

III.1. Introduction

Comme exposé dans la partie précédente, un générateur photovoltaïque (GPV) présente des caractéristiques P-V non linéaires qui admettent un seul point de fonctionnement optimal dans les conditions homogènes d'éclairement et de température. De plus, les conditions d'ombrage partiel en raison des nuages ou des bâtiments rendent la courbe caractéristique P-V plus complexe avec l'apparition de plusieurs points de puissance maximale avec un seul point maximal globale. Une adaptation d'impédance s'impose pour forer le fonctionnement du GPV autour du point maximal et cela peut se faire par un couplage direct d'une charge variable adaptée ou en insérant entre le GPV et la charge électrique un étage d'adaptation. Ce dispositif n'est autre qu'un convertisseur statique muni d'une commande de poursuite du point de puissance maximale (PPM) [55]. Dans la suite, on va expliquer le principe et le rôle du convertisseur DC-DC dans le processus de poursuite du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking (MPPT)) du GPV ; Et, on va synthétiser les différentes techniques exploitées dans ce contexte.

III.2. Connexion GPV-charge et étage d'adaptation

Les configurations des systèmes photovoltaïques se diversifient selon le type de charge à alimenter, ainsi que la présence ou l'absence du système de stockage. La figure III.1 présente les différentes associations GPV-charge. La charge peut être à courant continu ou à courant alternatif, comme elle peut être une résistance, un moteur ou un réseau électrique.

Malgré sa simplicité de mise en pratique et son faible coût, le couplage direct GPV-charge DC est rarement utilisé. Cette configuration n'offre aucune possibilité de réglage de tension ou d'adaptation de puissance entre le générateur PV et la charge (Figure III.1.a.1). Autrement dit, cette configuration ne garantit pas l'extraction de la puissance électrique maximale que peut produire le GPV pour une irradiation et une température données ; ce qui est confirmé par certaines études montrant que le système à couplage direct utilise au maximum 31 % de la capacité électrique du GPV [4]. Dans le cas d'une charge AC, la connexion directe du GPV est invalide et un étage de conversion DC-AC (onduleur) est nécessaire (Figure III.1.b) [55]. Il est donc nécessaire d'avoir un étage intermédiaire DC-DC ou DC-AC entre le GPV et la charge come adaptateur de charge (adaptation d'impédance et adaptation de la nature de tension (DC ou AC)) [28]. L'adaptation d'impédance (adaptation de la paire (I,V) de la charge et de la paire (I,V) du GPV) permet l'imposition d'une tension au bornes du

GPV assurant la maximisation de sa puissance générée. L'adaptation de la nature de tension permet de fournir une tension convenable à la charge (DC ou AC) (Figure III.1) [55].

L'étage d'adaptation peut être [17] :

- Pour une charge DC :

Un seul étage : DC-DC (Figure III.1.a.2),

Deux étages : DC-DC / DC-DC (Figure III.1.a.3) rarement utilisé,

- Pour une charge AC [17] :

Un seul étage : DC-AC (Figure III.1.b.1) moins stable et rarement utilisé,

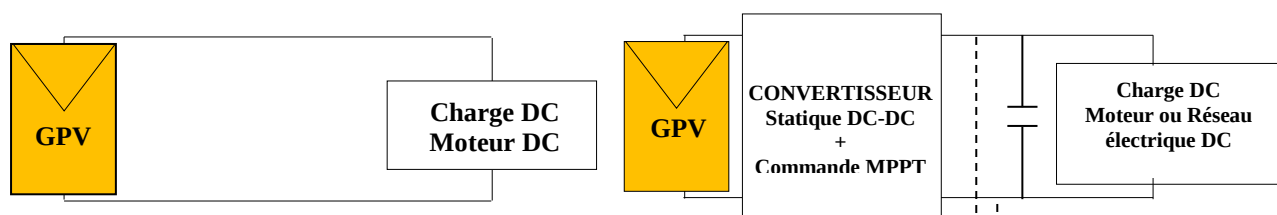
Deux étages : DC-DC / DC-AC (Figure III.1.b.2) plus stable et souvent utilisé,

Dans toutes les configurations de la figure suivante, le système PV peut être au fil du soleil (sans système de stockage de l'énergie électrique), comme il peut être muni d'un dispositif de stockage de l'énergie électrique.

