

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**



**DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE**

**Mémoire en vue de l'obtention du diplôme**

**De Master en Electrotechnique**

*Thème*

**SYNTHESE DES METHODES DE POURSUITE  
DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE (MPPT)**

**Réalisé par :**

*Mr. LAMRAOUI Soufyane*

***Proposé et encadré par :***

*Pr M.O.MAHMOUDI  
Pr E.M BERKOUK*

***Promotion Juin 2014***

École Nationale Polytechnique, 10 Avenue Hassen Badi, El-Harrach, Alger.

## *REMERCIEMENTS*

*Nous remercions Dieu, le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études.*

*Tout d'abord, nous remercions tout particulièrement et très chaleureusement nos promoteurs Pr.E.M.Berkouk et Pr.M.O.Mahmoudi, pour tous les conseils et encouragements qu'ils nous ont prodigués pendant toute la durée de ce travail.*

*Notre sincère remerciement et notre profonde gratitude vont également au président et aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous accordent, en acceptant de juger notre travail.*

*Enfin, un remerciement pour tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, à la concrétisation de ce travail.*

*Merci*

# *DÉDICACE*

*Je dédie ce modeste travail à*

*La mémoire de mon père*

*Ma chère mère*

*Je dédie aussi ce travail à mes chères frères et sœurs,*

*qui m'ont soutenu et aidé tout au long de mon*

*parcours.*

*A mes nièces et neveux, que je leurs souhaite le*

*succès et la réussite dans la vie.*

*Ainsi qu'à tous mes amis (es) et camarades.*

*Soufyane*

## **Résumé:**

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. Cette estimation précise ne peut se faire qu'en prenant en compte les effets d'ombrage qui ont des conséquences dramatiques sur la puissance électrique délivrée. En effet, sous l'effet de l'ombrage, la courbe puissance-tension (P-V) peut posséder plusieurs pics de puissance, et par conséquent pouvoir pointer vers le point de puissance maximale global devient un enjeu très important. Ainsi, nous avons procédé à une étude comparative entre plusieurs algorithmes MPPT afin de localiser le point de puissance maximale global.

## **Mots-clés :**

Système photovoltaïque, MPPT, énergie renouvelable, ombrage

## **Abstract:**

The development of PV market requires perfect knowledge of these power generation systems at different sites in particular to estimate its profitability. The accurate estimation can't be made without taking into account the effects of shading which have dramatic consequences on the electrical power delivered. Indeed, under the effect of shading, power-voltage curve (PV) can have multiple power peaks, and therefore able to point to the point of global maximum power becomes a very important issue. So, we undertook a comparative study between several MPPT algorithms. to track the global maximum power point are shown in this work

## **Keywords:**

Photovoltaic system, MPPT, renewable energy, shading.

## **ملخص**

تطوير سوق الألواح الكهروضوئية يتطلب معرفة كاملة من الأنظمة لتوليد الطاقة في مواقع مختلفة على وجه الخصوص إلى تقدير ربحيتها ويمكن إجراء تقدير دقيق دون الأخذ بعين الاعتبار آثار التظليل التي لها عواقب وخيمة على الطاقة الكهربائية تسليمها. وبالتالي أجرينا دراسة مقارنة لعدة خوارزميات. برهنا بواسطة قدرتهم على تحديد نقطة الاستطاعة العامة.

## **الكلمات المفتاحية**

نظام كهروضوئي. التمثيل النموذجي. الطاقة المتجددة. تظليل

# Sommaire

Résumé	
Liste des figures	
Nomenclatures	
Introduction générale	
I.1	1
I.1.1	1
I.1.2	2
I.1.3	2
I.2	3
I.2.1	3
I.2.1.2	4
I.2.1.2	4
I.2.1.2	4
I.3	6
I.3.1	6
I.3.1.1	7
I.3.1.2	8
I.3.1.3	8
I.4	8
II.1	9
II.2	9
II.2.1	9
II.2.2	11
II.2.3	13
II.3	15
II.4	16
II.4.1	16
II.4.2	19
II.4.3	19
II.4.4	23

II.5	Conclusion .....	24
III	Critère d'évaluation d'une MPPT.....	25
	Conclusion générale.....	26
	Bibliographie	

## Liste des figures

### CHAPITRE I

<b>Figure I. 1</b> Composantes principales d'une chaîne photovoltaïque.....	1
<b>Figure I. 2</b> Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome. ....	2
<b>Figure I. 3</b> Installation ou centrale électrique photovoltaïque raccordée au réseau.....	3
<b>Figure I. 4</b> Cellule au Silicium Monocristallin.....	3
<b>Figure I. 5</b> Cellule au Silicium Poly-cristallin.....	4
<b>Figure I. 6</b> Cellule au Silicium amorphe (couche mince).....	4
<b>Figure I. 7</b> circuit électrique équivalent d'une cellule solaire réelle connectée une charge. ....	5
<b>Figure I.8</b> Caractéristique $I=f(V)$ d'un module photovoltaïque. ....	6
<b>Figure I.9</b> caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un générateur PV en fonction de différentes irradiations à $T=25^{\circ}\text{C}$ .....	7
<b>Figure I.10</b> caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un générateur PV en fonction de différentes.....	8

### CHAPITRE II

<b>Figure II. 1</b> Signal PWM pour la commande de l'interrupteur (transistor). ....	9
<b>Figure II. 2</b> circuit électrique d'un convertisseur Boost.....	10
<b>Figure II. 3</b> Circuits équivalents de Boost, S fermé en (a), S ouvert en (b). ....	10
<b>Figure II. 4</b> Circuit électrique d'un convertisseur DC-DC de type Buck. ....	11
<b>Figure II. 5</b> Circuits équivalents de Buck, S fermé en (a), S ouvert en (b). ....	12
<b>Figure II. 6</b> Schéma électrique du convertisseur Buck-Boost.....	13
<b>Figure II. 7</b> Circuits équivalents du buck-boost, S fermé (a), S ouvert (b).....	14
<b>Figure II. 8</b> Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque .....	15
<b>Figure II. 9</b> Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal.....	16
<b>Figure II. 10</b> Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence .....	17
<b>Figure II. 11</b> Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension $V_{oc}$ .....	18
<b>Figure II. 12</b> Principe de la méthode à contre réaction de tension avec cellule pilote .....	19
<b>Figure II. 13</b> Caractéristique $(P_{pv} - U_{pv})$ d'un panneau photovoltaïque.[10].....	20
<b>Figure II. 14</b> Organigramme de la méthode P&O.....	21
<b>Figure II. 15:</b> Organigramme de le méthode IncCond. ....	23

# Nomenclature

$f_s$	: Fréquence de commutation
$T_s$	: Période de commutation
D	: Rapport cyclique
DC	: Direct Curent
$I_x$	: Courant pour la lettre X
$V_x$	: Tension pour la lettre X
$P_x$	: Puissance pour la lettre X
L	: Inductance
C	: Condensateur
M	: Rapport de conversion
W	: Energie dans l'inductance
K	: Interrupteur électronique
$T_{on}$	: Temps de fermeture de K
$t_{off}$	: Temps d'ouverture de K
$\eta$	: Rendement
PV	: Photovoltaïque
GPV	: Générateur Photo Voltaïque
PPM	: Point de Puissance Maximum
MPPT	: Maximum Power Point Tracker
P&O	: Perturbation and Observation
$I_{ph}$	: photo-courant
$I_s$	: courant de saturation
T	: Température

q : la constante de charge élémentaire d'électron

k : constante de Boltzmann

n1, n2 : facteurs d'idéalité de la diode

Vco : Tension en circuit ouvert

Icc : Le courant de court-circuit

PWM : Pulse Width Modulation

MOSFET : Metal Oxid Semiconductor Field Effect Transistor

□G : Grille/ Gate

S : Source

Tr : temps de montée (rise time)

tf : temps de décroissance (fall time)

ton : temps de la mise en conduction (turn-on time)

toff : temps de la mise en blocage

## INTRODUCTION GENERALE

L'énergie solaire est une source d'énergie propre disponible dans presque tous les endroits du monde et aussi longtemps que le soleil brillera. L'énergie solaire est produite par des cellules photovoltaïques qui captent l'énergie du soleil et la convertissent en électricité. L'énergie solaire est une énergie attrayante parce que la technologie photovoltaïque ne produit aucune pollution, a une durée de vie de vingt ans et nécessite peu d'entretien. À ce titre, l'énergie solaire est de plus en plus considérée comme une solution à long terme pour lutter contre le réchauffement de la planète. L'électricité solaire est en train de s'imposer depuis que les panneaux solaires sont devenus moins chers avec un rendement acceptable. En parallèle, la technologie des composants semi-conducteurs de grande puissance a nettement progressé par l'introduction de composants très performants du point de vue rendement et puissance de fonctionnement.

