d'une batterie n'est pas constante.

Elle oscille entre 11,4V quand la batterie est déchargée, et monte à 13,2V une fois rechargée.

En revanche, le régulateur MPPT va transformer les caractéristiques du courant pour que le module puisse produire un maximum de puissance, tout en respectant les contraintes de la batterie. C'est en quelque sorte un convertisseur qui va absorber le maximum du module et qui fournira en sortie la même puissance

#### **III-4) Conclusion :**

Nous avons vu dans ce chapitre la méthode de stockage d'énergie électrique photovoltaïque sous forme d'énergie électrochimique dans des batteries, les différents types de ces batteries et leurs caractéristiques. Nous avons vu aussi le principe de fonctionnement et la constitution de la batterie au plomb et de la batterie nickel-cadmium qui sont les plus utilisées dans ce domaine. Enfin nous avons illustré les différents types de régulateurs de la charge et décharge se ces accumulateurs.

**IV-1) Introduction :**

La technologie des semi-conducteurs a connu de nombreuses avancées ces trois dernières décades, d'où l'émergence de composants rapides et puissants, avec une multitude d'applications.

Le raccordement au réseau de distribution de systèmes photovoltaïques nécessite un dispositif électronique appelé « onduleur » qui permet de transformer le courant continu produit par les panneaux en courant alternatif avec les caractéristiques du réseau en tension, courant, fréquence et impédance. Ce courant qui sera ensuite injecté dans réseau et exploité par les appareils domestiques. On parle ici d'onduleur DC/AC. Il existe également des convertisseurs qui sont à la fois de type AC/DC et DC/DC pour les systèmes hybrides autonomes avec stockage [69].

Le producteur d'énergie électrique doit dimensionner les systèmes de production, de transfert et de distribution de façon à pouvoir livrer à chaque instant une quantité d'énergie électrique fiable, donc en occurrence une onde de tension sinusoïdale et continue, caractérisée par sa fréquence et sa tension nominale et sa phase.

**IV-2) Convertisseurs :**

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative [20].

Donc à partir de cette définition on englobe deux types différents d'appareils électroniques placés entre générateur photovoltaïque et charges :

- Ø Les convertisseurs continus-continus qui font office d'interface entre générateur et charge pour transférer de l'un à l'autre le maximum de puissance (Hacheurs).
- Ø Les convertisseurs continus-alternatifs qui transforment l'énergie de type continu fournie par le panneau ou le stockage en énergie de type alternatif (onduleurs).

**IV-2-1) Etude des Hacheurs :**

Le hacheur ou convertisseur continu - continu est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue [21].

On peut imaginer un grand nombre de dispositifs électroniques réalisant cette fonction. On se contentera ici d'indiquer les types de montages les plus utilisés :

**IV-2-1-1) Hacheur série :**

Ce hacheur est aussi appelé hacheur abaisseur de tension ou dévolteur. Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée (tension aux bornes de la cellule photovoltaïque). Il comporte un interrupteur  $K$  à amorçage et à blocage commandés et un interrupteur à blocage et amorçage spontanés (diode) [22].

Actuellement, le composant qui assure le hachage est ordinairement un IGBT ou un MOSFET de puissance. Ce composant est conducteur pendant une durée  $T_{on}$  et bloqué pendant le reste de la période  $T$ . On définit le rapport cyclique  $\alpha$  tel que :  $\alpha = T_{on} / T$

C'est en réglant ce rapport cyclique que le contrôleur peut agir sur le convertisseur.

Le schéma de principe d'un hacheur Buck est donné par la (Figure IV-1):

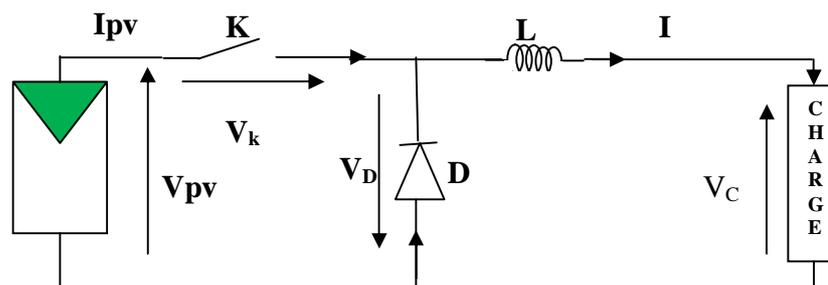


Figure IV-1: Schéma de montage d'un hacheur série [23]

**1. Principe de fonctionnement :**

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage  $T$  ( $T=1/f$ ), comporte deux étapes. Lors de la première, on rend l'interrupteur  $K$  passant et la diode polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de  $0$  à  $\alpha.T$ , avec  $\alpha$  est appelé rapport cyclique compris entre  $0$  et  $1$ . Lors de la seconde, on bloque l'interrupteur  $K$ . La diode devient passante. Cette phase dure de  $\alpha T$  à  $T$ . [23]

### 2. Equations régissent le circuit:

Le montage le plus simple consiste à mettre périodiquement en conduction l'inductance  $L$  pendant une durée  $t = \alpha T$  bien déterminée ; cette mise en conduction est assurée par un hacheur branché en série avec la charge [23].

$$0 < t < \alpha T : K \text{ fermé} \Rightarrow V_K = 0$$

$$V_D = -V_{PV} \Rightarrow D \text{ bloquée} \quad (\text{IV-1})$$

$$V_C = V_{PV} - V_L \quad (\text{IV-2})$$

$$V_C = V_{PV} - L \frac{di}{dt} \quad (\text{IV-3})$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_{PV} - V_C}{L} \quad (\text{IV-4})$$

$$\text{Avec : } V_C = \alpha V_{PV} \quad (\text{IV-5})$$

$$i(t) = \frac{(1-\alpha)V_{PV}}{L} t + I_{\min} \quad (\text{IV-6})$$

$$\alpha T < t < T : K \text{ ouvert} \Rightarrow D \text{ conduit} \Rightarrow V_D = 0$$

$$V_C = \alpha V_{PV} \text{ (en régime permanent)} \quad (\text{IV-7})$$

$$V_C = -L \frac{di}{dt} \quad (\text{IV-8})$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{-\alpha V_{PV}}{L} \quad (\text{IV-9})$$

$$i(t) = \frac{-\alpha V_{PV}}{L} t + I_{\max} \quad (\text{IV-10})$$

### 3. Avantages et inconvénients du hacheur série:

Ce convertisseur a l'avantage d'une ondulation du courant de charge limité par l'inductance  $L$ . En outre, dans le cas d'une installation photovoltaïque, il permet d'annuler le courant par blocage du transistor lorsque la charge n'est pas en état d'être alimentée.

Cependant, le courant d'entrée est discontinu, un filtre d'entrée est donc normalement requis tout particulièrement dans le cas d'un système (PV). Il nécessite un circuit de protection contre le cas de court-circuit de la diode. En fin, dans le cas d'un système (PV), il ne peut fonctionner

lorsque la tension du générateur (PV) est inférieure à la tension de la charge de sorte que l'énergie reçue pendant les périodes à faible éclairement est perdue [24].

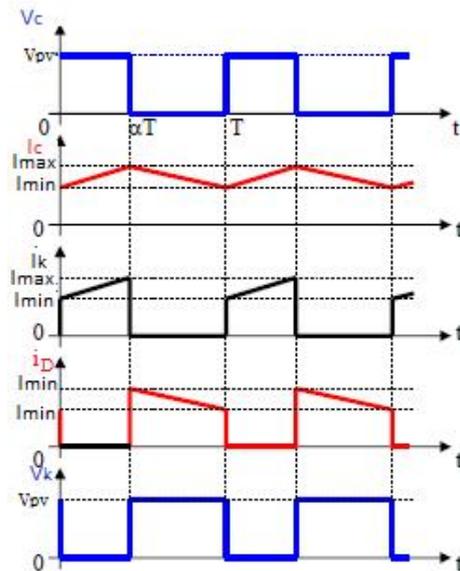


Figure IV-2: signaux typiques de convertisseur abaisseur.-

IV-2-1-2) Hacheur parallèle :

Le hacheur parallèle est aussi appelé hacheur survolteur ou élévateur de tension. Dans ce hacheur, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée (tension aux bornes de la cellule photovoltaïque), d'où son nom. Cette structure demande un interrupteur K commandé à l'amorçage et au blocage (transistor bipolaire, transistor MOS, IGBT...) et une diode (amorçage et blocage spontanés).

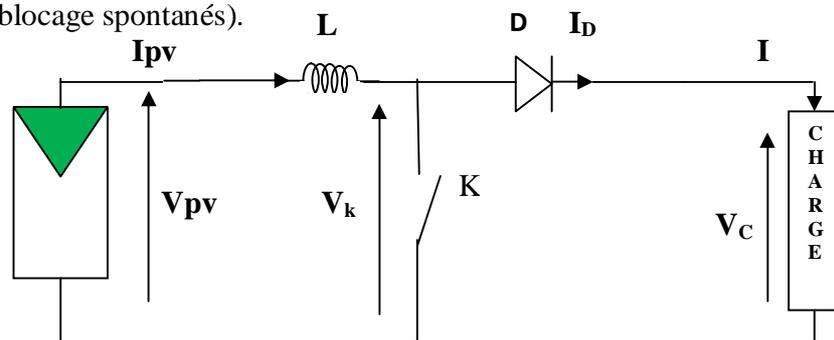


Figure IV-3 : Structure d'un hacheur Boost.

1. Principe de fonctionnement :

Lors de la première partie du cycle de fonctionnement, de 0 à  $\alpha T$ , l'interrupteur commandé est fermé (passant). Cette fois, la source et la charge ne sont pas en contact durant cette phase. La diode est alors bloquée.

Lors de la seconde partie du cycle, de  $\alpha T$  à  $T$ , on ouvre l'interrupteur commandé et la diode devient passante. C'est alors que la source et la charge sont reliées.

## 2. Equations régissent le circuit :

Le montage le plus simple consiste à mettre périodiquement en court-circuit l'inductance  $L$  pendant une durée  $t = \alpha T$  bien déterminée ; cette mise en court-circuit est assurée par un hacheur branché en parallèle avec la charge (une résistance par exemple). [23]

Dans la seconde partie la diode est conductrice la charge est alimentée.

$0 < t < \alpha T$  : K fermé  $\Rightarrow V_K = 0$ , D bloquée

$$V_{PV} = V_L = L \frac{di}{dt} \quad (\text{VI-11})$$

$$\frac{di}{dt} = V_{PV} \Rightarrow i(t) = \frac{V_{PV}}{L} t + I_{\min} \quad (\text{IV-16})$$

$$V_C = 0 \quad (\text{IV-17})$$

$\alpha T < t < T$  : K ouvert  $\Rightarrow$  D conduit ( $V_D = 0$ )

$$V_{PV} = V_C + L \frac{di}{dt} \quad (\text{IV-18})$$

$$\text{avec : } V_C = \frac{V_{PV}}{1-\alpha} \quad (\text{IV-19})$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_{PV} - V_C}{L} = \frac{-\alpha V_{PV}}{L(1-\alpha)} \quad (\text{IV-20})$$

$$i(t) = \frac{-\alpha V_{PV}}{L(1-\alpha)} t + I_{\max} \quad (\text{IV-21})$$

## 3. Avantages et inconvénients du convertisseur « Boost » :

Ce convertisseur a l'avantage d'une ondulation du courant d'entrée limitée par l'inductance  $L$ . Il peut fonctionner même avec une tension d'entrée faible, ce qui dans le cas d'une installation PV permet récupérer le peu d'énergie disponible lors des périodes à faible éclaircissement. Si la tension à vide du générateur PV devient supérieur à la tension de la charge, il n'est plus possible

d'annuler le courant en bloquant l'interrupteur K, mais il reste la possibilité d'annuler le courant de sortie en rendant l'interrupteur conducteur en permanence ( $\alpha=1$ ), ce qui revient à court-circuiter le générateur PV.

Un court-circuit de l'interrupteur n'a pour effet que de court-circuiter le générateur PV, ce qui ne conduit pas à une situation dangereuse. Il faut par contre prévoir un circuit de protection contre le cas de court-circuit de la diode. [24]

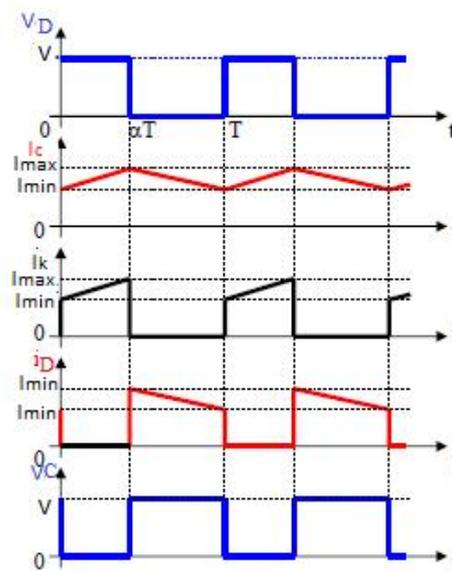


Figure IV.3: signaux typiques de convertisseur boost

**IV-2-1-3) Hacheur Buck-Boost :**

Un convertisseur Buck- Boost convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur.

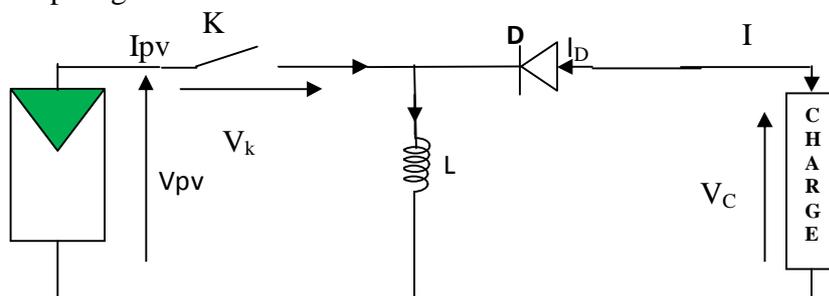


Figure IV-5: Structure d'un hacheur Buck-Boost

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck-Boost peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur K (voir la figure IV-5) :

Dans l'état passant, l'interrupteur K est fermé, conduisant ainsi à une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance.

Dans l'état bloqué, l'interrupteur K est ouvert. L'inductance est reliée à la charge et à la capacité. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité et la charge. [25]

#### **IV-2-2) Etude des onduleurs :**

##### **IV-2-2-1) Concept :**

Les charges alimentées en courant alternatif nécessitent donc un convertisseur de type continu/alternatif (DC/AC) adapté à leurs caractéristiques. Ce convertisseur transforme en énergies électrique alternative, une énergie de type continu provenant soit de la batterie d'accumulation, soit directement du générateur photovoltaïque via le dispositif de régulation de contrôle. [26]

Les convertisseurs DC/AC ont essentiellement des structures en pont constituées d'interrupteurs électroniques tel que les transistors de puissance (IGBT) ou thyristor. [27]

Les trois principaux éléments qui constituent un onduleur sont les suivants [28] :

- ü Source de tension continue (par exemple: batterie)
- ü Convertisseur DC/AC
- ü Filtre LC.

Il existe deux catégories d'onduleurs : les onduleurs autonomes et les onduleurs non autonomes (onduleur pour réseau) :

##### **a) Onduleur autonome :**

C'est un système qui nécessite des composants commandés à la fois à la fermeture et à l'ouverture, de fréquence variable, dont les instants de commutations sont imposés par des circuits externes. La Charge est quelconque [29].

##### **b) Onduleurs pour le réseau :**

Etant connecté directement sur le champ PV, leur tension et leur courant d'entrée sont donc très variables avec les conditions d'ensoleillement et de température ambiante.

L'une des fonctions importantes de l'onduleur réseau est donc la recherche du point de puissance maximum -à-dire l'adaptation permanente de l'impédance d'entrée afin d'optimiser, à chaque instant, le produit  $P_{OPT} = V_{OPT}.I_{OPT}$  sur la caractéristique du champ PV [30].

#### IV-2-2-2) Raccordement de générateurs photovoltaïques au réseau basse tension :

Il existe deux types de structures de systèmes photovoltaïques raccordés au réseau :

- **Les systèmes à connexions directe au réseau :** cette installation est constituée d'un générateur photovoltaïque qui est connecté à l'aide d'un onduleur au réseau électrique.

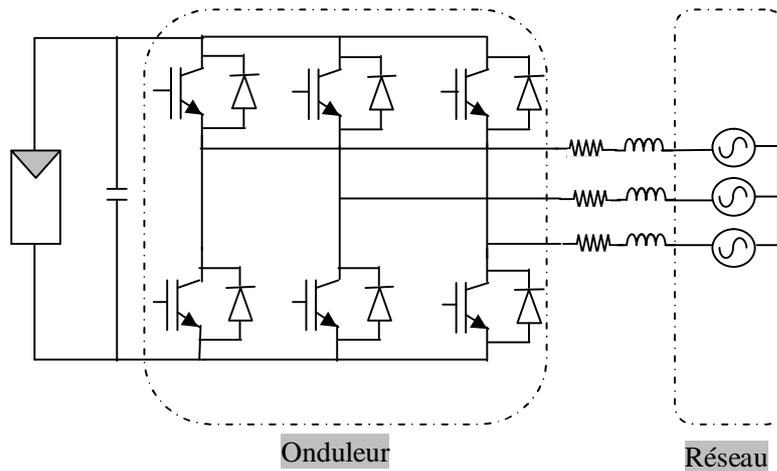


Figure IV-6 : système PV raccordé directement au réseau.

- **Le système à bus continu intermédiaire :** Le générateur photovoltaïque est connecté à un bus par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-continu. Un onduleur délivre une tension modulée. Celle-ci est filtrée pour réduire le taux d'harmonique (THD) on obtient alors en sortie de ce dispositif une tension utilisable pouvant être injectée dans le réseau. [6]

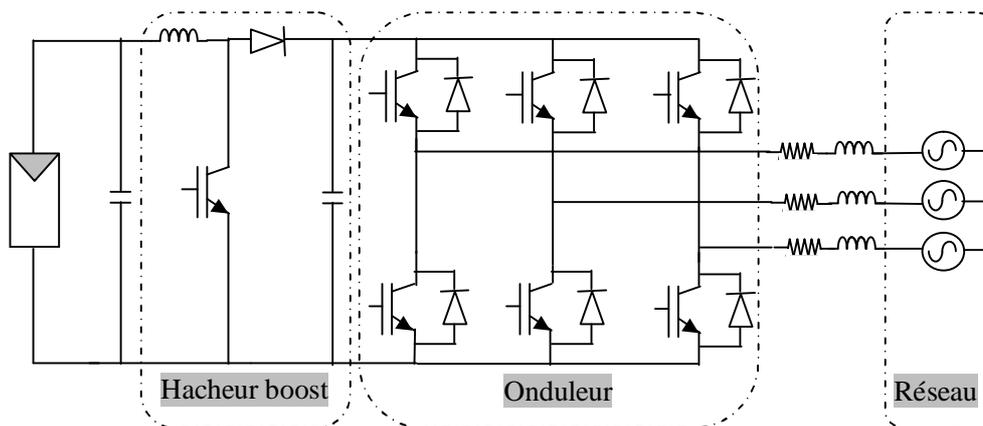


Figure IV-7 : système PV raccordé au réseau par bus intermédiaire.

### IV-2-2-3) Etude d'un onduleur triphasé :

L'onduleur triphasé dit à deux niveaux est illustré par son circuit de puissance de la Figure (IV-8). On distingue d'une part les tensions de branche  $V_{AN}$ ,  $V_{BN}$ ,  $V_{CN}$  mesurées par rapport à la borne négative de la tension continue  $V_{pv}$  des panneaux photovoltaïques, d'autre part, il y a les tensions de phases  $V_{An}$ ,  $V_{Bn}$  et  $V_{Cn}$  mesurées par rapport à un point neutre flottant  $n$  représentant une charge équilibrée montée en étoile. Des tensions simples on peut tirer facilement les tensions composées  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  et  $V_{CA}$

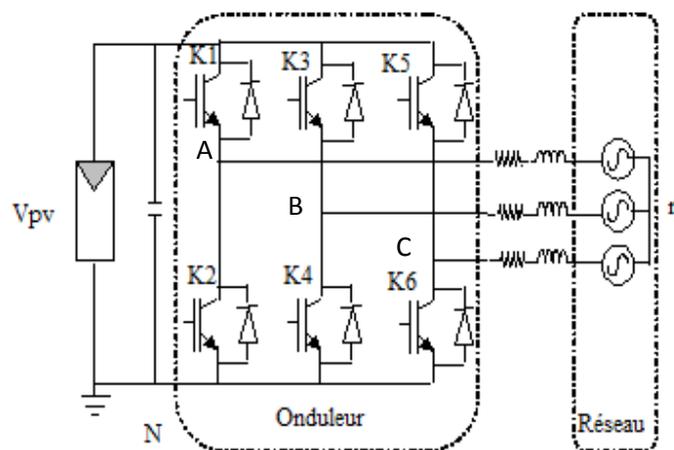


Figure IV-8 : Circuit de puissance d'un onduleur triphasé.

