

Sommaire

I. 1 Introduction	2
I.2 Les Différents Types de Systèmes Photovoltaïques	2
1.2.1 Alimentations électriques faibles puissances	2
1.2.2 Installations électriques photovoltaïques autonomes	2
1.2.3 Installations ou centrales électriques photovoltaïques raccordées au réseau	3
1.2.4 Installations ou centrale électriques photovoltaïques hybride	3
I.3 La Cellule Photovoltaïque	3
I.3.1 Principe de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque	4
I.3.2 Le rendement photovoltaïque	4
I.3.3 Les Différents technologies de Cellules Photovoltaïques	5
I.4 Le générateur photovoltaïque	6
I.4.1 Le panneau solaire	6
I.4.2 Groupement de Cellules Photovoltaïques	6
I.4.3 Regroupement (série et parallèle)	8
I.5 Conversion de l'énergie	8
I.6 Poursuite du point maximum de puissance	9
I.6.1 Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)	10
I.6.2 Classification des Commandes MPPT	10
I.6.3 Critères de Qualité d'une commande MPPT	12
I.6.4 Rendements de la Chaîne de Puissance	12
I.6.5 Les algorithmes MPPT	13
I.7 Conclusion	18

I.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique, par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible (nommés cellules PV). L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension $I(V)$ non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM).

Dans ce chapitre, nous présenterons les principales caractéristiques des éléments constitutifs de ces GPV avec leurs fonctionnements. Ainsi nous décrivons tout d'abord le principe de fonctionnement d'une cellule PV élémentaire.

L'utilisation des GPV nécessite l'adaptation de puissance de ces derniers avec la charge, c'est pourquoi, nous présenterons le schéma de base de l'étage d'adaptation spécifique d'un GPV qui devra permettre d'atteindre le point maximum de puissance de ce dernier.

I.2 Les Différents Types de Systèmes Photovoltaïques

1.2.1 Alimentations électriques faibles puissances

Il s'agit des alimentations électriques faibles telles que les calculatrices ou les chargeurs de piles. Des modules photovoltaïques (PV) peuvent faire fonctionner n'importe quel appareil alimenté par des piles.

1.2.2 Installations électriques photovoltaïques autonomes

Un système photovoltaïque (PV) autonomes est composé dans son ensemble de :

- **Un générateur photovoltaïque** : peut fournir directement l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner les récepteurs (éclairage et équipement domestique).
- **Le régulateur de charge** : a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Il est un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie.
- **Une batterie d'accumulateurs** : permettent de stocker l'énergie électrique qui sera ensuite utilisée en l'absence du Soleil. Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous une forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique au besoin selon ses caractéristiques.
- **Convertisseur continu/continu (DC/DC)** : permettant d'alimenter le bus continu et de poursuivre le point de puissance maximum.

- **Convertisseur DC/AC** : permettant d'alimenter les charges alternatives.
- **La charge** : on peut utiliser deux types de charges (continu ou bien Alternative) [4].

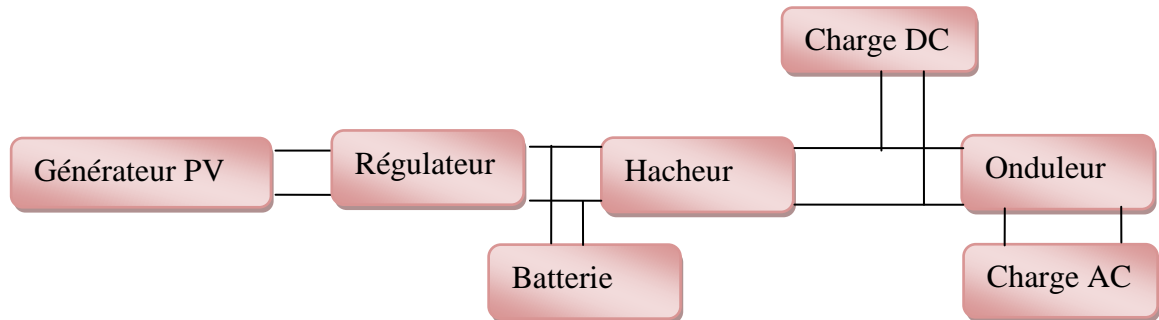


Figure 1.1 : Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome.

1.2.3 Installations ou centrales électriques photovoltaïques raccordées au réseau

Un générateur photovoltaïque connecté au réseau n'a pas besoin de stockage d'énergie et élimine donc le maillon le plus problématique (et le plus cher) d'une installation autonome. C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie.

Deux compteurs d'énergie sont nécessaires : un compteur comptabilise l'énergie achetée au fournisseur d'énergie et un autre compteur mesure l'énergie renvoyée sur le réseau électrique lorsque la production dépasse la consommation.

Un troisième compteur est ajouté dans le cas où l'énergie produite est injectée en intégralité dans le réseau (compteur de non-consommation).



Figure 1.2 : Installation ou centrale électrique photovoltaïque raccordée au réseau

1.2.4 Installations ou centrale électriques photovoltaïques hybride

Il s'agit de systèmes qui regroupent des sources d'énergie de nature différentes telle une installation Éolienne, un générateur diesel ou central de cogénération en plus du générateur photovoltaïque. Ce type d'installation est utilisé lorsque le générateur photovoltaïque seul ne couvre pas toute l'énergie requise.

I.3 La Cellule Photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants électroniques à semi-conducteurs (généralement faites de silicium sous ses différentes formes). Elles convertissent directement l'énergie lumineuse en électricité courant continu basse tension (effet photovoltaïque).

