

## Chapitre3

### Commande de la puissance générée Via les Techniques MPPT

#### 3.1. Introduction

La conception d'un étage d'adaptation permet aujourd'hui de relier aisément un générateur photovoltaïque (GPV) à une charge de type continu (DC), avec un rendement de conversion très élevé. En fait, un convertisseur à découpage continu-continu (DC/DC).

#### 3.2. Connexion directe source-charge

La connexion directe est surtout utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre, son coût minimal et sa fiabilité. En termes de rendement, même si la puissance du GPV est choisie judicieusement par rapport à la charge, ce type de connexion souffre souvent d'une mauvaise adaptation électrique et présente des pertes importantes de production d'énergie.

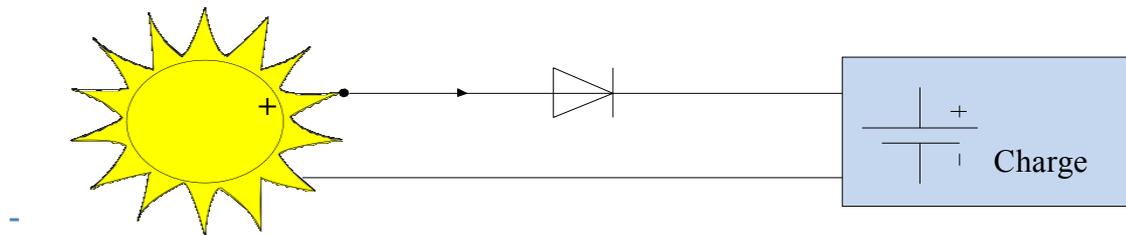


Figure3.1. Connexion directe source-charge.

#### 3.3. Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge

Un GPV présente des caractéristiques  $I(V)$  non linéaires avec des PMM, ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférer à la charge en mode connexion direct [17].

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans la figure (3.2). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle le transfert du maximum de

puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de  $P_{\max}$  disponible [18].

Aujourd'hui, on peut trouver deux types d'étages d'adaptation électroniques distincts commercialisés. Le premier type permet de connecter le GPV à une charge continue telle qu'une batterie. Il fait appel à des convertisseurs DC-DC. Ce type d'architecture est la plupart du temps utilisé pour un fonctionnement en site isolé (hors réseau, off-grid en anglais). Dans certains cas, il n'y a pas le choix car les caractéristiques de la charge ne sont pas compatibles avec la forme d'électricité produite par un GPV. C'est le cas de toutes les charges ayant besoin des tensions alternatives. Dans ce cas, on fait appel à un second type d'architecture permettant d'effectuer une conversion continu-alternatif (DC-AC).

L'étage d'adaptation (partie de puissance) se compose généralement d'un convertisseur statique, qui est situé entre les panneaux solaires et la charge.

Par définition un convertisseur statique est un montage permettant par une commande pertinente de un ou plusieurs interrupteurs à semi-conducteur de régler un transfert d'énergie entre une source et un récepteur, Usuellement, au sein d'un MPPT, deux types de convertisseurs statiques sont utilisés:



**Figure3.2.** Étage d'adaptation entre un GPV et une charge.

- ❖ Des convertisseurs de type « Boost » : la tension en sortie (aux bornes de la batterie) est plus importante que celle en entrée (aux bornes du panneau solaire).
- ❖ des convertisseurs de type « Buck » : la tension en sortie est alors plus faible que celle en entrée.

Il existe d'autres types d'adaptation comme l'utilisation des transformateurs et des girateur DC, mais sont moins utilisés par rapport aux hacheurs [17].

Enfin, la connexion entre une source et une charge peut être optimisée en ajustant le rapport cyclique  $\alpha$  pour que d'un côté, le générateur puisse fonctionner à  $R_{\text{opt}}$  et d'un autre côté que la charge puisse varier à sa guise dans la mesure où le point d'intersection source-charge continue à exister.



Cette équation montre que la tension  $V_S$  est en fonction du rapport cyclique  $\alpha$  et supérieur à celle d'entrée  $V_{PV}$ .

$$I = (1 - \alpha)I_{PV} \quad (3.2)$$

Cette dernière équation montre que le courant de sortie  $I_S$  est en fonction du rapport cyclique et il inférieur à celui d'entrée.