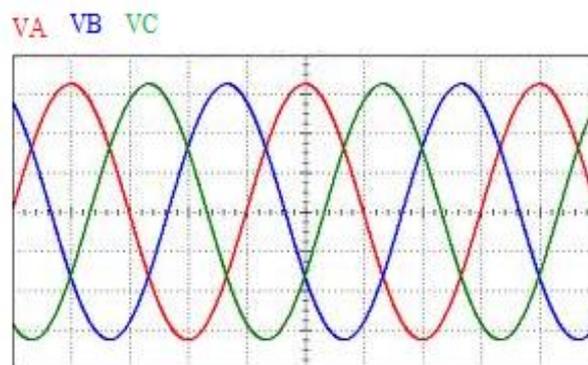


Figure IV-9 : Les tensions de sortie d'un onduleur.

#### IV-2-2-3-1) Paramètre de performance de l'onduleur :

Les sorties d'un onduleur (tension, courant) contiennent certaines harmoniques, et la qualité de l'énergie fournit par un onduleur est évaluée suivant les paramètres de performance suivant :

**a. Facteur de la n<sup>ième</sup> harmonique HF<sub>n</sub> :**

C'est la mesure de la contribution individuelle des harmoniques défini comme suit :

$$HF_n = \frac{V_{effn}}{V_{eff1}} \quad (IV-22)$$

V<sub>effn</sub> : Valeur efficace de la n<sup>ième</sup> harmonique ;

V<sub>eff1</sub> : Valeur efficace de la fondamentale.

**b. Facteur de distorsion DF :**

Les facteurs de distorsion de la tension simple et de la tension composée sont défini comme suit :

$$DF = \frac{1}{V_{eff1}} \left[ \sum_{n=2,3}^{\infty} \left( \frac{V_{effn}}{n^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (IV-23)$$

Le facteur de distorsion pour l'harmonique individuelle :

$$DF_n = \frac{V_{effn}}{V_{eff1} \times n^2} \quad (IV-24)$$

**c. Distorsion harmonique totale THD [31] :**

C'est la mesure de la similitude de la forme d'onde réelle avec sa composante fondamentale :

$$THD = \frac{1}{V_{eff1}} \left[ \sum_{n=2,3}^{\infty} (V_{effn})^2 \right]^{1/2} \quad (IV-25)$$

**d. Harmonique du plus bas ordre LOH :**

C'est l'harmonique ayant une fréquence proche de la fondamentale et son amplitude  $\geq 3\%$  de celle de la composante fondamentale.

**IV-2-2-3-2) Différents types de commande des onduleurs :**

Il existe plusieurs types de commandes, leur but est d'améliorer les formes des grandeurs de sortie des onduleurs tel que la tension et le courant, c'est-à-dire de les rendre plus sinusoïdales.

Parmi ces types de commandes on cite :

- La commande pleine onde ;
- La commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) en générale sinus-triangle.

### 1) Commande en pleine onde :

Dans la commande en pleine onde, on ferme les interrupteurs d'une branche de façon complémentaire pendant une demi période et en décalant la commande de chaque bras d'un tiers de la période ( $2\pi/3$ ). Par conséquent on obtient trois ondes carrées de tension décalées de  $2\pi/3$ , dont l'amplitude est égale à la tension continue, et de même période que la tension de réseau.

Cette commande a un inconvénient de générer un très grand nombre d'harmoniques de tension et de courant ; ceci gêne le transfert de l'énergie de la source à la charge, il ne permet pas aussi d'optimiser le fonctionnement des interrupteurs.

$$V_{AB} = \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} \frac{4V_{PV}}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \sin\left[n\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)\right] \quad (\text{IV-26})$$

$V_{BC}$  et  $V_{CA}$  sont décalées par rapport à  $V_{AB}$  de  $\frac{2\pi}{3}$  et  $\frac{4\pi}{3}$

$$V_{BC} = \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} \frac{4V_{PV}}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \sin\left[n\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)\right] \quad (\text{IV-27})$$

$$V_{CA} = \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} \frac{4V_{PV}}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \sin\left[n\left(\omega t + \frac{7\pi}{6}\right)\right] \quad (\text{IV-28})$$

Il est à remarquer qu'il n'y a pas d'harmoniques d'ordres 3, ni d'ordre égale à un multiple de 3 dans les tensions entre phases dans un système triphasé.

**-Valeur efficace de la tension composée :**

$$V_{\text{ceff}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times V_{\text{PV}} \quad (\text{IV-29})$$

**-Valeur efficace de la tension simple :**

$$V_{\text{Seff}} = \frac{V_c}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \times V_{\text{PV}} \quad (\text{IV-30})$$

## 2) La commande MLI :

La modulation de largeur d'impulsion (MLI), consiste à adapter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et à former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession des créneaux de largeur convenable.

La multiplication du nombre des impulsions formant chacune des alternances de la tension de sortie présente deux avantages importants :

- Elle repousse vers des fréquences plus élevées les harmoniques de la tension de sortie, ce qui facilite le filtrage.
- Elle permet de faire varier la valeur de fondamentale de la tension de sortie.

Si la référence est sinusoïdale, cette commande est caractérisée par deux paramètres qui sont :

- L'indice de modulation « m », égale au rapport de la fréquence de commutation sur la fréquence des grandeurs de sortie.
- Le coefficient de réglage en tension « r », égale au rapport de l'amplitude de la tension de référence sur la valeur crête de l'onde modulante [34].

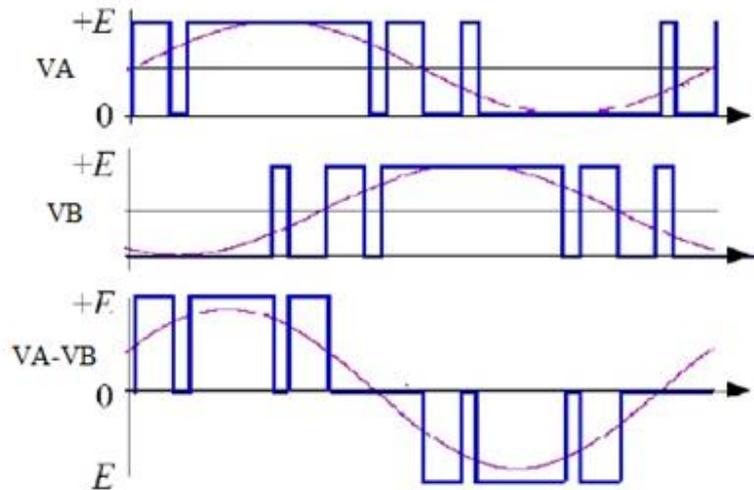


Figure IV-10 : Allures des tensions du l'onduleur triphasé

$$V_A = \frac{E}{2} + \frac{E}{2} \sin \omega t$$

$$V_B = \frac{E}{2} + \frac{E}{2} \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$V_A - V_B = \frac{E\sqrt{3}}{2} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{6} \right)$$

(IV - 31)

### IV-3) Topologies de champs :

Nous allons présenter dans la suite les architectures de champs PV permettant la connexion au réseau de distribution, en s'intéressant principalement à la fonction de base « conversion ».

#### IV-3-1) Convertisseurs raccordés au réseau :

##### IV-3-1-1) Onduleur central:

La topologie la plus ancienne et la plus classique est composée d'un seul onduleur réalisant l'interface entre le réseau et le champ photovoltaïque, où des chaînes de modules (ou "string") sont connectées en parallèle (Figure IV- 11). Ce montage est généralement utilisé pour des installations de grandes puissances dans lesquelles des protections anti-retour de courant sont implantées par rangée.

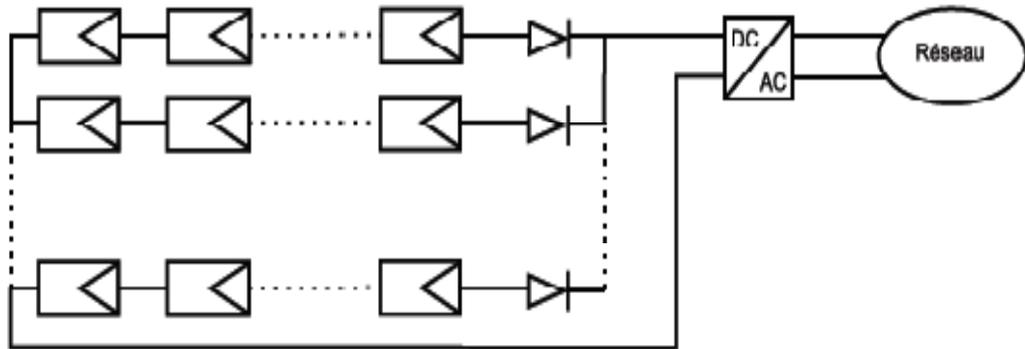


Figure IV-11 : La topologie «Onduleur central» [32]

L'avantage de la topologie « onduleur central » est sa simplicité de mise en œuvre : un seul onduleur connecté au champ photovoltaïque est nécessaire. De plus, l'onduleur central demande un faible coût d'investissement tout en permettant une maintenance simple. La simplicité du montage permet également un meilleur rendement de la conversion de la tension.

Par contre, ce montage présente plusieurs défauts :

- Pertes de conversion solaire (un seul MPPT pour un ensemble de modules).
- Aucune continuité de service en cas de panne de l'onduleur.

Malgré les nombreux défauts de cette configuration, cette solution reste très employée dans les centrales PV au sol de forte puissance [32].

#### IV-3-1-2) Onduleur string 'rangée':

C'est l'onduleur le plus utilisé. Un certain nombre de modules sont connectés en série, pour chacune des séries de ce genre est connecté un seul onduleur. C'est ainsi qu'en cas d'ombrage partiel des modules, il n'y a de perte que pour la rangée ombragée. L'emploi de diode by-pass est nécessaire. On peut utiliser un seul et même onduleur string pour des installations jusqu'à 3KW de puissance. Pour des puissances plus importantes, il est parfaitement possible de connecter plusieurs onduleurs string en parallèle, côté courant alternatif.

L'intérêt dans ce concept est d'utiliser un plus grand nombre d'onduleurs du même type. Cela réduit les coûts de production et apporte un intérêt supplémentaire : si un onduleur tombe en panne, la production de la seule rangée concernée est défaillante [33].

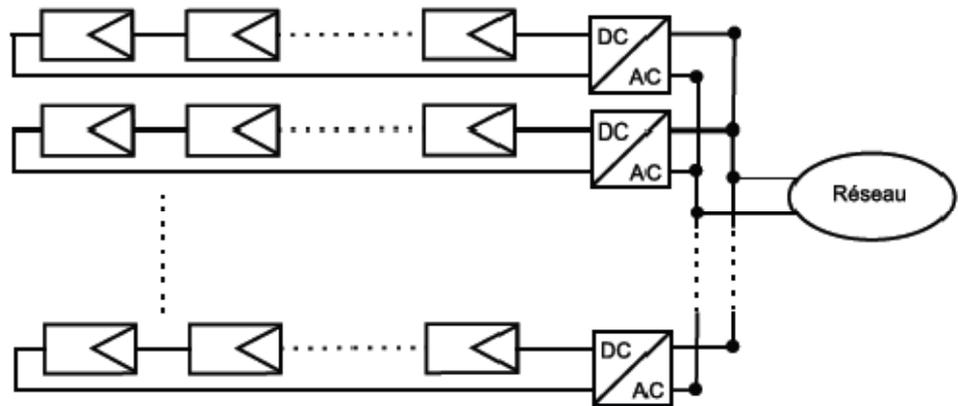


Figure IV-12 : La topologie «Onduleur string» [32].

#### IV-3-1-3) Hacheur modulaire parallèle :

Une évolution de la topologie hacheur « rangée » est la topologie hacheur modulaire parallèle présentée sur la (Figure IV-13). Le hacheur n'est plus connecté à une chaîne de modules PV mais directement à la sortie du module PV. Cette évolution garde tous les avantages du hacheur « rangée », tout en augmentant le niveau de discrétisation du MPPT. Ainsi ce n'est plus une chaîne de modules PV qui fonctionne à son MPPT mais chaque module PV. Un gain de productivité est donc à attendre par rapport au hacheur « rangée ». De plus, cette discrétisation plus importante permet une surveillance plus fine et une détection des défauts plus rapide.

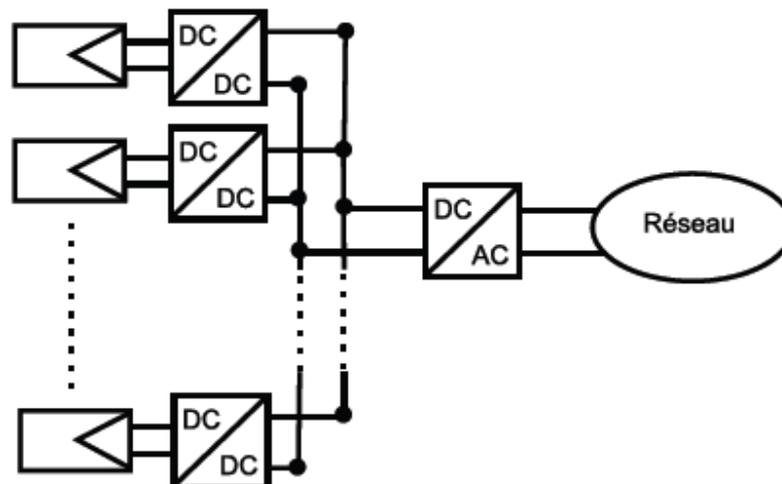
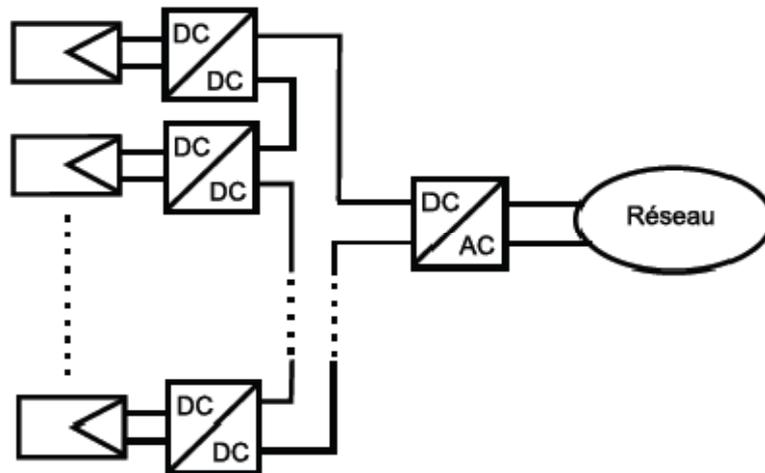


Figure IV-13 : La topologie « hacheur modulaire parallèle ».

**IV-3-1-4) Hacheur modulaire série :**

Une des solutions pour diminuer le rapport d'élévation des hacheurs nécessaires à la topologie hacheur modulaire parallèle est de mettre la sortie des hacheurs en série. Ainsi le rapport d'élévation est d'autant diminué que le nombre de hacheurs en série est augmenté. Cette topologie dénommée hacheur modulaire série est présentée sur la (Figure IV-14).



**Figure IV-14: La topologie « hacheur modulaire série »**

Cette topologie garde tous les avantages de la topologie précédente tout en diminuant le rapport d'élévation des hacheurs et permet ainsi d'augmenter le rendement. En revanche, la mise en série des hacheurs implique une dépendance des points de fonctionnement des uns par rapport aux autres.

**IV-3-2) Convertisseur autonome :****IV-3-2-1) Onduleur à onde sinusoïdale- chargeur :**

Les onduleurs modernes sinusoïdaux pour installations indépendantes utilisent les mêmes techniques que celles développées pour la liaison au réseau. Les circuits sont plus simples à mettre en œuvre, les protections et la synchronisation au réseau n'existant pas.

Pour alimenter une habitation autonome, le système choisi est souvent hybride et incorpore une génératrice diesel auxiliaire qui suppléera aux manques de soleil et variations de saison [20].

**IV-3-2-2) Onduleur à onde carrée :**

C'est la technique la plus simple et la plus ancienne pour générer une onde alternative. Dans ce cas en commande deux transistors dans le primaire d'un transformateur par un oscillateur de 50Hz. S'il est parfaitement carré, le signal généré va produire une somme d'harmoniques impaire qui ne pourront souvent pas alimenter sans problème des charges inductives. Les appareils utilisant cette technique n'ont pas de réglage de la tension de sortie : celle-ci va donc varié avec la charge et la tension d'entrée. Actuellement, le choix d'utiliser un onduleur à onde carrée ne se justifie que si le récepteur fonctionne parfaitement avec cette onde [43].

**IV-3-2-3) Onduleur à onde pseudo-sinusoïdale :**

Le signal produit est un double carré (positif et négatif) avec passage par zéro. Le passage par zéro à chaque commutation réduit les harmoniques part rapport au signal carré pur. Le carré de largeur variable en fonction de la charge et de la tension d'entée permet un ajustage précis de la tension de sortie. Cette impulsion de largeur variable permet également de faire fonctionner l'onduleur à tension de sortie plus faible en mode d'attente à faible consommation dès qu'un appareil est branché, le circuit détecte une augmentation de consommation et fait fonctionner l'onduleur [20].

**IV-4) Les filtres passifs :****IV-4-1) Définition :**

Le filtre est un quadripôle linéaire qui ne laisse passer que certaines composantes fréquentiels de signal appliqué à l'entrée.

Le domaine de fréquence ou le signal passe est délimité par les fréquences de coupures, on l'appelle la bande passante de filtre.

Si un filtre n'est constitué qu'avec des éléments passifs linéaires RLC, on dit qu'il est un filtre passif, et s'il contient des éléments actifs, on dit qu'il est actif.

**IV-4-2) Fonction de transfert d'un filtre :**

On définit la fonction de transfert complexe d'un quadripôle par :

$$F(j\omega) = \frac{v_s}{v_e} = |F(\omega)|e^{j\varphi(\omega)} \quad (\text{IV-32})$$

Avec :  $|F(w)| = \left| \frac{v_s}{v_e} \right|$  est le gain de quadripôle.

$\varphi(w) = \varphi_s(w) - \varphi_e(w)$  est la phase de la fonction.

#### IV-4-3) La fréquence de coupure :

La fréquence de coupure d'un filtre est défini comme étant la fréquence pour la quelle le module de la fonction de transfert, égale sa valeur efficace.

$$|F(w)_c| = \frac{|F(w)|_{max}}{\sqrt{2}} \quad (IV-33)$$

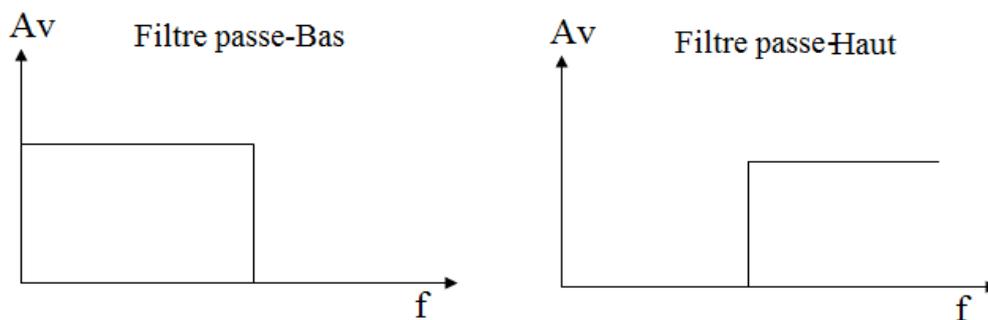
#### IV-4-3) Les types de filtres :

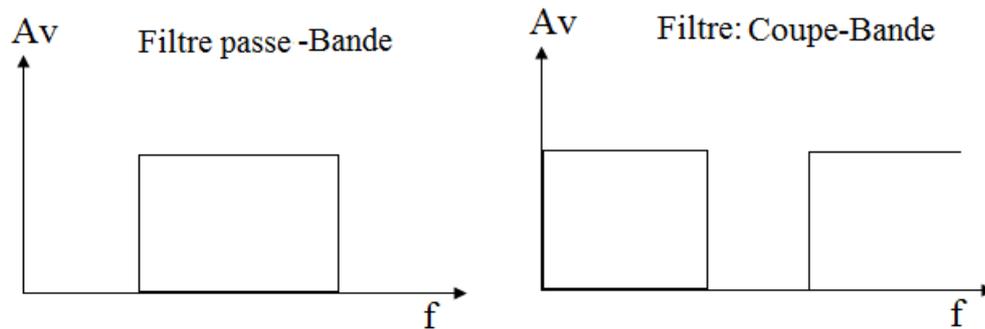
Un filtre passe bas ne laisse passer que les composantes fréquentiels inférieures ou égales à la fréquence de coupure de filtre, et atténue les fréquences supérieures.