Comme l'énergie lumineuse est le soleil, on parle alors de cellules solaires.

I.3.1 Principe de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque donc est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants: Absorption des photons par le matériau constituant le dispositif ; Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électrons/trous dans le matériau semi-conducteur ; Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant: d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trous créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N, (Figure 1.3) [5].

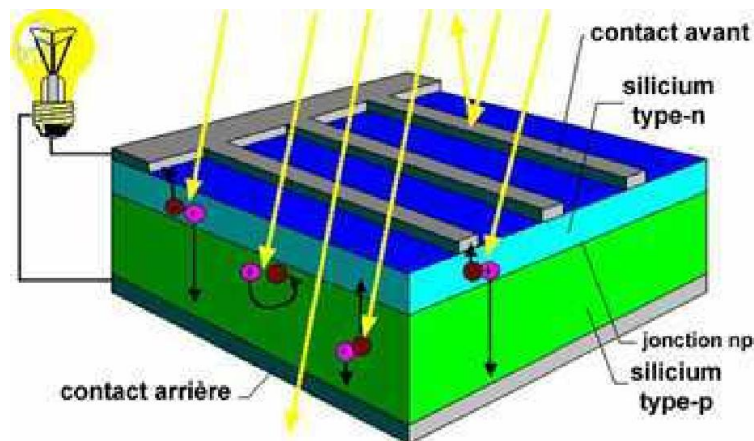


Figure 1.3 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I.3.2 Le rendement photovoltaïque

Le rendement photovoltaïque est un facteur très important pour les composants photovoltaïques, il se définit comme étant le taux de conversion d'énergie des cellules PV. Le rendement est aussi le pourcentage de l'énergie solaire qui est convertie en électricité par l'intermédiaire d'une cellule solaire. Il caractérise ces composants et définit leur performance. Le rendement est fonction du type de semi-conducteur utilisé et est directement lié au «band gap». Pour le silicium cristallin, le rendement théorique maximum est de 44 %. Le silicium n'est pas le meilleur matériau, son «band gap» est de 1.10 eV, celui de l'arséniure de gallium (GaAs) a un «band gap» quasi optimal de 1.4 eV. Le rendement commercial des cellules monocristallines est de l'ordre de 12 à 17 % maximum [6].

I.3.3 Les Différents technologies de Cellules Photovoltaïques

- ***Cellules monocristallines (mono c-SI)***

Sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium poly cristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal.

- ***Cellules poly cristallines (multi c-SI)***

Sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes). Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées.

- ***Cellules amorphes***

Ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies poly cristallines ou monocristallines.

- ***Les couches minces***

Les principales filières couches minces sont le silicium amorphe(Sia) – utilise depuis de longues années, dans les montres et calculatrices notamment le CdTe (hétéro jonction tellurure de cadmium, sulfure de cadmium) et le CIS (hétéro jonction diséléniure cuivre indium / sulfure de cadmium). La fabrication se réalise en automatique, avec tunnels pour les dépôts de couche et à l'aide de laser pour les connexions. Elle est adaptée aux grosses productions. Ces premières technologies ouvrent actuellement d'autres voies, sans que l'on sache laquelle dominera.

- ***Les cellules organiques***

Sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. Un semi conducteur organique se présente sous la forme d'un cristal ou d'un polymère dont les caractéristiques principales sont la conduction par les électrons et

les trous. Les molécules servant à la conception de ces semi conducteurs sont composés de carbone [5].

I.4 Le générateur photovoltaïque

I.4.1 Le panneau solaire

Pour obtenir des puissances ou des tensions élevées, un certain nombre de cellules doivent être groupées en modules. Pour doubler la tension, il faut monter les cellules en série, pour doubler la puissance à tension constante, il faut les mettre en parallèle. Il faut veiller avec soin à disposer des caractéristiques électriques équivalentes c.à.d. toutes les cellules couplées en parallèle devraient avoir la même tension en circuit ouvert, et la même tension en point de puissance maximale. Pour les cellules couplées en série elles devraient avoir le même courant de court-circuit et le même courant pour le point de puissance maximale. Si ces conditions ne sont pas vérifiées les photopiles de grande puissance vont débiter dans celles de faible puissance, le panneau sera alors dégradé.

En conséquence, les performances du panneau solaire sont limitées par les photopiles dont les caractéristiques sont les plus faibles. La puissance de sortie est réduite par un accroissement de la température du panneau dû à la dissipation interne de la puissance.

Pour les systèmes de puissance importante, il faut tenir compte d'une seconde contrainte, appelée 'point chaud', car une cellule défectueuse peut détruire tout le module.

La pratique générale n'est pas de construire un générateur solaire à partir d'un seul module, mais de diviser l'ensemble en un certain nombre de modules de tensions et puissances égales.

I.4.2 Groupement de Cellules Photovoltaïques

La puissance fournie par une seule cellule solaire étant très faible, plusieurs cellules dont les caractéristiques sont semblables doivent être électriquement associées et encapsulées dans un plastique pour former un GPV pratique. Dans ce qui suit, différents groupements possibles des cellules solaires sont présentés, ainsi que les précautions à prendre pour contourner quelques aléas.

I.4.2.1 Groupement en série de cellules PV

Si on assemble en série des cellules, la tension aux bornes de l'assemblage est égale à la somme des tensions délivrées par chacune des cellules

$$U = \Sigma U_C \quad (1.1)$$

U , Volt : Tension aux bornes de l'assemblage.

