

Université Mohamed Boudiaf - Msila

Faculté de Technologie

Département : Génie Electrique

Réf : .....



جامعة محمد بوضياف - المسيلة

كلية التكنولوجيا

قسم : الهندسة الكهربائية

## Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique

**Option : Energie renouvelable**

**Présentés par :**

**BAHACHE Nour**

**Thème :**

**Amélioration des performances d'un système  
photovoltaïque par la technique d'optimisation  
Gray Wolf**

**Devant le jury composé de:**

**Dr. Hilal RAHALI**

**Président**

**Université de Msila**

**Dr. Abderrahim ZEMMIT**

**Encadreur**

**Université de Msila**

**Dr. Abdelhafid BENYOUNES**

**Examineur**

**Université de Msila**

**Année Universitaire : 2021/2022**



# Remerciement

*Au nom de DIEU*

*Le meilleur avec lequel une personne puisse ouvrir ses premiers mots, et c'est ce avec quoi j'ai ouvert ma première année académique de ma carrière en tant qu'étudiant à la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université Mohammad Boudiaf -M'sila*

*Ceux dont les efforts sont purement destinés à Dieu Tout-Puissant ne seront pas perdus. Louange à Dieu qui m'a inspiré patience et force pour terminer cette partie de ma carrière scientifique qui se poursuit encore, si Dieu le veut.*

*Quiconque ne remercie pas les gens ne remercie pas Dieu. C'est pourquoi je tiens à remercier mon professeur et mentor,*

*Dr.Abderrahim ZEMMIT pour l'effort et le temps qu'il nous a donné sans relâche ou l'ennui dans sa quête pour lever le drapeau et continuer son message éducatif*

*Je remercie chaleureusement tous mes professeurs du département de génie électrique, chacun en son nom, et tout le personnel du Collège des sciences et technologies.*

*Enfin, je remercie particulièrement mes parents pour leur soutien inconditionnel tout au long de ces longues années de scolarité.*

**NOUR**



# *Dédicace*

*Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de M'avoir donné le courage, la volonté et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.*

*A mon cher mari : **DJABER***

*A ma chère mère : **AKILA**, pour ses sacrifices depuis qu'elle m'a mit au monde ;*

*A mon chère père : **RABEH**, qui m'a toujours soutenu et aidé à affronter les difficultés. Pour tous ce qui a fait pour que je puisse les honorer ;*

*A ma chers frère : **LAKHDER***

*A ma sœurs : **SOUMIA***

*A toute ma famille **BAHACHE, LAIFA** ;*

*A tous mes amis*

*A tous les enseignants au département de Génie Electrique ;*

*A ma promotion de Master Électrotechnique (juin 2022)*

*A tous les étudiants.*

# Table des Matières

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
-----------------------------------	----------

## **Chapitre I : Système photovoltaïques**

I.1 Introduction .....	3
I.2.la cellule photovoltaïque .....	3
I.2.1.Historique.....	4
I.2.2.Constitution de la cellule photovoltaïque.....	4
I.3. Les différents types des cellules photovoltaïques .....	4
I.4 Association des modules photovoltaïques .....	5
I.5.Le module photovoltaïque .....	5
I.6.Caractéristiques d'un module.....	6
I.7. Influence de l'éclairement.....	7
I.8. Influence de la Température	
I.9 conclusion .....	9