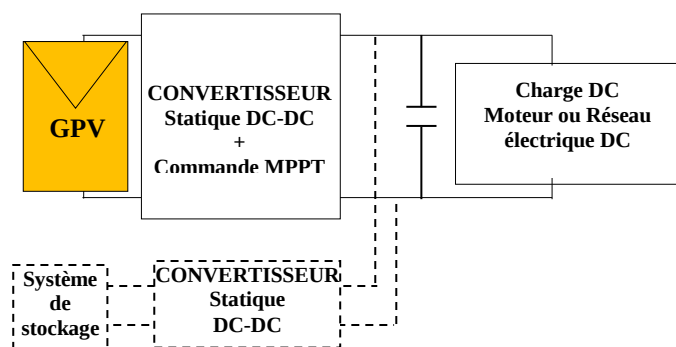
La charge DC ou AC peut être [17] :

- Résistance, Inductance, Capacité,
- Batteries électrochimiques, Système d'Electrolyse, Supraconducteur, Supercapacitor,
- Moteur électrique DC ou AC,
- Réseau électrique DC (souvent un micro-réseau DC),
- Réseau électrique AC.

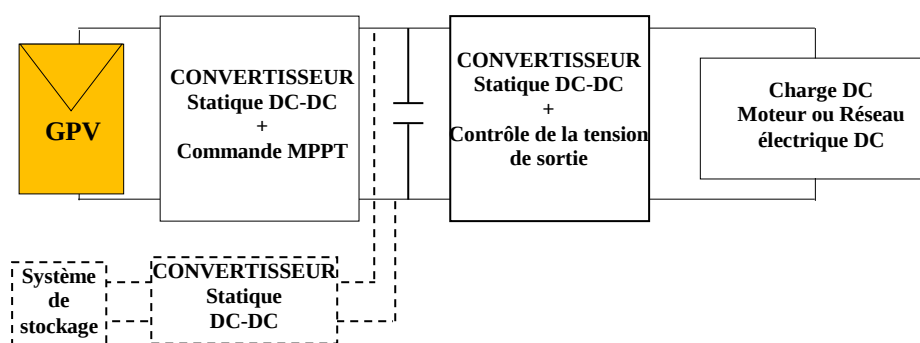
Lorsque la charge AC est le réseau de distribution électrique AC, on dit que le système PV est lié au réseau électrique (en anglais : grid connected PV system, grid tied PV system, on-grid PV system). Sinon, on dit que la system PV est autonome ou isolé (en anglais : autonomous PV system, isolated PV system, off-grid PV system) [17].