L'adaptation optimale est alors réalisée lorsqu' $I_{PV}$  et  $V_{PV}$  valent respectivement  $I_{OP}$  et  $V_{OP}$ . Ceci correspond alors à une résistance optimale  $R_{OPT}$  du générateur répondant à l'équation suivante:

$$R_{opt} = \frac{V_{opt}}{I_{opt}} = (1 - \alpha)^2 \frac{V_S}{I_S} = (1 - \alpha)R_S \quad (3.3)$$

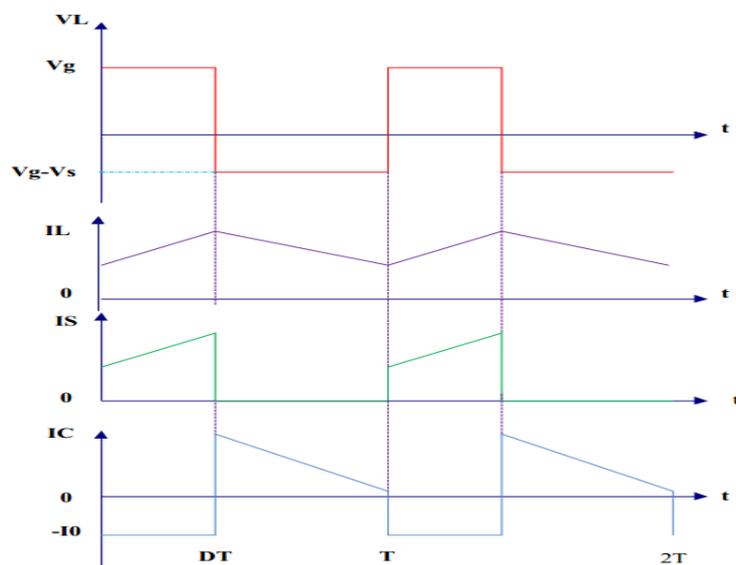


Figure 3.4. Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur.

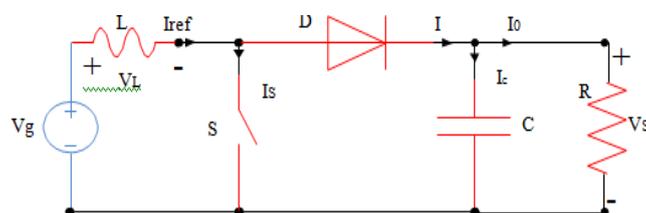


Figure 3.5. Circuit électrique de base du hacheur survolteur.

Les paramètres de simulation d'un convertisseur survolteur sont donnés dans le tableau suivant:

Tableau 3.1. Paramètres de simulation [21].

Paramètres	$V_g(V)$	$I_{ref}(A)$	$I_0 (A)$	$I_s (A)$	$C(F)$	$R_L(\Omega)$
valeurs	100	6.25	3	0.03	10e-6	0.5



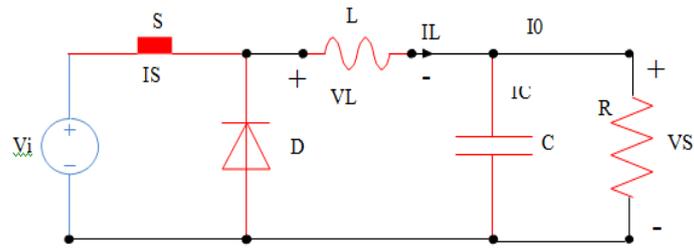


Figure3.8. Circuit électrique de base du hacheur dévolteur.