U_C , Volt : Tension aux bornes de la cellule d'indice " c ".

Dans ce cas, le courant qui traverse les cellules est le même mais les cellules peuvent fonctionner à des tensions différentes.

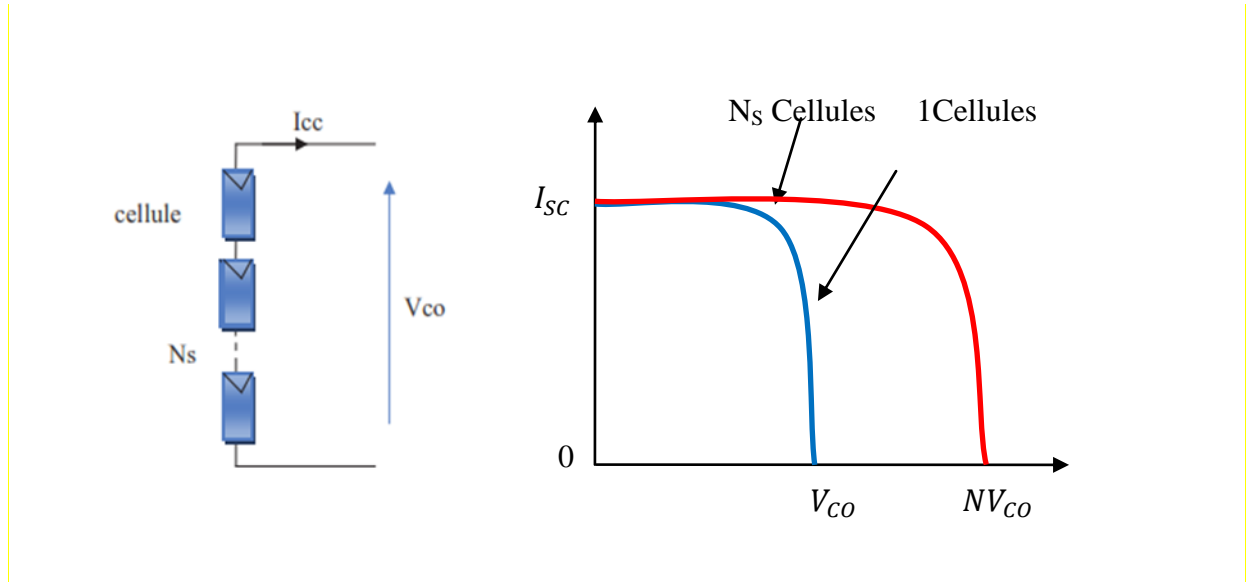


Figure 1.4 : Caractéristique I/V d'un groupement en série de Cellules PV

I.4.2.2 Groupement en parallèle de cellules

Dans le cas d'un montage en parallèle, le courant de l'ensemble sera égal à la somme des courants produits par chacune des cellules.

$$I = \Sigma I_C \quad (1.2)$$

I , Ampère : Courant circulant dans l'assemblage.

I_C , Ampère : Courant circulant dans chaque cellule.

Dans le cas d'une association en parallèle, les cellules délivrent la même tension mais elles fonctionnent avec des courants différents.

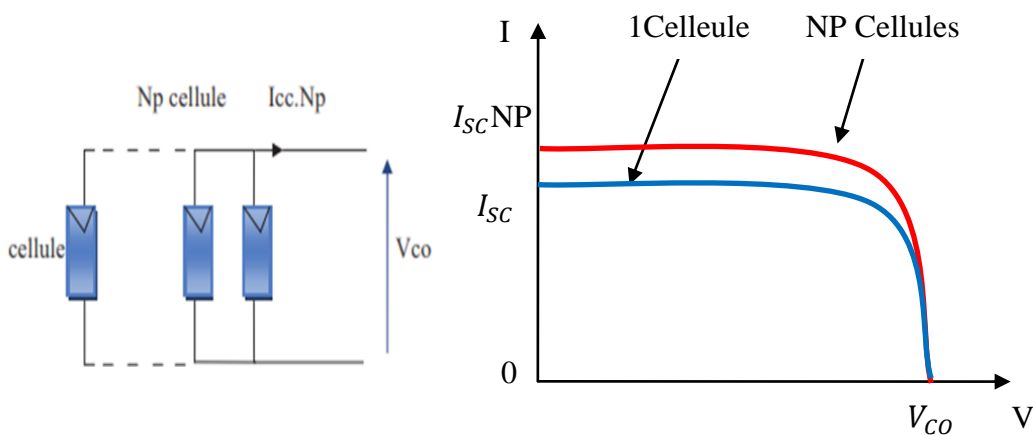


Figure 1.5 : Caractéristique I/V d'un groupement en parallèle de cellules PV

I.4.2.3 Regroupement (série et parallèle)

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque.

I.5 Conversion de l'énergie

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant de générer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe. Ils se composent de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance dans le cas idéal, c'est pour cette raison que les hacheurs ont de bons rendements.

Généralement le commutateur est un transistor MOSFET qui travaille en mode bloqué-saturé. Si le commutateur est bloqué, son courant est nul, il ne dissipe donc aucune puissance ; s'il est saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque nulle et par conséquent la puissance perdue sera très petite [7].

Le commutateur du convertisseur est commandé par un signal PWM (pulse width Modulation), ou MLI (modulation large d'impulsion), avec une fréquence de commutation f_s fixe et un rapport cyclique D variable.