a.1) Couplage direct

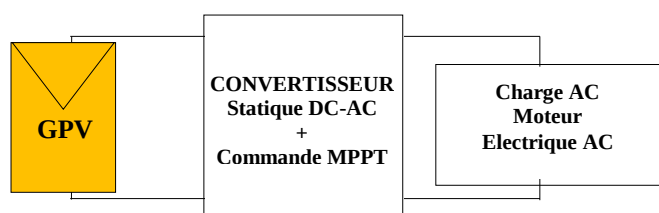


a.2) Couplage indirect avec un seul étage

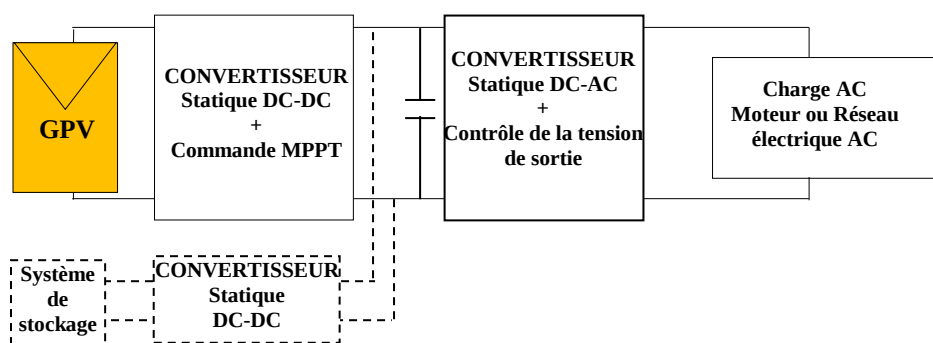


a.3) Couplage indirect avec deux étages d'adaptation

a. GPV alimentant une charge DC (avec ou sans batteries de stockage)



b.1) Couplage indirect avec un seul étage d'adaptation



b.2) Couplage indirect avec deux étages d'adaptation

b. GPV alimentant une charge AC (avec ou sans batteries de stockage)

Figure III.1 : Différentes associations GPV-charge

III.2.1. Etage d'adaptation DC-DC et contrôle de la tension du GPV

La commande convenable de l'étage intermédiaire entre la charge et la GPV permet de faire fonctionner le GPV de manière à ce qu'il produise en permanence sa puissance maximale en imposant une tension à ses bornes (V_{mpp} , I_{mpp}) correspondant à cette puissance maximale, quelles que soient les conditions climatiques (température et éclairage). Cet étage d'adaptation d'impédance se présente souvent sous la forme d'un convertisseur DC-DC tel qu'illustré à la figure III.2 [17].