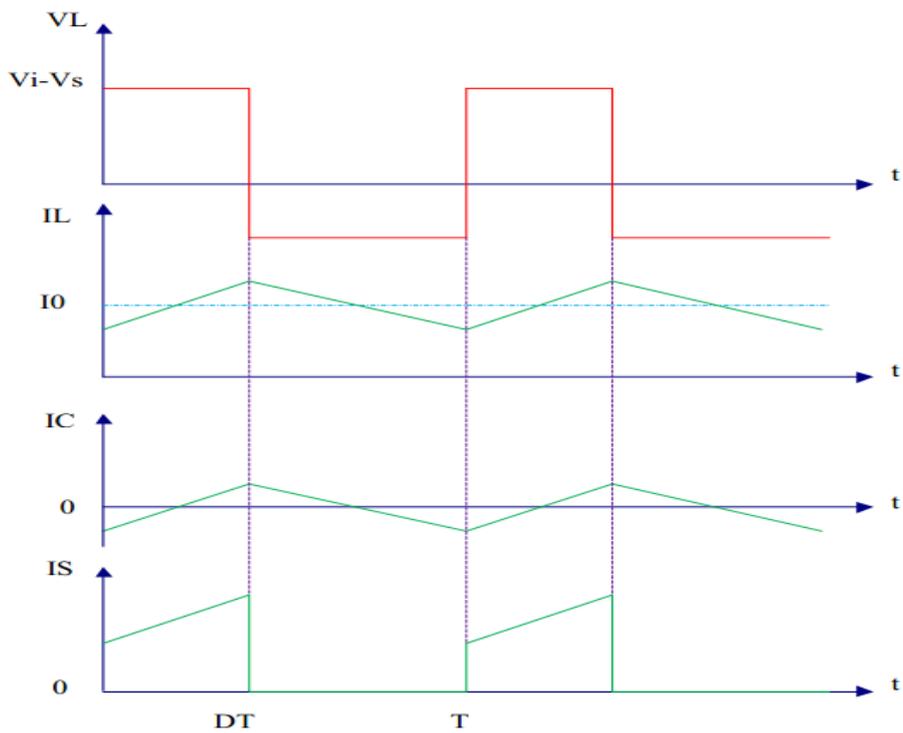


Figure3.4. Caractéristique de la tension et des courants dans le transistor et l'inductance d'un convertisseur Buck.

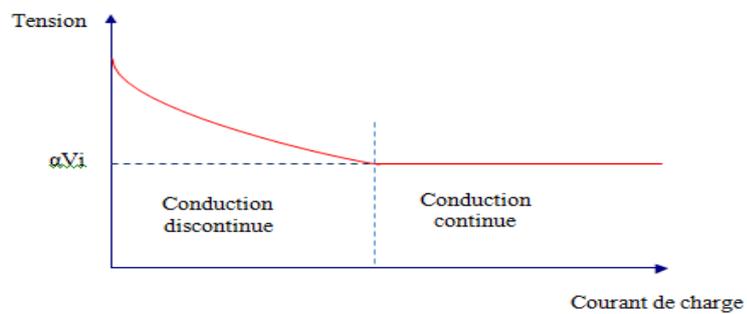


Figure3.10. Variation de la tension de charge avec le courant de charge pour un convertisseur Buck.

### 3.3.1.3 Le convertisseur Buck-Boost

La troisième topologie de base de ce convertisseur est donnée par la figure (3.12). Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est désignée opposé à la tension d'entrée. Le circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur, et les caractéristiques du courant et de la tension de charge sont données par la figure (3.12).

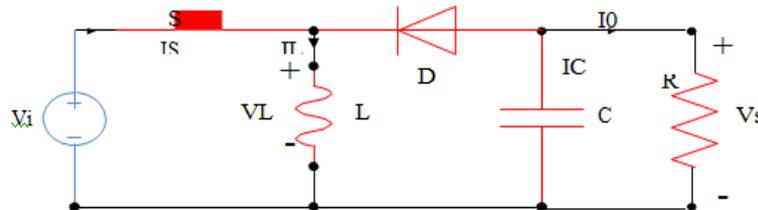


Figure 3.5. Circuit électrique de base du hacheur survolteur/dévolteur.

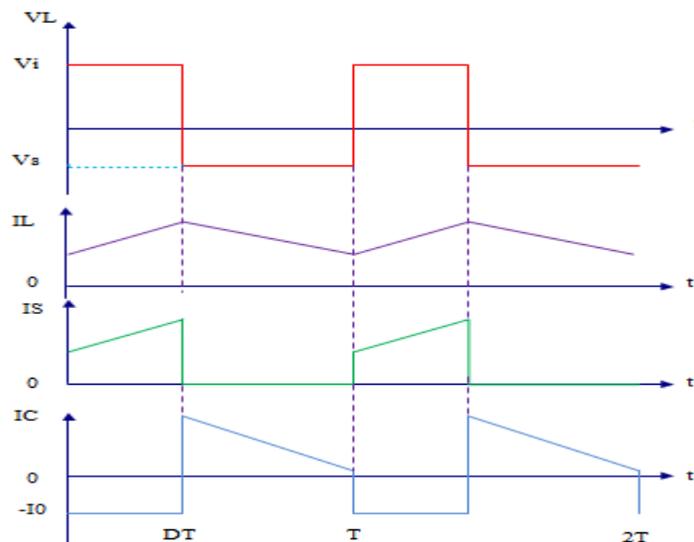


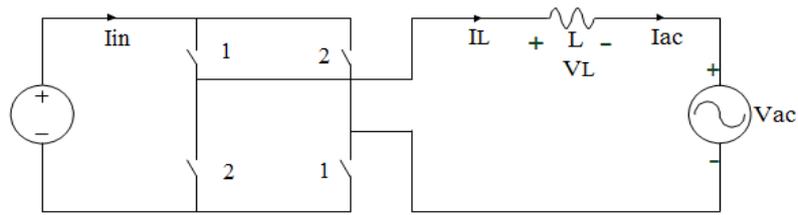
Figure 3.6. Caractéristique de la tension et du courant du Buck-Boost.