Un filtre passe haut ne laisse passer que les composantes fréquentiels supérieures ou égales à la fréquence de coupure de filtre, et atténue les fréquences inférieures.

Un filtre passe bande ne laisse passer que les composantes fréquentiels appartenant à la bande de fréquences comprise entre la fréquence de coupure basse et la fréquence de coupure haute de filtre.

Un filtre coupe bande atténue les composantes fréquentiels appartenant à la bande de fréquences, compris entre la fréquence de coupure basse et la fréquence de coupure haute de filtre.





#### VI-5) Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié divers convertisseurs statiques utilisés dans un système photovoltaïque, que ce soit DC/DC pour l'alimentation d'une charge continue ou bien la charge d'une batterie, ou DC/AC pour la connexion au réseau ou bien alimenter une charge en alternatif. Nous avons étudié aussi les différentes topologies des onduleurs utilisés dans le domaine de photovoltaïque. Enfin nous avons vu le filtrage passif utilisé pour atténuer les harmoniques dans la connexion d'un onduleur au réseau électrique.

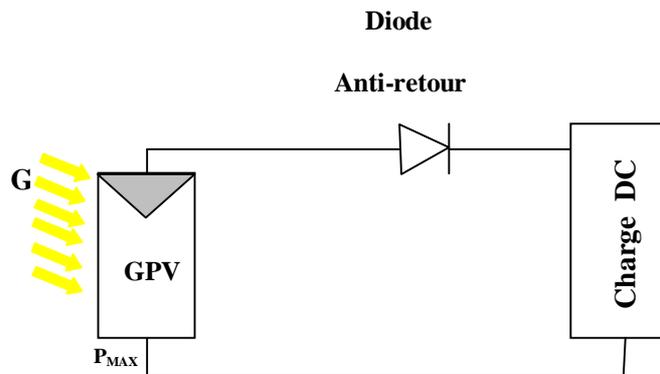
**V-1) Introduction :**

L'énergie photovoltaïque est une source utilisée pour différentes applications, la conception et la réalisation des systèmes PV sont nécessaires et posent actuellement de nombreux problèmes [64]. Il convient donc de dimensionner les différents composants pour maximiser le rendement global de l'installation [65].

La plupart des applications photovoltaïques sont suivies d'un étage d'adaptation associé à une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), dans le but de transférer en permanence la puissance maximale produite par le générateur photovoltaïque (GPV) à la charge. Selon le type de charge utilisée, l'étage, d'adaptation insérée dans la chaîne de conversion peut être, soit un convertisseur statique DC-DC pour une batterie, soit un convertisseur DC-AC pour la connexion réseau [66].

**V-2) Connexion directe entre la source et la charge :**

La connexion directe du panneau solaire photovoltaïque à une charge reste actuellement le principe de fonctionnement le plus répandu, (Figure V.1), le point de fonctionnement du GPV dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté.



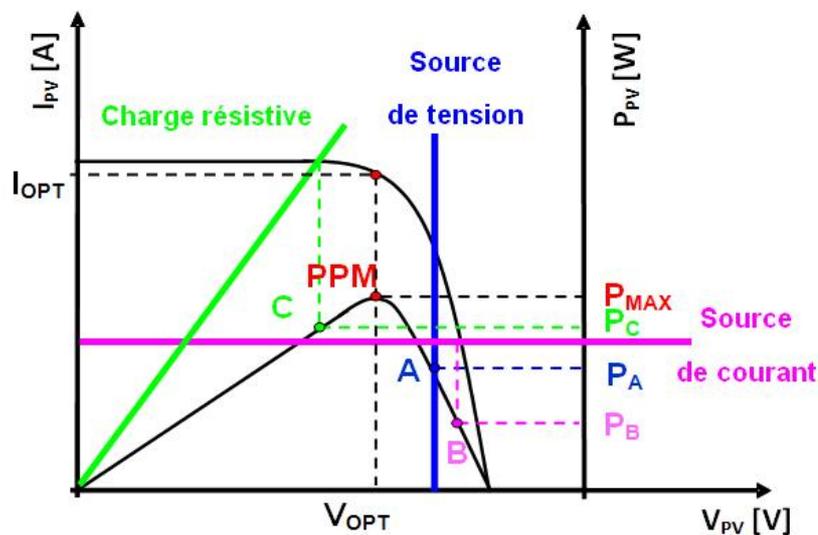
**Figure V.1 : Principe d'une connexion directe entre un GPV et une charge.**

L'inconvénient majeur de cette connexion est sa dépendance directe entre la puissance fournie par le générateur et la charge. En fait, la puissance fournie par le module photovoltaïque résulte de l'intersection entre la caractéristique  $I(V)$  du GPV et celle de la charge. Cependant, cette configuration n'offre aucun type de limitation et de réglage de la tension de la charge. Ce qui la restreint à des applications nécessitant une tension fixe ou faiblement variable. Généralement, la puissance extraite d'un GPV connectée directement à une application est souvent très éloignée du maximum de puissance que peut délivrer le GPV [67].

Trois types de charges DC typiques existent : une charge purement résistive, une charge de type source de tension et une charge de type source de courant. Sur la figure V-2, nous avons représenté les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  d'un GPV ainsi que les caractéristiques  $I(V)$  des trois types de charges.

Tout d'abord, nous pouvons identifier le point de fonctionnement où la puissance fournie par le générateur est maximale ( $P_{MAX}$ ) pour un courant optimal ( $I_{OPT}$ ) et une tension optimale ( $V_{OPT}$ ), point nommé PPM. Ensuite, nous pouvons trouver le point d'intersection entre les caractéristiques  $I(V)$  du générateur et celles des trois types de charges [42]:

- point A pour une charge de type source de tension ;
- point B pour une charge de type source de courant ;
- point C pour une charge résistive.



**Figure V.2 : Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de la charge. [42]**

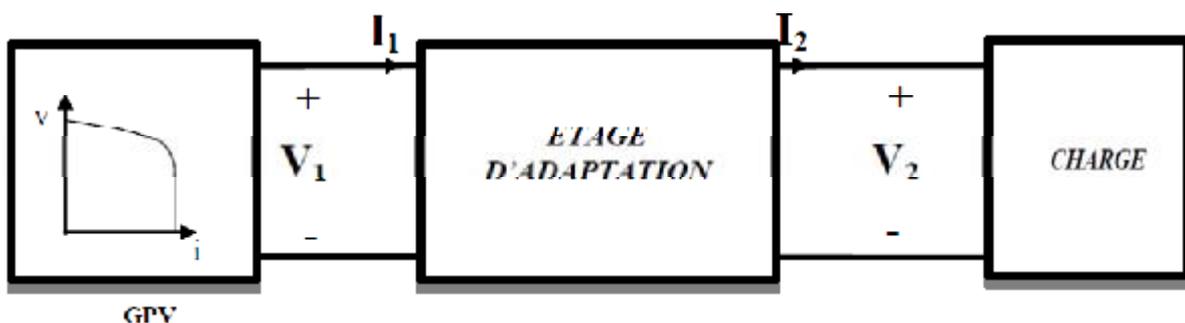
Pour ces trois points, la puissance fournie par le générateur est respectivement  $P_A$ ,  $P_B$  et  $P_C$ , que comme l'illustre la figure V-2 correspondant à des valeurs de puissance inférieures à la puissance maximale disponible  $P_{MAX}$ . Donc, une perte d'une partie de la puissance délivrable aux bornes du générateur PV implique des pertes de production énergétiques importantes.

D'autre part, certains types de charges ont besoin de tensions et courants alternatifs. La connexion directe n'est alors pas possible car le GPV fournit un courant continu [6].

### V-3) Définition de l'étage d'adaptation entre une source et une charge :

Comme nous l'avons vu précédemment, un GPV présente des caractéristiques  $I(V)$  non linéaires avec des PPM. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance maximale du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe [67,66].

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme le montre la figure(V.3). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de  $P_{MAX}$  disponible. Pour cela, il suffit d'effectuer un choix sur l'étage d'adaptation selon ses propriétés de conversion de puissance et la présence d'au moins un degré de liberté lui permettant d'adapter les tensions et les courants autant en valeur qu'en forme entre son port d'entrée et son port de sortie pour respecter au mieux les contraintes d'une part du GPV et d'autre part, de la charge. L'électronique de puissance largement utilisée dans divers domaines de la conversion d'énergie offre plusieurs solutions potentielles sous forme de convertisseurs statiques [6,42].



**Figure V.3 : Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de  $P_{MAX}$  du GPV.**

En résumé, selon l'application et le degré d'optimisation de production souhaités, l'étage d'adaptation entre le GPV et la charge peut être constitué d'un ou plusieurs convertisseurs statiques et permet d'assurer les fonctions suivantes [67] :

- adapter les niveaux de tensions entre la source et la charge dans de grandes proportions si nécessaire (convertisseur Buck, Boost,...),

- connecter une charge avec des besoins d'alimentation de type alternative (onduleur)

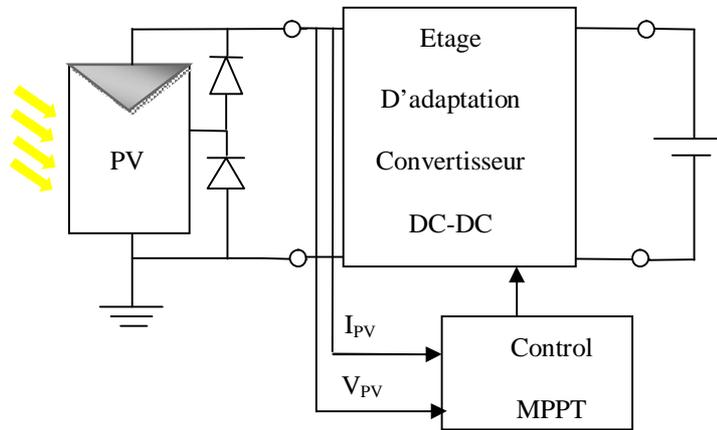
L'introduction d'un étage d'adaptation permettant de fixer le point de fonctionnement du GPV indépendamment de celui de la charge, permet l'extraction de la puissance optimale. L'ensemble peut fonctionner de façon idéale, si diverses boucles de contrôle en entrée et en sortie de l'étage d'adaptation sont prévues. En entrée, elles garantissent l'extraction à chaque instant, du maximum de puissance disponible aux bornes du GPV. Et en sortie, des boucles de contrôle spécifiques permettent un fonctionnement optimal de chaque application dans son mode le plus approprié. Les techniques utilisées classiquement pour les boucles de contrôle en entrée consistent à associer à l'étage d'adaptation une commande appelée MPPT qui effectue une recherche permanente du PPM [9, 10].

Cependant, en pratique, pour que l'étage d'adaptation joue le rôle d'interface idéale (sans pertes) entre les deux éléments, plusieurs conditions sont à respecter :

- le type d'action de contrôle sur le port d'entrée ne doit pas générer des pertes en régime statique ou transitoire,
- le transfert de la puissance du GPV ne doit pas être minimisé par les diverses pertes liées au fonctionnement de l'étage d'adaptation.

#### **V-4) Principe de la recherche du point de puissance maximal :**

La figure (V.4) représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT. Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC est choisie, la commande MPPT est nécessairement associée à un quadripôle possédant des degrés de liberté qui permettent de pouvoir faire une adaptation entre le GPV et la charge. Dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV corresponde à la puissance maximale ( $P_{MAX}$ ) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge.



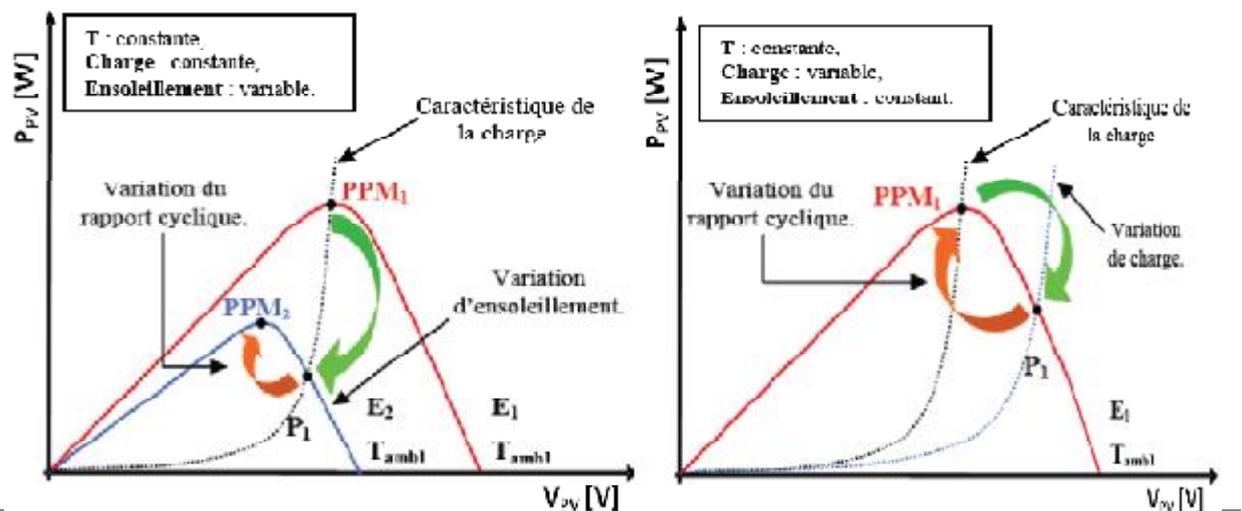
**Figure V.4 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.**

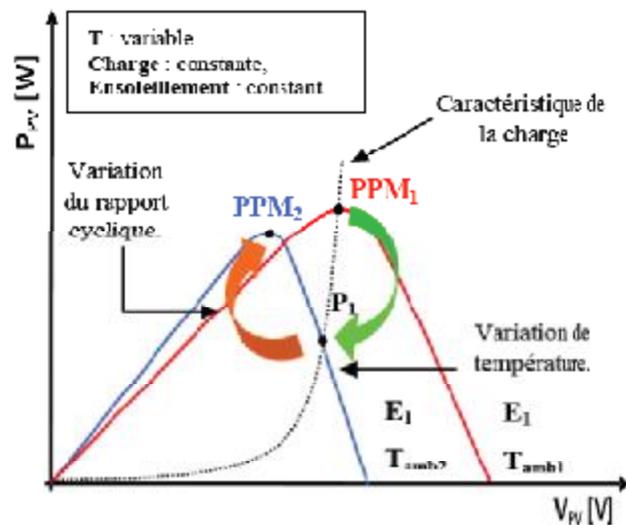
La technique de contrôle utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.

La figure (V.5) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal  $PPM_1$  vers un nouveau point  $P_1$  de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum  $PPM_2$ .

Pour une variation de charge (cas b), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.

Dans une moindre mesure, un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c).





**Figure V.5 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal**

- a) suite à une variation d'ensoleillement,
- b) suite à une variation de charge,
- c) suite à une variation de température [70]

### V-5) Les différents types de MPPT solaires photovoltaïques :

La classification, d'une manière générale des commandes MPPT est faite selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT. Bien qu'il existe un grand nombre de publications scientifiques qui présentent des commandes MPPT plus ou moins complexes [48].

#### V-5-1) Les commandes MPPT destinées aux applications spatiales :

Dans les premières MPPT créées dans les années 1970, l'algorithme mis en œuvre était relativement simple, étant données les capacités des microcontrôleurs disponibles à cette époque et les principales applications, destinées alors au spatial. Appliquée au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F. Boehringer. La commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM). Ce dernier peut être implanté entièrement en numérique. Il consiste à calculer la puissance à l'instant  $t_i$  à partir des mesures de  $I_{PV}$  et  $V_{PV}$ , et de la comparer à celle stockée en mémoire, correspondant à l'instant  $t_{i-1}$ . De là, un nouveau rapport cyclique  $D$  est calculé et est appliqué au convertisseur statique [68].

L'ensoleillement dans les applications spatiales présente un comportement prévisible, contrairement aux applications terrestres, soumises aux heures du jour et aux données météorologiques. Pour cela, un certain nombre de simplifications sur l'évaluation de la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque peuvent être faites [68].

#### **V-5-2) Structure de la commande MPPT analogique :**

Cette commande MPPT analogique utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

L'implantation de cette commande ne fait intervenir que des composants analogiques et logiques sans aucun calcul ne soit nécessaire.

La conception de cette commande est indépendante de la structure du convertisseur statique utilisé ; elle peut s'appliquer aussi bien à des convertisseurs abaisseurs qu'à des élévateurs [71].

#### **V-5-3) Les Commandes MPPT numériques performantes :**

La plupart des commandes MPPT récentes sont de type numérique, elles sont basées sur la mesure des tensions de sortie et d'entrée d'un hacheur. Ainsi, connaissant le comportement du convertisseur statique, on en déduit la valeur du rapport cyclique qui permet de faire la meilleure adaptation source-charge. Ce type de commande simple est ainsi valable à basse fréquence et puissance élevée. Mais, lorsque la fréquence du système de conversion de puissance augmente, les erreurs faites sur le rapport cyclique, pouvant être importantes, entraînent des pertes en rendement importantes.

#### **V-6) Les méthodes de recherche des points du maximum de puissance (MPPT) :**

Plusieurs algorithmes permettant la recherche des points de maximum de puissance sont présentés dans la littérature. On cite : la méthode de perturbation et observation (P&O) , la méthode de la conductance incrémentale (IncCond) et Hill-Climbing. D'autres récentes méthodes existent aussi et utilisent l'intelligence artificielle : les réseaux de neurones, la logique floue, les algorithmes génétiques, etc [72].

#### **V-6-1) La méthode Perturb & Observe (P&O) :**

La méthode Perturb & Observe (P&O) est l'une des méthodes les plus utilisées permettant d'obtenir le PPM : on mesure les caractéristiques du panneau PV puis on induit

une petite perturbation sur la tension (ou le courant) afin d'analyser la variation de puissance qui en résulte [69].

Le principe de cette commande consiste à perturber la tension  $V_{PV}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{PV}$  qui en résulte [73].

Ainsi, comme l'illustre la figure V-6, on peut déduire :

Le point maximum est atteint lorsque  $dP_{pv} / dV_{pv} = 0$ . [41]

Une incrémentation positive de la tension  $V_{PV}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{PV}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

Une incrémentation négative de la tension  $V_{PV}$  engendre un décroissement de la puissance  $P_{PV}$ , cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît.

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P_{PV}(V_{PV})$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié [42].