Une caractéristique importante des panneaux solaires est que la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement donné, localisé par une tension et un courant connus, appelé en anglais Maximum Power Point (MPP). L'autre problème est que la position de ce point n'est pas fixe mais se déplace en fonction de l'ensoleillement et de la température des cellules solaires. À cause du coût relativement onéreux de ce genre d'énergie on doit extraire le maximum de watts des panneaux solaires. Cela nécessite un mécanisme de poursuite (Tracking) du point de puissance maximale appelé 'maximum power point tracking' (MPPT) afin que la puissance maximale soit générée en permanence.

Nous présentons dans ce manuscrit trois chapitres. En commençant par une introduction générale, introduisant des généralités sur le photovoltaïque dans le premier chapitre, en deuxième chapitre on présente quelques convertisseurs de puissance comme étant des étages d'adaptations ainsi quelques techniques MPPT et terminant par une conclusion générale.

*Chapitre I :*  
*Généralités sur les systèmes*  
*photovoltaïques*

## I.1 SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

Un système photovoltaïque est un système d'alimentation électrique, constitué principalement d'un générateur photovoltaïque composé d'un seul ou plusieurs panneaux solaires, d'un ensemble de batteries pour le stockage d'énergie électrique, d'un ou de plusieurs convertisseurs continu-continu pour fournir les tensions d'alimentation adéquates pour les batteries et les charges continues et un convertisseur continu-alternatif pour l'alimentation des autres appareils à courant alternatif, [1].

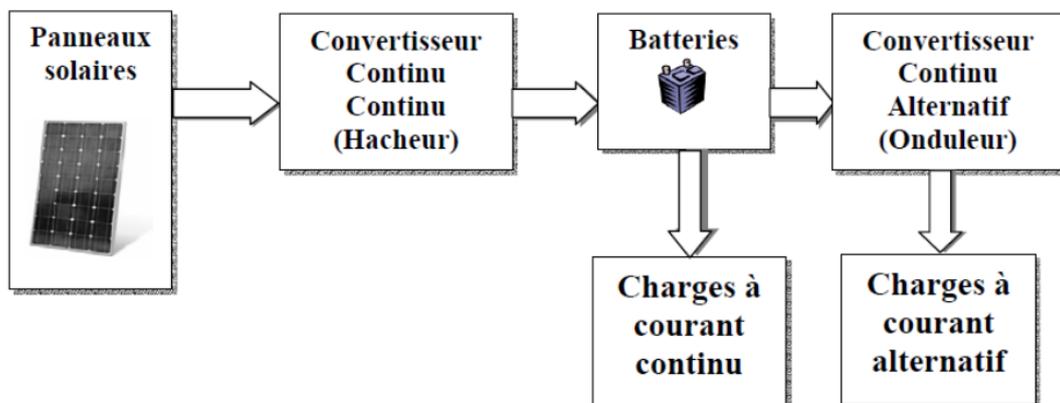
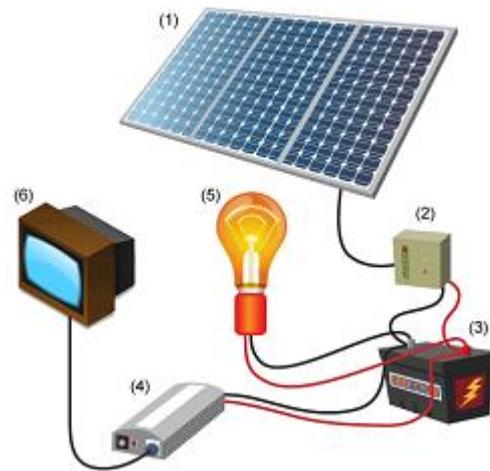


Figure I. 1 Composantes principales d'une chaîne photovoltaïque

Les systèmes PV sont classés en fonction de trois types : autonomes, hybrides et reliés au réseau, [2].

### I.1.1 Les systèmes autonomes

Ils sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme le pompage de l'eau. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries d'accumulateurs pour stocker l'énergie. De tels systèmes sont particulièrement utiles et rentables dans les applications estivales, lorsque l'accès à un endroit est difficile ou coûteux ou lorsque les besoins en entretien doivent être réduits au minimum.



**Figure I. 2** Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome.

### **I.1.2 Les systèmes hybrides**

Ils reçoivent une partie de leur énergie d'une ou de plusieurs sources supplémentaires. En pratique, les modules de systèmes PV sont souvent alliés à une éolienne ou à une génératrice à combustible. De tels systèmes ont habituellement des accumulateurs de stockage d'énergie. Ils conviennent mieux lorsque la demande d'énergie est élevée (pendant l'hiver ou tout au long de l'année).

### **I.1.3 Les systèmes raccordés au réseau**

Un système photovoltaïque raccordé au réseau est constitué de panneaux solaires, qui injectent (à travers l'onduleur) l'électricité produite dans le réseau du fournisseur d'électricité. Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau ne nécessitent pas de stockage d'énergie. Cette fonction est pratiquement prise en charge par le réseau électrique. Le propriétaire du système photovoltaïque est un producteur d'énergie qui vend l'électricité à un fournisseur d'électricité privé ou public.

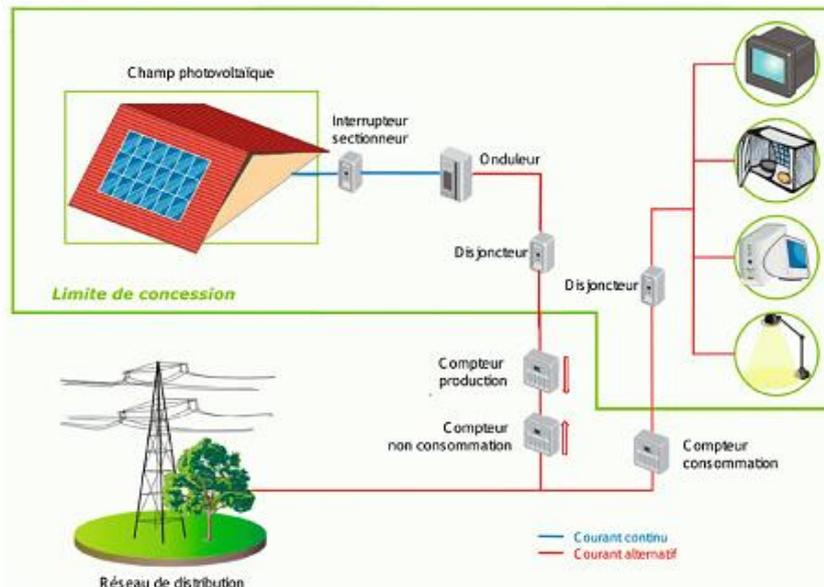


Figure I. 3 Installation ou centrale électrique photovoltaïque raccordée au réseau

## I.2 Générateur photovoltaïque

### I.2.1 La cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques (photon : grain de lumière et volt : unité de tension) 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. [3], on distingue plusieurs types de Cellules Photovoltaïques

#### I.2.1.1 Cellule au silicium monocristallin

Les panneaux PV avec des cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal, figure I.4. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie il est cependant plus efficace que le silicium polycristallin. Le rendement de ce type des cellules est de 13 à 17%. [4]

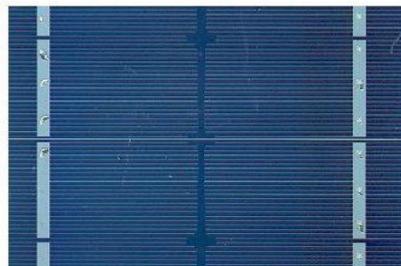


Figure I. 4 Cellule au Silicium Monocristallin

### I.2.1.2 Cellule au silicium poly-cristallin

Les panneaux PV avec des cellules poly-cristallines sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations (figure I.5) différentes des cristaux (tonalités différentes).

Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules mono-cristallines. [4]



Figure I. 5 Cellule au Silicium Poly-cristallin

### I.2.1.3 Cellule au silicium amorphe

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement.

Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. Figure I.6.