### 3.3.2 Adaptateur continu/alternatif DC/AC

Ce type d'adaptation, bien connu également, fait appel à des structures de convertisseurs continu/alternatif de type onduleur. On peut distinguer aujourd'hui trois grands types de structures utilisées en milieu industriel [22]:

- ❖ les onduleurs à source de courant.
- ❖ les onduleurs à source de tension et modulation de largeur d'impulsion.
- ❖ les onduleurs à résonance.

Le principe de conversion d'un onduleur est schématisé sur la figure (3.14) ci-après.

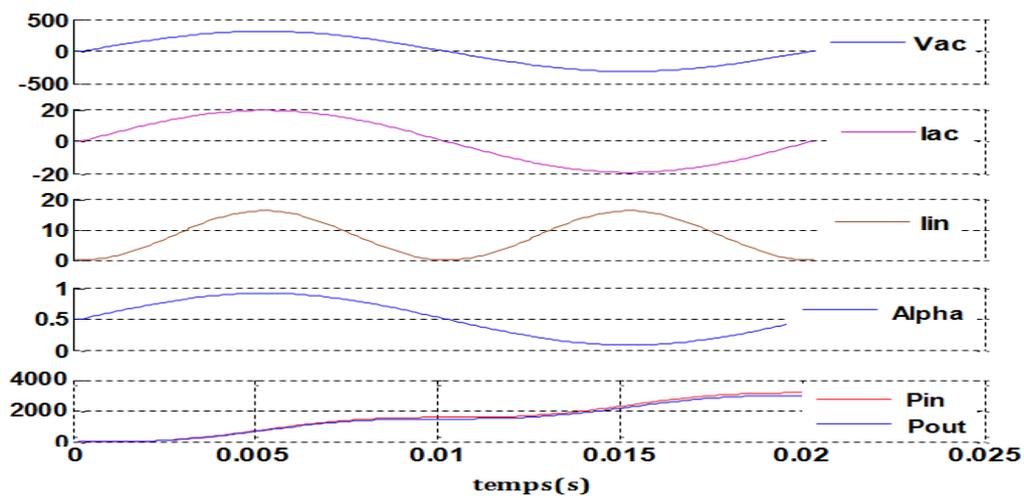


**Figure 3.7.** Caractéristique de la tension et du courant du Buck-Boost.

Les paramètres de simulation d'un onduleur sont donnés dans le tableau suivant:

**Tableau 3.2.** Paramètres de simulation.

paramètres	V <sub>dc</sub> (V)	I <sub>ref</sub> (A)	I <sub>S</sub> (A)	R <sub>L</sub> (Ω)	V <sub>rms</sub> (V)
valeurs	391	13.67	0.8	0.05	220



**Figure 3.8.** Différentes courbes des grandeurs transférées par l'onduleur.

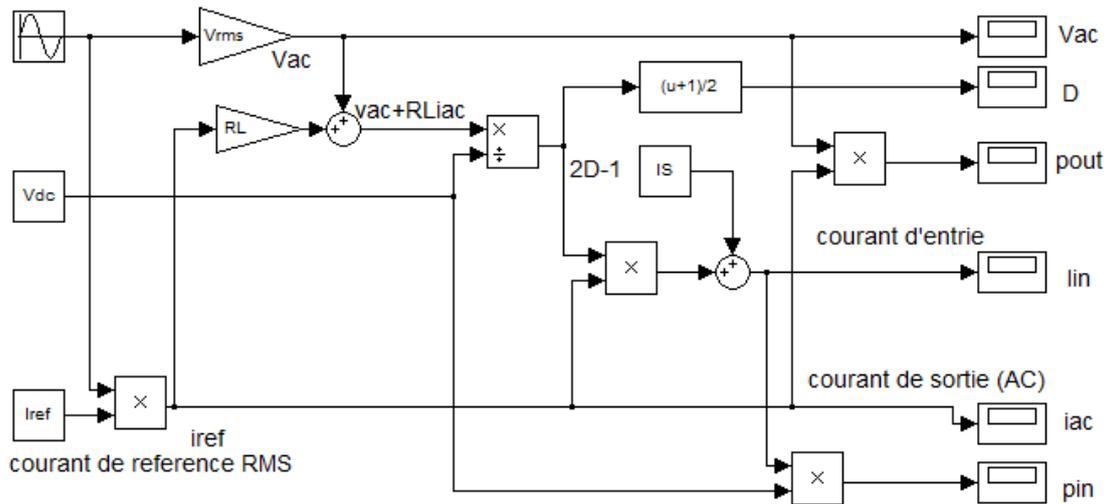


Figure3.9. Schéma de bloc par Simulink d'un onduleur.

