

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

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département d'Electronique



Complément de mémoire

Pour l'obtention du titre

De Master en Electronique

THEME

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

Présenté par :
REZKI Abderrahmane

Proposé par :
Mr LARBES Cherif

Promotion Septembre 2012

SOMMAIRE

Introduction Générale	1
Chapitre I : Généralités sur les générateurs photovoltaïques	2
I.1 Générateur photovoltaïque	3
II.1.1 La cellule photovoltaïque	3
I.1.2 Le module photovoltaïque	3
I.2 Courbes caractéristiques d'un générateur photovoltaïque	4
Chapitre II : Poursuite du point de puissance maximale (MPPT)	7
II.1 Principe du fonctionnement général d'un MPPT	8
II.2 Différentes techniques MPPT	11
II.2.1 Méthodes à contre réaction de tension	11
II.2.1.1 Méthode à tension de référence fixe	11
II.2.1.2 Méthode à tension de référence en fonction de Voc	12
II.2.1.3 Tension de référence externe (Cellule pilote)	14
II.2.2 Méthodes à contre réaction de courant	14
II.2.2.1 Méthode se basant sur la modélisation du courant de court-circuit	14
II.2.2.2 Méthode de maximisation du courant de sortie	16
II.2.3 Méthodes à contre réaction de puissance	16
II.2.3.1 Algorithme de perturbation et observation (P&O)	17
II.2.3.2 Algorithme d'incrémentatation de la conductance	18
II.2.3.3 Méthode de tracking analogique	20
II.2.3.4 Méthode à oscillation forcée	21
Chapitre III : Critères d'évaluation d'une commande MPPT	23
Conclusion Générale	25
Références	26

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. A 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 quatre chapitres. En commençant par une introduction générale, introduisant des généralités sur le photovoltaïque dans le premier chapitre, présenter quelques techniques MPPT dans le deuxième chapitre, énumérant les critères d'évaluation d'une commande MPPT et terminant par une conclusion générale.

CHAPITRE I

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].

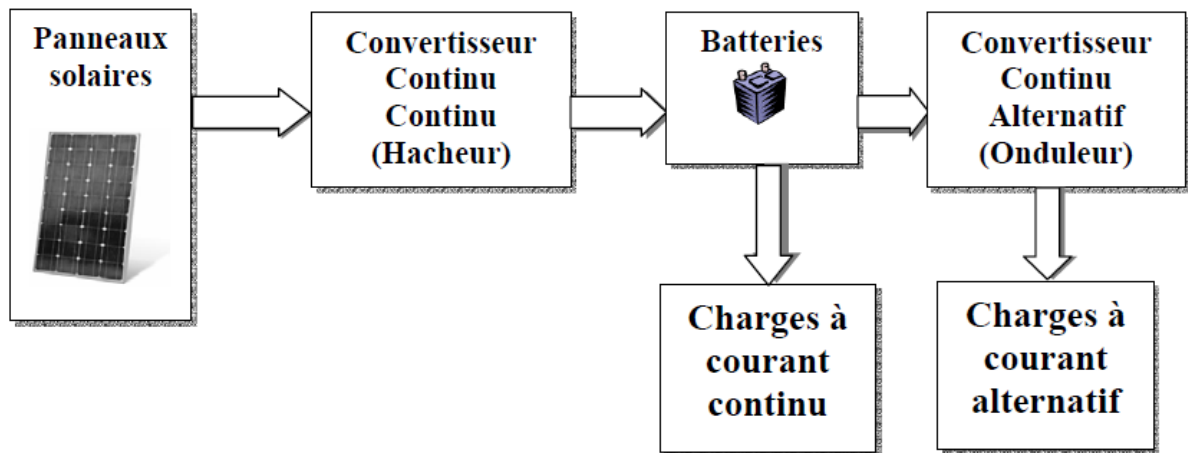


Figure I.1. Composantes principales d'une chaîne photovoltaïque.

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

- **Les systèmes autonomes** 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 la surveillance à distance et 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.
- **Les systèmes hybrides** 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).

- **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.

I-1 Générateur photovoltaïque

I.1.1 La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est l'élément central d'un module photovoltaïque. Il s'agit d'une surface composée d'un matériau semi-conducteur, en général le silicium, qui absorbe la lumière et la transforme en électricité. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque.

Le silicium est le semi-conducteur le plus couramment utilisé car il a un bon rendement. Il existe trois types de cellules en silicium : en silicium monocristallin, polycristallin ou amorphe. Leur rendement varie entre 12 et 16% pour le monocristallin et le polycristallin et il est de 7% pour l'amorphe, [3].

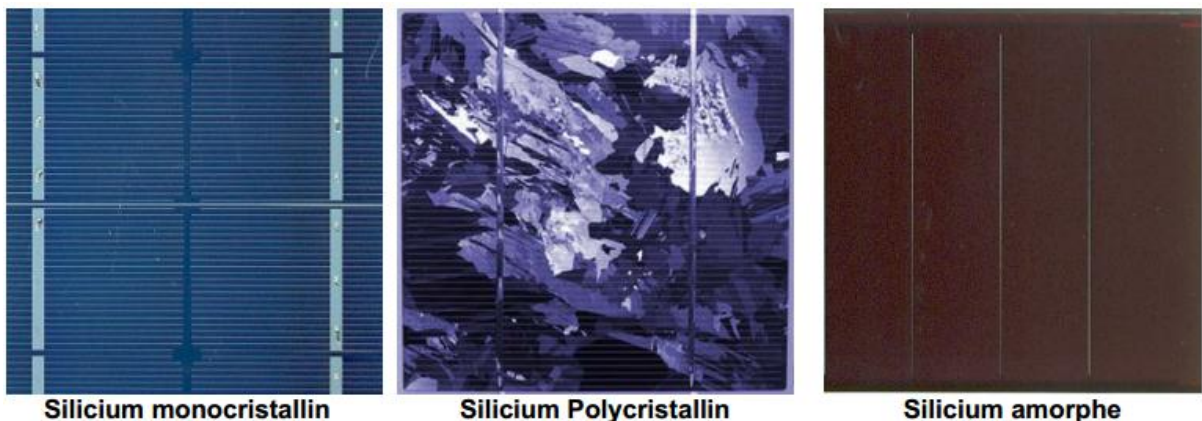


Figure I.2. Différents types de cellules photovoltaïques

I.1.2 Le module photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque produit une tension d'au moins un Volt et une puissance de 1 à 3 Watts (variable avec le type de matériau utilisé). Pour obtenir plus de puissance, on place plusieurs cellules ensemble. Encapsulées de manière étanche dans un cadre les protégeant des chocs et de l'usure, elles forment un module photovoltaïque. L'assemblage de plusieurs modules permet d'obtenir une puissance et un ampérage plus élevés.

On trouve sur le marché des modules de différentes puissances. Leur rendement dépend de la quantité de lumière solaire disponible, de leur orientation et de leur inclinaison ainsi que du matériau qui les compose. Reliés entre eux, ils constituent un générateur photovoltaïque. Ces modules ont une durée de vie de plus de 25 ans, [3].



Figure I.3. Générateur photovoltaïque formé par un ensemble de panneaux solaire

I.2. Courbes caractéristiques d'un générateur photovoltaïque

Tout panneau photovoltaïque, est considéré comme générateur et présente une courbe caractéristique dérivée de la courbe caractéristique de la cellule photovoltaïque.

Pour pouvoir comprendre la courbe, voyons d'abord le circuit équivalent et l'équation relative des deux grandeurs dérivée de celle-ci :

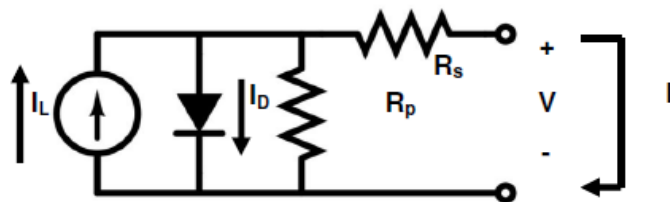


Figure I.4. Circuit équivalent d'un panneau photovoltaïque

Dans le circuit équivalent, nous voyons une source, celle qui fournit l'énergie ; une diode qui symbolise la jonction P-N et les résistances séries et parallèles associées.