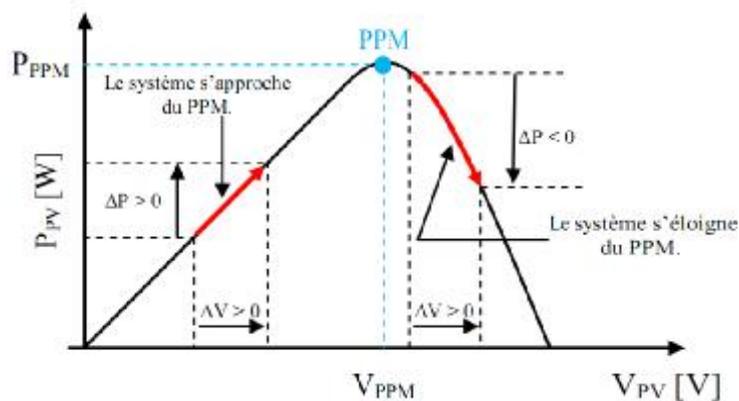


Figure V.6 : Caractéristique  $P_{PV}(V_{PV})$  d'un panneau solaire [69]

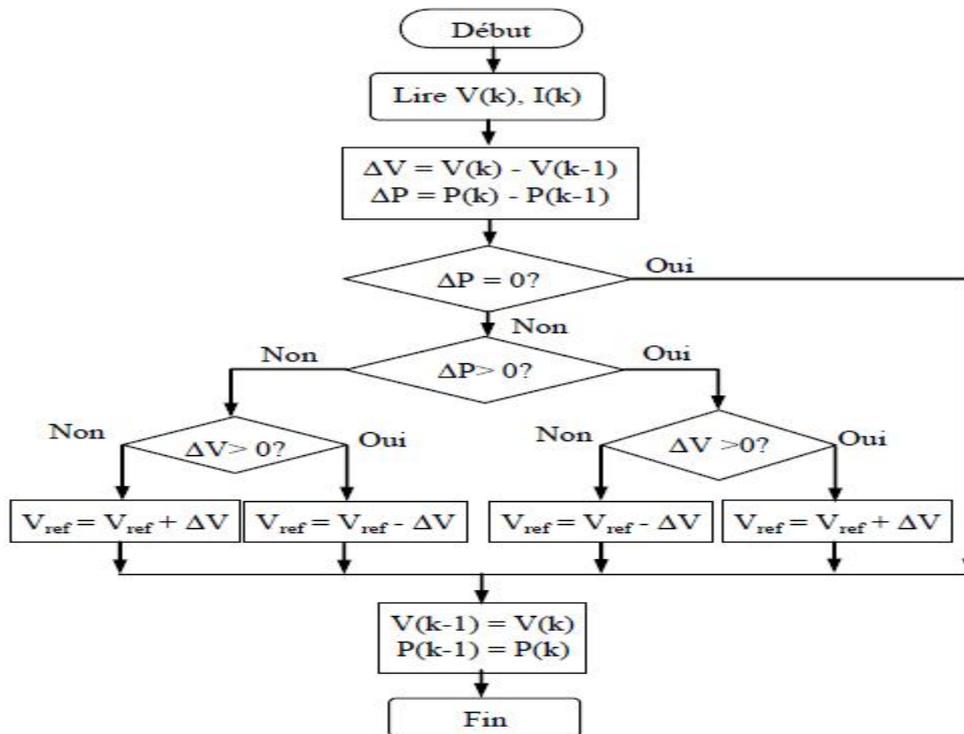


Figure V.7 : Organigramme Perturb end Observe

La méthode P&O est largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. En effet, il arrive que P&O ne permette pas d'atteindre le maximum de puissance en cas de fluctuation très rapide de l'ensoleillement[74]. Il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser [42].

#### V-6-2) La méthode **Incrément de conductance** :

La recherche du PPM, de cette technique est basé sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM. La méthode d'incrément de la conductance a été proposée pour éviter les inconvénients de la méthode P&O de recherche du MPPT [23]. Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous :

$$G = \frac{I_{PV}}{V_{PV}} \quad (V-1)$$

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

$$dG = \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (V-2)$$

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 [23].

La figure (V-6) permet d'écrire l'ensemble d'équations suivantes :

-Si  $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} > 0$ , le point de fonctionnement est à gauche du PPM,

-Si  $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0$ , le point de fonctionnement est sur le PPM,

-Si  $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} < 0$ , le point de fonctionnement est sur la droite du PPM.

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(I_{PV} \cdot V_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \cong I_{PV} + V_{PV} \frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} = 0 \quad \text{au PPM} \quad (V-3)$$

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(I_{PV} \cdot V_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \cong I_{PV} + V_{PV} \frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} > 0 \quad \text{à gauche du PPM} \quad (V-4)$$

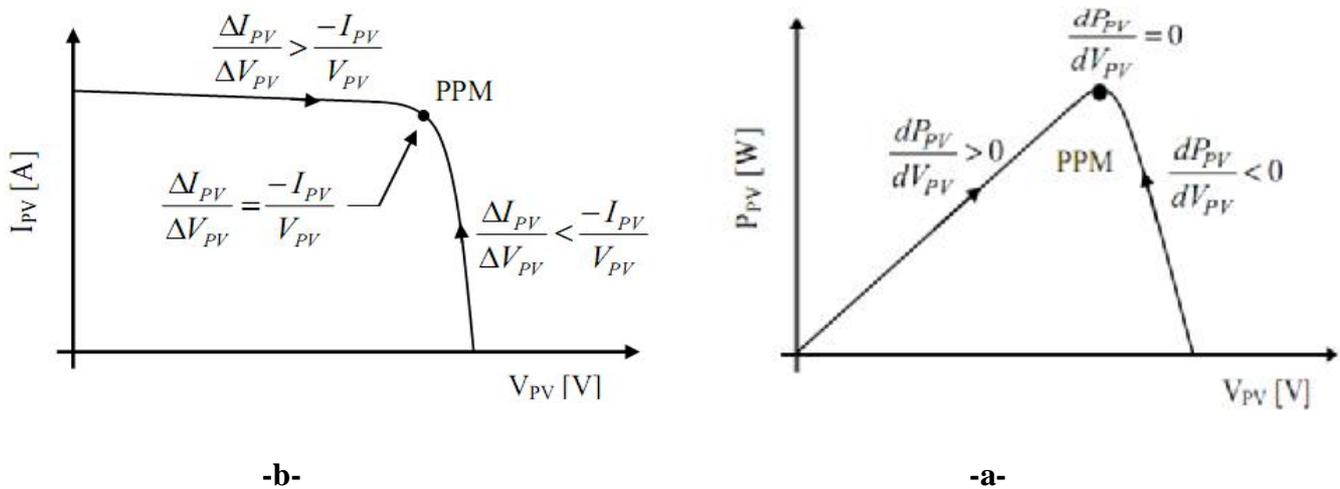
$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(I_{PV} \cdot V_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \cong I_{PV} + V_{PV} \frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} < 0 \quad \text{à droite du PPM} \quad (V-5)$$

Ces équations peuvent être écrites comme :

$$\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} = -\frac{I_{PV}}{V_{PV}} \quad \text{au PPM} \quad (V-6)$$

$$\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} > -\frac{I_{PV}}{V_{PV}} \quad \text{à gauche du PPM} \quad (V-7)$$

$$\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} < -\frac{I_{PV}}{V_{PV}} \quad \text{à droite du PPM} \quad (V-8)$$



**Figure V.8 : Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de  $dP_{PV}/dV_{PV}$  sur la caractéristique de puissance (a) et de la valeur de  $\Delta I_{PV}/\Delta V_{PV}$  sur la caractéristique de courant (b).**

Le maximum de puissance peut être alors traqué 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 V.9  $V_r$  correspond à la tension de référence et force le GPV à fonctionner à cette valeur. Si on est au PPM, alors la tension  $V_{ref}$  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  $\Delta I_{PV}$ . Cela indique alors un changement de conditions climatiques, donc un nouveau PPM à rechercher. Pour cela, l'algorithme incrémente ou décrémente la valeur de  $V_{ref}$  jusqu'à atteindre le PPM [70].

L'organigramme de l'algorithme de commande est montré sur la figure (V-9).

L'avantage principal de cet algorithme est qu'il est adapté aux conditions climatiques instables car, théoriquement, il est possible de trouver un MPP et de s'y immobiliser si la perturbation cesse. Dans ce cas-là, la variation de tension est nulle ; l'apparition d'une variation de courant permet d'ajuster la valeur de la tension de référence pour atteindre un nouveau MPP. C'est une propriété intéressante par rapport aux autres types de MPPT, car en régime établi, il n'y a pas d'oscillations autour du MPP. De plus, cette méthode ne présente pas de risques de divergence par rapport au MPP [69].

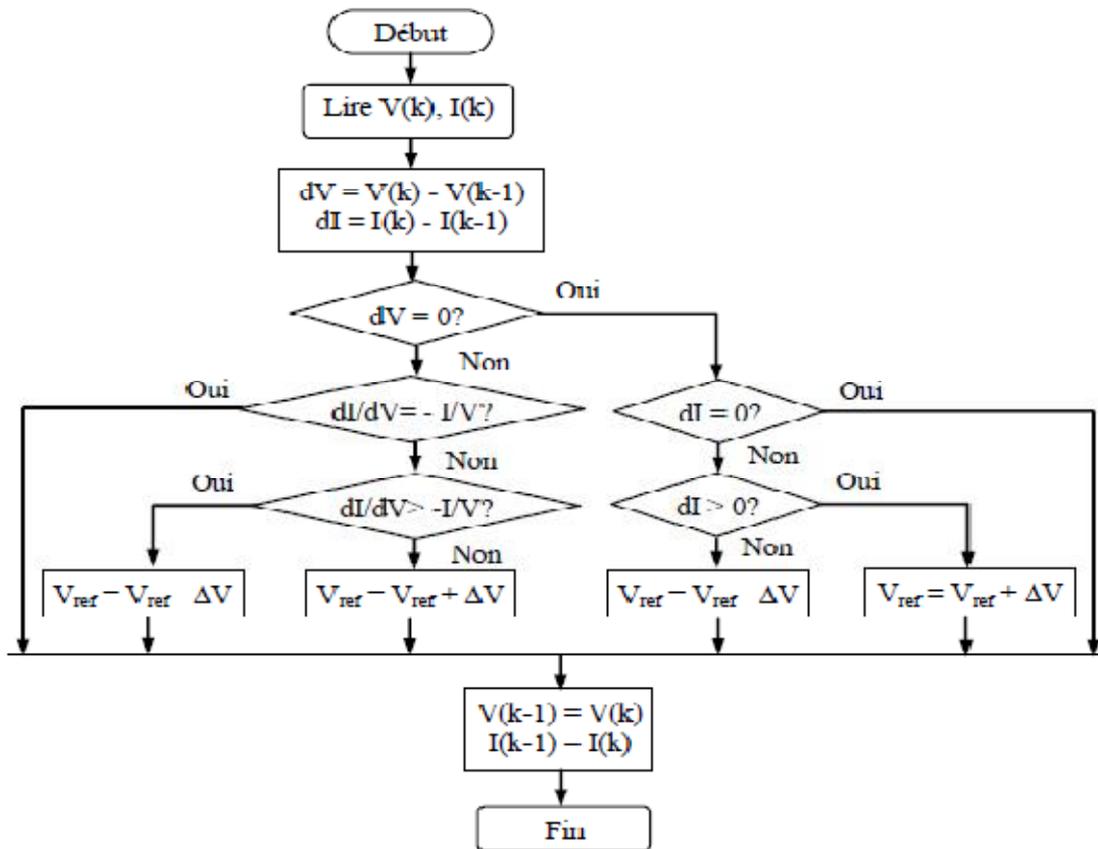


Figure V-9 : Organigramme d'incrément de conductance

### V-6-3) Principe de commande Hill-Climbing :

La technique de contrôle nommée Hill Climbing, consiste à faire monter le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint. Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du panneau et la valeur du rapport cyclique appliqué au convertisseur statique. Mathématiquement, le PPM est atteint lorsque  $dP_{pv} / dD$  est forcé à zéro par la commande[73].

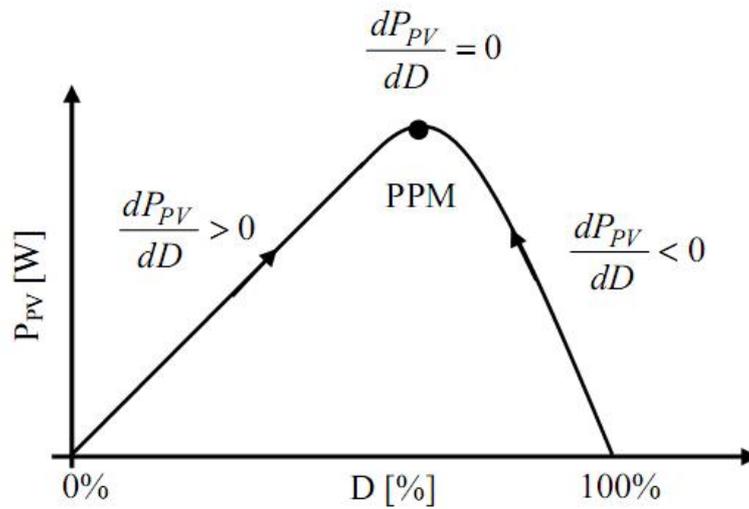


Figure V.10 : Relation entre PPV et le rapport cyclique D du convertisseur statique

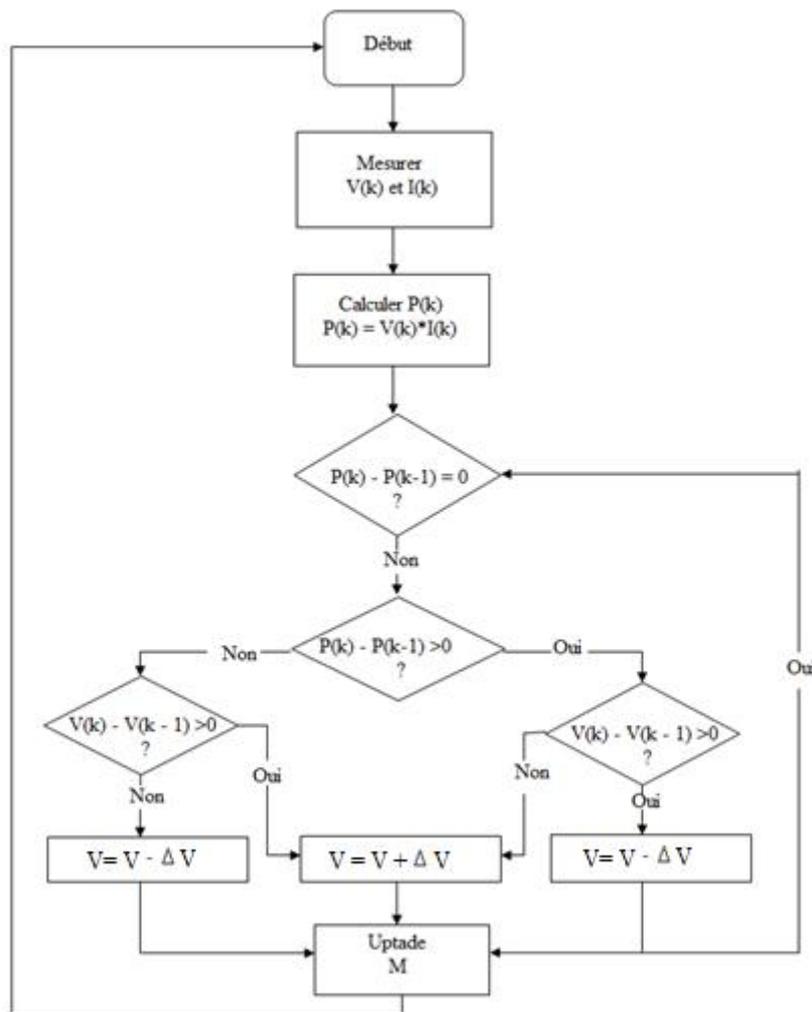


Figure V.11: Algorithme type de la commande Hill Climbing

**V-7) Performance d'un système photovoltaïque avec MPPT:**

Lorsque l'on s'intéresse à l'énergie PV, le premier rendement à définir est celui concernant la conversion de l'énergie solaire en électricité par l'intermédiaire de cellules ou de générateurs PV. En effet, le rendement de conversion d'une cellule PV est un critère important pour ce type de capteur [68].

Le rendement maximum de la conversion photons-électrons du panneau solaire noté  $\eta_{PV}$  est défini selon l'équation :

$$\eta_{PV} = \frac{P_{MAX}}{G \cdot A_{eff}} \quad (V-9)$$

Où :

$P_{MAX}$  est le maximum de puissance potentiellement disponible à la sortie du GPV dépendant du matériau photovoltaïque, de l'instant et de l'endroit des mesures et des conditions météorologiques [35].

La puissance  $P$  délivrée par un générateur PV dépend en plus de la commande utilisée dans le convertisseur (MPPT, connexion directe...). Le rendement du point de fonctionnement que nous notons  $\eta_{RPF}$  ou  $\eta_{MPPT}$  (Rendement MPPT) permet de mesurer l'efficacité de la commande qui est en charge le contrôle du convertisseur statique afin que le module PV fournisse la puissance maximale.

$$\eta_{RPF} = \frac{P}{P_{MAX}} = \eta_{MPPT} \quad (V-10)$$

Enfin, le rendement du convertisseur noté  $\eta_{CONV}$ , qui est défini par :

$$\eta_{CONV} = \frac{P_{OUT}}{P} \quad (V-11)$$

En notant :

$P_{OUT}$  : la puissance délivrée en sortie du convertisseur.

Le rendement total de la chaîne de conversion  $\eta_{TOTAL}$  peut être défini comme le produit de ces trois rendements précédemment définis.

$$\eta_{TOTAL} = \frac{P_{MAX}}{G \cdot A_{eff}} \cdot \frac{P}{P_{MAX}} \cdot \frac{P_{OUT}}{P} = \eta_{PV} \cdot \eta_{MPPT} \cdot \eta_{CONV} \quad [6] \quad (V-12)$$

**V-8) Présentation des PI :**

La puissance délivrée par un générateur photovoltaïque doit être régulée pour optimiser le GPV et limiter l'impact des perturbations. Elle sera contrôlée avec un régulateur Proportionnel, Intégral.

Un régulateur Proportionnel, Intégral (PI) permettrait d'annuler l'erreur statique grâce à l'action intégrale. Toutefois, on privilégie régulateur PID car il donne un degré de liberté supplémentaire pour le réglage. De plus, l'action dérivée permet d'augmenter la marge de stabilité et d'accélérer la réponse du système au début d'un transitoire (réduction du temps de montée).

La régulation est la partie intelligente d'un système, elle regroupe l'ensemble des techniques utilisées visant à contrôler une grandeur physique (température, pression, débit...), son rôle est d'améliorer le comportement de processus en assurant d'abord une bonne stabilité ensuite la rapidité de réaction.

### V-8-1) Types de régulateurs :

Les correcteurs usuellement utilisés en pratique sont les régulateurs à effet proportionnelle, intégrale et dérivé.

Dans ce qui suit on s'intéresse aux régulateurs les plus répandus.

#### V-8-1-1) Régulateur proportionnel P:

Ce correcteur élémentaire est le correcteur de base, il agit principalement sur le gain de système, il permet d'améliorer notablement la précision.

$$u(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) \quad (\text{V-13})$$

Avec :

$K_p$  : Gain du régulateur ;

$u(t)$  : Sortie du régulateur ;

$\varepsilon(t)$  : Entrée du régulateur (erreur).

#### V-8-1-2) Régulateur intégral pur I:

Pour un intégrateur pur la loi de commande  $u(t)$  est de la forme :

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) \cdot dt \quad (\text{V-14})$$

#### V-8-1-3) Régulateur dérivateur pur D :

La loi de commande est de la forme :

$$u(t) = T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (\text{V-15})$$

Avec :

$T_d$ : Constante de dérivation

**V-8-1-4) Régulateur proportionnel intégral PI:**

Le correcteur Intégrateur est en général associé au correcteur proportionnel et la loi de commande corrigée est de la forme :

$$u(t) = K_p \left( \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) \cdot dt \right) \quad (\text{V-16})$$

Avec :

$T_i$  : Constante d'intégration

**V-8-1-5) Régulateur proportionnel dérivé PD:**

La loi du correcteur PD est donc :

$$u(t) = K_p \left( \varepsilon(t) + T_d \frac{d.\varepsilon(t)}{dt} \right) \quad (\text{V-17})$$

**V-8-1-6) Correcteur proportionnel dérivé intégral PID :**

L'intérêt du correcteur PID est d'intégrer les effets positifs des trois correcteurs précédents. La détermination des coefficients  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  du correcteur PID permet d'améliorer à la fois la précision ( $T_d$  et  $K_p$ ) la stabilité ( $T_d$ ) et la rapidité ( $T_d$ ,  $K_p$ ).

Le réglage d'un PID est en général assez complexe, des méthodes pratiques de réglages permettent d'obtenir des bons résultats.

Dans le domaine de réglage industriels les régulateurs utilisés sont de types PI (Correcteur proportionnel intégral), PID (Correcteur proportionnel dérivé intégral), car les régulateur PID sont très sensibles aux signaux parasites superposés aux signes et de mesures.

**V-9) Conclusion :**

Nous avons présenté dans ce chapitre, l'utilité d'insertion d'un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge, afin d'optimiser le maximum de puissance fournie par ce GPV. Nous avons vu aussi les différentes commandes MPPT de cet étage, avec leurs principes de fonctionnement et leurs organigrammes. Et enfin nous avons présenté le rendement énergétique de conversion d'une cellule photovoltaïque.

**VI-1) Introduction:**

L'exploitation des potentiels énergétiques (solaire) pour la production de l'électricité s'avère être rentable dans les régions isolées, là où l'extension du réseau électrique conventionnel serait impossible et onéreuse. Le développement du marché photovoltaïque nécessite de connaître parfaitement la production électrique de ces systèmes sur différents sites en particulier pour estimer sa rentabilité économique.

La performance d'un système PV dépend fortement des conditions météorologiques, telles que le rayonnement solaire et la température. Pour fournir l'énergie continuellement durant toute l'année, un système PV doit donc être correctement dimensionné. Ce qui exige une étude assez rigoureuse dans le but de faire le meilleur choix, le plus performant et au moindre coût.