### 3.4. Commande de la Puissance Générée via Les Techniques MPPT

#### 3.4.1. Les commandes MPPT basées; Algorithmes indirects

Le mode de fonctionnement de ces commandes est basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maxima ( $V_{OP}$  et  $I_{OP}$ ) et les paramètres caractéristiques du module PV ( $V_{OC}$  et  $I_{CC}$ ). Suivant le paramètre contrôlé, on parle alors de commande en régulation de courant ou de tension.

##### 3.4.1.1 Mesure de $V_{OC}$ (Fraction de $V_{OC}$ )

Elle consiste à comparer la tension du GPV ( $V_{PV}$ ) avec une tension de référence qui correspond à la tension optimale ( $V_{OP}$ ). L'erreur de tension est alors utilisée pour ajuster le rapport cyclique du hacheur, afin de faire coïncider les deux tensions. La tension de référence est obtenue à partir de la connaissance de la relation linéaire entre  $V_{OP}$  et  $V_{OC}$  d'un modulePV

$$V_{OP} = k_V \cdot V_{OC} \quad (3.5)$$

Avec  $k_V$  correspondant à un facteur de tension dont sa valeur dépend du GPV utilisé et de la température de fonctionnement.

##### 3.4.1.2. Mesure de $I_{CC}$ (Fraction de $I_{CC}$ )

Cette méthode est basée sur la connaissance de la relation linéaire en première approche entre  $I_{OP}$  et  $I_{CC}$  comme le montre l'équation.

$$I_{OP} = k_I \cdot I_{CC} \quad (3.6)$$

Avec  $k_I$  correspondant à un facteur de courant qui dépend là aussi du GPV utilisé et est généralement compris entre 0.78 et 0.92. L'équation précédente montre que le courant  $I_{OP}$  peut

être déterminé par une mesure de  $I_{CC}$  et que le PPM peut être atteint en appliquant un courant de référence égal à  $I_{OP}$  à la régulation en courant du convertisseur. Ces types de commandes ayant besoin uniquement d'un seul capteur.

### **3.4. 2. Les commandes MPPT à algorithmes performants : Algorithmes directs**

L'algorithme mis en œuvre dans les premières commandes MPPT était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à l'époque étaient faibles et les applications, surtout destinées au spatial avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres. Appliqué initialement au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F.

#### **3.4. 2.1. Les commandes "Perturbe and Observe" (P&O)**

Le principe des commandes 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  $P_{PV}$  qui en résulte. Ainsi, l'incrément 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. Donc c'est suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée vue sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi. En effet, il est connu que ce type de commande permet d'obtenir un rendement plus important durant une journée relativement ensoleillée, où le PPM évolue lentement et proportionnellement au soleil. Par contre pour une journée présentant de forts changements d'irradiations très fréquents, cette commande présente plus de pertes, engendrées par le temps de réponse de la commande pour atteindre le nouveau PPM.