L'équation est obtenue à partir du circuit équivalent comme suit : [4]

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\left(\frac{V+IR_s}{mv_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad \text{I.1}$$

Où :

- $V_t = k T/q$
 - V_t est le voltage thermique
 - k est la constante de Boltzmann, $k = 1.3854 \cdot 10^{-23}$, (JK)
 - T la température de la cellule, (K)
 - et q est la charge de l'électron, $q = 1,6021 \times 10^{-19}$ [c].
- I_L, I_0, m, R_s et R_p sont les paramètres de la cellule photovoltaïque en question.
 - I_L est le courant photo-généré, (A)
 - I_0 est le courant d'obscurité, (A)
 - m est le facteur d'idéalité de la diode
 - R_s est la résistance équivalente série, (Ω)
 - R_p est la résistance équivalente parallèle (Ω).

En effet, le générateur PV (ensemble de modules PV) a une courbe caractéristique IV non linéaire :

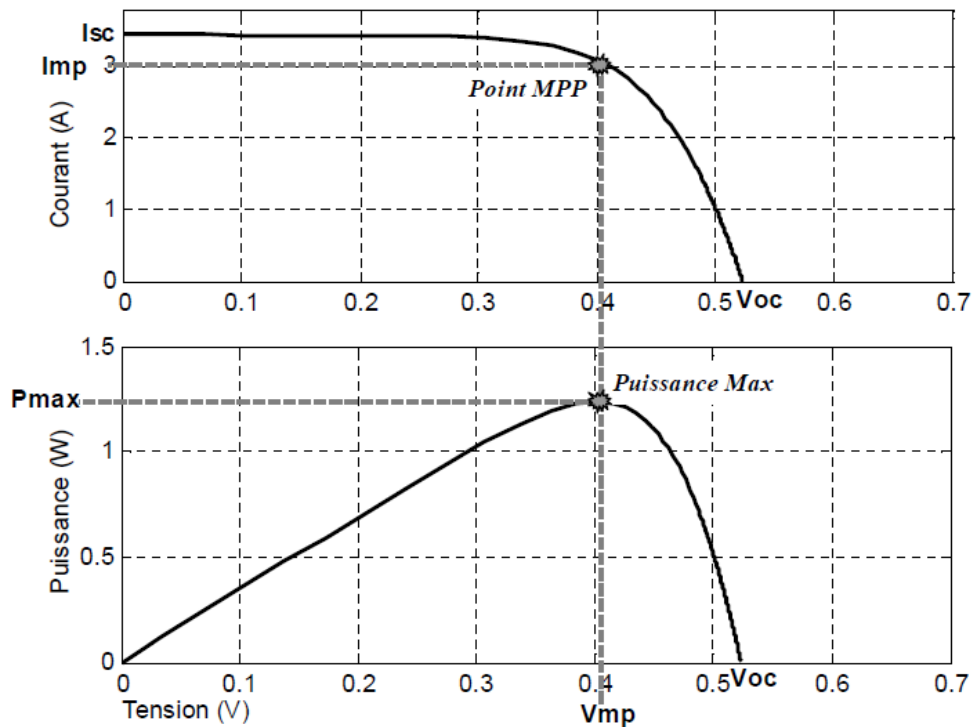


Figure I.5. Caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'une cellule solaire pour un ensoleillement et une température donnés, [1].

Les caractéristiques électriques du module photovoltaïque dépendent de l'éclairement et de la température de jonction au niveau de la surface exposée, le courant de fonctionnement du générateur augmente de façon proportionnelle quand l'éclairement augmente, [6].

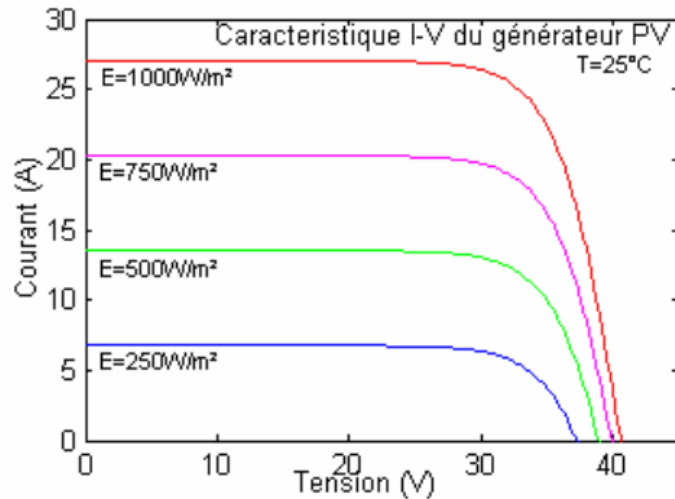


Figure I.6. Influence de l'éclairement sur I-V.

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, (pour une augmentation de 15°C, V_{oc} diminue de 5V), inversement le courant augmente, [6].

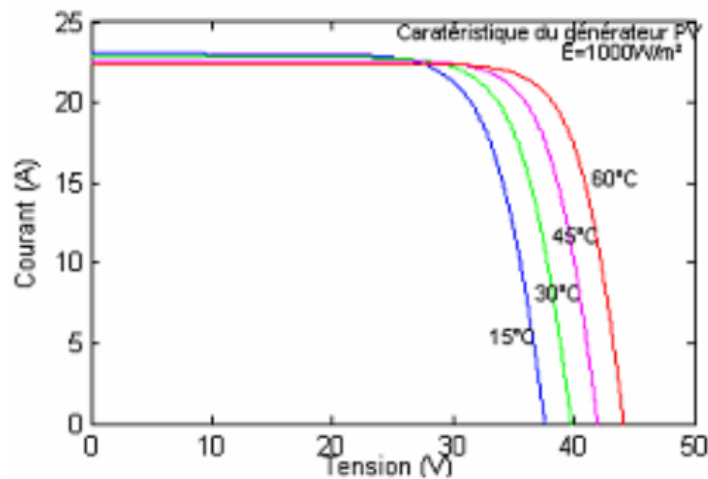


Figure I.7. Influence de la température sur I-V

La plus importante caractéristique 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. A 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.

CHAPITRE II

POURSUITE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE (MPPT)

D'un point de vue expérimental, les cellules photovoltaïques (PV) présentent de grandes variances de leur puissance électrique en fonction des conditions météorologiques. De plus, quand elles sont connectées à une charge, certains problèmes apparaissent, et la puissance transférée à la charge correspond rarement à la puissance maximale délivrée par le générateur PV. On remarque des problèmes similaires dans le cas du éolien.

Pour avoir la meilleure connexion entre une source non linéaire et une charge arbitraire et produire la meilleure puissance, le Maximum Power Point Tracking (MPPT) a été développé depuis 1968. Ces genres de contrôleurs, particulièrement adaptés pour piloter une source non linéaire, forcent le générateur à travailler à son Maximum Power Point (MPP), induisant une amélioration globale du rendement du système de conversion électrique.

Quand une source d'énergie est connectée à une charge, le point de fonctionnement est déterminé en prenant l'intersection de la caractéristique électrique I-V avec celle de la charge. Ce point de fonctionnement varie du fait que la source d'énergie ou la charge varie à tout moment. C'est pourquoi, souvent, on n'opère pas au MPP, et la puissance fournie à la charge est inférieure à la puissance maximale que l'on pourrait fournir.

Il existe différents types de contrôleurs MPPT. Généralement, chacun de ces contrôleurs a été réalisé pour une application spécifique. La précision et la robustesse de ces contrôleurs dépendent d'un certain nombre de paramètres :

- Le rendement global du système désiré par le constructeur
- Le type de convertisseur de puissance permettant l'adaptation et la connexion à une charge (DC-DC, DC-AC), ou à un réseau électrique.
- L'application souhaitée (systèmes autonomes, connectés au réseau, spatiaux.)
- Les caractéristiques du MPPT, en fonction de la vitesse, qualité
- Le type d'implantation choisi (analogique, numérique, mélange des deux)

II.1 Principe du fonctionnement général d'un MPPT

Les principes des contrôleurs MPPT sont souvent basés sur le « coude » de la caractéristique P-V. C'est plus ou moins une méthode par tâtonnement, comme le montre la figure suivante.