## **Chapitre II : Modélisation D'un System Photovoltaïques**

II.1 Introduction.....	11
II.2Générateur Photovoltaïque GPV .....	11
II.2.1 Modélisation D'un Cellule Photovoltaïque .....	12
II.2.2. Caractéristique D'une Cellule Photovoltaïque.....	15
II.2.3 Groupement de Cellules Photovoltaïques.....	15
II.2.3.1 Association De Cellules Photovoltaïques En Série.....	16
II.2.3.2 Association de Cellules Photovoltaïques en Parallèle .....	16
II.2.4 Protections D'un Générateur .....	17
II.2.5 Modélisation D'un GPV .....	18
II.2.6Caractéristique D'un Générateur PV .....	19
II.2.7.Influence De La Température Et L'ensoleillement Sur Le GPV .....	19
II.2.7.1.Influence De L'ensoleillement .....	19
II.2.7.2.Influence de la température .....	21
II.3Les Principes de Conversion dans les Systèmes PV .....	22
II.3.1.Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge .....	22
II.3.2. Convertisseur DC/DC.....	23
II.3.3.Étage d'Adaptation de Type BOOST .....	24
II.3.4.Modèle mathématique équivalent .....	24
II.3.5. Modèle approximé du convertisseur Boost.....	25
II.4.Conclusion .....	26

**Chapitre III : Simulation et analyse de MPPT par la commande (P&O)**

III.1 Introduction .....	27
III.2 Principe De La Commande MPPT .....	27
III.3.1. Classification Des Commandes MPPT .....	28
III.3.2 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche .....	29
III.4. Les Algorithmes MPPT .....	30
III.4.1 Approche de la Tension Constante (CV, Constant Voltage) .....	30
III.4.2 Approche Du Courant Constant (Constant Current) .....	31
III.4.3. Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe) .....	32
III.4.4 Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance) .....	35
III.4.5 La Commande Mppt Flou .....	38
III.4.6. Autres Méthodes .....	40
III.5 Simulation du système photovoltaïque .....	40
III.5.1 L'algorithme perturbation et observation (P&O) .....	40
III.5 Conclusion .....	44

**Chapitre IV : Optimisation de la MPPT par l'Algorithme de la Loups Gris (MPPT-GWO)**

IV.1 Introduction .....	45
IV.2 Algorithmes métaheuristiques ou intelligents .....	45
IV.3 Méthode d'optimisation par les loups gris GWO .....	47
IV.4. Grey Wolf Optimizer .....	48
IV.4.1 Inspiration .....	48
IV.4.2. Modèle mathématique et algorithme .....	50
IV.4.2.1. Hierarchie sociale .....	50
IV.4.2.2 Encercler la proie .....	50
IV.4.2.3. Chasse .....	52
IV.4.2.4 Attaquer une proie (exploitation) .....	53
IV.4.2.5 Recherche de proies (exploration) .....	53
IV.4.3. Organigramme de l'algorithme GWO .....	55
IV.5 .Optimisation de Régulateur PI par l'Algorithme Gray Wolf .....	56
IV.5.1. Procédure d'optimisation de régulateur PI .....	56
IV.5.2 .Optimisation de Régulateur de PI classique .....	57
IV.5.3. Résultat de simulation de la commande MPPT par utilisation PI_GWO .....	57
IV.6 .Conclusion .....	60

**Conclusion générale**.....61

**Références Bibliographiques**.....A

## Liste des figures

### Chapitre I

<b>Fig. I.1</b> : Schéma d'une cellule élémentaire.....	4
<b>Fig. I.2</b> : Cellule en silicium monocristallin.....	5
<b>Fig. I.3</b> : Cellule en silicium poly cristallin.....	5
<b>Fig. I.4</b> : Cellule silicium amorphe.....	5
<b>Fig. I.5</b> : Association des modules photovoltaïques.....	6
<b>Fig. I.6</b> : Un module photovoltaïque.....	7
<b>Fig. I.7</b> : Caractéristique P-V du module PV selon l'éclairement.....	8
<b>Fig. I.8</b> : Caractéristique I-V du module PV selon L'éclairement.....	9
<b>Fig. I.9</b> : Caractéristique P-V du module PV selon la Température.....	9
<b>Fig. I.10</b> : Caractéristique I-V du module PV selon la Température.....	10