[4]

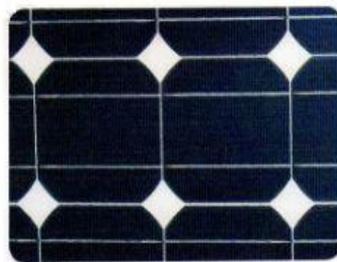


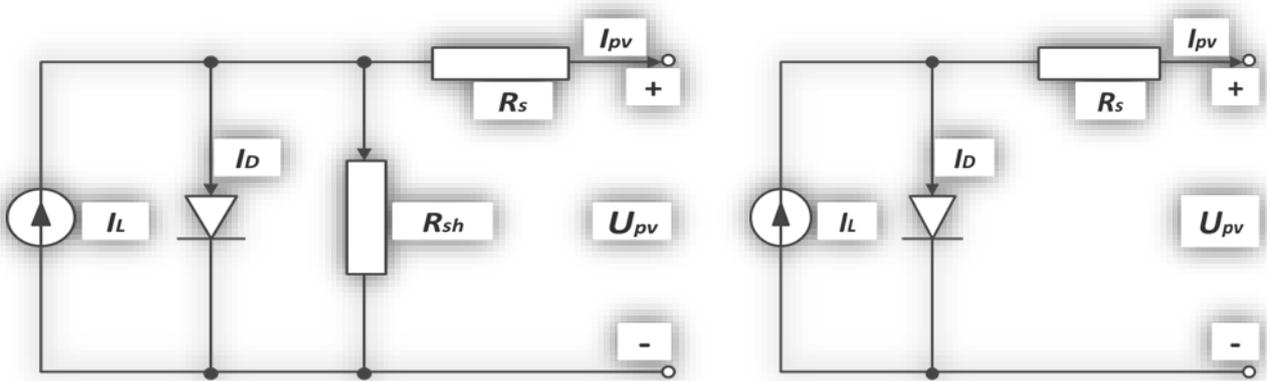
Figure I. 6 Cellule au Silicium amorphe (couche mince)

Le modèle fait intervenir une source de courant qui génère un photo-courant proportionnel à l'ensoleillement ( $G$ ), cette source est liée en parallèle avec une diode [12]. Ce générateur comporte en réalité une résistance série ( $R_s$ ) et une résistance en dérivation ou shunt ( $R_{sh}$ ). Ces résistances auront une certaine influence sur ses caractéristiques :

– La résistance série est la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé.

– La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

Le modèle le plus utilisé pour ces cellules est celui du circuit équivalent à cinq paramètres. Comme la résistance shunt  $R_{sh}$  est relativement grande, on peut l'approximer par un circuit ouvert. Le modèle à cinq paramètres peut alors être simplifié à un modèle à quatre paramètres. Pour la suite de notre étude, on utilise ce modèle simplifié (figure I. 7) [13] .



**Figure I.7** Circuit équivalent à une diode d'une cellule photovoltaïque. (a) Modèle à cinq paramètres ; (b) Modèle simplifié à quatre paramètres.

La relation entre la tension de sortie  $U_{pv}$  et le courant de charge  $I_{pv}$  peut être exprimée comme suit [13] :

$$I_{pv} = I_L - I_D = I_L - I_0 \left[ \exp \left( \frac{U_{pv} + I_{pv} R_s}{\alpha} \right) - 1 \right] \quad (\text{I. 1}).$$

Avec :

$I_L$  [A] Courant photovoltaïque

$I_0$  [A] Courant de saturation

$I_{pv}$  [A] Courant de charge

$U_{pv}$  [V] Tension de sortie

$R_s$  [Ω] Résistance série

$\alpha[V]$  Facteur de saturation thermique

### I.3 Module photovoltaïque

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que: la puissance, le courant de court-circuit  $I_{cc}$  ou la tension en circuit ouvert  $V_{co}$ . Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ou plusieurs modules PV en série et / ou en parallèle. [5]

#### I.3.1 Caractéristique d'un module solaire

##### I.3.1.1 Caractéristiques courant-tension

La figure I.8 représente la courbe  $I=f(V)$  d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température. L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de 25.

Le module photovoltaïque est considéré comme une source de puissance avec un point  $P_m$  où la puissance se trouve être maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie pour cela certains régulateurs solaires sont utilisés pour réaliser une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point  $P_m$ . [5]

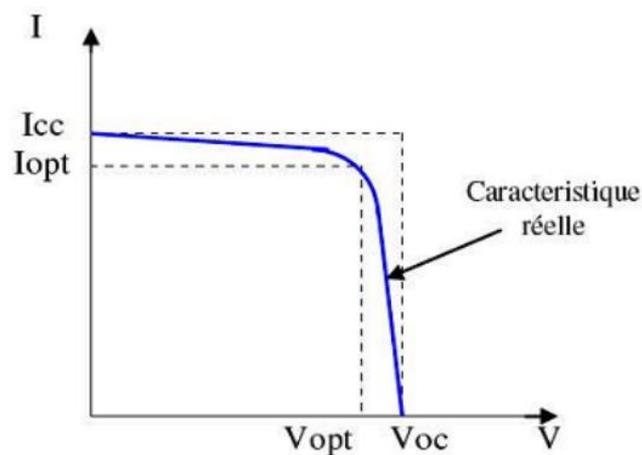


Figure I. 8 Caractéristique  $I=f(V)$  d'un module photovoltaïque.

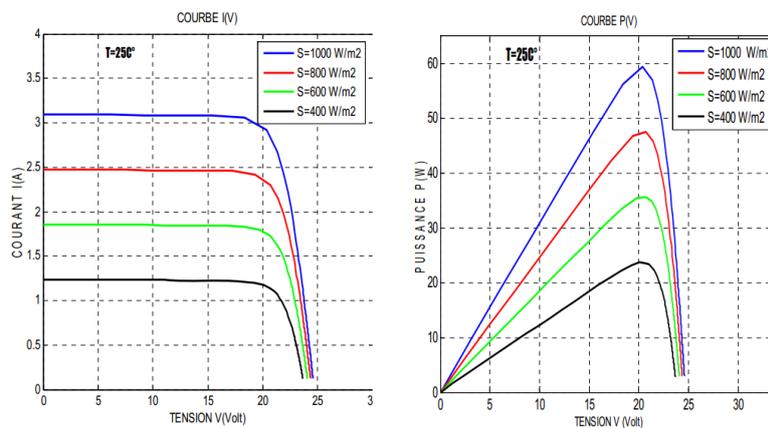
### I.3.1.2 Influence de l'éclairement sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$

La figure I.9 présente un exemple de courbes pour différents niveaux de rayonnement à une température de 25°C.

Il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais est légèrement variée pour des valeurs plus élevées d'éclairement.

Ceci implique donc que :

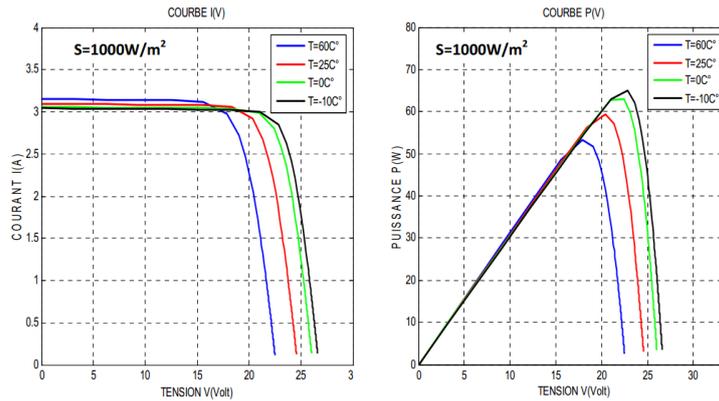
- La puissance optimale de la cellule (PM) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.



**Figure I.9** caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  d'un générateur PV en fonction de différentes irradiances à  $T=25^{\circ}\text{C}$

### I.3.1.3 Influence de la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$

La figure I.10 présente des courbes  $I(V)$  et  $P(V)$  pour différentes températures de fonctionnement de générateur photovoltaïque à une irradiation constante 1000w/m<sup>2</sup>. On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte. Il est important de savoir que la puissance du module diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au dessus de 25°C. [5]



**Figure I. 10** caractéristiques I(V) et P(V) d'un générateur PV en fonction de différentes températures à  $S=1000 \text{ w/m}^2$

#### I.4. avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Les principaux avantages de l'énergie photovoltaïque sont:

- Sa gratuité.
- Pas de pollution.
- Sa fiabilité et la longue vie de l'installation.
- Sa structure fixe.
- Son coup de maintenance bas.
- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- L'installation ne produit aucun bruit.

Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque sont :

- Le coût élevé de l'installation
- Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.
- Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution, la fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement.

#### I.5 Conclusion :

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

Afin de rendre cette énergie réalisable physiquement, elle nécessite des équipements complémentaire, contenant les composants d'amélioration nécessaires qui rendent l'électricité produite consommable (régulation, conversion CC/AC...).

## *Chapitre II*

*Les convertisseurs DC-DC (Les  
Hacheurs)*

*Et*

*Poursuite du point de puissance  
maximale*

## II.1 Introduction

Les hacheurs sont des convertisseurs de type continu-continu, leur utilisation permet le contrôle de la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse. Ce type de convertisseurs n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs. Capacités) qui dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement. [7]

Dans cette partie on essaye d'illustrer quelque détail de circuit de ces convertisseurs DC/DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques ainsi que les modèles mathématiques qui en dérivent.