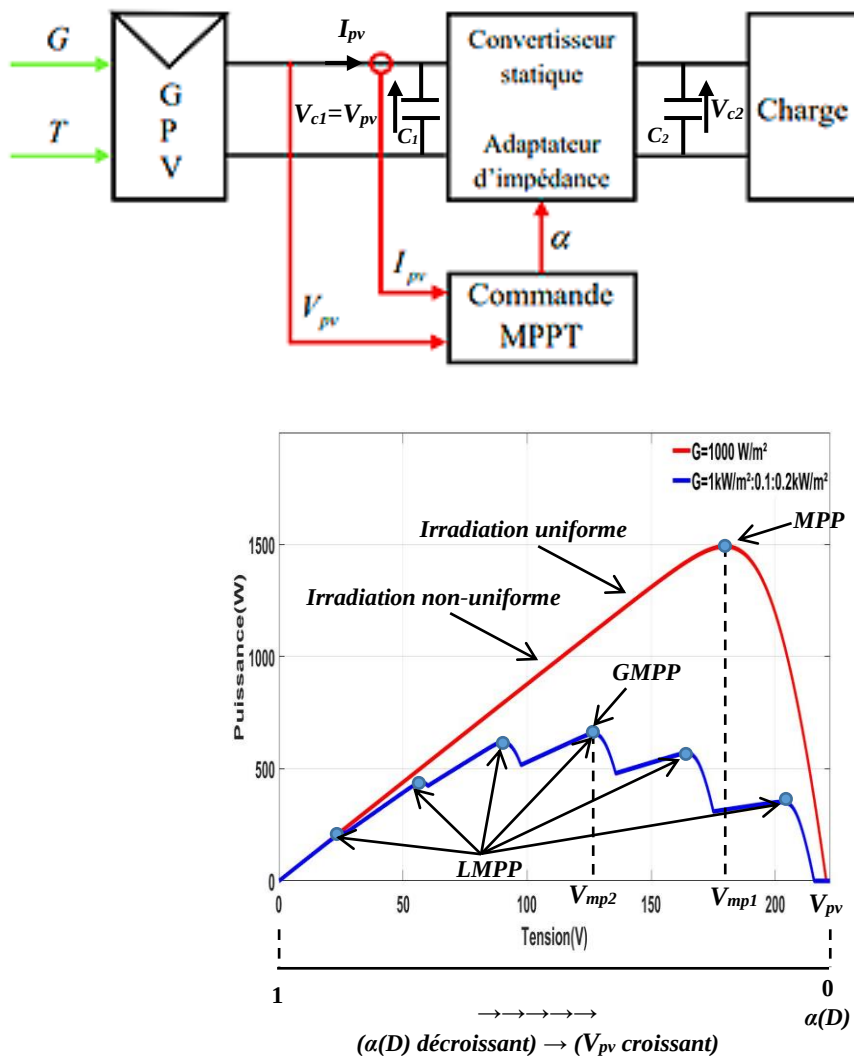


Figure III.2 : Etage d'adaptation d'impédance et contrôle de la tension du GPV.

Pour un convertisseur Boost (élevateur de tension), la tension de sortie (V_{c2}) est liée à la tension d'entrée ($V_{c1}=V_{pv}$) par la relation suivante :

$$V_{c2} = \left(\frac{1}{1-D}\right)V_{pv} = \left(\frac{1}{1-\alpha}\right)V_{pv} \rightarrow V_{pv} = (1-D)V_{c2} = (1-\alpha)V_{c2} \quad (\text{III.1})$$

En considérant la tension de sortie de l'hacheur (V_{c2}) lentement variable (C_2 très grande) ou Constante (cas de régulation de la tension V_{c2}), il est possible de contrôler le convertisseur Boost par voie de son rapport cyclique α (D) de telle sorte à imposer une tension à son entrée (V_{pv}) qui est égale à la tension du point de puissance maximale ($V_{pv} = V_{mp}$). Donc, en augmentant α (D), on diminue la tension (V_{pv}) ; et en diminuant α (D), on augmente la tension (V_{pv}) [17].

III.2.2. Principe de la recherche du point de puissance maximale (PPM)

Le principe de recherche du PPM (Maximum Power Point) est basé sur deux approches [17] :

- En appliquant une valeur initiale du rapport cyclique et en mesurant la puissance correspondante, on applique une autre (seule) valeur du rapport cyclique et on observe comment évoluer (augmenter ou diminuer) la puissance électrique du GPV, pour choisir la nouvelle valeur du rapport cyclique permettant l'augmentation de cette puissance électrique (figure III.2).
- On applique successivement plusieurs valeurs (vecteur de valeurs) du rapport cyclique et on récolte les différentes valeurs de puissances électriques correspondantes du GPV ; Ensuite, on maintient la ou les valeurs du rapport cyclique offrant le maximum de puissance pour être ajoutées à un nouveau vecteur de valeurs du rapport cyclique. Ce dernier sera appliqué pour récolter les nouvelles valeurs de puissances électriques correspondantes du GPV et maintenir la ou les valeurs du rapport cyclique offrant le maximum de puissance. Le processus se poursuit jusqu'à l'atteinte du point de puissance maximale (figure III.2).

III.2.3. Modèle mathématique équivalent du Convertisseur statique DC-DC

Comme expliqué dans le chapitre 1, le choix du convertisseur statique DC-DC dépend de :

- Niveau de tension du GPV, défini par le nombre de panneaux et leur association (série, parallèle ou série/parallèle) ;
- Niveau de tension (et du courant) exigée à la sortie du convertisseur, imposé par la charge ;

Selon le système de pompage adopté dans cette thèse, le convertisseur Boost est la plus convenable. Son schéma électrique est présenté par la figure suivant [29] :