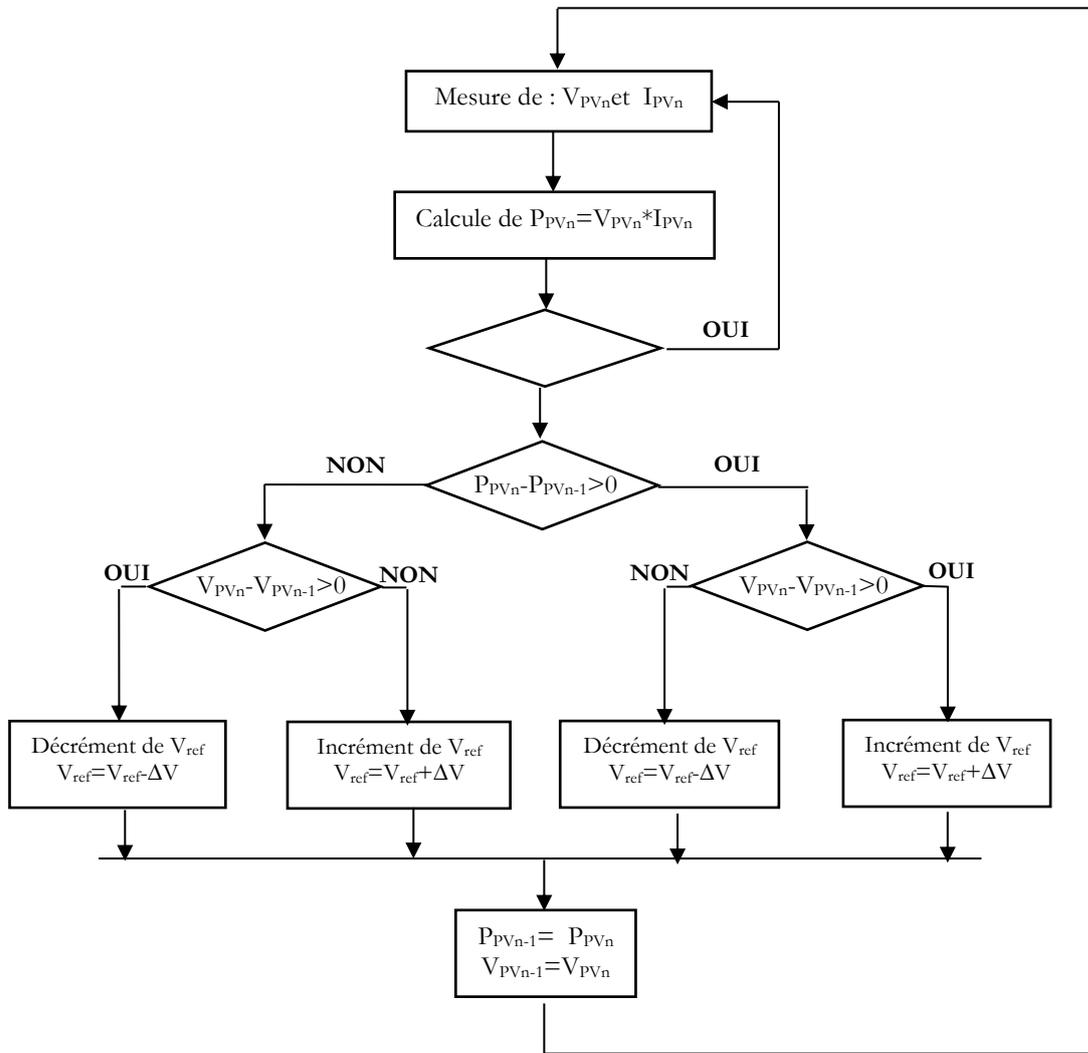
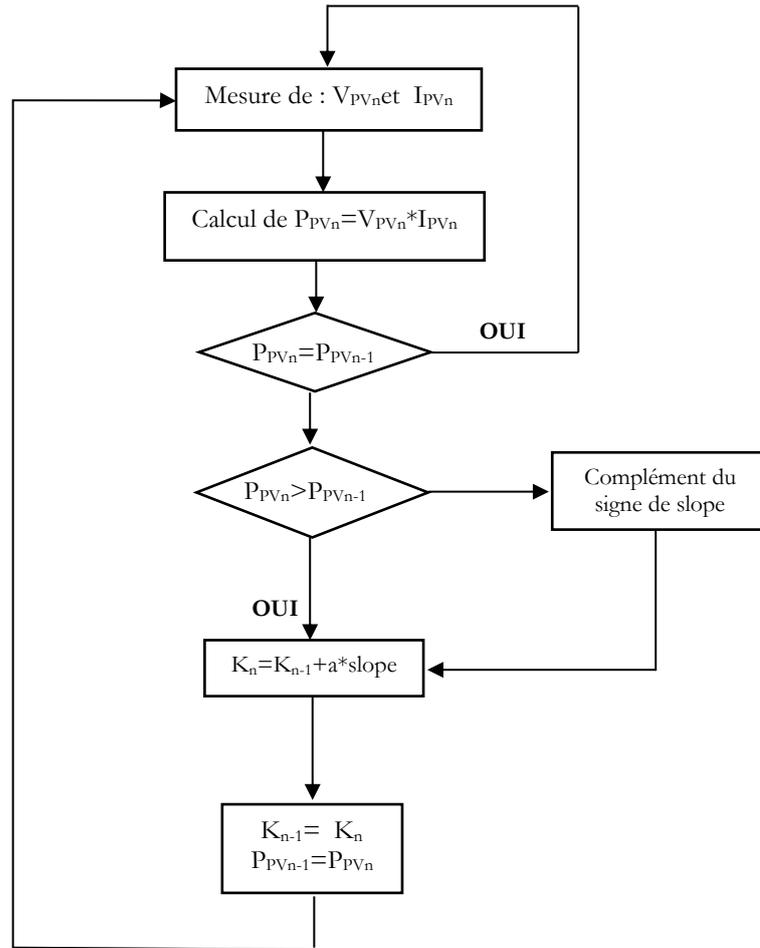