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commandé par un signal PWM (Pulse Wide Modulation) dont fréquence constante  $f_s$  et un rapport cyclique variable  $\alpha$  avec un temps de fermeture égal à  $\alpha T_s$  et un temps d'ouverture égal à  $(1-\alpha)T_s$

Où :

$T_s$  est la période de commutation qui est égale à  $1 / f_s$

$\alpha$  représente le rapport cyclique du commutateur  $0 < \alpha < 1$

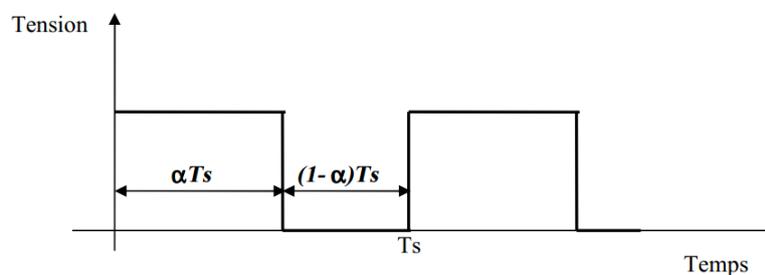


Figure II. 1 Signal PWM pour la commande de l'interrupteur (transistor).

## II.2 Type de convertisseurs

Il y a différents types de convertisseurs DC-DC on distingue alors :

### II.2.1 Hacheur survolteur « Boost »

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension, abaisseur de courant. Le Schéma ci-dessous représente le circuit électrique du Boost. Durant le temps  $\alpha T_s$ , le transistor S est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, au fur et à mesure elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin du premier intervalle. Le transistor

S s'ouvre et l'inductance L délivre le courant  $i_L$  et ainsi génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge Z à travers la diode D.

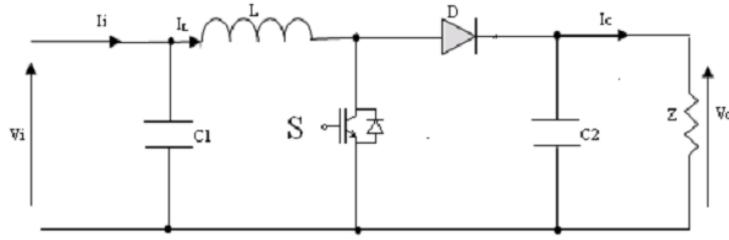


Figure II. 2 circuit électrique d'un convertisseur Boost

### II.2.1.1 Modèle mathématique équivalent

Comme pour le circuit Buck, l'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents (voir figure II.3) des deux phases de fonctionnement nous donne :

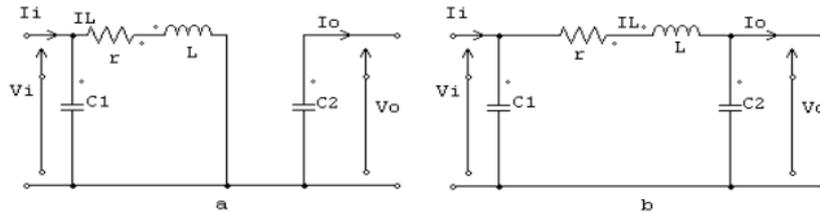


Figure II. 3 Circuits équivalents de Boost, S fermé en (a), S ouvert en (b).

Pour la première période  $0 < t < \alpha.T_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_L \\ i_{c2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = -i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - r_L i_L \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Pour la deuxième période  $\alpha.T_s < t < T_s$

$$\begin{cases} i_{c1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_L \\ i_{c2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = i_L - i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - v_o - r_L i_L \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Le modèle en valeur moyenné du boost est donné par :

$$\begin{cases} i_L = i_i - C_1 \frac{dv_i}{dt} \\ i_o = (1 - \alpha)i_L - C_2 \frac{dv_o}{dt} \\ v_i = (1 - \alpha)v_o + r_L i_L + L \frac{di_L}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

### II.2.2 Hacheur dévolteur « Buck »

Le convertisseur Buck est un convertisseur de puissance de type DC-DC, appelé aussi « abaisseur », il permet d'obtenir sur son port de sortie une tension inférieure à la tension d'entrée, mais son courant de sortie est plus élevé, il est constitué d'une cellule de commutation formé par deux semi-conducteur, dont l'un possède un amorçage commandé par exemple un transistor MOSFET et l'autre une commande spontanée (une diode).[8]

Le transistor MOSFET travaille en régime de commutation avec une période  $T_s$ . Dans la première fraction  $\alpha T_s$  le transistor est dans un état de saturation, alors l'inductance  $L$  se charge d'énergie avec augmentation du courant  $I_L$ , Dans la deuxième fraction de temps  $(1-\alpha)T_s$  l'inductance  $L$  libère cette énergie à la charge  $Z$  avec une diminution de courant  $I_L$ . Alors le circuit est décomposé en deux circuits linéaires qui correspondent à chaque état du transistor  $S$ . figure II.2.[7]

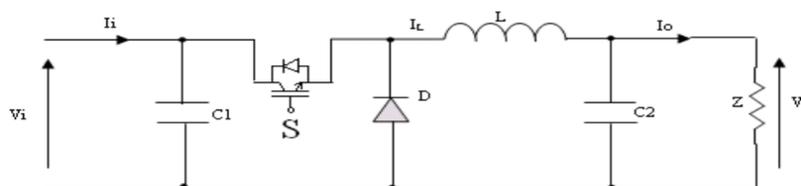
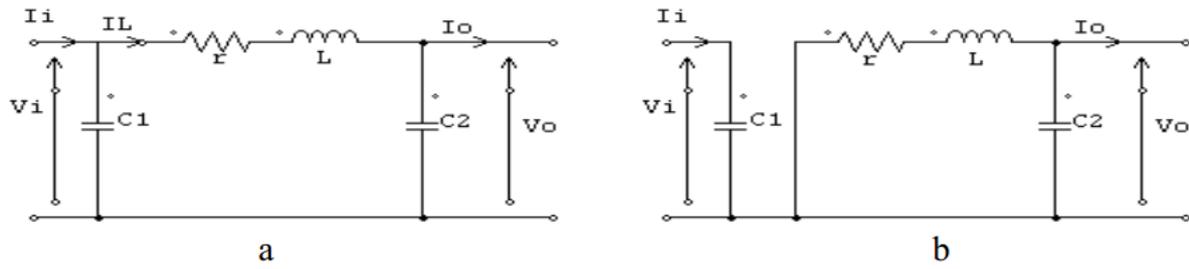


Figure II. 4 Circuit électrique d'un convertisseur DC-DC de type Buck.

#### II.2.2.1 Modèle mathématique équivalent

Pour extraire le modèle mathématique du convertisseur, il faut l'étudier dans les deux phases de fonctionnement ( $S$  fermé, et  $S$  ouvert), puis faire un modèle approximé qui englobe les différentes grandeurs moyennes d'entrée et de sortie du convertisseur. la figure ci-dessous représente les circuits équivalent du convertisseur buck dans les deux cas.



**Figure II. 5** Circuits équivalents de Buck, S fermé en (a), S ouvert en (b).

En appliquant les lois des courants et des tensions de Kirchhoff sur les deux circuits de la figure II.5, on obtient les systèmes d'équations suivants :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_L \\ i_{c2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = i_L - i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} + r i_L = v_i - v_o \end{array} \quad 0 < t < \alpha T_s \quad (\text{II.4}) \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i \\ i_{c2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = i_L - i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} + r i_L = -v_o \end{array} \quad \alpha T_s < t < (1-\alpha) T_s \quad (\text{II.5}) \right.$$

Pour :  $0 < t < T_s$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_o = i_L - C_2 \frac{dv_o}{dt} \\ i_L = \frac{1}{\alpha} \left( i_i - C_1 \frac{dv_i}{dt} \right) \\ v_i = \frac{1}{\alpha} \left( v_o + r_L i_L + L \frac{di_L}{dt} \right) \end{array} \quad (\text{II.6}) \right.$$

Le régime continu est obtenu en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes. Le système d'équations II.4 donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_i = \alpha I_L \\ I_o = I_L \\ V_i = \frac{1}{\alpha} (V_o + r_L I_L) \end{array} \right. \quad (\text{II.7})$$

Comme pour le circuit Buck, en remplaçant les dérivées des signaux par des zéros, on peut remplacer les signaux du convertisseur par leurs grandeurs moyennes,

$$\left\{ \begin{array}{l} I_L = I_i \\ I_o = (1-\alpha)I_L \\ V_i = (1-\alpha)V_o + r_L I_L \end{array} \right. \quad (\text{II.8})$$

### II.2.3 Hacheur buck boost

Ce dernier a acquis les caractéristiques et les propriétés électriques des deux types évoqués précédemment. Il présente donc une sorte d'un transformateur hybride (abaisseur/élevateur) pour une tension d'entrée/sortie continue ; son schéma de base est illustré par la figure II.6.