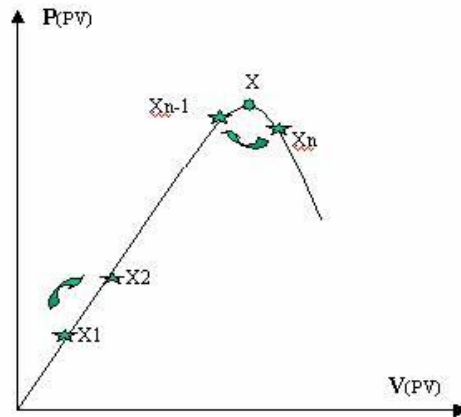


Figure II.1. Principe d'un contrôleur MPPT

On se place à un endroit de la courbe (X1), et l'on regarde si la valeur du point suivant est supérieure ou non. Si oui, on se déplace au point suivant (X2), jusqu'au moment où le terme suivant (Xn) sera inférieur au précédent (Xn-1). A ce moment, on prend un intervalle de valeur entre chaque point plus faible, et l'on recommence à partir de (Xn-1), jusqu'à obtenir le MPP (X).

Cependant, ce principe, facile à réaliser semble-t-il dans ces conditions, devient moins accessible lorsque l'éclairement intervient. En effet, lorsque l'intensité de l'éclairement varie, la caractéristique P-V change. Le point X, qui était jusqu'à présent le MPP, se retrouve être un mauvais point de fonctionnement dans les nouvelles conditions, comme le montre la figure suivante. On voit apparaître un nouveau point de fonctionnement ici appelé X', [6].

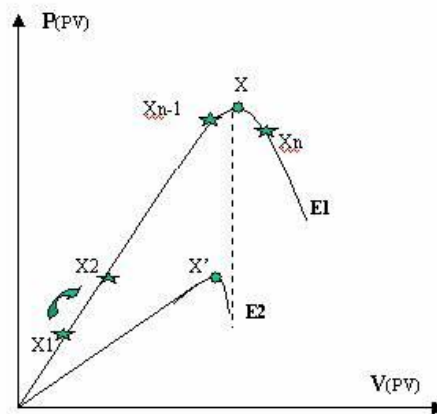


Figure II.2. Conséquence d'un changement d'éclairement sur la recherche du MPP

Comme pour les régulateurs linéaires, le contrôle est basé sur un système de régulation qui a X_s et X_e respectivement comme variables de sortie et d'entrée. Dans la plupart des systèmes de régulation, seulement une mesure est nécessaire pour connaître le rapport entre X_s et X_e , mais ce n'est pas une condition suffisante dans un système où le rapport est une fonction du temps, [6].

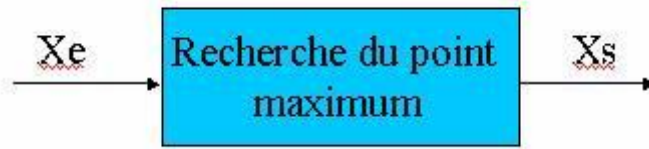


Figure II.3. Schéma bloc classique

Le déplacement de X_e , peut être assimilé à une perturbation dans la régulation du maximum. En effet, quand le signe de la dérivée de X_s est connu, et si cela signifie que X_s s'éloigne du maximum, alors le contrôleur change le signe de la direction de X_e pour retrouver le maximum. Cette constante évolution de X_e introduit un état d'oscillation autour de la valeur maximale.

Cependant, plusieurs limites existent :

- La caractéristique P-V du générateur peut avoir plus de un maximum. Cela se produit quand beaucoup de cellules PV, avec leur diode de protection, sont associées en série ou en parallèle.
- Des variations brutales peuvent apparaître au niveau de l'éclairement ou de la charge. Si le MPPT n'a pas une bonne dynamique, le MPP peut être perdu. Pendant le temps qu'il faudra pour retrouver le MPP, de nouvelles pertes de puissance vont apparaître.
- Des oscillations autour du MPP existent lors de la recherche de ce point. Cela introduit des pertes, [6].

Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôlé par un mécanisme de poursuite (Maximum Power Point Tracking) pour extraire le maximum de la puissance générée par le panneau solaire. Ne pas confondre le tracking de puissance avec la notion de tracking du panneau qui s'occupe de la poursuite de soleil.

La figure II.4 montre le diagramme synoptique d'un système photovoltaïque, avec un module MPPT qui a pour entrées la tension et le courant de sortie du panneau. Dans la plupart des cas on fait une maximisation de la puissance fournie par le panneau solaire et non la puissance fournie à la charge. Car dans le cas d'un moteur, comme charge, la maximisation de la puissance de charge conduit à la maximisation de la puissance perdue dans les bobines et non seulement la puissance mécanique générée par le moteur, ainsi pour que le mécanisme du MPPT soit indépendant de la charge, il est préférable de maximiser la puissance de sortie du Panneau, [1].

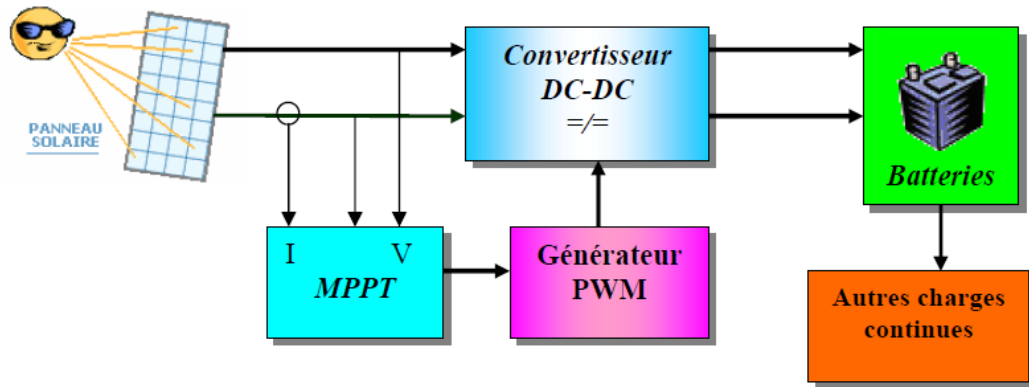


Figure II.4. Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT.

La figure II.5 donne un exemple de comparaison entre un système sans et avec MPPT pour des variations d'ensoleillement. On constate une amélioration apparente de la puissance de sortie dans le cas de l'utilisation de MPPT, [1].

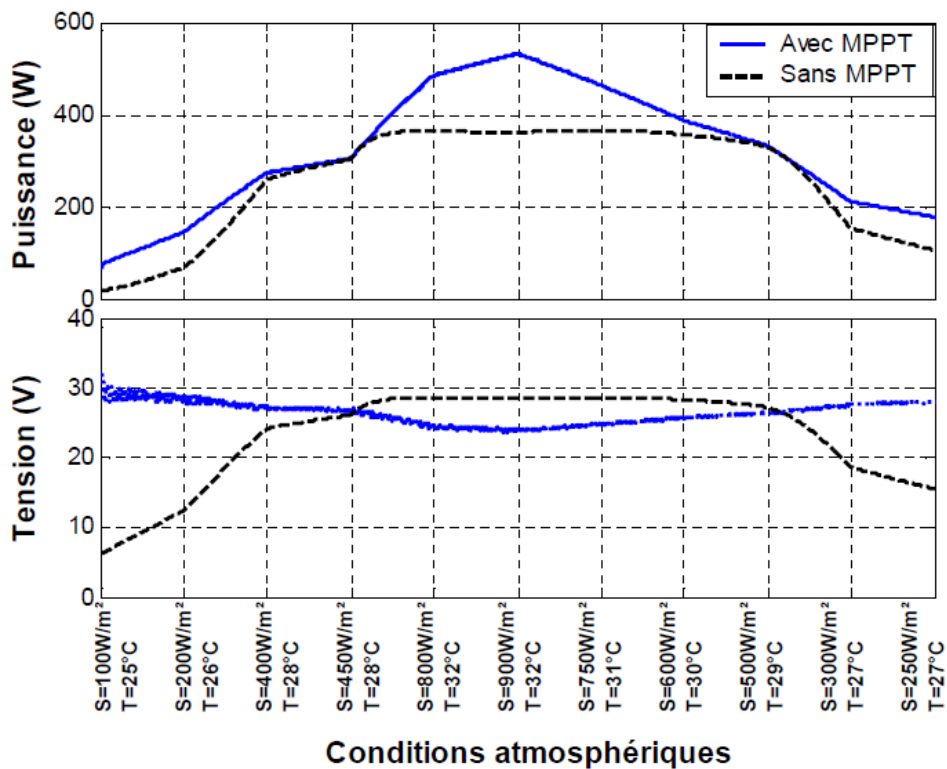


Figure II.5. Puissance et tension de sortie du panneau solaire avec et sans MPPT pour des ensoleillements et des températures variables.