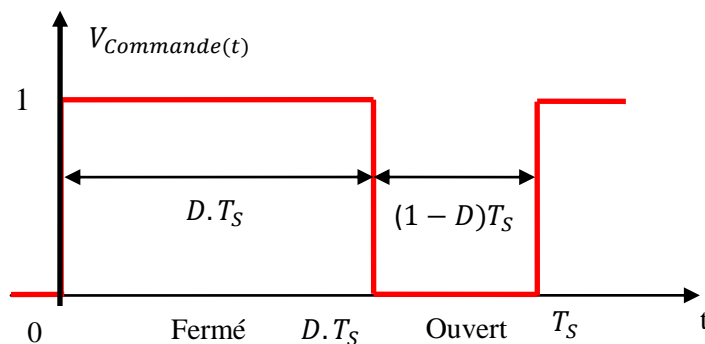


Figure 1.6 : Tension de commande (PWM) du commutateur durant une période de commutation

La figure (1.6) montre le signal de commande PWM du commutateur. D'abord on ferme le commutateur pendant un temps de fermeture égal à $D \cdot T_s$, ensuite on l'ouvre durant un temps d'ouverture durant un temps d'ouverture égal à $(1-D) \cdot T_s$.

Ou :

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

Il existe différents types de convertisseurs continu-continu (DC-DC), les trois types les plus fréquemment utilisés dans les systèmes photovoltaïques sont le convertisseur Buck, le boost et le buck-boost.

I.6 Poursuite du point maximum de puissance

La puissance délivrée par un GPV dépend fortement du niveau d'ensoleillement, de la température des cellules, de l'ombrage et aussi de la nature de la charge alimentée. Elle est de ce fait très imprévisible, la courbe caractéristique de puissance du GPV présente un point de puissance maximale MPP (Maximum Power Point) correspondant à un certain point de fonctionnement de coordonnées V_{MPP} pour la tension et I_{MPP} pour le courant (voir figure I.7). Vu que la position du MPP dépend du niveau d'ensoleillement et de la température des cellules, elle n'est jamais constante dans le temps. Un convertisseur MPPT (Maximum Power Point Tracker) doit donc être utilisé afin de suivre ces changements.

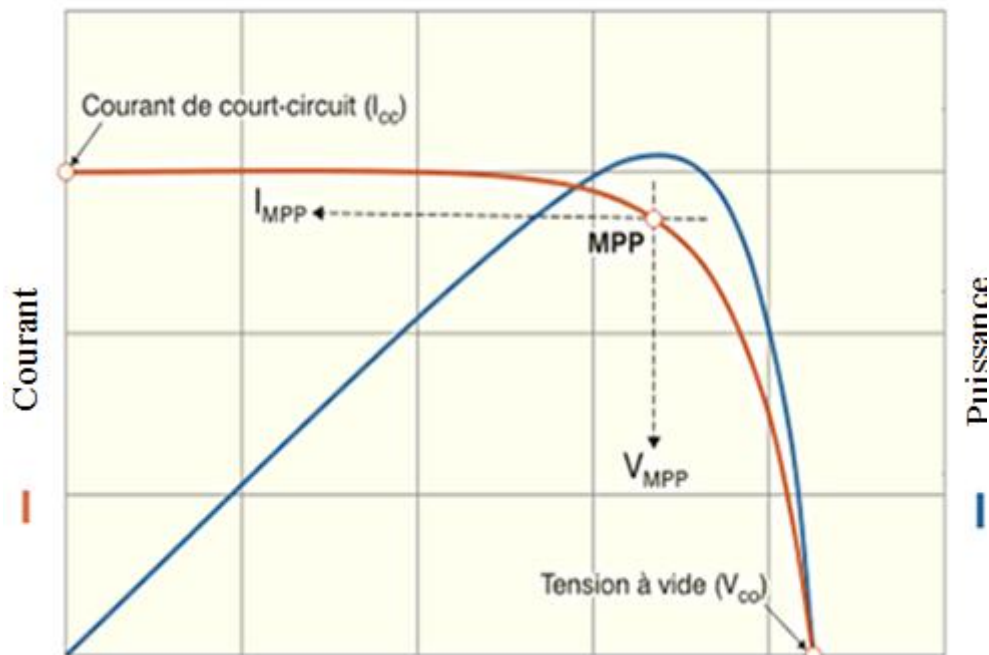


Figure 1. 7 : Courbe caractéristique de puissance d'un GPV

Par définition, un convertisseur MPPT est un système de conversion de puissance muni d'un algorithme de contrôle approprié permettant d'extraire le maximum de puissance que le GPV peut fournir.

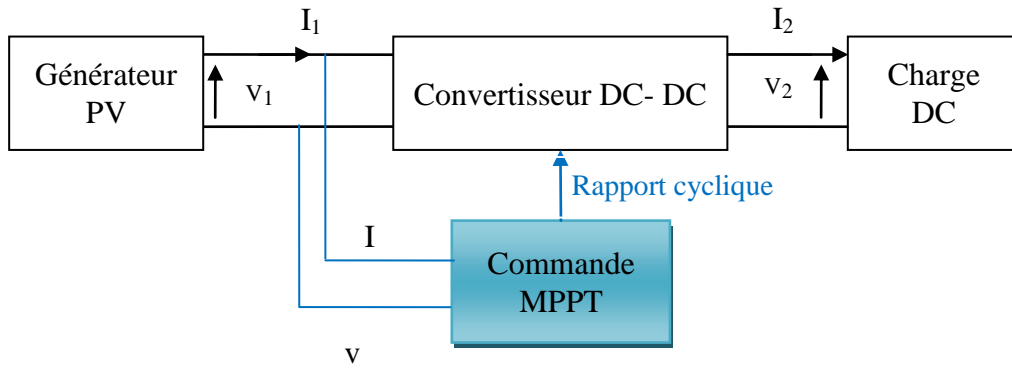


Figure 1.8 : Schéma de principe du convertisseur MPPT

L'adaptateur communément utilisé en PV est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC). La structure de conversion est choisie en fonction de la charge à alimenter. Elle peut être survolteur ou dévolteur.