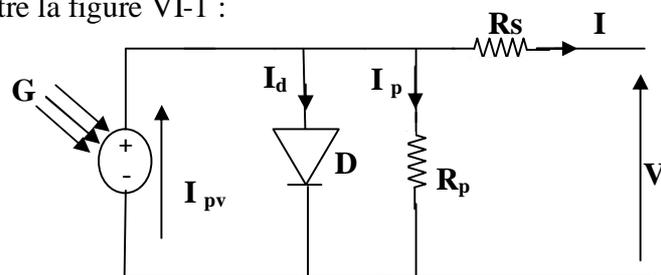
Dans le cadre de l'optimisation du rendement d'un générateur photovoltaïque. Nous nous sommes intéressés à l'impacte des conditions atmosphériques : ensoleillement et température sur la caractéristique du GPV.

Pour l'optimisation du GPV l'implantation d'un étage d'adaptation s'avère nécessaire, pour cela on a opté à introduire un hacheur et un onduleur pour sa connexion au réseau.

Pour la recherche du point de puissance maximale plusieurs méthodes existent, on a choisit d'exploiter deux méthodes ; P&O et Inc/Cond.

**VI.2) Caractéristiques et influences des conditions météorologiques sur un GPV :****VI-2-1) Modélisation et caractéristiques du générateur photovoltaïque :**

La modélisation d'une cellule photovoltaïque peut être effectuée selon différents niveaux de complexité. Il s'agit d'obtenir un circuit électrique équivalent de la cellule photovoltaïque. Il existe plusieurs modèles parmi lesquels nous avons choisit celui d'une complexité moyenne, comme le montre la figure VI-1 :



**Figure VI.1: Modèle du générateur photovoltaïque**

Une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique shuntée par une diode, avec deux résistances l'une en série et l'autre en parallèle.

Ce circuit peut être utilisé aussi bien pour une cellule élémentaire, que pour un module ou un panneau constitué de plusieurs modules.

D'après le schéma de la figure VI.1 on a :

$$I = I_{pv} - I_p - I_d \quad (\text{VI-1})$$

L'équation reliant le courant délivré par une cellule PV et la tension à ses bornes est donnée par:

$$I = I_{pv} - I_0 \left( \exp \left( \frac{V}{a.V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (\text{VI-2})$$

Avec :

$$I_d = I_0 \left( \exp \left( \frac{V}{a.V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{VI-3})$$

$$I_p = \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (\text{VI-4})$$

Avec :

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + k_I \Delta T}{\exp(V_{oc,n} + K_v \Delta T / a.V_t) - 1} \quad (\text{VI-5})$$

A des niveaux d'éclairement usuels, le photo-courant est proportionnel à l'irradiation solaire ( $\text{W/m}^2$ ) qui peut s'écrire :

$$I_{pv} = [I_{pv,n} + K_I(T - T_n)] \cdot \frac{G}{G_n} \quad (\text{VI-6})$$

- **Coutant de court-circuit et tension à vide :**

**Coutant de court-circuit ( $V_{co}=0$ ) :**  $I_{cc} = I_{pv}$  (VI-7)

**Tension à vide ( $I=0$ ):**  $V_{co} = a.V_t \ln \left( \frac{I_{pv}}{I_0} - 1 \right)$  (VI-8)

Où :

$I_{pv}$  : Courant produit par la lumière (directement proportionnel à l'irradiation) [A] ;

$I_{pv,n}$  : Courant produit par la lumière aux conditions nominale [ $25^\circ\text{C}$  et  $1000 \text{ W/m}^2$ ] ;

$V$  : Tension aux bornes de la cellule [V] ;

- $I$  : Courant aux bornes de la cellule [A] ;  
 $R_s$  : Resistance série [ $\Omega$ ] ;  
 $R_p$  : Resistance parallèle [ $\Omega$ ] ;  
 $V_t$  : Tension thermique avec  $V_t = \frac{T.K}{q}$  ;  
 $K$  : Constante de Boltzmann [ $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K] ;  
 $q$  : Charge élémentaire d'électrons [ $1.6 \cdot 10^{-19}$  C] ;  
 $T$  : Température de jonction de la cellule photovoltaïque [K] ;  
 $T_n$  : Température nominale [ $25^\circ\text{C}$ ] ;  
 $a$  : Facteur d'idéalité de la jonction ;  
 $I_0$  : Courant de saturation [A] ;  
 $I_{sc,n}$  : Courant de saturation nominal ;  
 $G_n$  : Irradiation nominale [ $1000 \text{ W/m}^2$ ] ;  
 $G$  : Irradiation sur la surface de dispositif [ $\text{W/m}^2$ ] ;  
 $K_I$  : Coefficient d'idéalité du courant ;  
 $K_V$  : Coefficient d'idéalité de la tension ;

Pour un générateur photovoltaïque comportant  $N_s$  cellules série et  $N_p$  cellules parallèles on aura :

$$I = N_s \cdot I_{cell} \quad (\text{VI-9})$$

$$V = N_p \cdot V_{cell} \quad (\text{VI-10})$$

Avec :

$I_{cell}$  : Courant d'une seule cellule ( $I_{pv}=I_{cell}$ ).

$V_{cell}$  : Tension aux bornes d'une cellule ( $V_{pv}=V_{cell}$ ).

Pour la modélisation et la simulation on a choisis le model photovoltaïque (**MSX-60-**), il contient 36 cellules amorphes.

Caractéristiques	
Courant maximal ( $I_{mp}$ )	3.5 A
Tension maximal ( $V_{mp}$ )	17.1V

Puissance maximale ( Pmax)	60W
Courant de saturation (Isc,n)	3.8A
Tension du circuit ouvert (Vco)	21.1V
Coefficient d'idéalité de la tension (K <sub>V</sub> )	-0.38 V/K
Coefficient d'idéalité du courant (K <sub>I</sub> )	0.065A/K
Nombre de cellules série (N <sub>s</sub> )	36
Courant nominal de saturation (I <sub>o,n</sub> )	2 10 <sup>-8</sup> A
Courant produit par la lumière (I <sub>pv</sub> )	3.8A
Facteur d'idéalité de la jonction (a)	1.2
Resistance parallèle (R <sub>p</sub> )	1000 Ω
Resistance série (R <sub>s</sub> )	0.008 Ω

Tableau VI-1: Caractéristiques du modèle photovoltaïque (MSX-60-) [4]

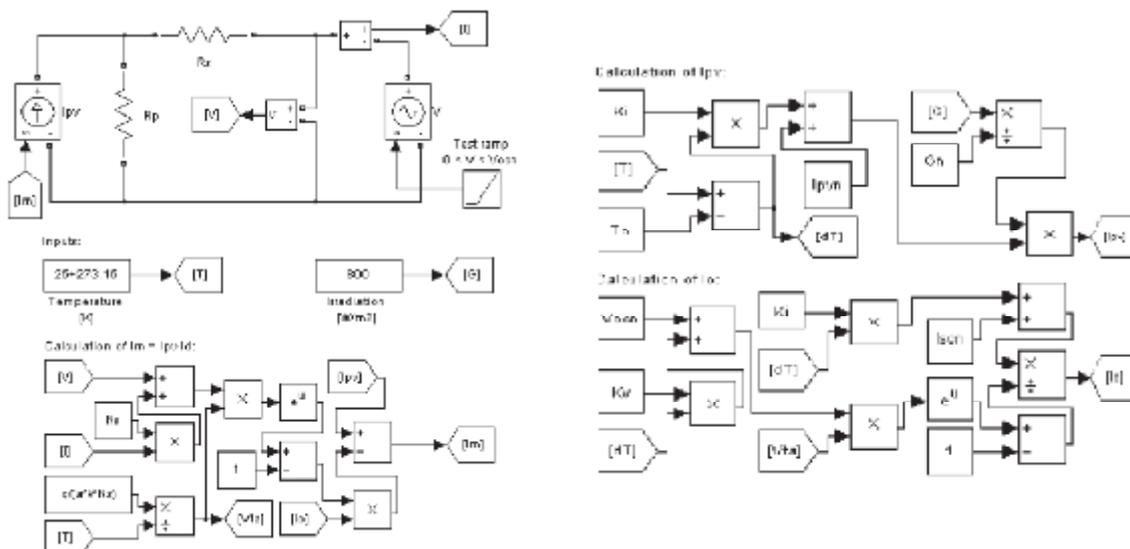
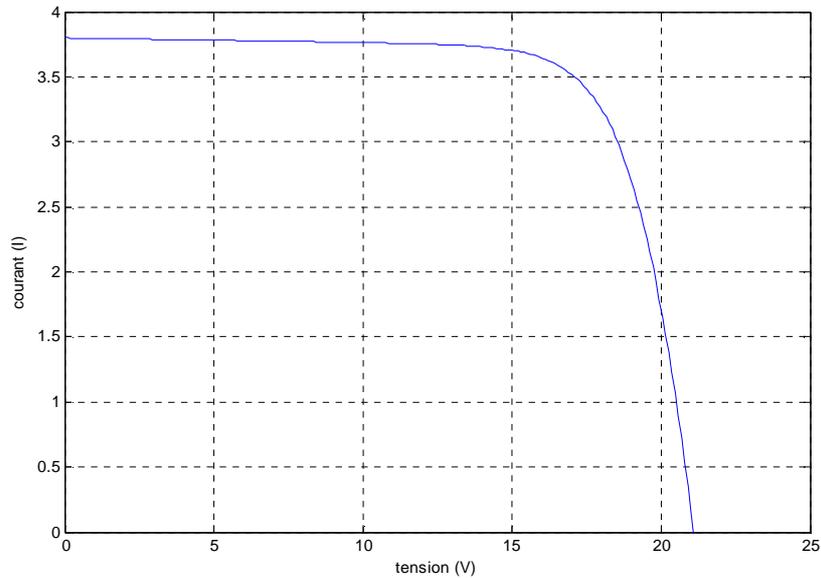


Figure VI.2 : Schéma de simulation d'un générateur photovoltaïque

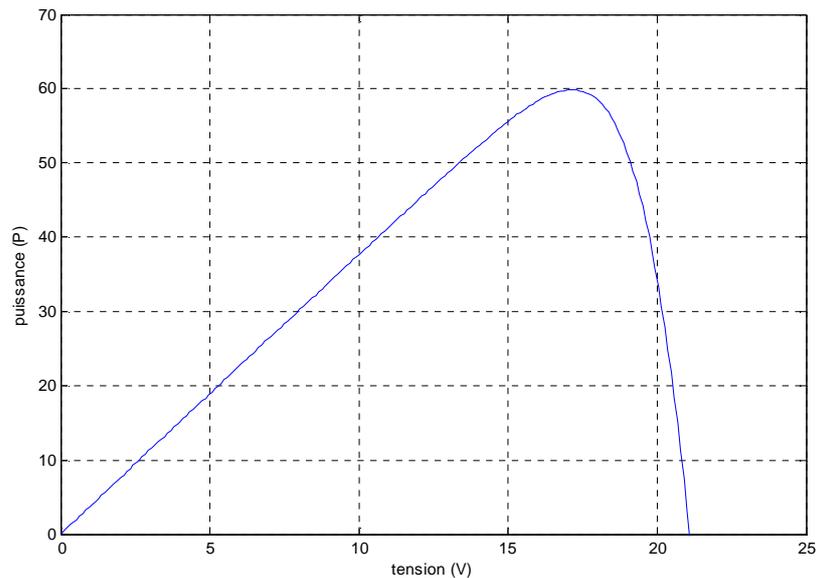
**Caractéristiques du générateur photovoltaïque à température et éclairement constants :**

- La caractéristique  $I = f(V)$  pour un éclairement et température constants et particulièrement aux conditions standards ( $G=1000W/m^2$ ,  $T=25\text{ °C}$ ) est illustrée dans la figure suivante



**Figure VI.3 : Caractéristique  $I=f(V)$  d'un générateur photovoltaïque.**

- La caractéristique  $P=f(V)$  pour un éclairement et température constants et particulièrement aux conditions standards ( $G=1000\text{W/m}^2$ ,  $T=25\text{ °C}$ ) est illustrée dans la figure suivante :



**Figure VI. 4: Caractéristique  $P=f(V)$  d'un générateur photovoltaïque**

### VI-2-2) Paramètres influençant sur les caractéristiques du GPV:

Dans la section précédente, nous avons présenté les bases de la modélisation mathématique du générateur PV. Ce modèle a été développé sous l'environnement Matlab et PSIM.

En effet la caractéristique  $I(V)$  du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale.

#### VI-2-2-1) Influence de l'éclairement :

Nous avons fait varier l'irradiation solaire de  $400\text{W/m}^2$  à  $1200\text{W/m}^2$  avec un pas de  $200\text{W/m}^2$  en maintenant la température constante. La figure (VI.5) montre le schéma de simulation sur PSIM de l'influence de l'irradiation sur le GPV.

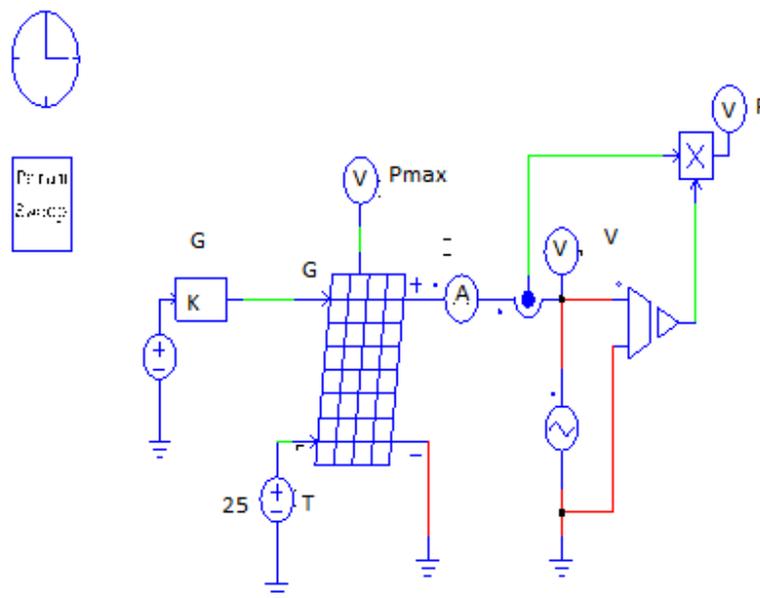


Figure VI.5 : Schéma de simulation de l'influence de l'éclairement sur le GPV

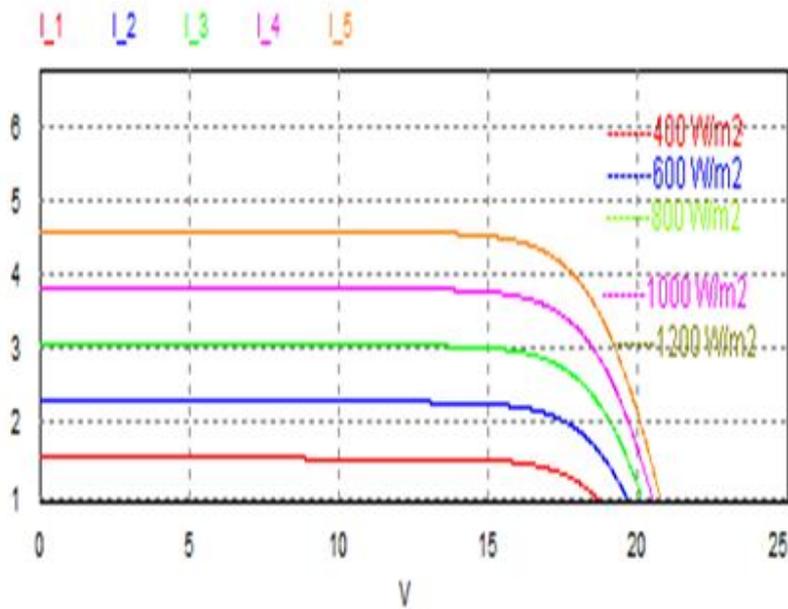


Figure VI.6: Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$

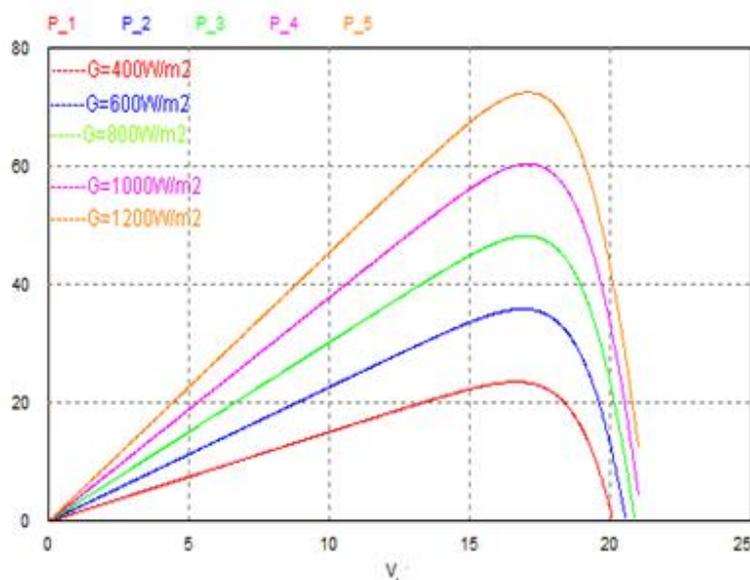


Figure VI.7: Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P=f(V)$

#### VI-2-2-2) Influence de la température :

Nous avons effectué une simulation en maintenant une irradiation constante à différentes températures de 15°C à 55°C avec un pas de 10 °C. La figure VI.8 montre le schéma de simulation sur PSIM de l'influence de la température sur le GPV.

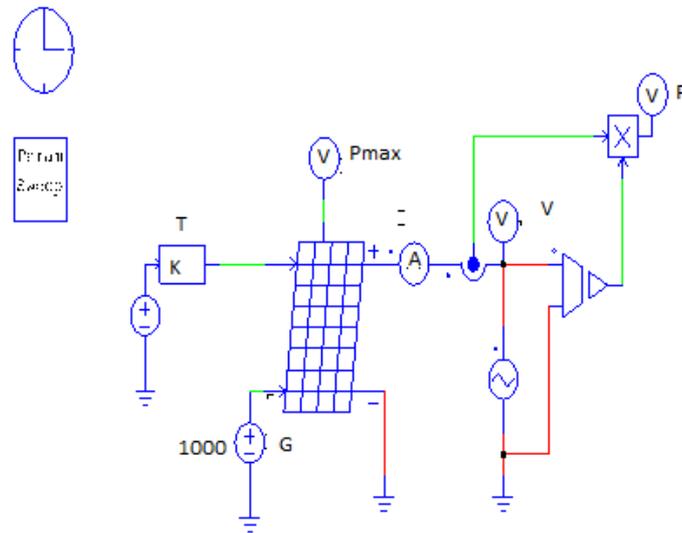


Figure VI.8 : Schéma de simulation de l'influence de la température sur le GPV

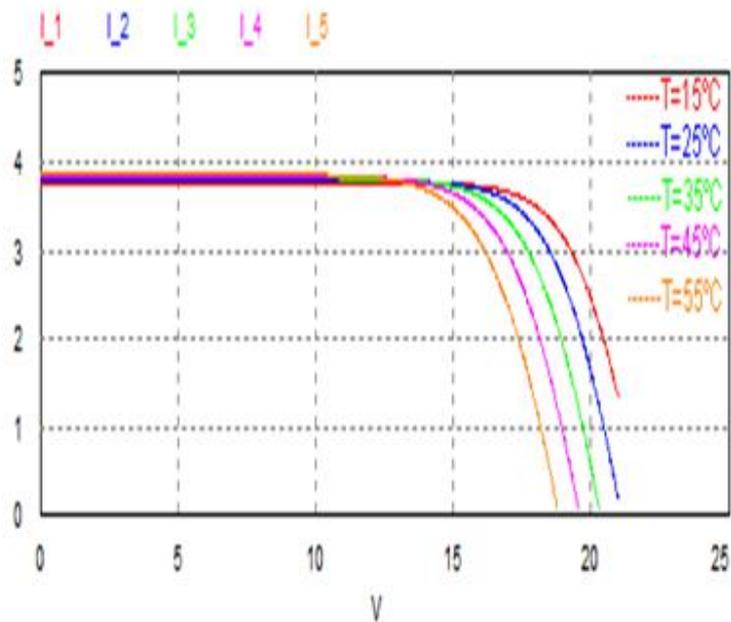
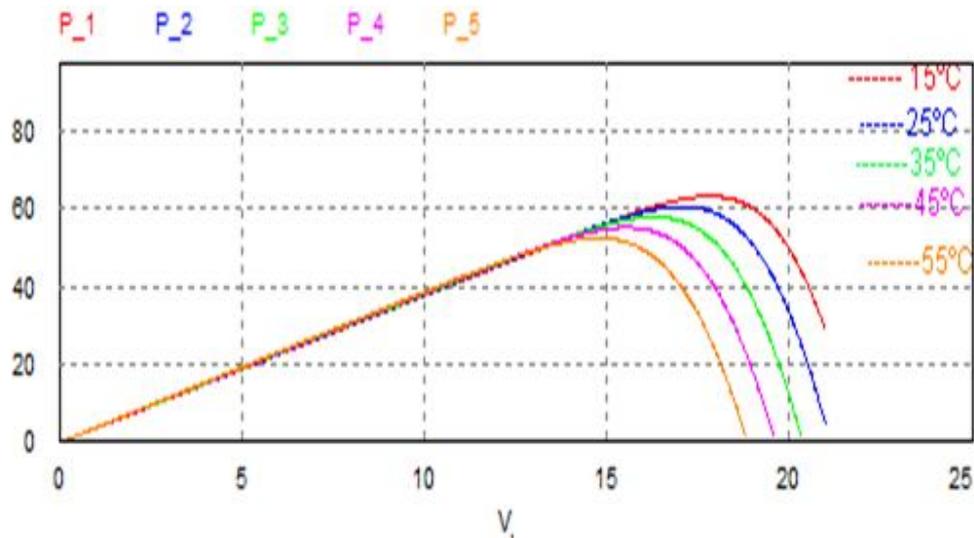


Figure VI.9: Influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$



**Figure VI.10: Influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$**

- **Interprétation des résultats :**

Quand l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant photovoltaïque croît, les courbes I-V se décalent vers les valeurs croissantes permettant au module de produire une puissance électrique plus importante (Figure VI.). Le photo-courant est donc directement lié à l'éclairement.