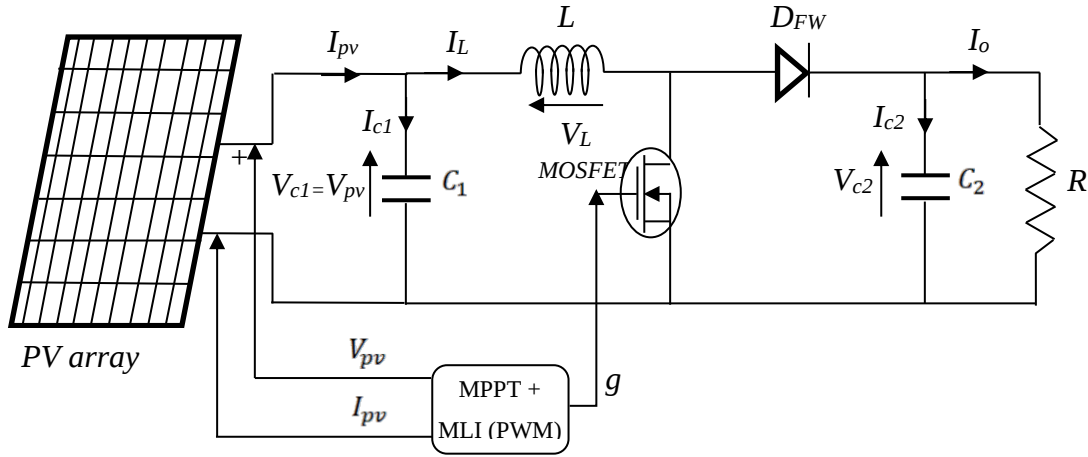


Figure III.3 : Association GPV-Convertisseur Boost-Charge résistive

Le modèle mathématique équivalent en valeur instantané du convertisseur Boost est exprimé par les équations temporelles suivantes [29] :

$$(I_{c2} = I_{DFW} - I_o) \rightarrow (C_2 \frac{dV_{c2}}{dt} = I_L(1 - g) - \frac{V_{c2}}{R}) \rightarrow (C_2 S V_{c2} = I_L(1 - g) - \frac{V_{c2}}{R}) \quad (III.2)$$

$$\rightarrow (V_{c2} = \frac{1}{S} \left[\frac{1}{C_2} \left(I_L(1 - g) - \frac{V_{c2}}{R} \right) \right]) \text{ ou } (V_{c2} = \left(\frac{1}{C_2 S + \frac{1}{R}} \right) I_L(1 - g)) \quad (III.3)$$

$$(L \frac{dI_L}{dt} = V_{c1} - (1 - g)V_{c2}) \rightarrow (LS I_L = V_{c1} - (1 - g)V_{c2}) \quad (III.4)$$

$$\rightarrow (I_L = \frac{1}{S} \left[\frac{1}{L} (V_{c1} - (1 - g)V_{c2}) \right]) \text{ avec } (V_{c1} = V_{pv}) \text{ et } (I_{c1} = C_1 \frac{dV_{c1}}{dt} = I_{pv} - I_L) \quad (III.5)$$

En valeurs moyennes, le modèle équivalent du convertisseur Boost est donné par le système d'équations suivantes :

$$V_{c2} = \frac{1}{1-D} V_{c1} \quad (III.6)$$

$$I_o = (1-D) I_L = (1-D) I_{pv} \quad (III.7)$$

Avec :

g : Signal de commande du transistor (MOSFET) issue du bloc de la commande MLI (signal binaire (0,1) ou (0V,5V)).

D : Signal de sortie de la commande MPPT ((rapport cyclique) appliqué à l'entrée de la commande MLI (PWM)).

III.3. Etat de l'art sur les techniques MPPT

La première technique MPPT a été utilisée dans les années 1970 pour des applications aéronautiques, par la compagnie « Honeywell » et le centre de recherche « NASA » [17], [63]. Depuis, de nombreuses techniques MPPT ont été développées et utilisées. Ces techniques peuvent être classées en deux groupes principaux, les MPPT locaux (en anglais : LMPPT) et MPPT globaux (en anglais : GMPPT). Les LMPPT peuvent être utilisés pour le suivi du point de puissance maximale des systèmes photovoltaïques, mais seulement dans des conditions d'irradiation uniformes présentant un seul point maximum local (LMPP). Ils incluent des méthodes conventionnelles, améliorées et d'intelligence artificielle. En ombrage partiel, la caractéristique P-V du GPV démontre un seul point maximal global parmi plusieurs points maximums locaux, qui est difficile à être détecté efficacement par les techniques LMPPT. Pour résoudre ce problème, les approches GMPPT ont été développées et pour permettre l'identification de point de puissance maximale globale quel que soit le niveau et le scénario d'ombrage (ombrage partiel concentré, ombrage partiel reparté, ... etc) et la valeur de la température. Ces techniques comprennent les méthodes d'intelligences artificielles, les méthodes méta-heuristiques, les MPPT améliorées et les MPPT hybrides [17], [22].