Figure 3.10. Algorithme de la commande perturbe & observe : P&O

### 3.4.2.2 Principe des commandes “Hill Climbing”

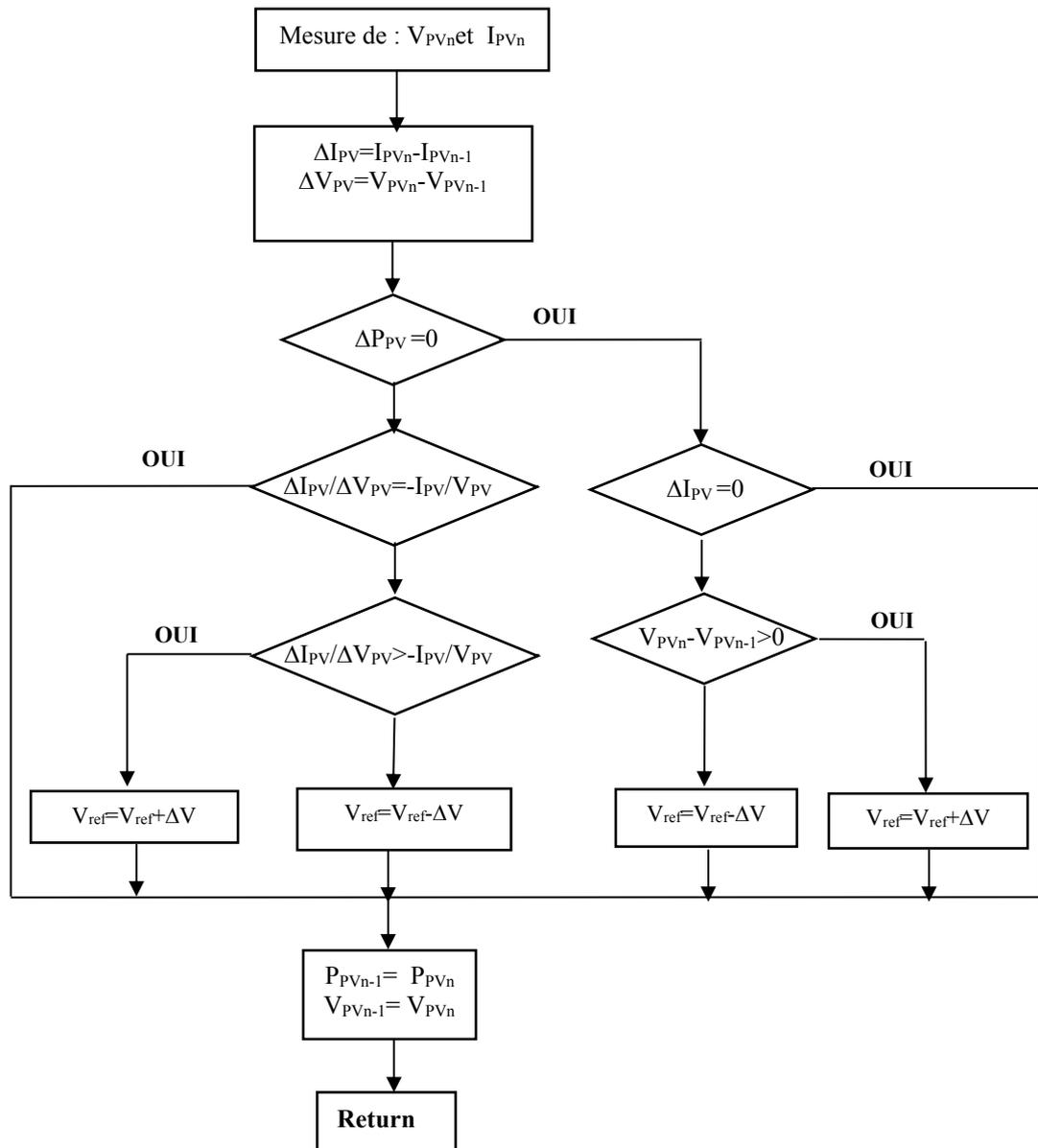
La technique de contrôle nommée Hill Climbing consiste à faire « monter » le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum. Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s’arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint. Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du panneau et la valeur du rapport cyclique appliqué au convertisseur DC/DC.