Le comportement de la caractéristique I-V d'un générateur PV en fonction de la température est complexe; lorsque la température augmente, la tension du générateur diminue, par contre le courant demeure constant.

L'effet de l'augmentation de la température sur la caractéristique P-V fait diminuer légèrement la puissance et la tension du GPV.

### **VI-3) Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque autonome :**

Pour qu'un générateur photovoltaïque fonctionne dans les conditions optimales, il doit être doté d'un adaptateur. Cet adaptateur peut être un convertisseur DC/DC de type survolteur ou abaisseur, Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome.

Nous avons choisi de faire la simulation du schéma suivant :

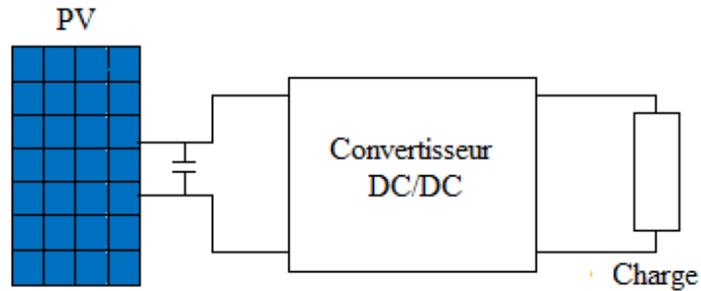


Figure VI.11 : Schéma de simulation du hacheur élévateur.

### VI-3-1) Modélisation du hacheur boost :

Dans ce hacheur, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée. Cette structure demande un interrupteur K commandé à l'amorçage et au blocage (dans cas on utilise un IGBT) et une diode (amorçage et blocage spontanés).

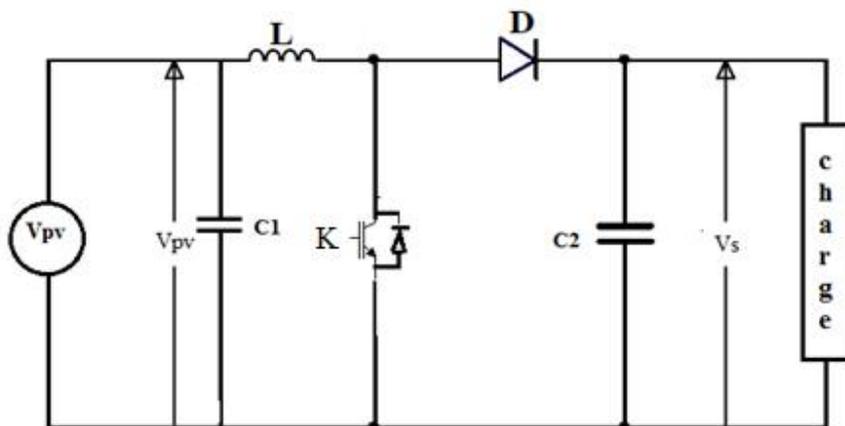


Figure VI.12: circuit électrique équivalent.

- **Modèle mathématique équivalent :**

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents de la figure (VI-13) des deux phases de fonctionnement (fermeture et ouverture de l'IGBT) donne :

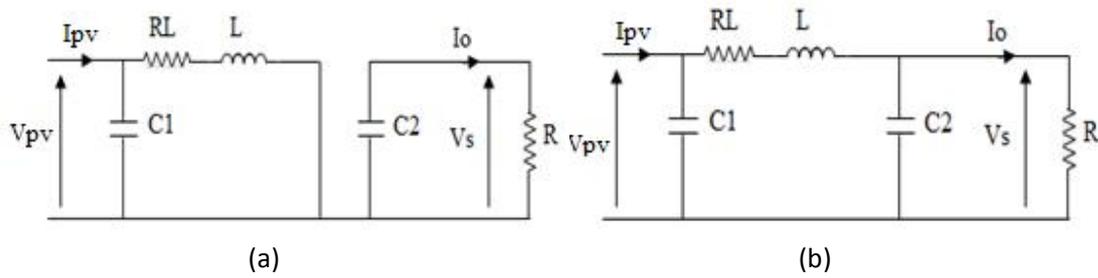


Figure VI-13 : circuits équivalents des deux phases de fonctionnement.

(a) **K** fermé, (b) **K** ouvert

Pendant la période  $\alpha T$  :

$$\begin{cases} I_{C1} = C1 \cdot \frac{dV_{PV}}{dt} = (I_{PV} - I_L) \\ I_{C2} = C2 \cdot \frac{dV_s}{dt} = -I_O \\ V_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} = V_{PV} - R_L i_L \end{cases} \quad (VI-11)$$

Pendant la période  $(1-\alpha) T$  :

$$\begin{cases} I_{C1} = C1 \cdot \frac{dV_{PV}}{dt} = (I_{PV} - i_L) \\ I_{C2} = C2 \cdot \frac{dV_o}{dt} = i_L - I_O \\ V_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} = V_{PV} - V_s - R_L i_L \end{cases} \quad (VI-12)$$

Equation de la tension de sortie :

$$V_{PV} t_{on} = (V_s - V_{PV}) t_{off} \quad (VI-13)$$

Ainsi :

$$V_s = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} V_{PV} \quad (VI-14)$$

Ou:

$$T = t_{on} + t_{off} \quad (\text{VI-15})$$

Le rapport  $T/t_{on}$  s'appelle le rapport cyclique  $\alpha$  et donc  $\alpha = T/t_{on}$ . De l'équation (VI-14), la tension de sortie peut être dérivée:

$$V_s = \frac{V_{PV}}{1-\alpha} \quad (\text{VI-16})$$

Ou :

$V_s$  : est la tension de sortie.

$V_{PV}$ : est la tension d'entrée (panneau solaires).

$T_{on}$  : est la durée de temps quand le commutateur IGBT est fermé.

### VI-3-2) Schéma de simulation du GPV avec le hacheur :

Dans les conditions standards de température et d'éclairement, le modèle de simulation du GPV et le hacheur boost, est donnée par la figure suivante :

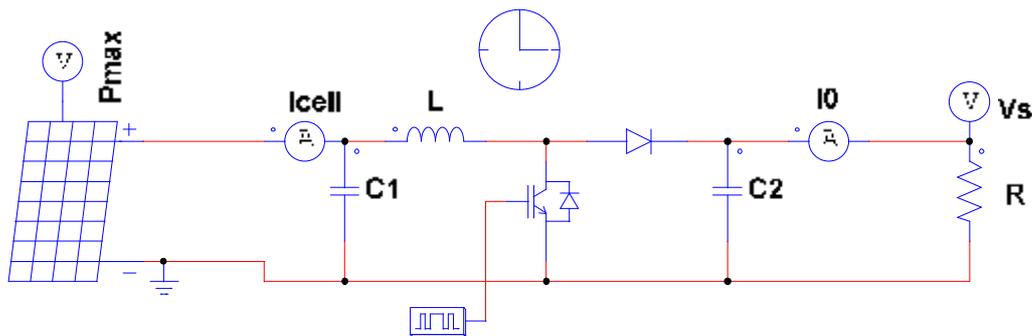
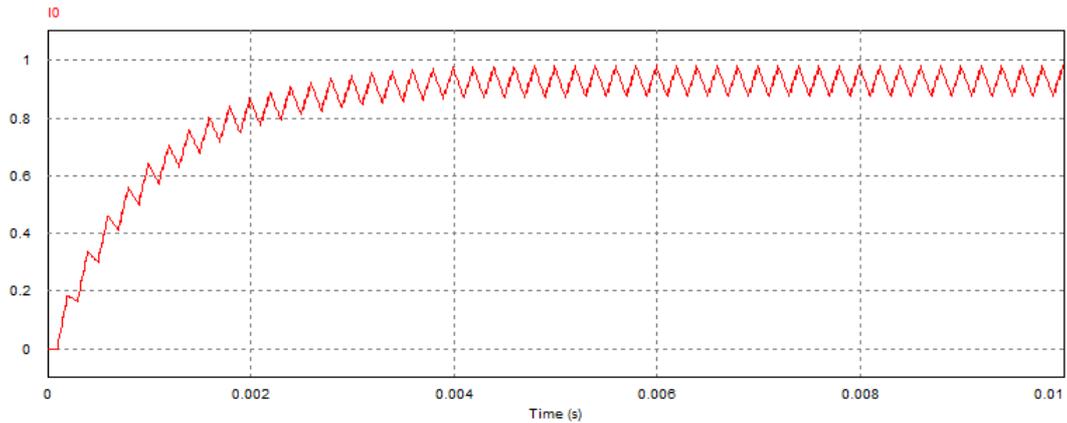
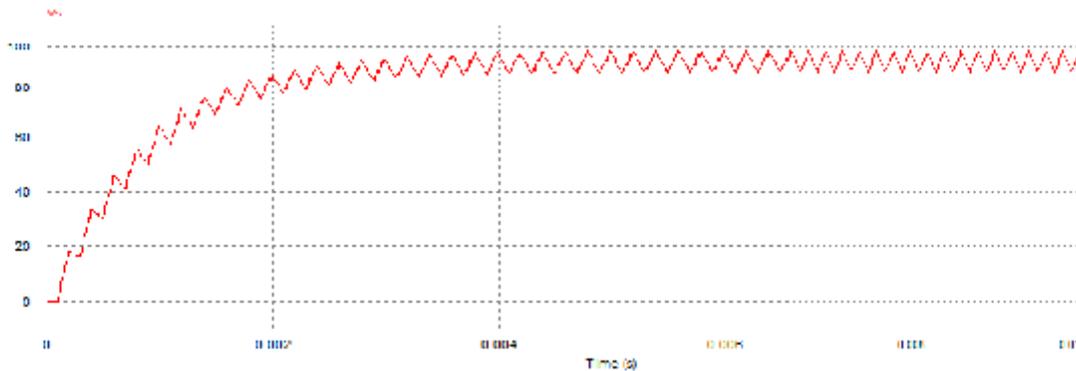


Figure VI.14: schéma de simulation d'un panneau avec un hacheur boost sur psim.

Avec :  $C_1 = 10\text{nF}$ ;  $C_2 = 9.27\mu\text{F}$  ;  $L = 0.47\text{mH}$ ;  $R = 100\Omega$ ,  $\alpha = \frac{1}{2}$ .



**Figure VI.15: Allure du courant sortant du hacheur.**



**Figure VI.16 : Allure de la tension de la sortie du hacheur.**

- **Discussion des résultats :**

A partir des résultats précédents, pour connecter un panneau solaire à une charge continue il est indispensable de le raccorder via un étage d'adaptation pour minimiser les pertes de puissance.

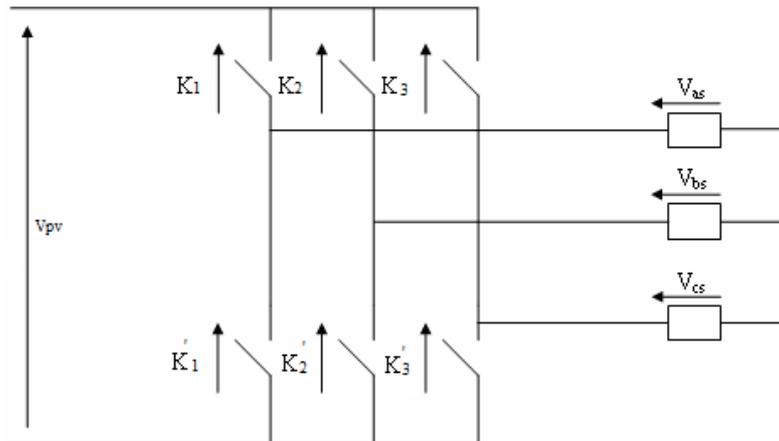
#### **VI-4) Simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau triphasé :**

Le modèle à simuler comporte un générateur photovoltaïque, un onduleur MLI triphasé qui sert à connecter le générateur au réseau.

**VI-4-1) Modélisation de l'onduleur triphasé :**

Soit  $F_i$  l'état de l'interrupteur  $K_i$ , il est donné par:

$$F_i = \begin{cases} 0 & \text{si } K_i \text{ est fermé et } K'_i \text{ est ouvert,} \\ 1 & \text{si } K_i \text{ est ouvert et } K'_i \text{ est fermé,} \end{cases}$$



**Figure VI-17: Représentation des composants bidirectionnels.**

Le rapport entre la tension de la partie continue ( $V_{pv}$ ) et la partie alternative ( $V_{abc}$ ) dépend de l'état des interrupteurs de l'onduleur. Si on prend comme hypothèse que les interrupteurs sont parfaits (sans chutes de tension ni temps morts), les tensions composées sont données par :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = V_{pv} \begin{bmatrix} F_1 & -F_2 \\ F_2 & -F_3 \\ F_3 & -F_1 \end{bmatrix} \tag{VI-17}$$

Par conséquent, les tensions simples et le courant  $I_s$  à l'entrée de l'onduleur s'expriment en fonction des fonctions logiques comme suit:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = V_{pv} \begin{bmatrix} 2F_1 & -F_2 & -F_3 \\ -F_1 & 2F_2 & -F_3 \\ -F_1 & -F_2 & 2F_3 \end{bmatrix} \tag{VI-18}$$

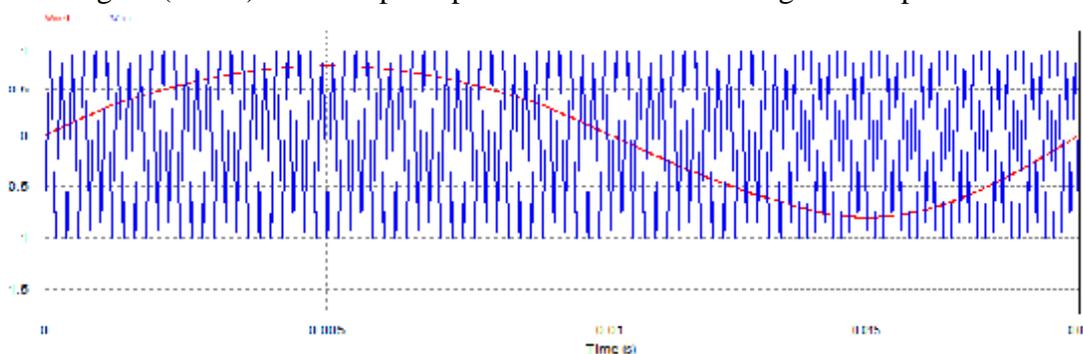
$$I_s = F_1 I_{sa} + F_2 I_{sb} + F_3 I_{sc} \quad (\text{VI-19})$$

- **Principe de la commande à MLI :**

La fonction de commutation est obtenue par comparaison de deux signaux (la figure suivante) : la modulante ( $V_{ref}$ ), qui est une onde de référence.

La représentation de la tension de sortie souhaitée, comprise entre (-1) et (1), et que la fréquence de ( $V_{TRI}$ ) et qui détermine la fréquence de commutation de l'onduleur.

La figure (VI-18) donne le principe de la modulation de largeur d'impulsion.

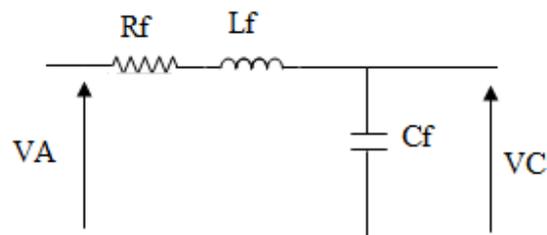


**Figure VI-18 : Schéma du signal de commande à MLI et la tension ( $V_A$ ) de sortie d'un onduleur monophasé.**

#### VI-4-2) Modélisation de l'interface réseau :

Les charges sont les éléments consommateurs de puissance électrique dans un système. La consommation de cette puissance électrique dépend des caractéristiques de la charge. Une modélisation correcte de ces caractéristiques est indispensable pour représenter finement le comportement de la charge.

- **Modélisation du filtrage RLC :**



**Figure VI-19 : Schéma équivalent monophasé du filtre RLC.**

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

$$H(p) = \frac{V_C}{V_A} = \frac{1}{1 + C_f \cdot R_f \cdot p + C_f \cdot L_f \cdot p^2} \quad (\text{VI-20})$$

Sa pulsation est donnée par :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_f L_f}} \quad (\text{VI-21})$$

### VI-4-3) Simulation de l'onduleur commandé par MLI connecté au réseau :

#### A. Sans filtrage :

Schéma de simulation est représenté par la figure suivante :

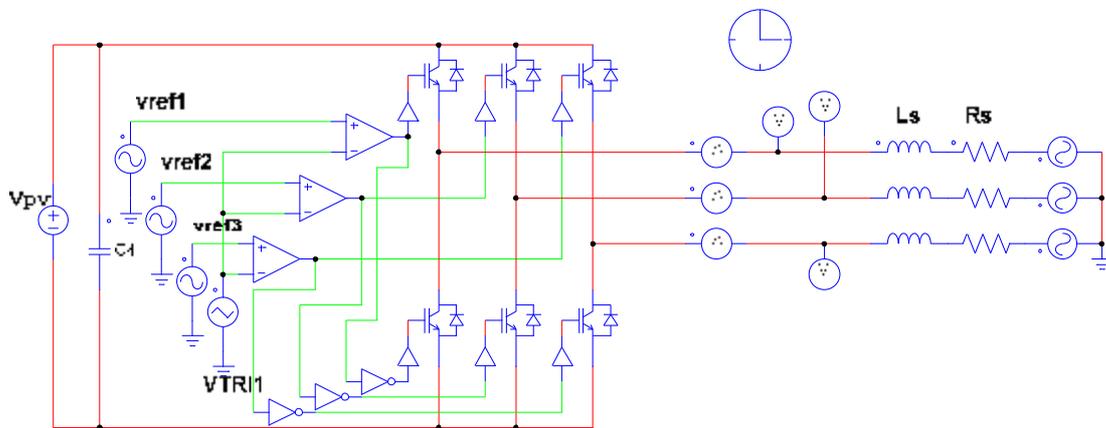


Figure VI-20 : schéma de connexion PV-réseau via un onduleur MLI sans filtrage.

Sachant que :

$V_{pv} = 844\text{V}$ ,  $V_{ref1} = V_{ref2} = V_{ref3} = 0.8\text{ V}$ ,  $V_{tri} = 2\text{V}$  avec une fréquence de  $5000\text{Hz}$ ,  
 $L_s = 2\text{mH}$  et  $R_s = 5\Omega$ .

La tension  $V_{pv}$  obtenue par l'association de 40 panneaux photovoltaïques en série, parallèle avec 8 branches. Chaque branche débite un courant de  $3.8\text{A}$ , et chaque panneau a une tension de  $21.1\text{ V}$ .