III.3.1. MPPT locaux (LMPPT)

De nombreuses méthodes de poursuite de point de puissance maximum (LMPPT) ont été développées pour permettre au système d'extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque. On peut classer d'une manière générale les commandes LMPPT selon l'approche de recherche adoptée en trois types de commande MPPT [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [29], [62] :

III.3.1.1. MPPT conventionnels

Le principe de fonctionnement de ces méthodes repose sur le déplacement du point de fonctionnement en augmentant V_{PV} , lorsque $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}}$ est positif ou en diminuant V_{PV} , lorsque $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}}$ est négatif. La variation ou l'évolution de la puissance est estimée en comparant la puissance correspondant à V_{pv} appliqué avec celle correspondant à V_{pv} appliqué précédemment. Leurs performances se caractérisent par la rapidité avec laquelle le PPM est atteint, la façon dont il oscille autour de ce même point, mais aussi la robustesse d'éviter la divergence lors de changements brusques des conditions climatiques ou de charge. Parmi les techniques les plus courantes :

- Perturb and Observe (P&O)
- Incremental Conductance (InCond)

- Hill Climbing (HC)
- Circuit Voltage (FOCV)
- Circuit Current (FSCI)

Ces méthodes sont efficaces et rapides lorsqu'il n'y a qu'un seul point optimal (pas d'ombrage). Sinon, l'occurrence des conditions d'ombrage, ces méthodes convergent vers le premier maximum local et le considère comme un maximum, ce qui rend le suivi du maximum réel moins précis.

III.3.1.2. MPPT Intelligence artificielle

L'une des nouvelles orientations des travaux de recherche dans les applications des énergies renouvelables est l'intégration de techniques d'intelligence artificielle pour contrôler et récolter l'énergie et améliorer l'efficacité de divers systèmes de production d'énergie, en particulier dans le domaine des systèmes photovoltaïques.

a. Réseaux de neurones artificiels (RNA)

Un RNA est une interconnexion de neurones artificiels (nœuds) qui imitent un cerveau biologique [22]. Une structure possible d'RNA, adaptée au MPPT. Il comprend une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie. De nombreux paramètres mesurés liés au GPV utilisé, comme, peuvent être utilisés comme entrées pour MPPT à base de RNA.

Le réseau de neurones entraîné pour reproduire la même grandeur de sortie de la commande MPPT correspondant aux grandeurs d'entrée utilisées dans son apprentissage. La grandeur de sortie de la commande MPPT peut être par exemple : la référence de la tension du GPV, la référence du courant du GPV ou le rapport cyclique du convertisseur DC-DC [24]. Les grandeurs d'entrées peuvent être par exemple : la tension du GPV, le courant du GPV, les données environnementales (irradiation et température), ou toute combinaison.

Il est à noter que la haute performance d'un RNA dans le suivi du MPP dépend fortement de la couche cachée et de la rigueur et de l'étendue de l'entraînement de ses réseaux [25]. En générale, le RNA doit être formé et testé pendant de longues durées pour assurer une convergence précise vers le MPP dans diverses conditions environnementales (irradiation et température).

b. Contrôleur de logique floue (FLC)

Le FLC est une technique largement utilisée en raison de ses avantages sachant qu'elle peut assurer de bonnes performances même avec des entrées imprécises (intervalles), sans l'utilisation du modèle mathématique du système qui être linéaire ou non-linéaire comme le cas de la commande MPPT. Le

contrôle MPPT basé sur la FLC intègre l'expérience et les connaissances humaines dans le processus de conception du contrôleur en utilisant la théorie des ensembles flous pour transformer directement les valeurs du langage en une stratégie de contrôle automatisée.