**Figure 3.11.** Algorithme de la commande Hillclimbing

### 3.4. 2.3 Principe des commandes “Incrément de conductance” (IncCond)

Cette technique se base sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM. Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV. D’autre part, l’évolution de la puissance du module ( $P_{PV}$ ) par rapport à la tension ( $V_{PV}$ ) donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM.



**Figure 3.18.** Algorithme de l'incrément de la Conductance IncCond

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

$$G = \frac{I_{PV}}{V_{PV}} \quad (3.7)$$

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

$$\Delta G = \frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} \quad (3.8)$$

D'autre part, l'évolution de la puissance du module (PPV) par rapport à la tension (VPV) donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Lorsque la dérivée de puissance est

nulle, cela signifie que l'on est sur le PPM, si elle est positive le point d'opération se trouve à gauche du maximum, lorsqu'elle est négative, on se situe à droite.

- ❖ Si  $\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} > -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$  le point de fonctionnement est à gauche du PPM.
- ❖ Si  $\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} = -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$  le point de fonctionnement est sur le PPM.
- ❖ Si  $\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} < -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$  le point de fonctionnement est sur la droite du PPM.

Le lien entre la conductance donnée par l'équation précédente et la dérivée de la puissance

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d[I_{PV} \times V_{PV}]}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \times \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \times \frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} \quad (3.9)$$

D'où, on peut alors écrire de nouvelles conditions sur la variation de conductance

- ❖ Si  $\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} > -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$  le point de fonctionnement est à gauche du PPM.
- ❖ Si  $\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} = -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$  le point de fonctionnement est sur le PPM.
- ❖ Si  $\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} < -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$  le point de fonctionnement est sur la droite du PPM.

### 3.4.3 Les commandes MPPT basées sur les techniques d'intelligence artificielle

#### Algorithmes intelligents

##### 3.4.3.1 Les commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue.

Les commandes basées sur la logique floue sont de plus en plus populaires grâce à l'évolution des microcontrôleurs. L'avantage de ces techniques est qu'elles peuvent fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elles n'ont pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De plus, elles peuvent traiter des non linéarités. En général, la commande logique floue comprend donc trois étapes communément nommée dans la littérature

- ❖ la fuzzification,
- ❖ la lecture de la table de vérité,
- ❖ la defuzzification

Les paramètres d'entrées E et  $\Delta E$  sont liées aux équations suivantes

$$(3.10)$$

$$E(n) = \frac{P(n) - P(n - 1)}{V(n) - V(n - 1)}$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n - 1) \quad (3.11)$$

En fonction de leurs évolutions et d'une table de vérité comme indique dans le tableau Une valeur est attribuée au paramètre de sortie  $\Delta D$ .

**Tableau 3.3.** Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue.

E \ $\Delta E$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PB	PB	PB	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

### 3.4.3.2 Les commandes MPPT de réseaux de neurones artificiels.

La technique de réseaux de neurones est, elle aussi, de plus en plus utilisée, car elle offre une grande alternative pour résoudre des problèmes complexes. Ces dernières années, l'utilisation de cette méthode dans divers domaines d'application ne cesse d'augmenter car elle fonctionne à partir d'une boîte noire qui n'exige pas d'informations détaillées sur le fonctionnement du système. Ainsi elle peut traiter des problèmes d'une grande complexité grâce à des paramètres interdépendants. Les réseaux de neurones sont composés généralement de trois couches : Couche d'entrée, Couche cachée et Couche de sortie. Pour une commande MPPT, les variables d'entrées peuvent donc être les paramètres caractéristiques d'un GPV ( $V_{OC}, I_{CC}$ ) associées ou non à des données atmosphériques.

La sortie est un ou plusieurs signaux de référence comprenant au moins le rapport cyclique permettant de commander le hacheur pour fonctionner le plus souvent possible au PPM.

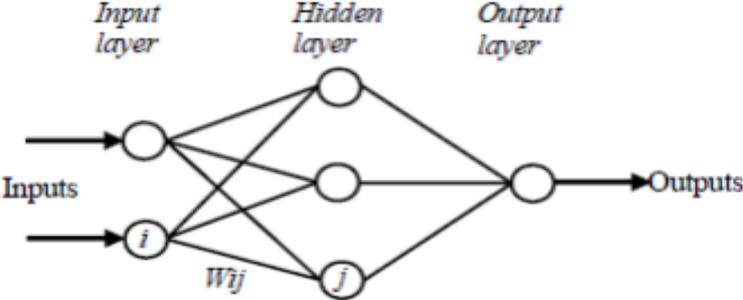


Figure 3.19. Exemple d'un réseau de neurones