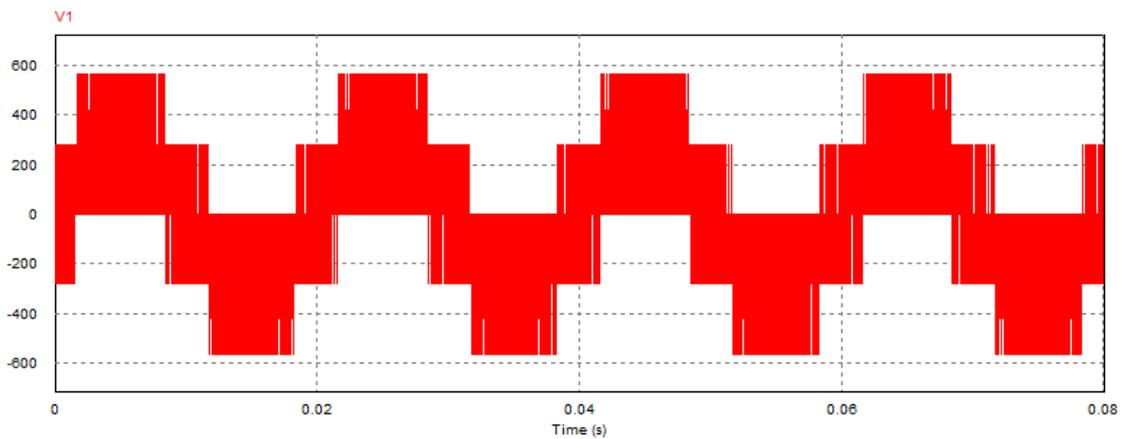
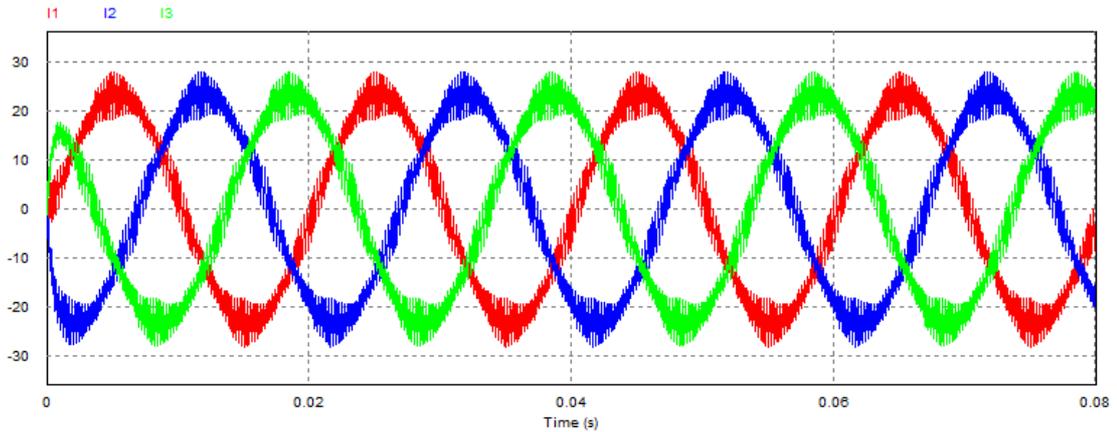


Figure VI-22: La tension simple de la première phase.

**B. Avec filtrage :**

Le schéma de simulation est donné par la figure ci-dessous :

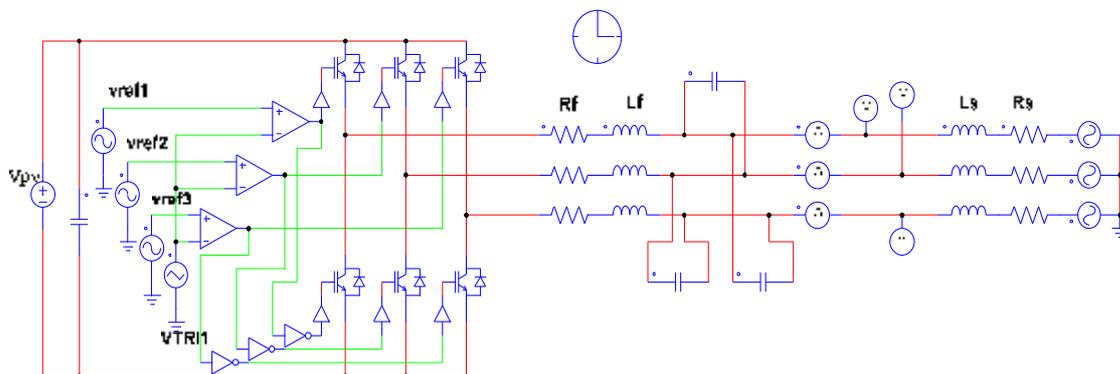


Figure VI-23 : Schéma de connexion PV-réseau via un onduleur MLI avec filtrage.

Avec :  $R_f = 5\Omega$  ;  $L_f = 800\mu\text{H}$  ;  $C_f = 400\mu\text{F}$ .

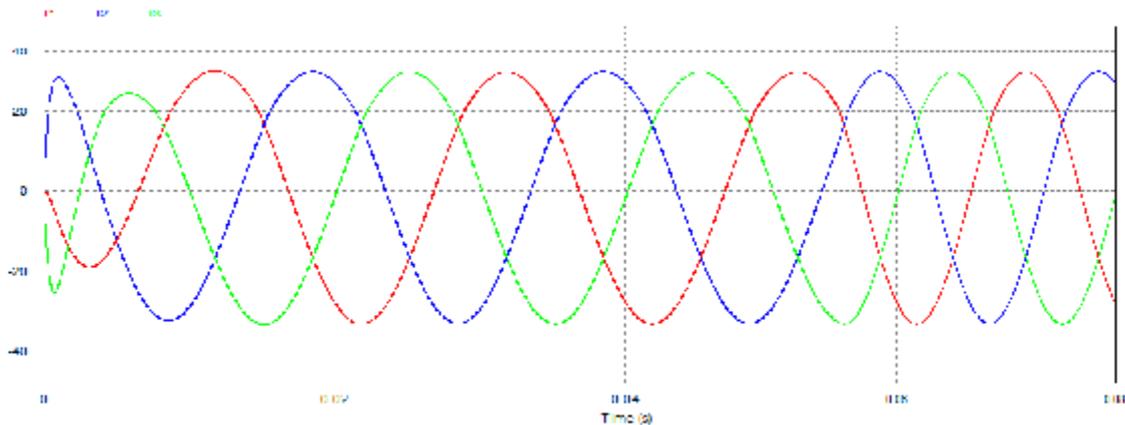


Figure VI-24 : Les courants dans les phases après filtrage.

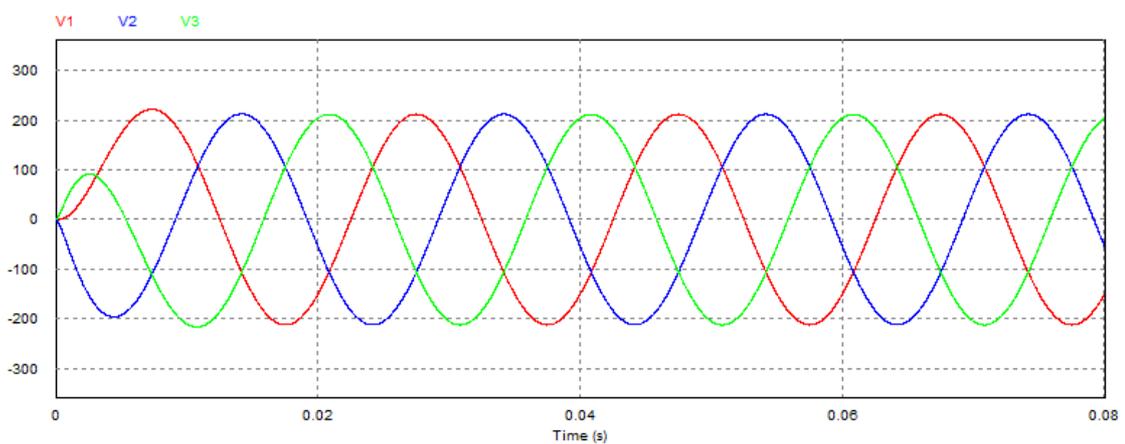


Figure VI-25 : Allures des tensions simples filtrées.

- **Interprétation des résultats :**

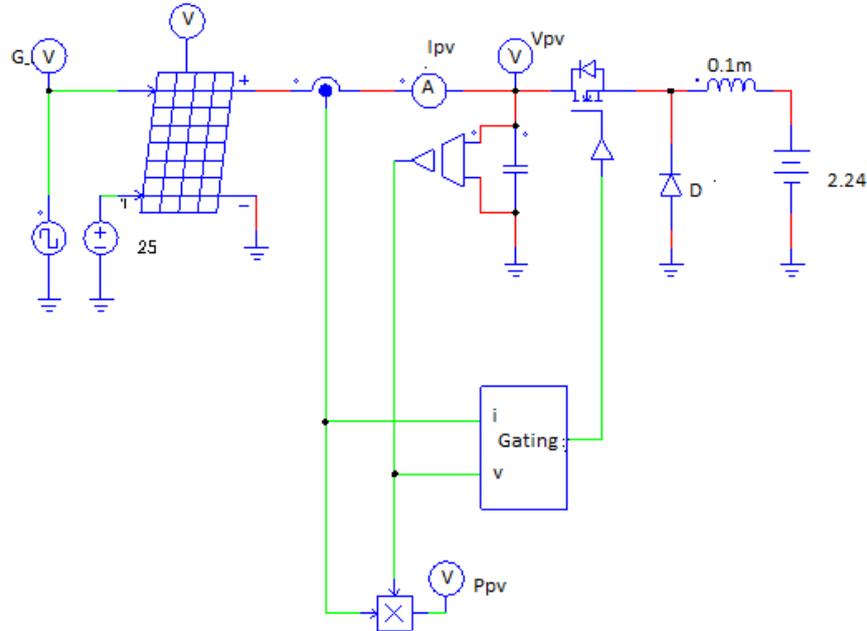
Pour pouvoir connecter l'onduleur de tension en parallèle avec le réseau, et le faire travailler comme une source de courant, il est nécessaire d'utiliser un filtre de raccordement.

**VI-5) Optimisation du transfert d'énergie :**

**VI-5-1) Méthodes de recherches du PPM :**

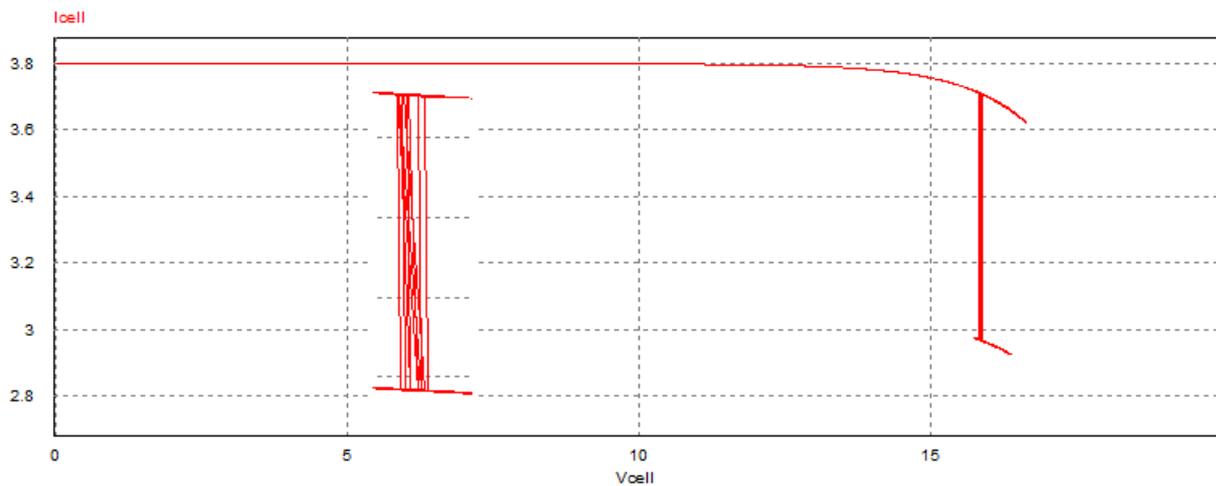
**VI-5-1-1) Méthode Perturb & Observ :**

Le schéma de simulation est représenté par la figure ci-dessous :

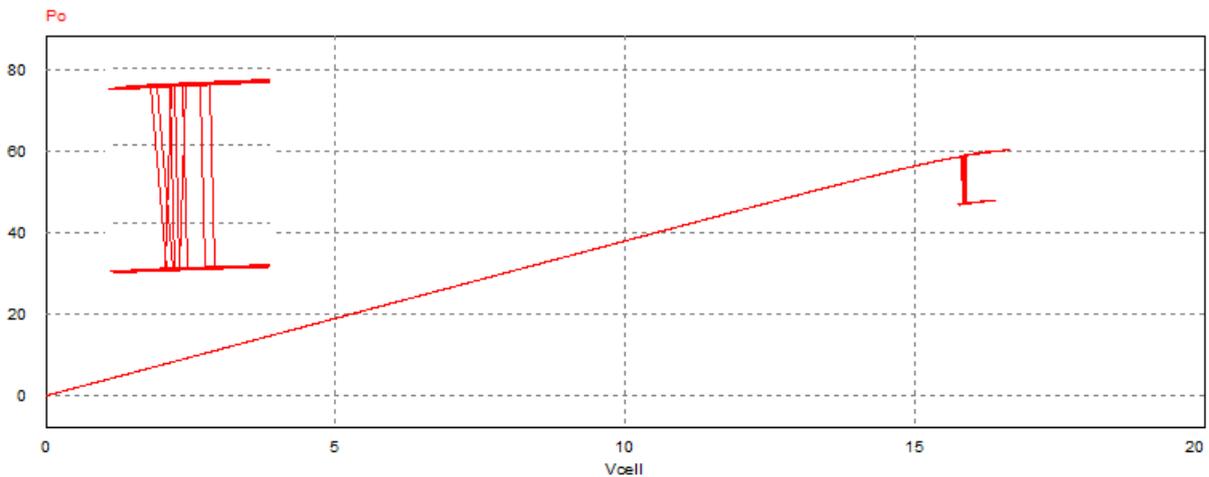


**Figure VI.26: Optimisation de la puissance avec la méthode Perturb & Observ**

Les résultats obtenus sont illustrés sur les figures suivantes :



**Figure VI-27 : Caractéristique  $I_{PV} - V_{PV}$  du GPV avec MPPT**



**Figure VI-28: Caractéristique P-V du GPV avec MPPT.**

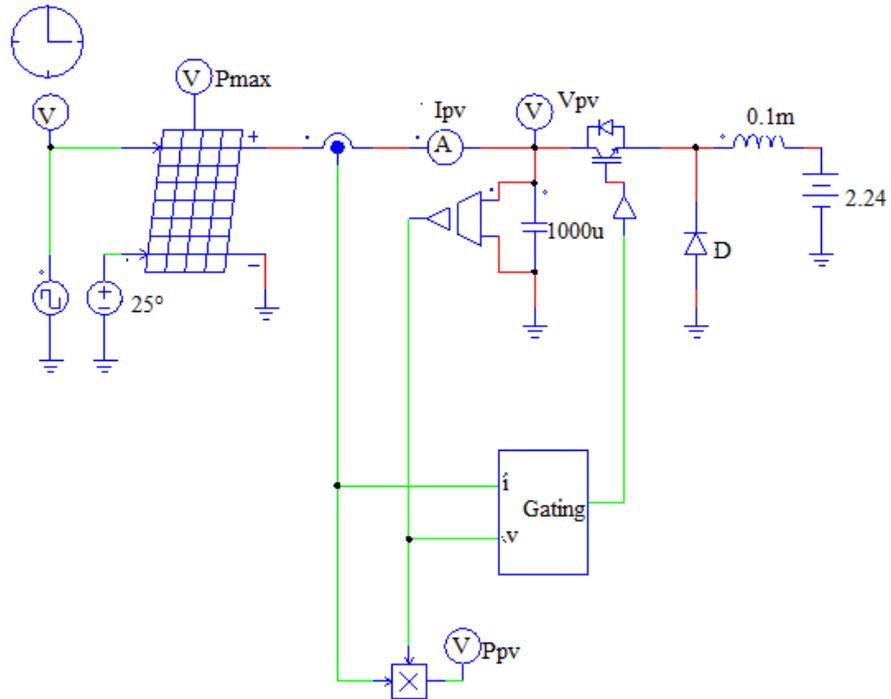
- **Interprétations des résultats :**

La puissance débitée par la GPV dépend du point de fonctionnement de ce dernier, c'est le produit de l'intensité du courant débité et la tension entre ses bornes. De là, on peut tirer la caractéristique courant-tension I-V et la caractéristique puissance tension P-V du GPV.

Le maximum de puissance peut être suivi en effectuant des comparaisons à chaque instant avec la tension de référence, une fois le point de puissance maximale est atteint, il va se maintenir sur ce point jusqu'à la détection d'une nouvelle variation de la valeur de la tension afin de se situer sur le PPM. Cependant, elle présente des oscillations importantes autour du PPM qu'elle engendre en régime établi. De plus, elle présente des pertes de recherche du PPM lors de changement rapide des conditions climatiques (le PPM se déplace vers des directions fausses).

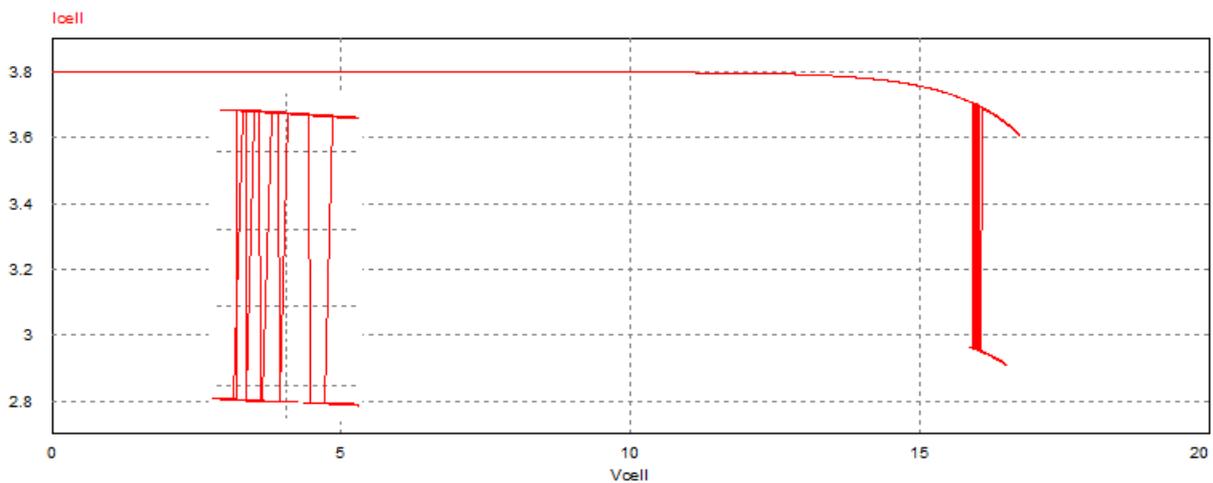
**VI-5-1-2) Méthode Incrément de Conductance :**

Le schéma de simulation est représenté par la figure ci-dessous :



**Figure VI.29: Optimisation de la puissance avec la méthode Inc/Cond**

Les résultats obtenus sont illustrés sur les figures suivantes :



**Figure VI-30: Caractéristique  $I_{PV} - V_{PV}$  du GPV avec MPPT**

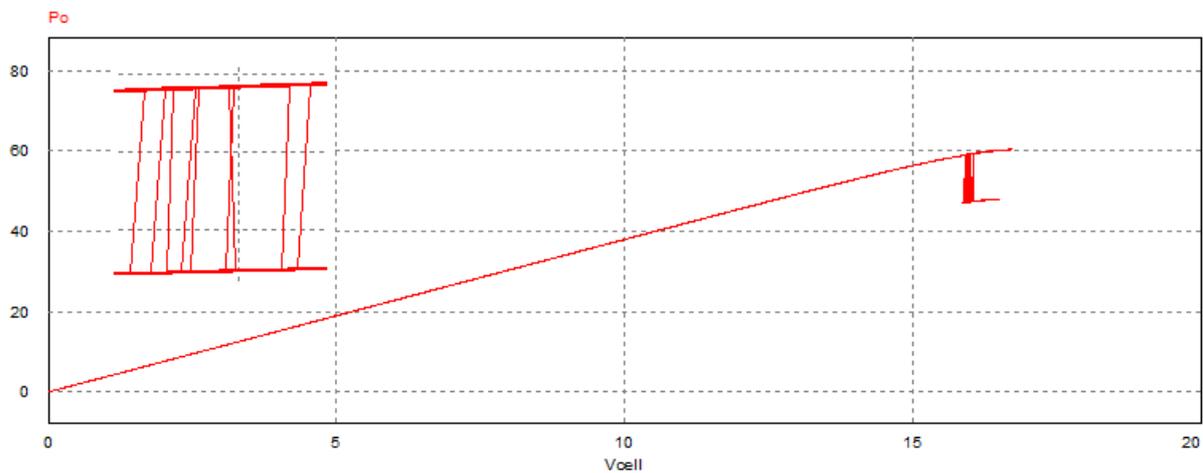


Figure VI-31 : Caractéristique  $P_{PV} - V_{PV}$  du GPV avec MPPT

- **Interprétation des résultats :**

On remarque que les allures obtenues sont similaires aux résultats de la méthode P&O.