II.2 Différentes techniques MPPT

Dans ce qui suit nous allons décrire quelques techniques MPPT.

II.2.1 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. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la PWM de commande afin d'annuler cette erreur. Selon la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe) on a trois types de méthodes :

II.2.1.1 Méthode à tension de référence fixe

Cette méthode suppose que les variations de l'éclairement et de la température au niveau des modules PV entraînent une variation insignifiante de la tension optimale, et qu'une tension fixe de référence constitue une approximation adéquate du point de fonctionnement optimal. Cette tension de référence correspond à la tension moyenne de l'intervalle des points des puissances maximales (Figure II.6) relevées par des tests sous différentes conditions d'ensoleillement et de température en agissant simplement sur les différents facteurs de pondération lors de la mise au point afin de générer le maximum de puissance.

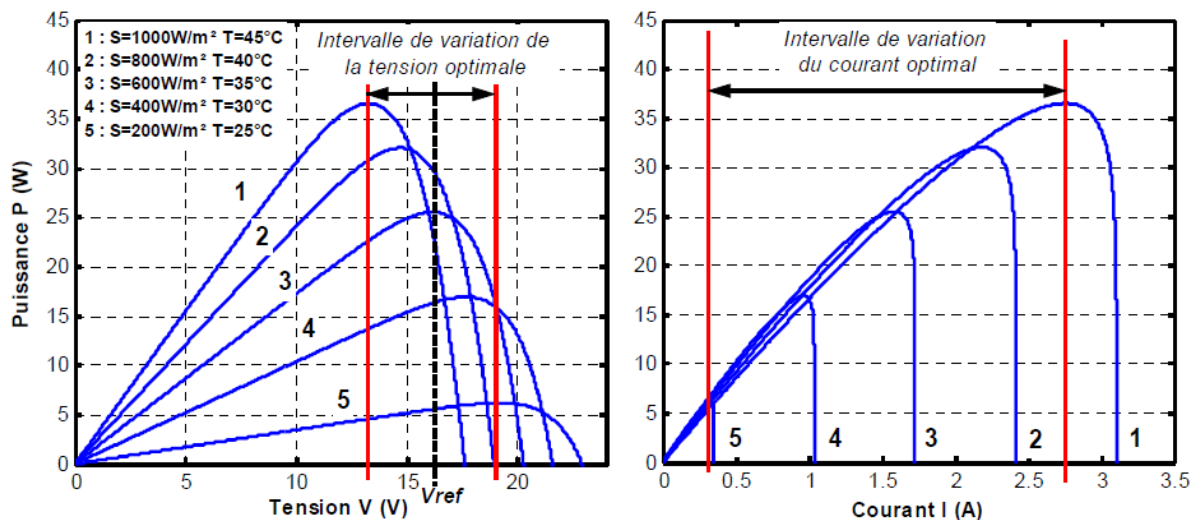


Figure II.6. Intervalles de variation de la tension et du courant de fonctionnement optimal pour des ensoleillements et des températures variables.

A cause de la dépendance de la tension du panneau avec l'ensoleillement et la température, la tension de puissance maximale est déviée, alors la tension de référence doit être corrigée pour différents ensoleillements et températures au long des périodes de l'année. La figure II.7 présente le schéma synoptique de cette méthode.

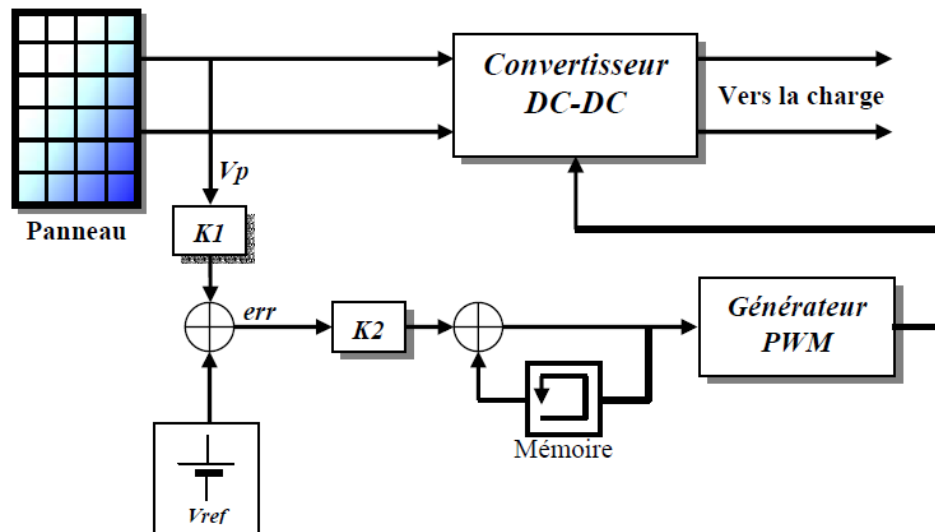


Figure II.7. Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence fixe.

La tension aux bornes des modules PV est prise comme variable à contrôler. Cette tension V_p est comparée à une tension de référence qui est déterminée selon les conditions optimales de fonctionnement des modules PV. La tension de consigne V_c qui en résulte est comparée, ensuite à un signal en dent de scie délivré par une base de temps (Générateur PWM). Le signal rectangulaire qui est alors obtenu, permet d'agir sur le rapport cyclique et de rendre égale, la tension de fonctionnement des modules PV, à sa valeur optimale, [7].

Cette méthode qui est simple à mettre en œuvre, présente les inconvénients suivants:

- Elle ne localise pas le point de puissance maximale, mais elle fait travailler les modules PV à son voisinage.
- Elle néglige l'effet de la température et de l'éclairement sur les modules PV.
- Elle ne prend pas en compte les dérives des caractéristiques des modules PV dues aux paramètres extérieurs (vieillessement, vent, poussière,)

Cette méthode de régulation est uniquement bien adaptée aux applications où les conditions climatiques sont stables, [7].

II.2.1.2 Méthode à tension de référence en fonction de V_{oc}

Cette méthode exploite la relation quasi linéaire entre la tension de fonctionnement en puissance maximale et la tension à circuit ouvert V_{oc} du panneau. Cette tension 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 0.7. Ainsi 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, [1].