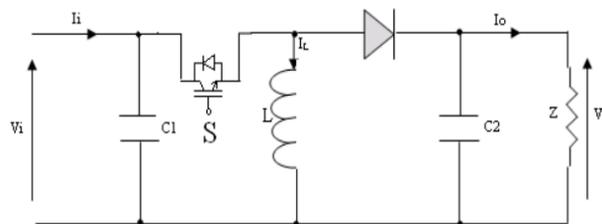
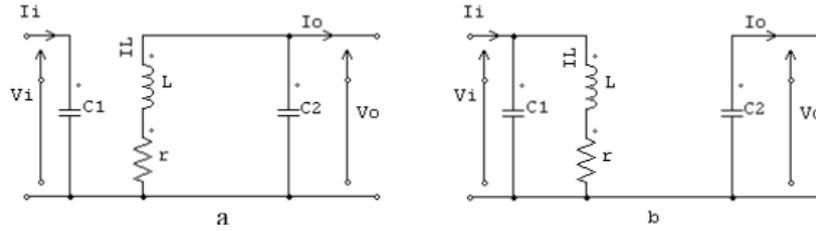


Figure II. 6 Schéma électrique du convertisseur Buck-Boost.

#### II.2.3.1 Modélisation mathématique

La figure II.7 montre les deux schémas équivalents de buck-boost pour les deux périodes de fonctionnement.



**Figure II. 7** Circuits équivalents du buck-boost, S fermé (a), S ouvert (b)

En appliquant les lois de Kirchoff sur les circuits équivalents précédents, on obtient :

Pour la première période  $\alpha T_s$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_L \\ i_{c2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = -i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - r_L i_L \end{array} \right. \quad (\text{II.9})$$

Et pour la deuxième période  $(1-\alpha) T_s$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i \\ i_{c2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = -i_o - i_L \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_o - r_L i_L \end{array} \right. \quad (\text{II.10})$$

Le modèle moyenné de buck-boost :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_l = \frac{1}{\alpha} \left( i_i - C_1 \frac{dv_i}{dt} \right) \\ i_o = -(1-\alpha) i_L - C_2 \frac{dv_o}{dt} \\ V_i = \frac{1}{\alpha} \left( -(1-\alpha) v_o + r_L i_L + L \frac{di_L}{dt} \right) \end{array} \right. \quad (\text{II.11})$$

Comme précédemment, en remplaçant les dérivées des signaux par des zéros, on peut remplacer les signaux du convertisseur par leurs grandeurs moyennes, ce qui donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_i = \alpha I_L \\ I_o = (1-\alpha) I_L \\ V_i = 1/\alpha [-(1-\alpha) V_o + r_L I_L] \end{array} \right. \quad (\text{II.12})$$

### II.3 Principe de la recherche du point de puissance maximal.

Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance. La figure (II.8) représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque élémentaire munie d'une commande MPPT.

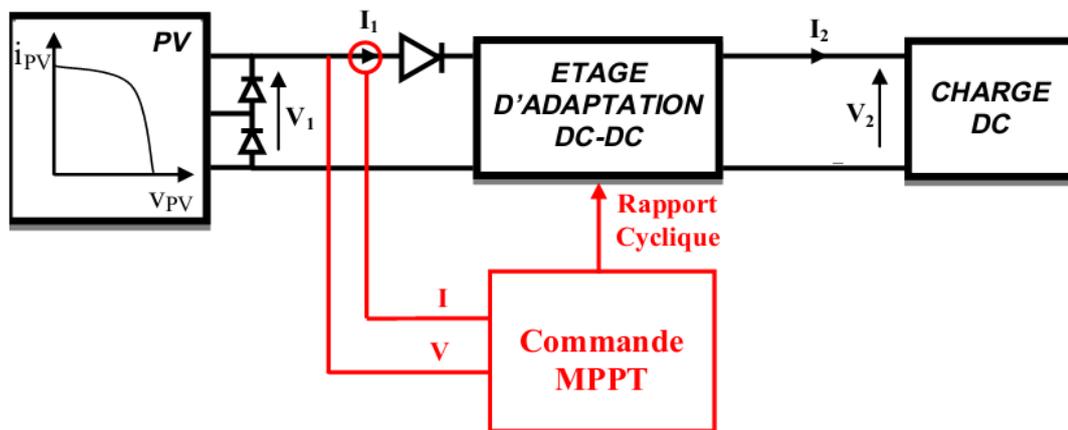


Figure II. 8 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

La technique de contrôle communément 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 (II.9) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. 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 PPM2. 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). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents.[9]

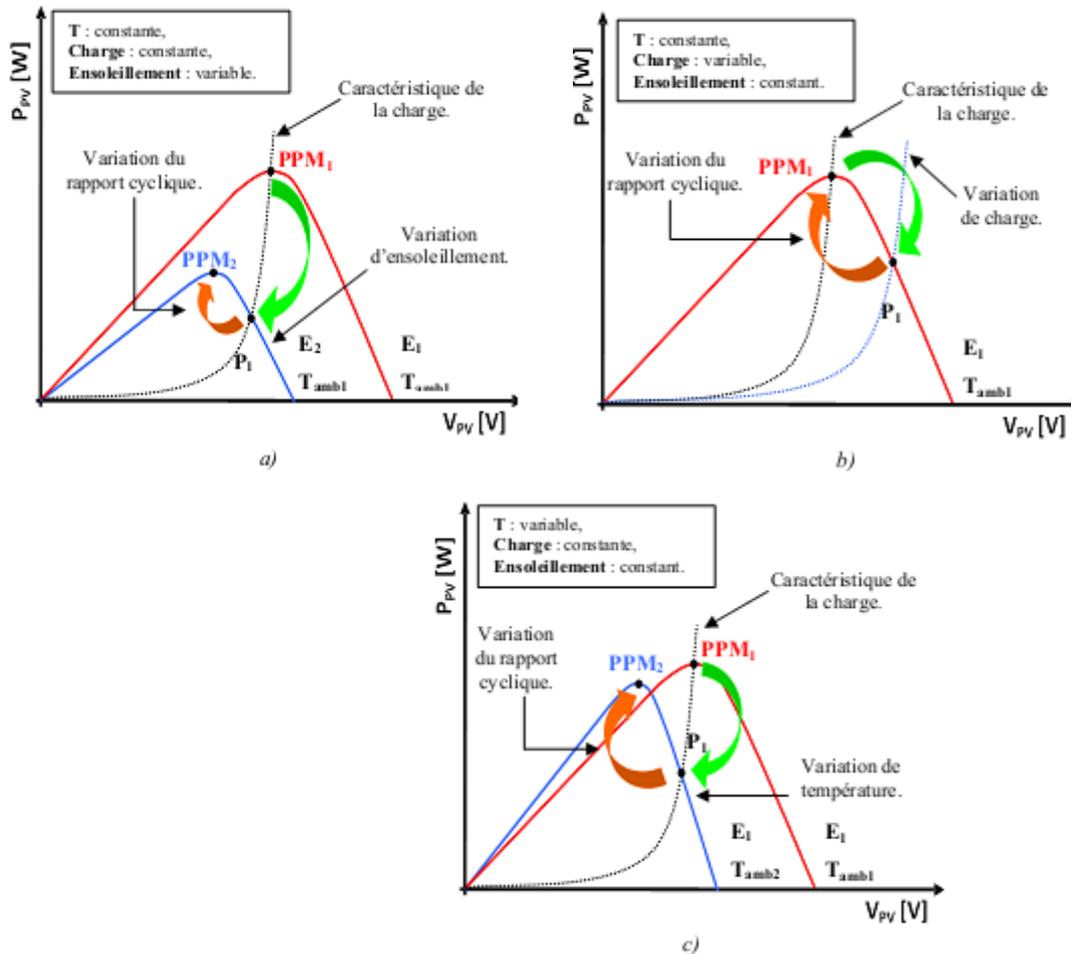


Figure II. 9 Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal

## II.4 Méthodes de poursuite du point de puissance maximal

### II.4.1 Méthodes à contre réaction de tension

Ce genre de mécanismes repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par la comparaison de cette tension avec une tension de référence pour générer une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la PWM de commande afin d'annuler cette erreur, en dépend de la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe) on a trois types de méthodes :