La méthode Inc/Cond est une correction de P&O puisqu'elle est capable de calculer la direction dans laquelle la perturbation du point de fonctionnement devrait être pour atteindre le PPM. Dans le cas de changement rapide de l'ensoleillement, l'algorithme ne devrait pas prendre la mauvaise direction, de plus, elle ne présente pas beaucoup d'oscillations comme le montre les figures ci-dessus.

#### VI-6) Conclusion :

Dans ce chapitre, nous nous sommes consacré à la présentation, et la simulation dans l'environnement de programmation Matlab/simulink et PSIM de l'ensemble générateur photovoltaïque, onduleur, hacheurs boost et buck et méthodes de recherche du PPM P&O et Inc/Cond avec l'analyse des résultats de la simulation.

Concernant le générateur photovoltaïque, nous avons pu simuler les caractéristiques courant-tension et puissance-tension, prenant en compte les variations de l'éclairement et de la température, ce qui a permis la détermination des différentes valeurs optimales de ces facteurs pour le bon fonctionnement du GPV. Puis on a simulé les trois configurations de raccordement du hacheur.

Pour rechercher le PPM du générateur photovoltaïque on a choisi les méthodes P&O et Incrémentation de Conductance en introduisant un régulateur qui doit satisfaire les objectifs

généraux de la régulation ainsi qu'aux contraintes liées au rejet des perturbations, puis on a fait la comparaison des résultats qu'on a obtenus.

### Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'articule sur l'étude des caractéristiques du générateur photovoltaïque et de ses applications.

Pour atteindre le point de fonctionnement maximum qui varie avec le rayonnement et la température, un suiveur du point optimal MPPT est utilisé.

Pour cela, plusieurs techniques d'algorithme d'optimisation du générateur solaire, ont été étudiées, tels que, la perturbation et l'observation, la méthode par incrémentation de conductance, et la méthode Hill Climbing.

Toutefois, les méthodes présentées souffrent de certaines insuffisances, liées notamment aux retards inhérents au système commandé et surtout les contraintes technologiques que doit respecter les composants utilisés.

Pour palier à ces problèmes d'autres méthodes existent, nous citons la commande prédictive. L'idée principale de cette dernière est basée sur l'utilisation d'un modèle du système à commander pour prédire sa sortie sur un certain horizon et anticiper l'envoi des variables de commande.

# Bibliographies

---

- [1].Rapport de recherche de syndicat des énergies renouvelables, SOLER, Groupement Français des professionnels du solaire Photovoltaïque ,2010.
- [2].M.Belhadj ; « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome ». Mémoire de magister, Université de Bechar, 2008.
- [4]. M.G. Villalva, J.R. Gazoli et E.R Filho; « Modeling and circuit- based simulation of photovoltaic arrays ». University of Campinas (UNICAMP), 10th Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), 2009.
- [6].A. Cid Pastor ;« Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ».Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 29 septembre 2006.
- [7].M. Makhlouf ; « Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque appliquée au pompage ».Mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, 2006.
- [8]. D. Delagnes, « Production d'énergie électrique : énergie solaire photovoltaïque».Revue, juin 2007.
- [9]. S. Brigand ; « Les principes de l'énergie solaire photovoltaïque ». Complément technique, Mars/Avril 2008.
- [10]. A. Marquet ; « Stockage d'électricité dans les systèmes électriques ». Techniques de l'Ingénieur D4030, 2006.
- [12]. S.A. Tedjar ; « Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque».Mémoire de magistère, Université de Boumerdés, 2008.
- [13].R.CHENNI ; «Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire ». Thèse de doctorat, Université de Constantine 24 février 2007.
- [14]. L.Bailly. « Cellules photovoltaïque organiques souples à grande surface ».Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 03 Septembre 2010.
- [15].C.Miquel «Systèmes photovoltaïques : fabrication et impact environnemental ».Synthèse HESPUL, Juillet 2009.
- [17].Alpha. JM ; « Conseils et études pour l'optimisation de l'utilisation des énergies solaires photovoltaïques ».Revue, Valences Espagne
- [18].S. Poignan, « L'énergie photovoltaïque ».Rapport d'information en application de l'article 145 du règlement par la commission des affaires économique sur l'énergie photovoltaïque, 16 Juillet 2009.
- [20].A.Labouret ; « Energie solaire photovoltaïque ».3<sup>eme</sup> édition, Paris Dunod, 2006.

## Bibliographies

---

- [21].F.Belhachat, C. Larbes, L. Barazane, S. Kharzi, « Commande neuro-floue d'un hacheur MPPT », 4th International conference on computer integrated manufacturing CIP, 03-04 November 2007.
- [23].A.Borni ; « Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire ».Mémoire de magister, Université de Constantine, 5 Mai 2009.
- [24].D.Ali ; « Etude et simulation d'un traqueur de puissance maximale d'un système photovoltaïque ». Mémoire de magister en électrotechnique, Option : Modélisation et commande des Machines, Université Mentouri de Constantine, 2009/2010.
- [26].K. Ouallouche et R. Mounsi ; « Réalisation d'une commande à MLI d'un pont onduleur monophasé à IGBT ».Mémoire de DEUA, Université Mouloud Mammeri Tizi-ouzou, 2008.
- [27].M.Adli, R.Benamar, « Etude d'un système photovoltaïque connecté au réseau », Mémoire Ingénieur, Université Mouloud Mammeri, T.O, 2008.
- [28].A. Chouder, A. Malek et F. Krim ; « Modèle de simulation d'une commande en temps réel d'un onduleur de tension ». Rev. Energ. Ren. : Valorisation 131-135,1999.
- [30].A. Mermou ; « Onduleurs pour le réseau ».Thèse de doctorat, Université de Genève, 1996.
- [31].B.A.El Moubarek ; «onduleur triphasé commandé par la stratégie d'élimination d'harmonique SHE».Mémoire de magistère, Ecole Normal Supérieur Enseignement Technique Oran, 2009-2010.
- [32].S. Vighetti; « Système Photovoltaïque raccordé au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion ». Thèse de Doctorat, Université Grenoble, 24 Septembre 2010.
- [34] .A.Kamel, A.Youcef, S.Naïm, «Etude et réalisation d'un onduleur IGBT triphasé piloté par une carte dSpace DS1102 ».Mémoire d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2006.
- [35]. M. Petibon Stéphane ; « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 20 Janvier 2009.
- [37]. J-J. Pireaux ; « Physique et énergie, Travail sur les panneaux photovoltaïques ». Document, Université Notre-Dame de la Paix, Namur France, 2006-2007.
- [38] .I. Vechiu ; « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome ».Thèse de doctorat, Université du Havre ,2005.

## Bibliographies

---

- [39] Alain Bilbao Learreta. « Réalisation de commandes MPPT numérique », Mémoire d'ingénieur technique industriel, Université de Rovera et Virvili, septembre 2006.
- [40]. B. Abdelmalek, « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque », Mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, 2008.
- [41].M.Arrouf, « Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branché sur un générateur photovoltaïque ».Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, 25 Décembre 2007.
- [42].C.Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque » Thèse de doctorat, Université Toulouse III, 15 Décembre 2008.
- [43] .L.Abbassen «Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque ». Mémoire de magistère, Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou, 05 juin 2011.
- [44].S.Astier, « Conversion photovoltaïque : De la cellule aux systèmes », Technique de l'ingénieur, D3 936.
- [45].A.Tchapo Singo, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome ».Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, le 3 Février 2010.
- [46].J.P. Hoareau «énergie photovoltaïque une énergie inépuisable écologique, économique et fiable ». Cours, Lycée Georges Brassens France.
- [47]. N. Achaïbou ; « Introduction à l'Etude du Système de Stockage dans un Système Photovoltaïque », CDER, Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999) 1-6.
- [48].A Sadek ; « Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien».Thèse de magister, Université de Batna, 01 Juillet 2009.
- [49]. N. Achaïbou ; « Stockage des énergies renouvelables », CDER Bulletin des Energies Renouvelables N° 5, juin 2004.
- [51].M.Zandi ; « Contribution au pilotage des sources hybrides d'énergie électrique ».Thèse de doctorat, Université de Nancy-Institut national polytechnique de Lorraine, 12 Novembre 2010.
- [52].M. Jacquier. « Accumulateurs », Techniques de l'Ingénieur D940, 1987.
- [53].E. Michel, A.Deves ; «Energie photovoltaïque : Application aux traitements de l'eau potable et des eaux usées aux zones rurales ».Document technique, FNDAE n°12 réédition 2003.
- [55].J.Royer, T.Djiako, E.Schiller, B.Sada Sy ; « Le pompage photovoltaïque ».Manuel de cours, Université, d'Ottawa/EIER/CREPA, 1998.

## Bibliographies

---

- [56]. V. Schwarz, B. Gindroz ; « Le stockage électrochimique », Dossier Stockage de l'Energie Mines-énergie, Janvier-Février 2005.
- [57].B. Duret, C.Lafon, H.Rouault ; « Stockage de l'électricité : les batteries ». CEA/Grenoble, CEA/Valrhô-Marcoule. 2000-2001.
- [58].Z.Foudil ; «Etude de la concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïques ».Mémoire de magister, Université de Mentouri Constantine ,2009.
- [59].G. Dillenseger ; « Caractérisation de nouveaux modes de maintien en charge pour les batteries stationnaires de secours », Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 14 décembre 2004.
- [60]. H.S. Wroblowa; « Modern aspects of electrochemistry ». New York, Plenum Press, Vol. 16, 1985.
- [61].A. CHRAA ; « Etude des processus d'oxydo-réduction intervenant dans les plaques anodique » Thèse de doctorat, Paris 6, 93PA066532, 1993
- [62].J.Labbé ; « L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés ». Thèse de doctorat, Ecole des mines de Paris, 21 décembre 2006.
- [63]. A. Moussi, A. Saadi «Etude comparative entre les technique d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque », Courrier du Savoir – N°01, Novembre 2001, pp. 73-79, Université de Biskra, Novembre 2001.
- [64].T.Mrabti, M. El Ouariachi, K.Kassmi et F.Bagui, « Conception, modélisation et réalisation d'un système photovoltaïque de moyenne puissance ». Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°4 (567 – 575), Université Mohamed Premier Oujda, Maroc, Université de Toulouse, 25 Décembre 2008.
- [65].V.Boitier, P.Maussion ; «Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques», LAAS-CNRS, Université de Toulouse.
- [66].A.Berasategi, «Convertisseur multicellulaires adaptatif pour applications photovoltaïques » LAAS-CNRS, Toulouse.
- [64].T.Mrabti,M. El Ouariachi,K.Kassmi et F.Bagui, « Conception, modélisation et réalisation d'un système photovoltaïque de moyenne puissance ». Université Mohamed Premier Oujda, Maroc, Université de Toulouse, 25 Décembre 2008, article PDF.

## Bibliographies

---

[65].V.Boitier, P.Maussion «Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques», Université de Toulouse.

[66].A.Berasategi, «Convertisseur multicellulaires adaptatif pour applications photovoltaïques » LAAS-CNRS, Toulouse

[67].S.Rodriguez ; « Réalisation d'un étage d'adaptation pour générateur photovoltaïque à partir d'un girateur de puissance ». Mémoire d'ingénieur technique industriel, Université de Rovera et Virvili, juin 2008.

[68].C. Alonso ; « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie ». L'habilitation à diriger les recherches, Université Toulouse III, Décembre 2003.

[69].A.T. Singo ; «Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome ».Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 3 Fevrier 2010.

[70]. JF.Reynaud. « Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques », Thèse de doctorat, Université de Toulouse III, 4 Janvier 2011.

[71].K. Kassimi, M. Hammdaoui et F. Olivie, « concertions et modélisation d'un système photovoltaïque adapte par une commande MPPT analogique», Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°4 451 – 462, 2007.

[72]. M. Chaabene, «Gestion énergétique de panneaux photovoltaïques». Mémoire de magistère, Université de Sfax Tunis 2007-2008.

[73].S.Belakehal, «conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables». Thèse de doctorat, Université de Constantine, 10 Juin 2010.

[74].C. Bernard, C. Sebrao –Oliveira, B.Laval, C. Vaudouer, «Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT a base de logique floue », rapport rédigé dans le cadre de l'UV BA04 – Energie renouvelables, université de Compiègne, 2009.

[75] .N.Aissaoui,L.Aissiou,Y.Ait Messaoud ; « éclairage à base de LEDs ».Mémoire DEUA, Université Mouloud Mammeri de T.O, 2008.

[76].R.Gardette. « Les energies renouvelables », Documentaire, les productions du Golem, 2001.

[3] [www.cipcsp.com/tutorial/regulateur](http://www.cipcsp.com/tutorial/regulateur)

[5] [www.terra-eco.com/-Convertisseurs-DC-AC](http://www.terra-eco.com/-Convertisseurs-DC-AC)

# Bibliographies

---

- [11]. [www.caracteristiques des équipements du système photovoltaïque.fr](http://www.caracteristiques-des-equipements-du-systeme-photovoltaïque.fr)
- [16] [www.inti.be](http://www.inti.be)2011
- [19].<http://www.ademe.fr> 2011
- [22] [www.stielec.ac-aix-marseille.fr](http://www.stielec.ac-aix-marseille.fr)2011
- [25] [fr.wikipedia.org/wiki/ Hacheur](http://fr.wikipedia.org/wiki/Hacheur)
- [29] [www.cipcsp.com/tutorial/generateur-solaire.html](http://www.cipcsp.com/tutorial/generateur-solaire.html) 2011
- [33][www.portail.cder.dz](http://www.portail.cder.dz) 2011
- [36]. <http://www.cea.fr/fr/Publications/clefs50/encadred.pdf> 2011.
- [50] [www.wikipidia.fr](http://www.wikipidia.fr)2011
- [54] <http://bat8.inria.fr/lang/licence/>

# Annexe

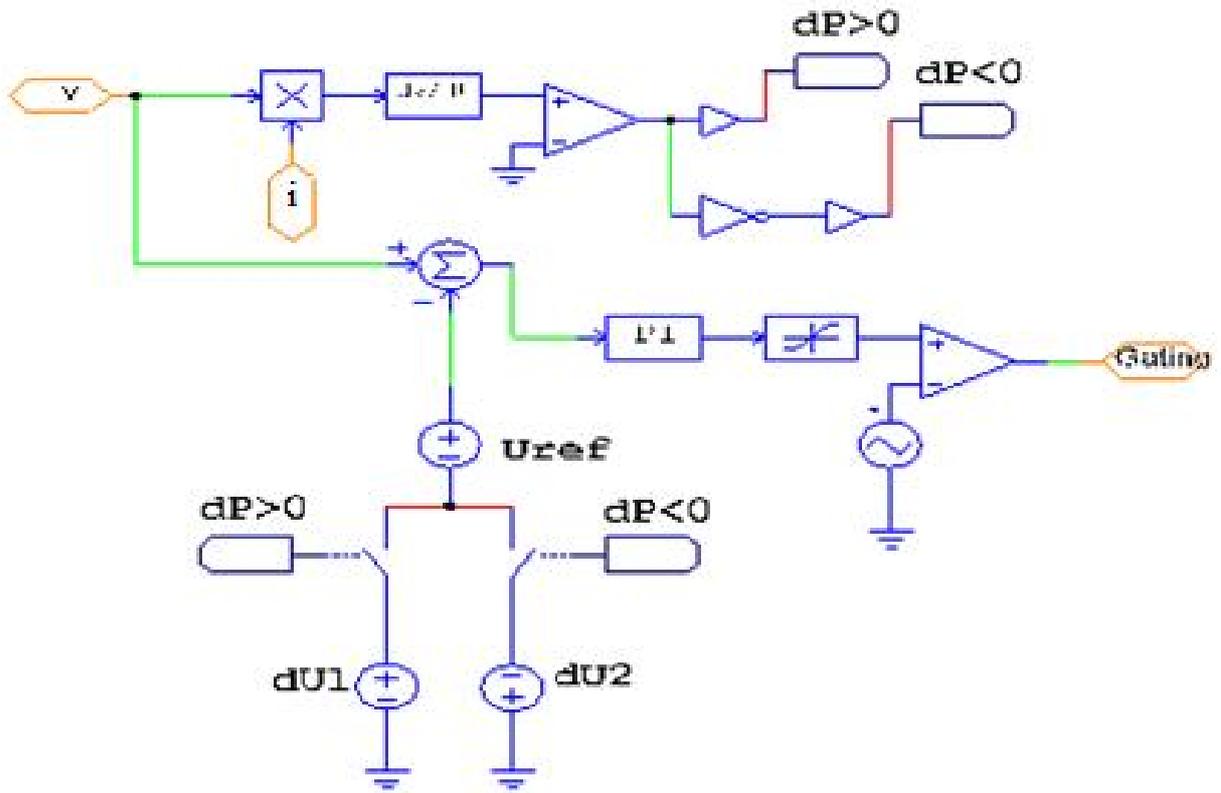
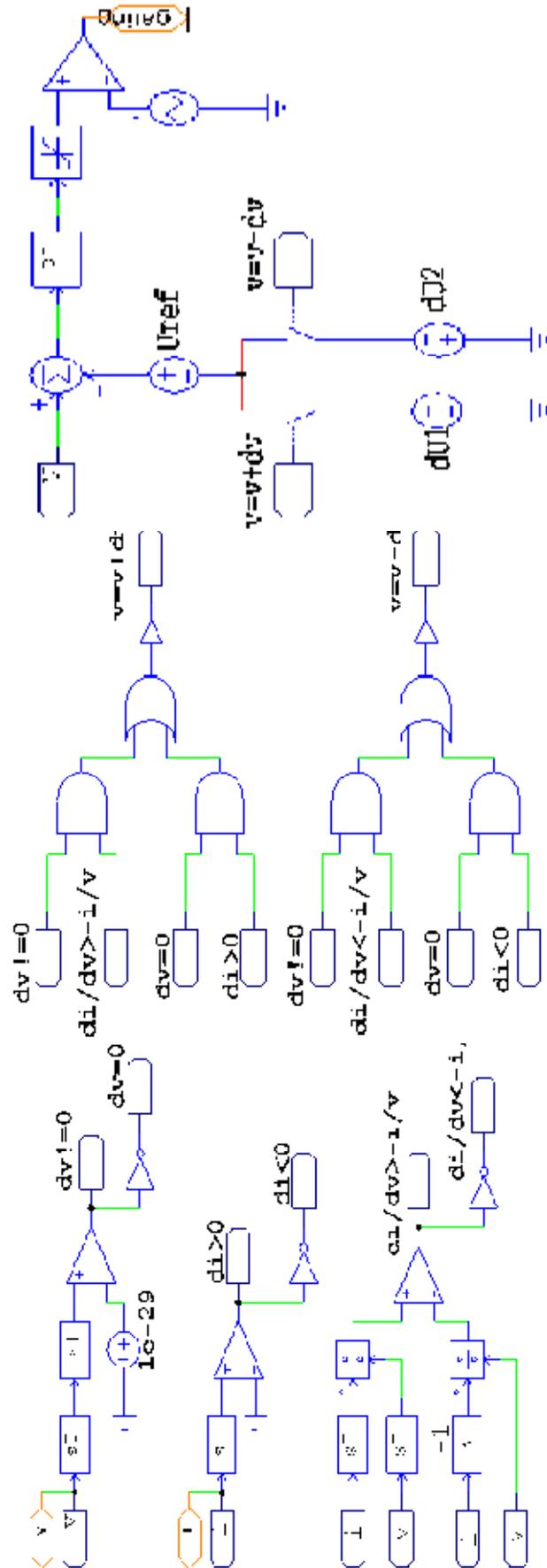


Schéma de commande MPPT P&O

# Annexe



**Schéma de commande MPPT incrément de conductance**