La tension à vide de cellules en fonction de la température et de l'éclairement est donnée, par :

$$V_{oc} = \frac{N_s A_{pv} K_B T_c}{q} \ln\left(\frac{I_{ph} + I_0}{I_0}\right) \quad \text{II.1}$$

Pour déterminer le point de fonctionnement correspondant au point de puissance maximale en fonction de la tension V_{co} , on trace le graphe $V_{op} = f(V_{co})$. La fonction $f(V_{co})$ obtenue n'est pas linéaire. Pour faciliter le calcul, on linéarise cette fonction. Ce qui donne :

$$V_{op} = 0.7 V_{co} + 0.328$$

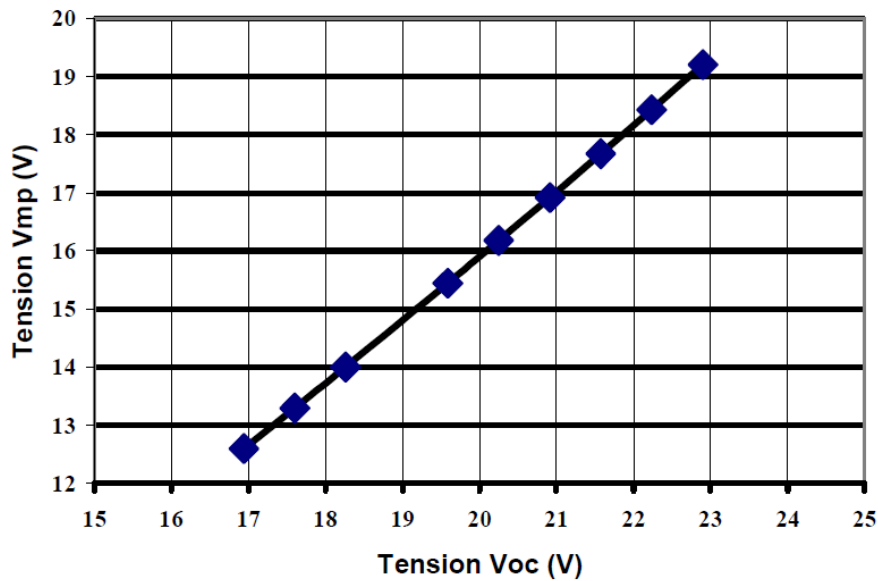


Figure II.8. La tension de la puissance maximale V_{mp} en fonction de la tension à circuit ouvert V_{oc}

La figure II.9 présente le schéma synoptique de cette méthode.

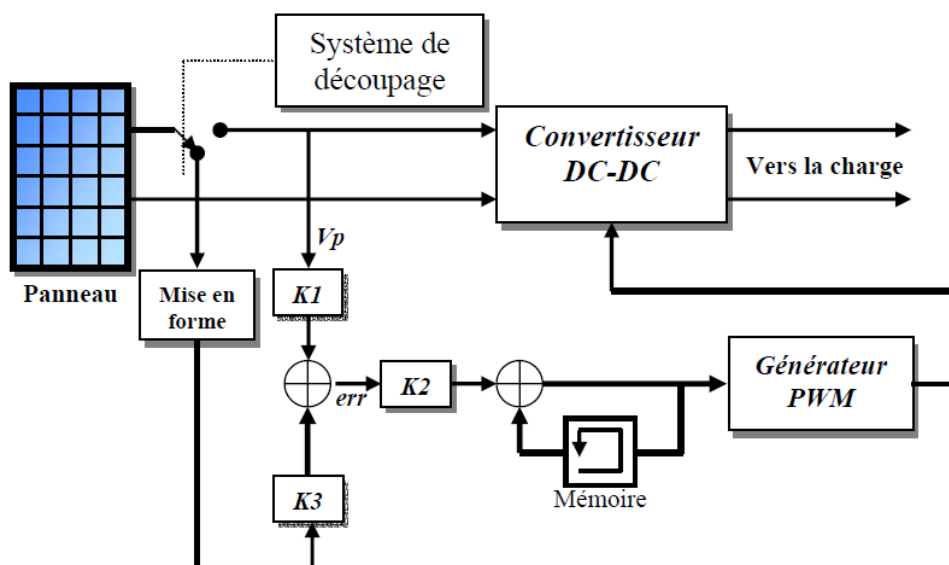


Figure II.9. Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence en fonction de tension à circuit ouvert du panneau

II.2.1.3 Tension de référence externe (Cellule pilote)

Dans la méthode précédente l'interruption du fonctionnement du circuit pour mesurer V_{oc} cause des pertes de puissance et un bruit dans les circuits électriques. Pour éviter ces problèmes une cellule pilote est ajoutée au panneau solaire. 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.

Cette méthode évite l'interruption du système mais il est difficile de trouver un endroit idéal de la cellule pilote pour qu'elle donne une information parfaite de la tension V_{oc} de l'ensemble pour différents ensoleillements et températures. Comme les méthodes précédentes, cette méthode utilise un facteur fixe pour estimer la tension V_{mp} à partir de la tension V_{oc} ce qui donne que le MPP (Maximum Power Point) n'est pas traqué parfaitement (Figure II.10), [1].

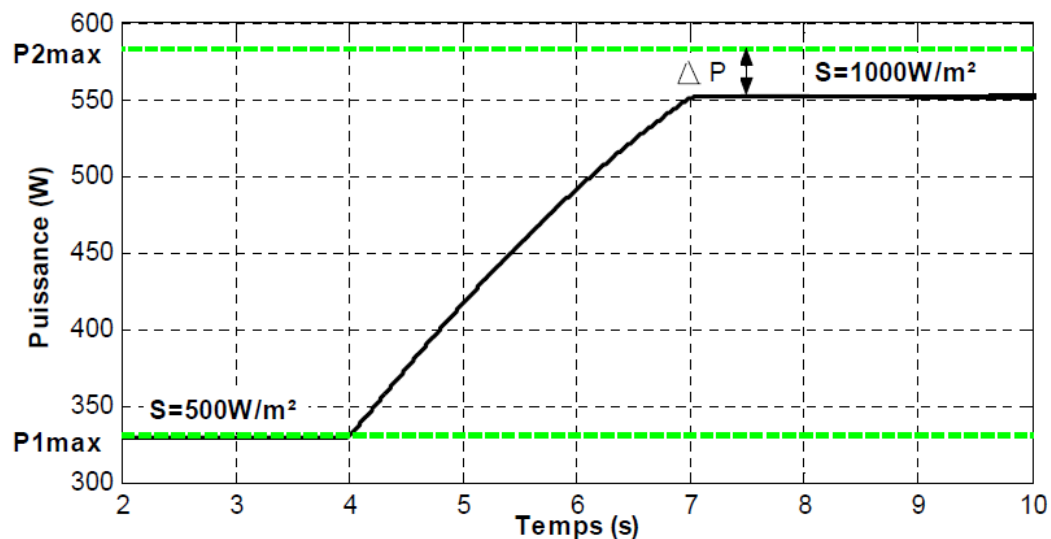


Figure II.10. Puissance de sortie des panneaux solaires par rapport à la puissance maximale avec la méthode à contre réaction de tension pour deux ensoleillements différents.

II.2.2 Méthodes à contre réaction de courant

II.2.2.1 Méthode se basant sur la modélisation du courant de court-circuit

En 2002, Toshihiko a montré que la relation entre la tension de référence et la tension de circuit ouvert n'est pas linéaire (Figure II.11). Donc, il n'est pas possible d'utiliser la Tension de circuit ouvert comme variable de contrôle.

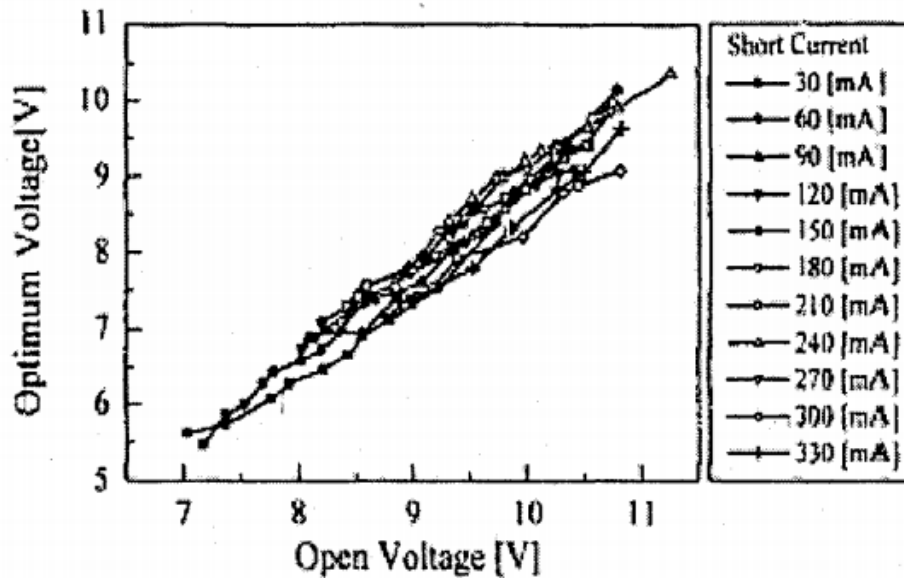


Figure II.11. Variation de la tension optimale en fonction de V_{co} pour différentes températures et différents éclaircements