#### II.4.1.1 Méthode à tension de référence fixe

C'est la méthode basée sur une simple comparaison entre la tension de sortie du panneau avec une tension de référence prédéfinie pour ajuster continuellement le rapport cyclique  $\alpha$  du convertisseur DC-DC. Cette tension correspond à la tension moyenne de l'intervalle des points des puissances maximales relevée par des tests sous différentes conditions d'ensoleillement et de température en agissant simplement sur les différents facteurs de pondération lors de la mise au point afin de générer le maximum de puissance.[10]

### II.4.1.2 Méthode à tension de référence en fonction de $V_{oc}$

Pour un ensoleillement et une température donnés la tension qui correspond à la puissance maximale du panneau est exprimée comme une fonction linéaire de la tension en circuit ouvert du panneau. En négligeant la résistance série de la cellule, l'expression de la puissance de sortie du panneau  $P$  est :

$$P=V*I=(I_{sc} - I_o \left( \exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right) * V \quad (II.13)$$

La puissance est maximal lorsque sa dérivé est nulle pour une tension optimale  $V_{mp}$  on remplace le courant de court-circuit en fonction de la tension de circuit ouvert :

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln\left(1 + \frac{I_{sc}}{I_o}\right) \quad (II.14)$$

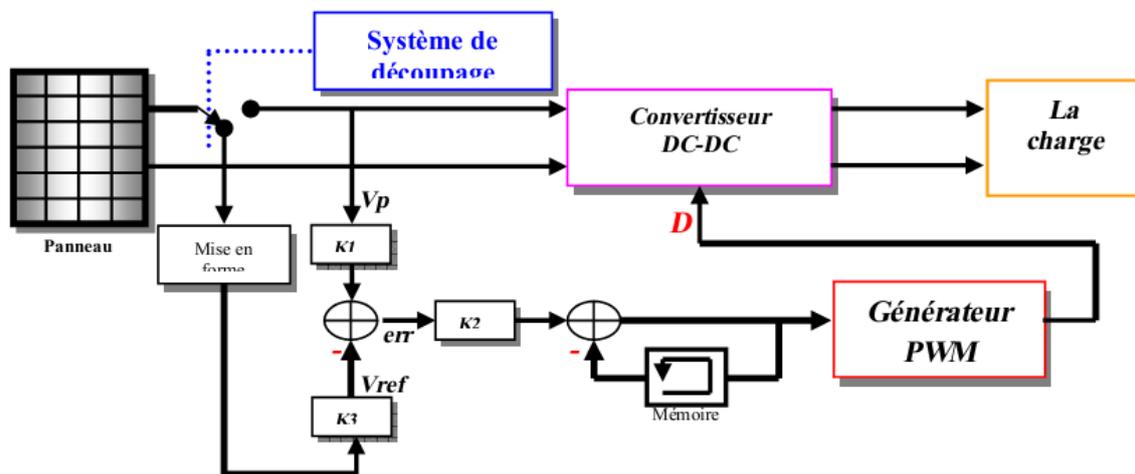
On obtient

$$\frac{q}{KT} V_{mp} + \ln\left(1 + \frac{q}{KT} V_{mp}\right) = \frac{q}{KT} V_{oc} \quad (II.15)$$

La fonction  $V_{oc}=f(V_{mp})$  est pratiquement linéaire et elle est de la forme  $V_{mp}=A*V_{oc}+a$

Pour cela la tension en circuit ouvert du panneau est prélevée régulièrement par le débranchement du panneau pour une courte durée pour ajuster la tension de référence précédente par une certaine proportionnalité généralement égale à 0.77 (figure II.10).

En exploitant cette propriété, on peut traquer en permanence le point de puissance maximale.



**Figure II. 10** Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence en fonction de tension à circuit ouvert du panneau.

### II.4.1.3 Méthode à Tension de référence externe (Cellule pilote)

Une cellule pilote est ajoutée au panneau solaire (C'est une cellule photovoltaïque simple qui est électriquement indépendante du reste de la rangée (figure II.11). La tension à circuit

ouvert de cette cellule mesurée continuellement va nous donner une information implicite de la tension en circuit ouvert de l'ensemble des panneaux solaires, en multipliant cette tension avec le nombre de cellules en série. [11].

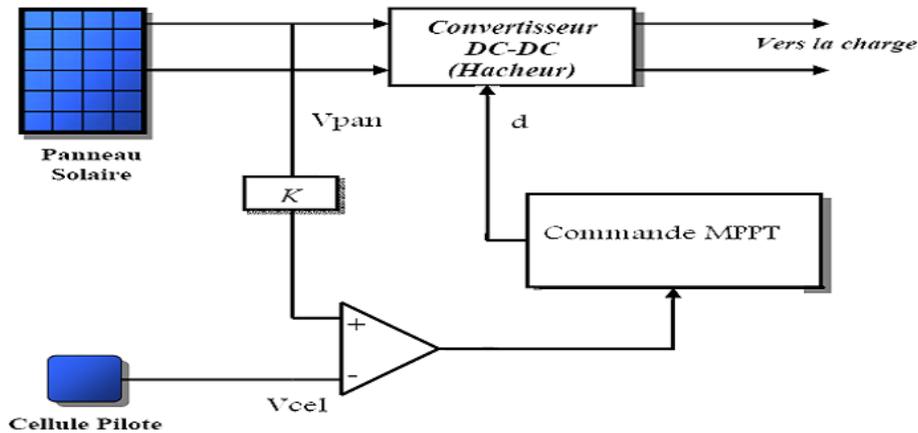


Figure II. 11 Principe de la méthode à contre réaction de tension avec cellule pilote

### II.4.2 Méthodes à contre réaction de courant

Par analogie avec les méthodes de contre réaction de tension on a le schéma suivant :

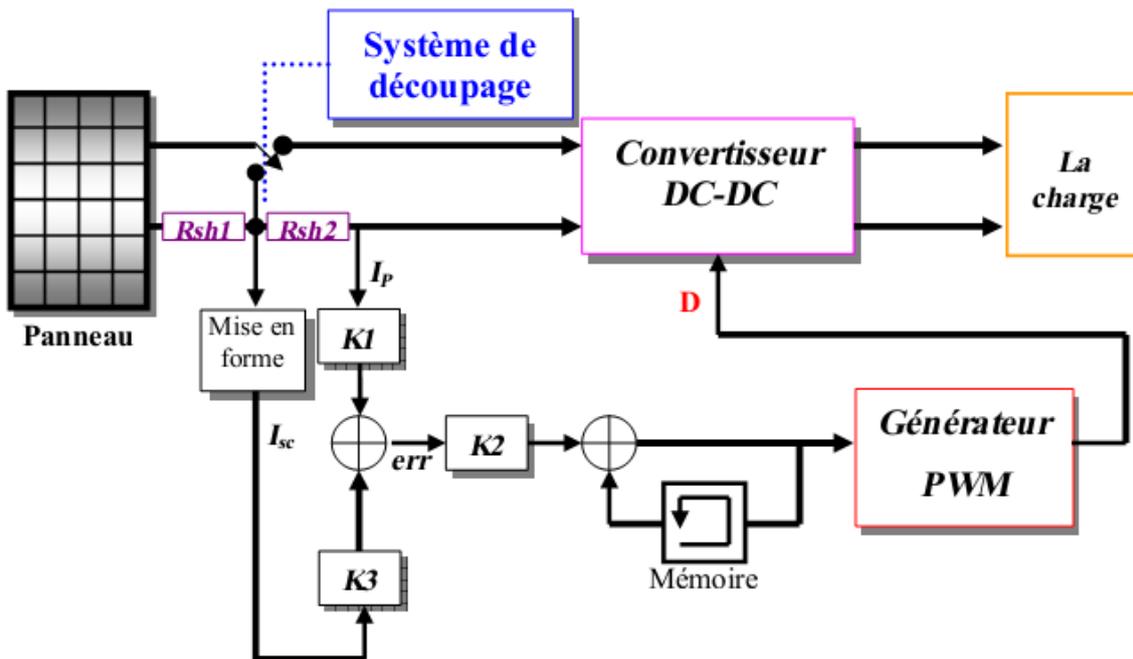


Figure II. 12 Principe de la méthode MPPT à courant de référence en fonction de  $I_{sc}$

#### II.4.2.1 Méthode à courant de référence en fonction du courant de court-circuit $I_{sc}$

Cette technique provient du fait que, sous des conditions atmosphériques variables, le courant  $I_{MPP}$  est approximativement linéairement lié au courant  $I_{sc}$  du GPV. Il a été montré que :

$I_{MPP} = k I_{sc}$  avec  $k$  constante de proportionnalité.  $k$  est généralement comprise entre 0.78 et 0.92.