I.6.1 Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)

La chaîne de puissance d'un GPV où une charge DC est alimentée par un générateur à travers un convertisseur DC-DC (hacheur) commandé par une MPPT peut être représentée comme indiquée sur la figure (1.8) [8]. La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du hacheur de telle sorte que la puissance fournie par le GPV soit le P_{MAX} disponible à ses bornes. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le PPM, mais en général il est basé sur la variation du rapport cyclique du hacheur jusqu'à se placer sur le PPM en fonction des évolutions des paramètres I_{PV} et V_{PV} [8].

I.6.2 Classification des Commandes MPPT

Il est possible de classer d'une manière générale les commandes MPPT 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.

I.6.2.1 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche d'entrée

a) *Commande MPPT Indirecte*

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{sc} ou V_{oc}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte

uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur [9].

Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques.

b) Commande MPPT directe

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV.

Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP.

I.6.2.2 Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée

a) Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du GPV

Ce type de commandes MPPT effectue une recherche du MPP selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. La commande nécessite alors la mesure du courant et de la tension en entrée du convertisseur de puissance [4].

D'autres types de commandes MPPT sont basées sur la régulation du courant du GPV, supposant que ce dernier soit une image proportionnelle à la puissance. Ceci permet de s'approcher le plus proche possible du courant optimal I_{opt} . Ce type de commande ayant besoin d'un seul capteur est plus facile à mettre en œuvre et a un coût bas.

b) Commande MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur

Dans la littérature, il existe des algorithmes basés sur les paramètres de sortie du convertisseur de puissance. En effet, ce type utilise la tension et le courant de sortie du CS ou alors uniquement l'un des deux. Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie sont principalement utilisées quand la charge est une batterie.

Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{MAX} est faite à travers le rendement du convertisseur. Plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, tous les systèmes avec un seul capteur sont imprécis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial.

I.6.3 Critères de Qualité d'une commande MPPT

Pour savoir si un gain est apporté par l'utilisation d'une commande MPPT d'un type ou d'un autre, des critères de qualité sont utilisés. Dans un premier temps, la commande MPPT doit avoir un niveau de simplicité important favorisant une faible consommation et un coût raisonnable.

De plus, concernant ses performances, la commande MPPT doit avoir un bon comportement en dynamique et en statique pour assurer une adaptation rapide aux changements climatiques.

Elle doit aussi pouvoir piloter l'étage d'adaptation de telle sorte qu'en régime statique, le point de fonctionnement du GPV soit le plus près possible du MPP dans n'importe quelle condition météorologique ou état de la charge alimentée. Aussi, la stabilité et la robustesse du système doit être assurée.

En résumé, l'utilisation d'un type de commande MPPT par rapport à une connexion directe doit apporter un gain énergétique et économique quantifiable. Il est important de préciser qu'il n'existe pas de standard international qui définisse comment il faut mesurer les performances d'une commande MPPT [8].

I.6.4 Rendements de la Chaîne de Puissance

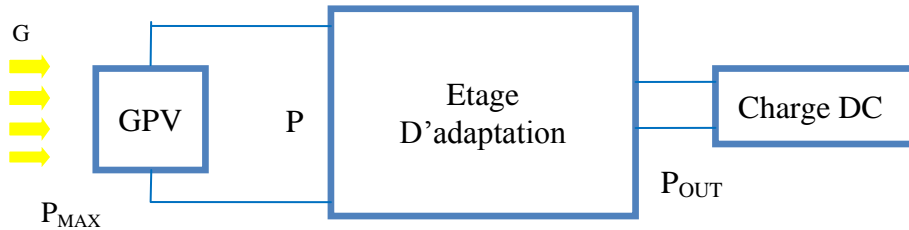


Figure 1.9: Chaîne élémentaire de conversion d'énergie PV

Le rendement total de l'étage d'adaptation entre le GPV et la charge DC se compose de divers types de rendements reliés à chaque partie de la chaîne.

Le rendement maximum de la conversion photons-électrons du panneau solaire μ_{pv} est défini par:

$$\mu_{pv} = \frac{P_{max}}{G.A_{eff}} \quad (1.3)$$

Où P_{max} le maximum de puissance potentiellement disponible à la sortie du panneau, G est l'irradiance (W/m^2) et A_{eff} est la surface effective du panneau PV.

La puissance P effectivement délivrée par un GPV dépend en plus de la commande utilisée dans le convertisseur. Le rendement du point de fonctionnement qui en découle est noté μ_{MPPT} (Rendement MPPT) permet de mesurer l'efficacité de la commande qui contrôle le convertisseur statique afin que le module PV fournisse la puissance maximale.

$$\mu_{MPPT} = \frac{P}{P_{\max}} \quad (1.4)$$

Enfin, le rendement du convertisseur noté μ_{conv} est défini par:

$$\mu_{conv} = \frac{P_{out}}{P} \quad (1.5)$$

Avec P_{out} la puissance délivrée en sortie du convertisseur.