D'après la formule, le courant de court-circuit traduit bien les variations de l'éclairement et de la température, [7].

$$I_{cc} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[\exp \left(\frac{q R_s I_{cc}}{N_p A_p v K_B T_c} \right) - 1 \right] \quad \text{II.2}$$

Toshihiko a obtenu une relation entre le courant de court-circuit et le courant de référence graphiquement, en traçant I_{cc} en fonction de I_{op} (Figure II.12). Ce qui donne:

$$I_{op} = K I_{cc}$$

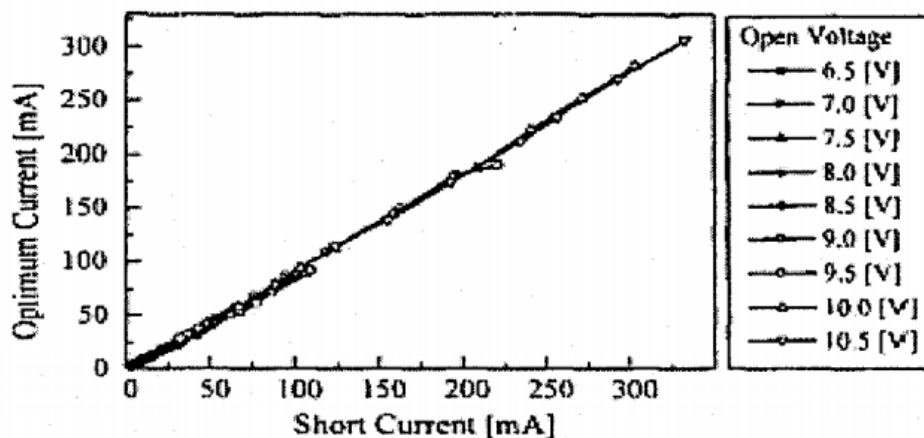


Figure II.12. Variation du courant optimal en fonction d' I_{cc} pour différentes températures et différents éclaircements

Cette méthode permet d'approcher le point de fonctionnement optimal, mais elle présente les inconvénients suivants:

- En réalité le courant de court-circuit vaut de 85 à 95 % du courant optimal, donc ce n'est pas vraiment linéaire

- Non prise en compte des caractéristiques du générateur PV dues aux paramètres extérieurs.
- Perte d'énergie pendant le temps des courts-circuits nécessaire pour la mesure de la référence, [7].

II.2.2.2 Méthode de maximisation du courant de sortie

Cette méthode est basée sur le fait que lorsque la charge est constituée par des batteries la tension de la charge est approximativement constante, c'est à dire que la maximisation de la puissance de sortie revient à maximiser le courant de charge de la batterie. En terme mathématique, cela est vrai si dI/dP est borné et strictement supérieur à zéro, cela peut être exprimé comme suit :

$$0 < \frac{V}{I} + \frac{dV}{dI} < \infty$$

Cette relation est vraie dans le cas d'une charge de très faible résistance ou une batterie mais si la charge est constituée d'un autre convertisseur ou d'un moteur à courant continu la dérivée dI/dP est nulle au point MPP et alors il sera impossible de trouver le MPP à partir du courant seulement. La maximisation est réalisée par la minimisation de dI seulement par des procédés analogiques ou par l'utilisation d'un microcontrôleur.

L'avantage de cette méthode réside dans sa simplicité par rapport aux méthodes de tracking par maximisation de puissance. On a moins de calculs ainsi on évite les multiplications et les divisions qui engendrent des exceptions qui doivent être traitées.

Cette méthode a l'inconvénient suivant : elle ne traque pas exactement le point de puissance maximale mais il existe un certain décalage par rapport à ce point, à cause de l'approximation précédente, cette déviation est de plus en plus minimisée par le branchement des batteries en parallèle.

II.2.3 Méthodes à contre réaction de puissance

Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du panneau pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les panneaux solaires. Ainsi pour un point donné on fait la recherche dans un certain sens, si on a une augmentation de la puissance du panneau alors on maintien cette direction de recherche, sinon on cherche dans le sens opposé.

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 $P=V.I$. Le sens de variation de la puissance P est connu par le calcul de manière approximative de la

dérivée $dP \approx \Delta P(k) = P(k) - P(k-1)$ sur un temps d'échantillonnage qui représente la vitesse d'exécution du microprocesseur ou du microcontrôleur.

A cause de l'approximation de la dérivée par des valeurs discrètes le MPP n'est jamais atteint mais le point de fonctionnement oscille au-dessous de ce point, ce qui engendre des instabilités et qui ajoute des formes du bruit au circuit.

II.2.3.1 Algorithme de perturbation et observation (P&O)

C'est l'algorithme de tracking le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de V_{ref} ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du panneau est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$ alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent. L'organigramme de cet algorithme, [1]

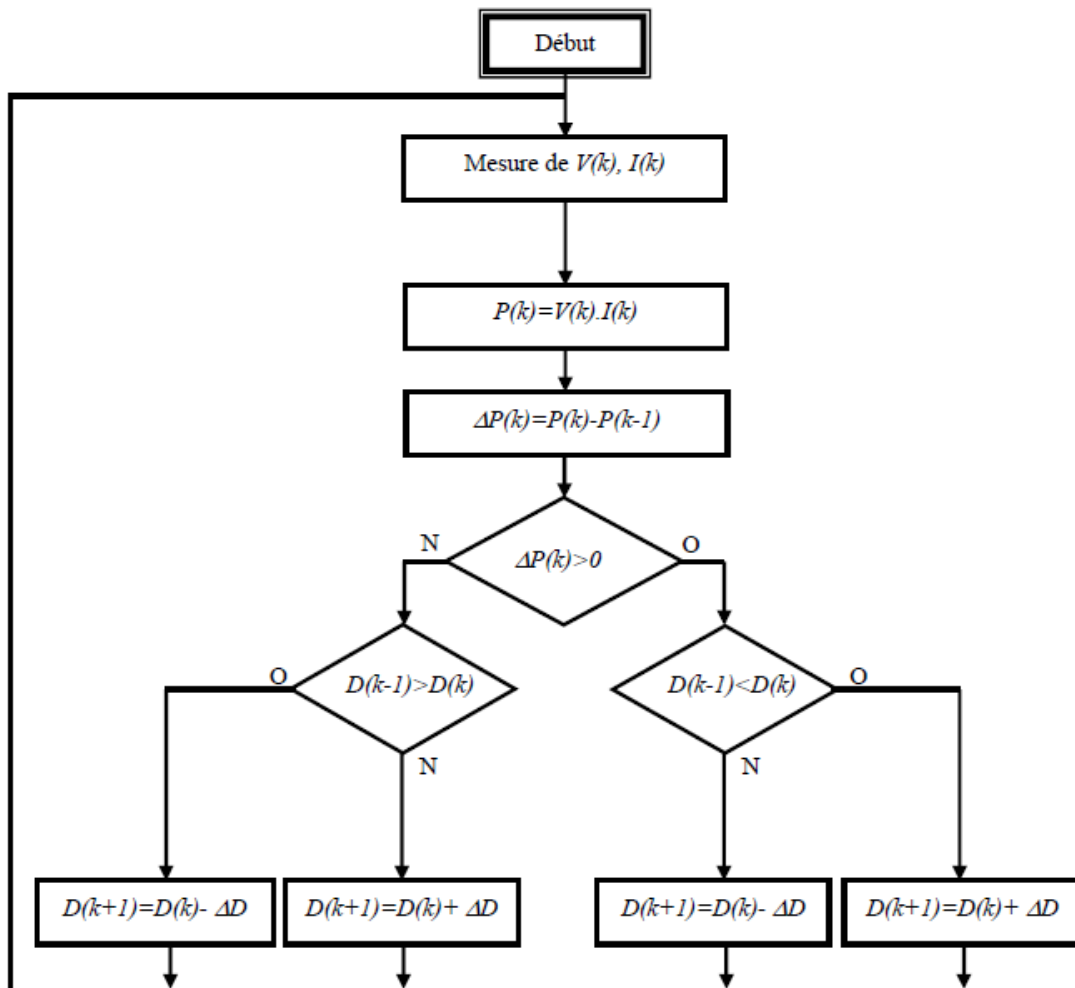


Figure II.13. Organigramme de l'algorithme perturbation et observation.