La mesure du courant  $I_{SC}$  durant le fonctionnement est problématique. Un commutateur est généralement ajouté au convertisseur de puissance pour court-circuiter le panneau et mesurer le courant  $I_{SC}$  à l'aide d'un capteur de courant. Ceci augmente le nombre de composants et donc le coût. La puissance de sortie est réduite lors de la mesure du courant  $I_{SC}$  de plus, le MPP n'est jamais atteint. [5]

#### **II.4.2.2 Méthode à courant de référence externe (Cellule pilote)**

Dans cette méthode l'utilisation d'une cellule pilote comme source d'information du courant de court-circuit de l'ensemble des panneaux est impossible par le fait que court-circuiter en permanence cette cellule cause un échauffement supplémentaire qui va fausser l'information générée par cette cellule et emmenés sa destruction rapide.[11]

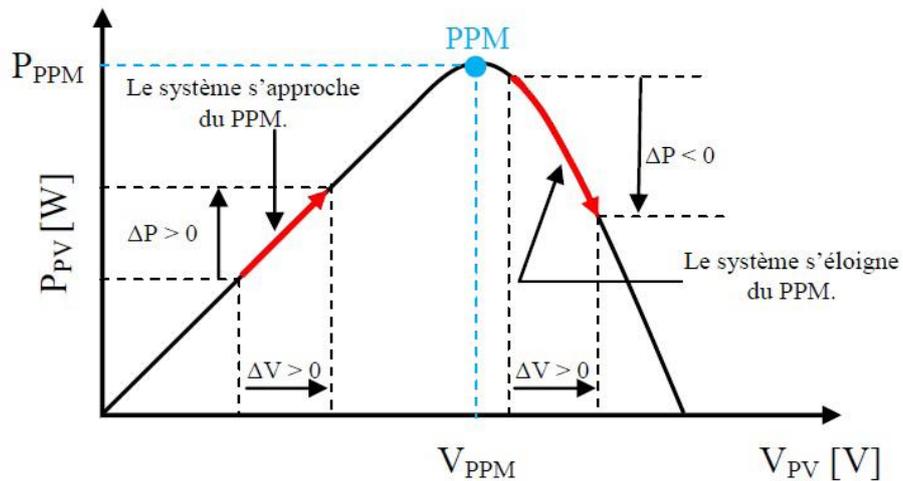
#### **II.4.3 Méthodes à contre réaction de puissance**

Les méthodes à contre réaction de puissance se bases sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du panneau afin que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. La puissance extraite du panneau est calculée à partir des mesures de courant  $I$  et de tension  $V$  du panneau et la multiplication de ces deux grandeurs  $P=V.I$ .

##### **II.4.3.1 Algorithme Perturbation et Observation (P&O)**

Le principe de commande MPPT de type P&O 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 résultante  $P_{pv}$ . Ainsi, comme l'illustre la figure II.13, on peut déduire que si 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. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît.

À 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.



**Figure II. 13** Caractéristique ( $P_{pv} - U_{pv}$ ) d'un panneau photovoltaïque.[10]

En résumé, si suite à une perturbation de tension (rapport cyclique du hacheur), la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le PPM.

#### Algorithme de la méthode P&O :

La figure II. 11 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

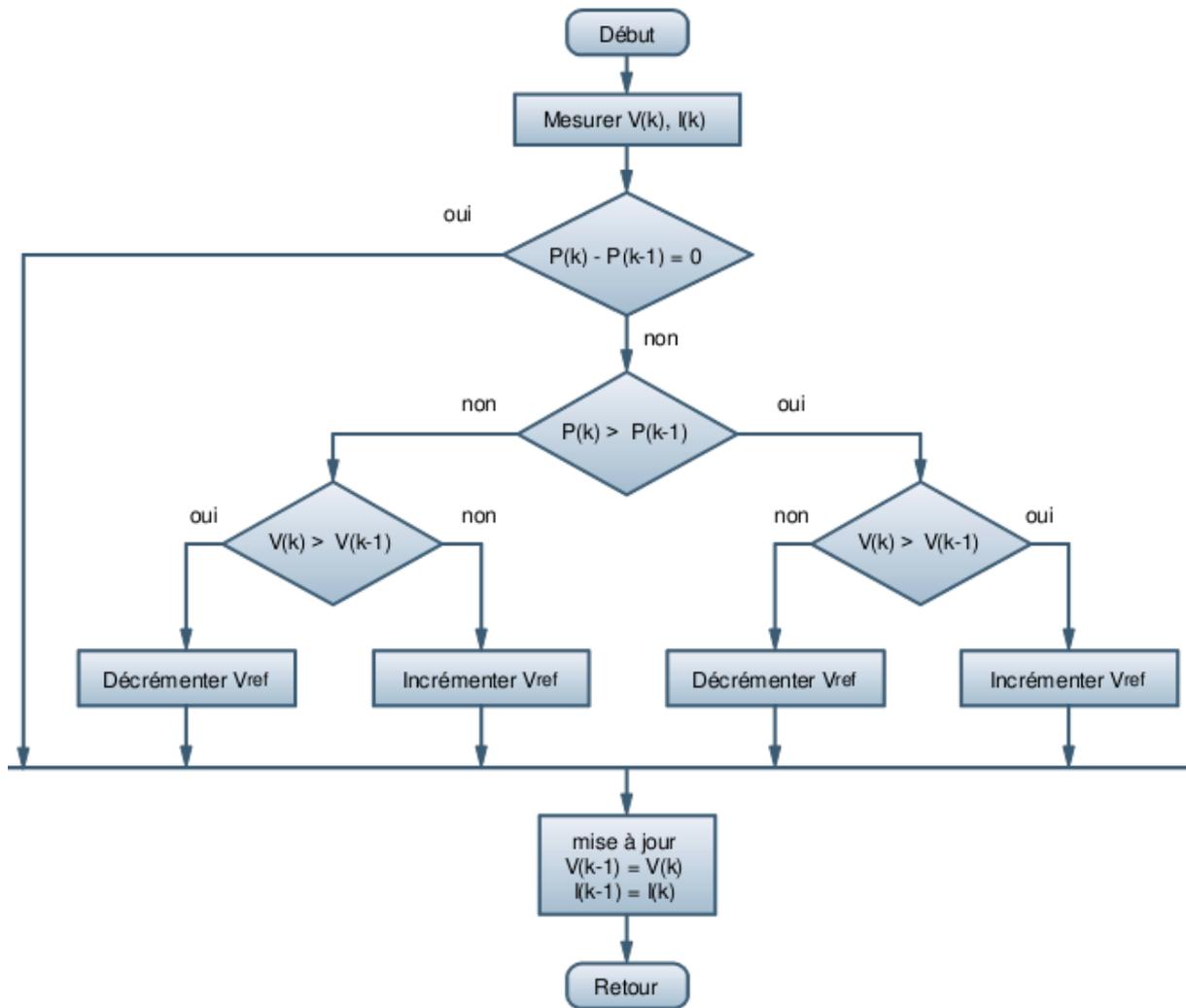


Figure II. 14 Organigramme de la méthode P&amp;O

### II.4.3.2 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 (figure III.8)

$$\begin{cases} dP/dV = 0 & \text{au MPP} \\ dP/dV = 0 & \text{à gauche du MPP} \\ dP/dV = 0 & \text{à droite du MPP} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

$$\text{Puisque : } \frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (\text{III.6})$$

Alors, l'équation (III.5) peut être écrite comme suit :

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \quad \text{au point MPP}$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \quad \text{à gauche du point MPP} \quad (\text{III.7})$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \quad \text{à droite du point MPP}$$

Le MPP peut donc être poursuivi en comparant la conductance instantanée ( $G_{ci} = I/V$ ) à l'incrément de la conductance ( $\Delta G_{ci} = \Delta I/\Delta V$ ), comme le montre l'organigramme de la figure II.15.  $V_{ref}$  est 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  $\Delta I$  est noté, indiquant un changement des conditions atmosphériques et donc du MPP. L'algorithme augmente ou diminue  $V_{ref}$  pour suivre le nouveau MPP.