Le rendement total de la chaîne de conversion μ_{total} est donné par :

$$\mu_{total} = \mu_{pv} \cdot \mu_{MPPT} \cdot \mu_{Conv} \quad (1.6)$$

I.6.5 Les algorithmes MPPT

Il existe dans la littérature plusieurs algorithmes MPPT. Les plus utilisés sont:

- Algorithme de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)
- Algorithme du Courant constant (Constant Current)
- Perturbation et Observation (P&O, Perturb and Observe)
- Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance)

Les algorithmes P&O et IncCond font partie de la technique appelée Hill Climbing (monté de pente).

Dans la suite de ce chapitre nous allons décrire les deux dernier algorithmes, qui sont les plus cités dans la bibliographie, ceci afin d'utiliser l'un ou l'autre ou les deux dans notre conception.

I.6.5.1 Algorithme Perturbation et Observation (P&O)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en perturbant le système et observant l'impact sur la puissance à la sortie du GPV. Sur la figure (1.10) [10], on voit que si la tension de fonctionnement est perturbée dans une direction donnée et que la puissance augmente ($dP/dV > 0$), alors il est clair que la perturbation a déplacé le point de fonctionnement vers le MPP. L'algorithme P&O continuera à

Perturber la tension dans la même direction par contre, si la puissance diminue ($dP/dV < 0$), alors la perturbation a éloigné le point de fonctionnement du MPP [11].

L'algorithme inversera la direction de la perturbation suivante. Cet algorithme est résumé sur l'organigramme de la figure (I.10) L'algorithme peut être représenté mathématiquement par l'expression :

$$V(k) = V(k - 1) + \Delta V \cdot \text{sign} \left(\left. \frac{dP}{dV} \right|_{V=V_{k-1}} \right) \quad (1.7)$$

Le processus est répété périodiquement jusqu'à ce que le MPP soit atteint. Le système oscille alors autour du MPP, ce qui provoque des pertes de puissance l'oscillation peut être minimisée en diminuant la taille de la perturbation. Cependant, une taille de perturbation trop petite ralentit considérablement la poursuite du MPP. Il existe alors un compromis entre précision et rapidité.

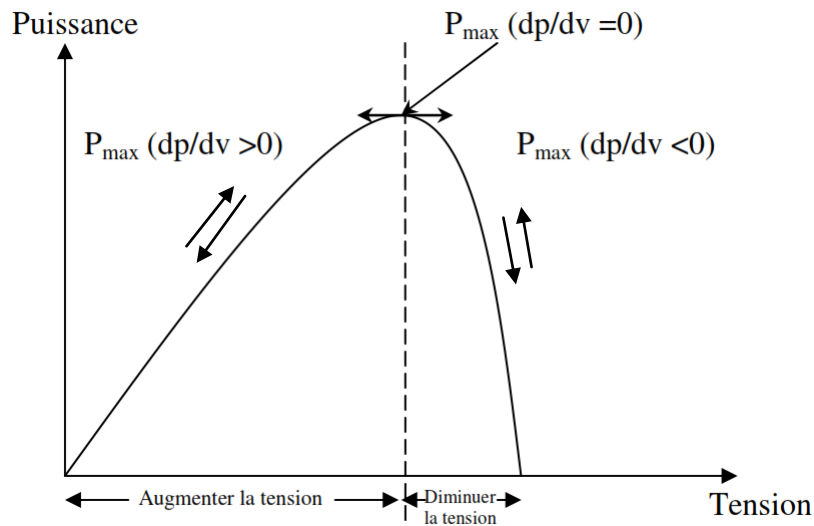


Figure 1.10: Signe de dP/dV à différentes position de la courbe caractéristique de puissance