Dans cette approche, on maximise la puissance délivrée à la charge et non la puissance permettant un rendement maximal de cette charge.

L'algorithme P&O est le plus utilisé dans la littérature. Il permet de déterminer le point de puissance maximale pour un ensoleillement et une température ou un niveau de dégradation des caractéristiques.

Le problème avec cet algorithme est:

- l'oscillation autour du point de puissance maximale dans les conditions de fonctionnement normales. Ce qui cause une perte de puissance qui dépend du pas de perturbation. Si ce pas est grand le système répond rapidement à des changements brutaux de l'ensoleillement mais on aura une augmentation des pertes d'ondulations, et si le pas de perturbation est faible ces ondulations sont réduites mais le système répond lentement à des changements brutaux des conditions de fonctionnement. Le pas idéal est déterminé expérimentalement en fonction des besoins.
- la mauvaise convergence de l'algorithme dans le cas des variations brusques de la température et/ou de l'ensoleillement, [7].

II.2.3.2 Algorithme d'incrément de la conductance

Cette méthode est basée sur l'approche de l'incrément de la conductance. L'évaluation de deux grandeurs, la variation de conductance (dI/dV) et la conductance (I/V), permet d'analyser la recherche du point de puissance maximale. Pour appliquer cet algorithme, deux paramètres importants restent à déterminer, la valeur initiale du point de fonctionnement (V_{ref}) et le pas de mise à jour de la tension de référence (dV). La puissance de sortie de la source PV est donnée par : [7]

$$\frac{dP}{dV} = I + \frac{dI}{dV} V \quad \text{II.3}$$

La puissance maximale est obtenue lorsque :

$$\left(\frac{dP}{dV}\right) = \left(\frac{dVI}{dV}\right) = 0$$

Ce qui donne :

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$$

Ceci nous permet de définir la conductance de la source par: $G = I/V$

Et l'incrément de la conductance par: $\Delta G = dI/dV$

Donc le rôle de cet algorithme est de chercher le point de fonctionnement optimal correspondant à l'égalité entre la conductance et l'incrément de la conductance (Figure II.14), [7].

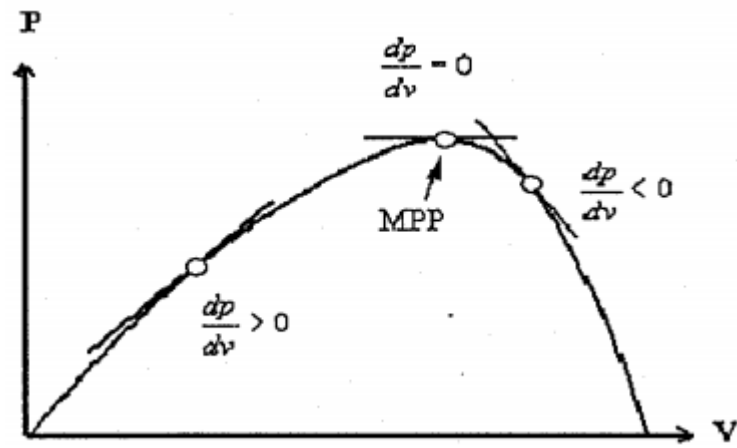


Figure II.14. Zones de fonctionnement d'un système PV

- $\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$ donc, $\frac{dP}{dV} = 0$
- $\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$ donc, $\frac{dP}{dV} > 0$
- $\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}$ donc, $\frac{dP}{dV} < 0$

Cet algorithme présente des difficultés de mise en œuvre due à la complexité du circuit de commande et le calcul en temps réel de la dérivée nécessite un processeur de calcul rapide

L'organigramme de cet algorithme : [1]

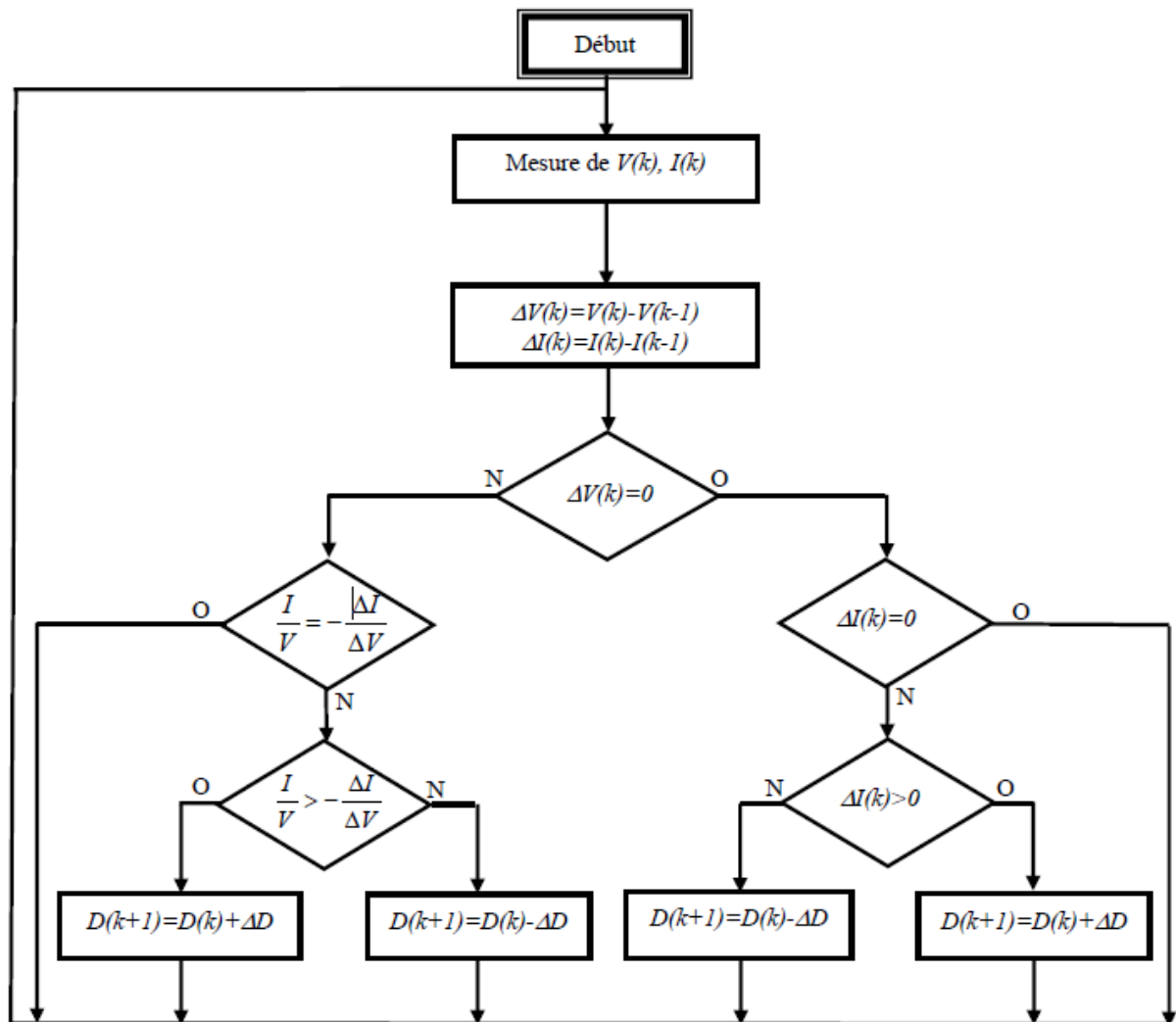


Figure II.15. Organigramme de l'algorithme incrémental conductance.