III.3.1.3. MPPT améliorés

- Modified versions of HC MPPT
- Modified versions of P&O
- Modified versions of InCond MPPT, etc....

Ces méthodes sont plus efficaces et plus rapides et plus précises que les méthodes conventionnelles, mais avec le même l'inconvénient de la convergence vers le premier maximum local si des conditions d'ombrage s'apparentent.

III.3.2. MPPT Globaux (GMPPT)

Lorsque le GPV reçoit un rayonnement uniforme, la courbe caractéristique photovoltaïque affiche un seul point de puissance maximale MPP. Mais si le GPV reçoit une quantité de rayonnement différemment reparti (ombrage partiel), la courbe photovoltaïque sera caractérisée par plusieurs pics, dont l'un est GMPP et les pics restants sont LMMP. Les MPPT conventionnels sont très susceptibles de fonctionner en LMPP, ce qui réduit la puissance de sortie et réduit ainsi considérablement l'efficacité des systèmes PV. Contrairement aux techniques GMPPT, il est capable de suivre le pic global car il dispose d'un mécanisme permettant de faire la distinction entre les extrêmes locaux et global. Dans la littérature, plusieurs techniques GMPPT ont été proposées et mises en œuvre. Elles peuvent être réduites à deux grands groupes, les techniques Soft Computing et les méthodes hybrides MPPT.

III.3.2.1. Techniques Soft Computing

Les techniques dites Soft Computing contrastent avec la possibilité qui est utilisée lorsque le problème n'est pas suffisamment défini pour utiliser les techniques informatiques traditionnelles. Le soft computing prend le raisonnement humain comme modèle. Diverses techniques de calcul jouent un rôle dans le soft computing, notamment :

- logique floue
- réseaux de neurones artificiels
- algorithmes génétiques
- Métaheuristiques, etc....

III.3.2.2. Techniques Soft Computing améliorées

Soft Computing techniques améliorées utilisé dans les applications PV MPPT incluent

- Particle Swarm Optimization
- Gray Wolf Optimization
- Cuckoo Search (CS),
- Ant Colony Optimization
- algorithme Firefly,
- colonie d'abeilles artificielles, etc....

Plus de ces techniques peuvent facilement identifier et suivre le GMPP dans les deux cas de conditions uniformément éclairées et partiellement ombragées des panneaux photovoltaïques. Néanmoins, ils présentent deux inconvénients principaux lorsqu'ils sont utilisés dans des applications photovoltaïques. La première l'un est associé à la position GMPP dynamique ou variant dans le temps dans les courbes P-V, dans lequel GMPP change de position au fil du temps, en raison du changement d'uniformité de l'irradiance solaire. Dans ce cas, la plupart des techniques informatiques douces de MPPT Tracking identifier le premier GMPP au début et s'y tenir, sans ressentir le changement de position du GMPP. La seconde est les oscillations d'énergie en régime permanent, dues aux variables aléatoires associées à tous ces calculs.

III.3.2.3. Méthodes hybrides GMPPT

Les MPPT hybrides peuvent être définis comme une combinaison de MPPT conventionnels avec des MPPT basés sur l'intelligence artificielle ou d'autres mécanismes pour poursuivre correctement le GMPP et ainsi éviter de tomber dans les LMPPs.

L'objectif principal des MPPT hybrides est de suivre avec précision le GPPM approprié des systèmes PV, quelle que soit la variabilité des conditions climatiques, des caractéristiques du générateur PV, même dans des conditions d'ombrage partiel. Voici quelques travaux de recherche importants sur les MPPT hybrides :

- RNA + InCond conventionnel,
- ACO + P&O conventionnel,
- PSO + P&O conventionnel,
- PSO + P&O conventionnel