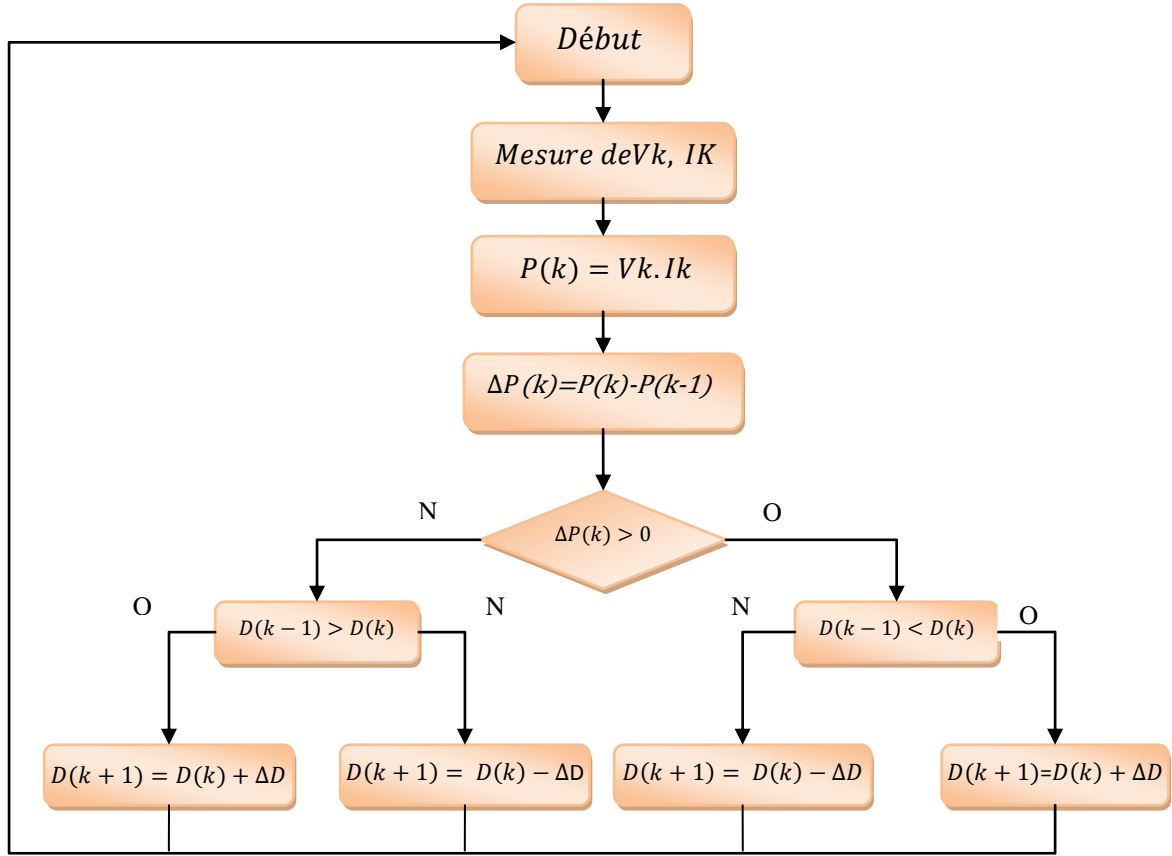


Figure 1.11: Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation

La figure (1.11) [11], montre l'organigramme de l'algorithme de P&O tel qu'il doit être implémenté dans le système de contrôle.

Le fonctionnement de l'algorithme P&O

D'abord la tension V et le courant I sont mesurés pour calculer la puissance $P(k)$ (à l'instant k). Cette valeur $P(k)$ est comparée à la valeur de la puissance obtenue durant la dernière mesure $P(k-1)$. Si la puissance fournie par le panneau a augmenté depuis la dernière mesure, l'incrément ou des incréments du rapport cyclique D continueront dans le même sens que lors du dernier cycle et ceci est fait par le test sur dV .

Si $dV > 0$ cela veut dire qu'on a incrémenté V durant le dernier cycle c'est-à-dire $D(k+1) = D(k) + \Delta D$.

Si $dV < 0$ cela veut dire qu'on a décrémenté V durant le dernier cycle c'est-à-dire qu'on va mettre $D(k+1) = D(k) - \Delta D$ donc on termine dans le chemin où P continue à augmenter.

Si la puissance fournie par le panneau a diminué depuis la dernière mesure, l'incrément ou la des incréments du rapport cyclique D sera en sens inverse par rapport au dernier cycle et ceci est fait aussi par le test sur dV .

Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V est perturbée avec chaque cycle.

I.6.5.2 Algorithme de l'Incrémentation de la conductance (IncCond)

Cette méthode est basée sur le fait que la pente de la courbe caractéristique de puissance du panneau est nulle au MPP, positive à gauche et négative à droite.

$$\begin{cases} dp/dv = 0 & \text{au MPP} \\ dp/dv > 0 & \text{à gauche du MPP} \\ dp/dv < 0 & \text{à droite du MPP} \end{cases} \quad (1.8)$$

Puisque :

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (1.9)$$

Alors, l'équation (1.8) peut écrite comme suit :

$$\begin{cases} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} & \text{au MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} & \text{à gauche du MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} & \text{à droite du MPP} \end{cases} \quad (1.10)$$

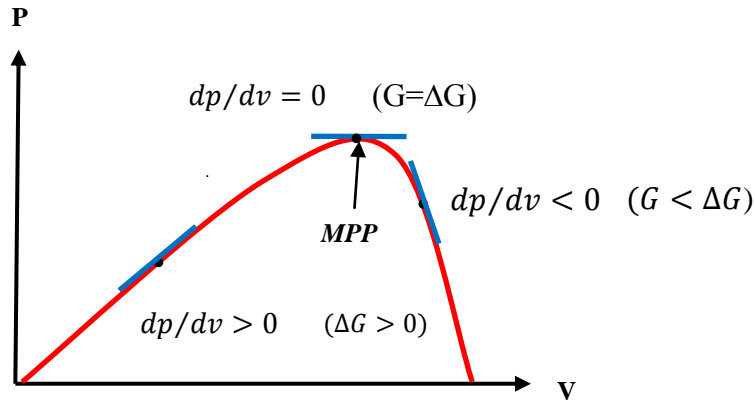


Figure 1.12 : Signe dp/dv de dp/dv pour différentes zones de fonctionnement

Le MPP peut donc être poursuivi en comparant la conductance instantanée ($G_{ci} = \frac{I}{V}$) à l'incrément de la conductance ($\Delta G_{ci} = \Delta I / \Delta V$), comme le montre l'organigramme de la figure (1.13) [4] est V_{ref} la tension de référence pour laquelle le panneau PV est forcé à fonctionner. Au MPP, $V_{ref} = V_{MPP}$. Une fois que le MPP est atteint, le point de fonctionnement correspondant est maintenu, à moins qu'un changement dans ΔI est noté, indiquant un changement des conditions atmosphériques et donc du MPP. L'algorithme augmente ou diminue V_{ref} pour suivre le nouveau MPP [12].

La taille de l'incrément détermine la rapidité de la poursuite du MPP. Une poursuite rapide peut être obtenue avec un incrément plus grand, mais le système ne pourrait pas fonctionner exactement au MPP et oscille autour de celui-ci. Il y a donc, comme pour la méthode P&O,

un compromis entre rapidité et précision.