II.2.3.3 Méthode de tracking analogique

Cette méthode utilise directement la tension et le courant du panneau pour le contrôle du MPP. L'image de la puissance du panneau est obtenue par la multiplication des grandeurs précédentes. Pour déduire le sens de variation de la puissance deux filtres RC de constantes de temps différentes créent un retard différent pour les deux branches P1, P2, en association avec un comparateur de tension. Ces deux signaux génèrent un signal qui représente la dérivée dt/dP .

Lorsque la puissance diminue la sortie du comparateur est négative, dans le cas contraire elle est positive. Ces créneaux attaquent une bascule JK où sa sortie bascule pour chaque front montant ou descendant du comparateur, la sortie de la bascule est intégrée par un circuit RC passe bas pour générer une tension continue qui sert comme tension de référence pour la génération de la PWM, (Figure II.16).

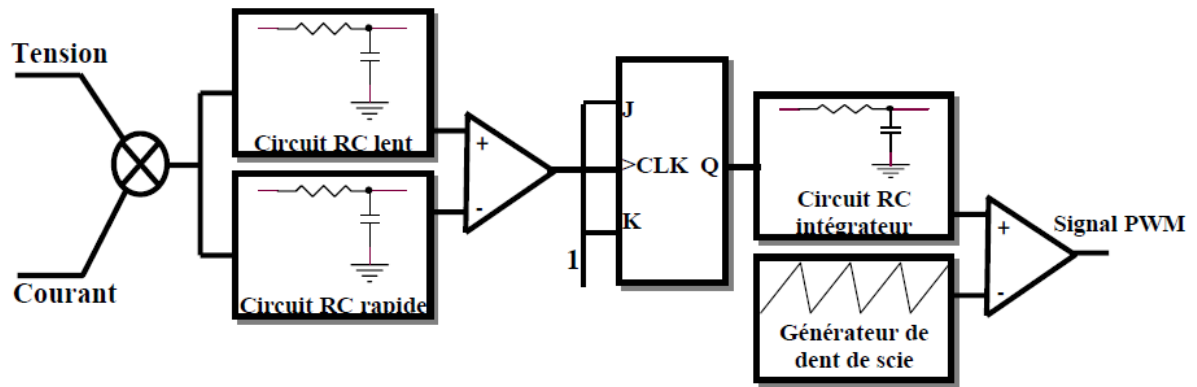


Figure II.16. Schéma synoptique d'un MPPT analogique.

Lorsqu'on a une augmentation rapide de l'ensoleillement le mécanisme de tracking est incapable de déterminer la cause de l'augmentation de la puissance si elle est causée par le déplacement du point de fonctionnement ou par des variations des conditions de fonctionnement. Cela cause la déviation du MPP ce qui engendre des pertes de puissance. Autre inconvénient, lorsqu'on a des changements rapides d'ensoleillement ou des parasites dans le courant, la bascule change d'état incorrectement et le point de fonctionnement s'éloigne de plus en plus du MPP jusqu'à ce que la sortie de la bascule se fixe à un niveau bas et le rapport cyclique D se fixe à zéro. Alors le système se bloque jusqu'à un nouveau redémarrage.

Pour remédier à ce problème, un contrôle du courant de sortie du panneau est proposé. S'il y a un arrêt du mécanisme de tracking, le courant du panneau se fixe dans une valeur très basse ou très haute selon le type du convertisseur (Boost ou Buck). Dans ce cas on force la bascule à changer d'état pour que le point de fonctionnement s'éloigne des limites. L'avantage de cette technique réside dans sa simplicité d'implémentation et son bas prix, [1].

II.2.3.4 Méthode à oscillation forcée

Dans les méthodes précédentes la dérivée de la puissance du panneau est utilisée pour déterminer la position du MPP avec différentes manières de traitements. A cause de l'approximation de la dérivée par des différences d'échantillons voisins, le MPP n'est jamais atteint et le point de fonctionnement oscille autour. Cette oscillation est nommée Auto-Oscillation.

La méthode proposée dans ce paragraphe est un mécanisme de tracking à oscillation forcée. En injectant un faible signal sinusoïdal d'une centaine d'Hertz dans la tension du panneau avec une simple addition, cela implique que la puissance de sortie du panneau à une composante sinusoïdale, de phase et d'amplitude en fonction de la position du point de fonctionnement par rapport au point MPP.

Si le point de fonctionnement est à gauche du point de puissance maximale le signal porté par la puissance est en phase avec le signal injecté. Si le point de fonctionnement est à droite par rapport au point MPP le signal de puissance est en opposition de phase par rapport au signal de référence injecté. Si le point de fonctionnement se trouve exactement sur le point MPP la fréquence du signal de puissance est le double de celle du signal de référence, (figure II.17), [1].

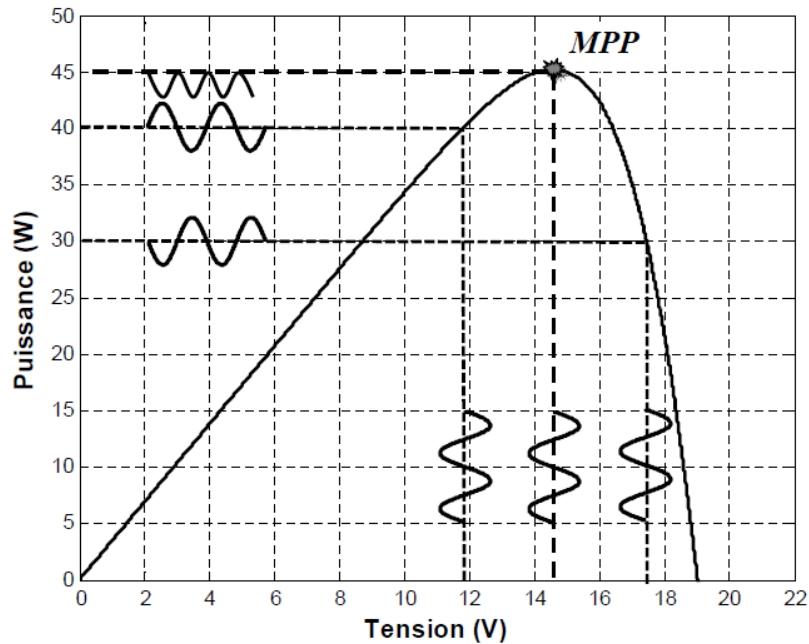


Figure II.17. La phase du signal de puissance en fonction de la position du MPP.

La détection de phase est réalisée par une boucle *PLL* (*Phase Locked Loop*) qui génère une tension d'erreur proportionnelle à la position du point de fonctionnement par rapport au point MPP.

L'avantage de cette technique est que la tension d'erreur intégrée de sortie du détecteur de phase fournit en permanence la position du point de fonctionnement et elle converge lentement vers zéro lorsque le point de fonctionnement approche du point de puissance maximale, ainsi en évitant que le point de fonctionnement oscille autour du MPP, la seule oscillation est causée par le signal injecté.

L'inconvénient de cette technique réside dans la difficulté de synchroniser le détecteur PLL lorsqu'on atteint le point MPP où l'amplitude du signal devient très faible par rapport à la composante continue, en plus du bruit de découpage du convertisseur DC-DC. Le détecteur sera incapable de maintenir une valeur stable à sa sortie, [1].

CHAPITRE 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 η_{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.

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{in}}{P_{max}} \quad \text{III.1}$$

Les performances d'une commande MPPT ne se résument pas à ce seul paramètre (η_{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. Vu 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.

REFERENCES

- [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] : Service info Environnement, « Les systèmes photovoltaïques (ER5) », Bruxelles Environnement, Avril 2008.
- [4] : A.Rezki A.Merzouk,« conception d'une carte d'une carte de caractérisation pour panneaux solaires basée sur un microcontrôleur », ENP 2012.
- [5] : R. Chenni, L. Zarour, « OPTIMISATION D'UN SYSTÈME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE », Faculté Science de l'Ingénieur, 2007.
- [6] : Lucie Petillon, « Le MPPT », e-LEE.com.
- [7] : T.Tafticht, « Analyse et commande d'un système hybride photovoltaïque éolien » thèse partielle du Doctorat, Université du Québec, 2006.