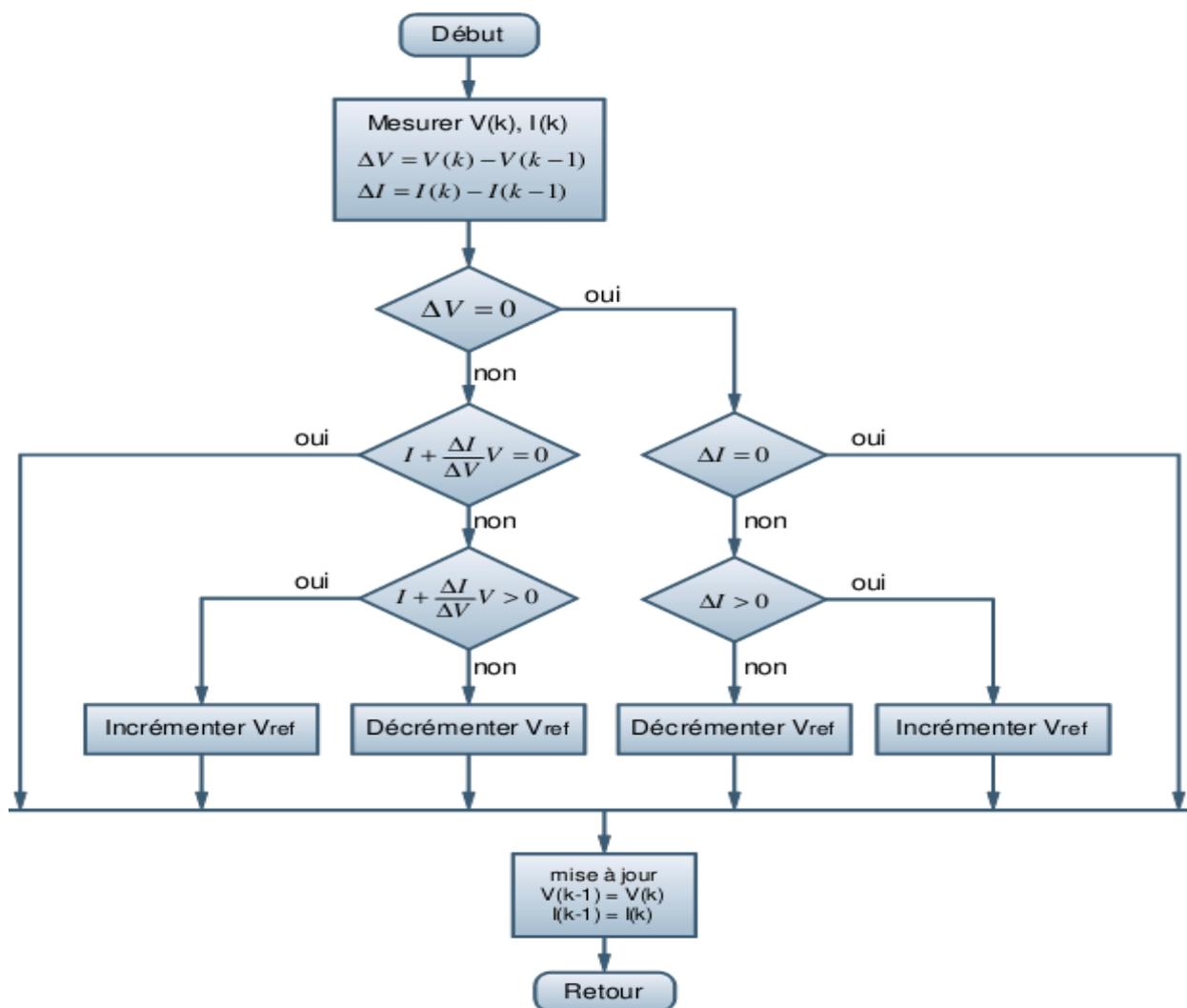


Figure II. 15: Organigramme de la méthode IncCond.

#### **II.4.4 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
- la méthode de l'oscillation forcée
- les algorithmes d'identification en temps réel du MPP

#### **II.5 Conclusion**

Dans cette partie, on a entamé la partie la plus importante et la plus délicate de cette étude. Il s'agit de la description du convertisseur MPPT. On a expliqué le principe de recherche du MPP. Ensuite, on a présenté quelques méthodes de poursuite et algorithmes, chacune de ces méthodes présentes des avantages comme des inconvénients.

## *Chapitre III*

# **Critère d'évaluation d'une MPPT**

### III .CRITERES D'EVALUATION D'UNE COMMANDE MPPT

La qualité d'une commande MPPT peut être définie comme la position du point de fonctionnement du système par rapport au PPM.

La puissance  $P_{in}$  effectivement délivrée par le GPV dépend de la commande utilisée au niveau du convertisseur (MPPT, asservissement de tension, connexion directe, ...). Le rendement du point de fonctionnement qui en découle et que nous noterons  $\eta_{MPPT}$ , permet de mesurer l'efficacité de la commande qui a en charge le contrôle du convertisseur de puissance. En résumé cela donne le % de pertes de puissance d'un module PV par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait produire.

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{in}}{P_{max}}$$

Les performances d'une commande MPPT ne se résument pas à ce seul paramètre ( $\eta_{MPPT}$ ). D'autres critères, présentés dans la suite du document, tels que le temps de réponse et son aptitude à fonctionner sur une large gamme de puissance sont importants pour évaluer les qualités de ce type de commande.

#### ➤ **Simplicité et Coût**

En plus de ses performances théoriques, il est important de connaître le niveau de complexité de l'algorithme entraînant des difficultés d'implémentation et des pertes liées directement au nombre de calculs nécessaires. En résumé, une commande MPPT doit avoir un niveau de simplicité important favorisant une faible consommation et donc un coût de développement raisonnable pour que sa présence compense le surcoût généré. En effet, il ne faut pas oublier que dans un contexte énergétique fortement concurrentiel, le fait d'insérer un étage d'adaptation avec une commande MPPT doit avoir un gain du point de vue énergétique recouvrant le surplus économique. Sinon, cette solution ne sera jamais viable du point de vue industriel. Dans le cas contraire, la commande aussi performante qu'elle soit en termes de rendement, présente trop de contraintes pour être choisie pour ce type d'application.

➤ **Réponse dynamique**

Une commande MPPT doit avoir un bon comportement en dynamique afin de pouvoir piloter l'étage d'adaptation et assurer que la recherche du nouveau PPM, suite aux changements d'éclairement ou de température, soit faite le plus rapidement possible.

➤ **Flexibilité**

Une commande MPPT doit être précise et stable quelles que soient ses conditions d'utilisation. C'est-à-dire qu'elle ne doit pas être conçue pour fonctionner pour un seul type de panneau. Elle doit être la plus universelle possible, capable de fonctionner avec des panneaux de différentes technologies sans trop de modifications, tout en gardant le même taux de précision et de robustesse.

➤ **Compétitive sur une large gamme de puissance.**

Par définition, une commande MPPT, utilisée dans des applications photovoltaïques, est supposée traquer le PPM généré par un module PV, quel que soit le niveau d'ensoleillement. La commande MPPT est dite compétitive si le PPM est atteint avec une erreur statique, correspondant à la position du point de fonctionnement par rapport au PPM, relativement faible sur une large gamme de puissance.

## **CONCLUSION GENERALE**

Pour obtenir un fonctionnement optimal d'un système PV, il est nécessaire de déterminer la puissance maximale de référence. Vue que cette dernière est fonction de la température et de l'éclairement et aussi caractérisée par une fonction non linéaire, ceci rend le fonctionnement du système PV à puissance maximale difficile à réaliser. Dans ce manuscrit, nous avons analysé la solution proposée par les différentes méthodes MPPT publiées dans la littérature pour déterminer la référence utilisée pour la recherche du point de puissance maximale. L'énergie ainsi obtenue peut être ainsi consommée tout en optimisant tous ces éléments ou bien injectée dans le réseau

- [1] K.Sobaihi, « Etude et réalisation d'un hacheur de tracking de MPP à contre réaction de tension », thèse magistère, ENP, 2008
- [2] Energie Renouvelables « An Introduction to Photovoltaic Systems », ressources naturelles Canada, 2001
- [3] F.CHEKIRED, "Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA" mémoire de magistère 2008, ENP, Alger Algérie.
- [4] M.ADOUANE "Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique" mémoire de magistère 2008, ENP, Alger Algérie.
- [5] O.BOUKLI-HACENE, "Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleur gestion énergétique" mémoire de magistère 2011 université de TLEMCEN
- [6] M.BIRANE "Etude et simulation des systèmes photovoltaïque avec micro-convertisseur" mémoire de magistère 2011, ENP, Alger Algérie.
- [7] K.SOBAlHI "Etude et réalisation d'un hacheur de tracking de point de puissance maximale (MPPT) à contre réaction de tension" mémoire de magistère 2003 ENP Alger.
- [8] M.S.RODRIGUEZ "Réalisation d'un étage d'adaptation pour générateur photovoltaïque" INSA Toulouse 2008.
- [9] C.CABAL "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque" Doctorat de université de Toulouse 2008.
- [10] Z.SMARA "Etude de différentes stratégies de commande des systèmes de poursuite de la puissance maximale" thèse de magistère 2009 ENP Alger.
- [11] K.NECHE "Aide à la mise au point d'un banc de test photovoltaïque" PFE 2008 ENP Alger.
- [12] W. Omran, "Performance Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Systems", Thèse de Doctorat, Université de Waterloo, Ontario, Canada, 2010.
- [13] A. Mahmoud, "Power conditioning unit for small scale hybrid pv-wind generation system", These de Doctorat, Universitie de DURHAM ,2010.