La mesure de la tension et du courant instantanés du panneau PV nécessite deux capteurs. La méthode IncCond se prête parfaitement à la commande par microcontrôleur, qui peut garder en mémoire les valeurs précédentes de la tension et du courant.

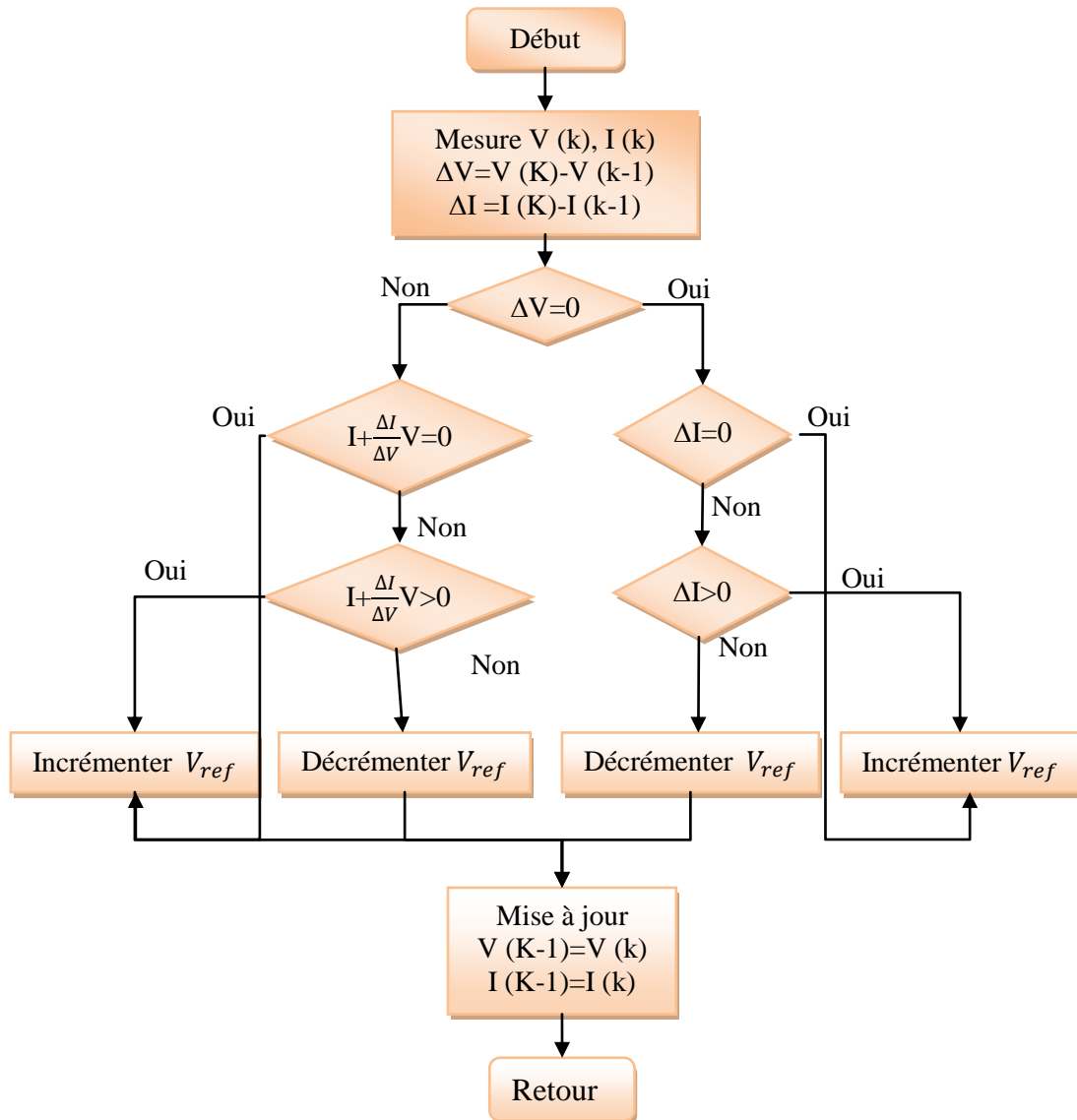


Figure 1.13 : Organigramme de la méthode IncCond

I.6.5.3 Autres méthodes

Il existe dans la littérature d'autres algorithmes MPPT plus complexes qui font parfois appel à des techniques nouvelles. On peut citer :

- Les algorithmes basés sur la logique floue
- Les algorithmes à base de réseau de neurones.
- Les algorithmes d'identification en temps réel du MPP.

- Dans le cas où la charge est une batterie, il existe un algorithme qui vise à maximiser uniquement le courant de charge puisque la tension en sortie est constante. Cet algorithme fait ainsi appel à un seul capteur ce qui réduit considérablement le coût.
- L'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance).
- La méthode de l'oscillation forcée.

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents aspects d'un système photovoltaïque, qui inclus entre autre un générateur photovoltaïque, un étage d'adaptation de puissance et un dispositif de maximisation de puissance appelé MPPT, tous ces différents éléments ont été exposés dans ce chapitre afin de les utiliser dans la conception de notre dispositif MPPT flou.

La deuxième partie de notre travail, est d'introduire la commande floue pour l'optimisation de la puissance d'un GPV, ceci nous mène au deuxième chapitre qui sera une introduction à la logique floue.