### Chapitre II

<b>Fig.II.1</b> : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.....	11
<b>Fig.II.2</b> : Composants d'un GPV.....	12
<b>Fig.II.3</b> : Modèle électrique équivalent à la cellule solaire .....	12
<b>Fig.II.4</b> : Caractéristique P-V d'une cellule .....	15
<b>Fig.II.5</b> Caractéristique I-V d'une cellule.....	15
<b>Fig.II .6</b> Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en série.....	16
<b>Fig.II.7</b> Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en parallèle.....	17
<b>Fig.II.8</b> Schéma tisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.....	18
<b>Fig.II.9</b> Caractéristique P/V d'un panneau PV.....	20
<b>Fig.II.10</b> Caractéristique I/V d'un panneau PV.....	20
<b>Fig.II.11</b> Caractéristique P/V d'un panneau PV pour une température constante de 25°C et un rayonnement variable.....	21
<b>Fig.II.12</b> Caractéristique I/V d'un panneau PV Pour une Température constante de 25°C et un rayonnement variable.....	21
<b>Fig.II.13</b> Caractéristique P/V d'un panneau PV Pour un rayonnement constant de 1000W/m2 et une température variable.....	22
<b>Fig.II.14</b> Caractéristique I/V d'un panneau PV Pour un rayonnement constant de 1000W/m2	

Et une température variable.....	22
<b>Fig.II.15</b> Etage d'adaptation entre un GPV et une charge.....	23
<b>Fig.II.16</b> convertisseurs DC-DC.....	24
<b>Fig.II.17</b> Exemple de convertisseur statique DC-DC Pouvant être utilisé comme adaptateur entre un générateur PV et une charge.....	25
<b>Fig.II.18</b> Allure des variables dynamiques IL.....	26

### Chapitre III

<b>Fig.III.1</b> Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenantUn panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.....	27
<b>Fig.III.2</b> Principe de la commande MPPT.....	28
<b>Fig.III.3</b> Algorithme de la Tension Constante.....	31
<b>Fig.III.4</b> Algorithme du constant courant .....	32
<b>Fig III.5</b> Recherche du PPM par la méthode (P&O) .....	33
<b>Fig.III.6</b> l'algorithme de P&O classique.....	34
<b>Fig.III.7</b> Divergence de la méthode P&O .....	35
<b>Fig.III.8</b> caractéristique de tension-puissance du panneau .....	36
<b>Fig.III.9</b> l'algorithme IncCond classique .....	38
<b>Fig.III.10</b> structuredebasedelacommandefloue.....	39

### Chapitre IV

<b>Fig.IV.1</b> Exemple de classification des méthodes métaheuristiques.....	46
<b>Fig.IV.2</b> Exemple de l'optimum global d'un problème d'optimisation.....	46
<b>Fig.IV.3</b> Hiérarchie du loup gris (la dominance diminue de haut en bas).....	48
<b>Fig.IV.4</b> Comportement de chasse des loups gris : (A) chasse, approche et suivi des proies (B-D) poursuite, harcèlement et encerclement (A) situation stationnaire et attaque.....	50
<b>Fig.IV.5</b> Vecteurs de position 2D et 3D et leurs prochains emplacements possibles.....	51
<b>Fig.IV.6</b> Mise à jour du poste dans GWO.....	52
<b>Fig.IV.7</b> Attaquer une proie ou rechercher une proie.....	53
<b>Fig.IV.8</b> Pseudo code de l'algorithme GWO.....	54
<b>Fig.IV.9</b> Organigramme de l'algorithme GWO.....	55
<b>Fig.IV.10</b> Principe d'optimisation MPPT par algorithme GWO.....	56
<b>Fig.IV.11</b> Schéma bloc global d'implantation de l'Algorithme Gray Wolf (GWO) pour l'ajustement des gains KP et KI du régulateur PI dans la commande MPPT.....	57
<b>Fig.IV.12</b> Puissance de sortie par MPPT-GWO.....	58

---

<b>Fig.IV.13</b> Zoom Puissance de sortie par MPPT-GWO a) Suivi MPPT b) ondulations de puissance, C) Debasement.....	59
<b>Fig.IV.14</b> Etude comparative entre MPPT classique et MPPT-GWO (a) : Les caractéristiques I-V, (b) : Les caractéristiques P-V.....	60

## Liste des tableaux

### Chapitre II

<b>Tab.II.1</b> Conditions de test. ....	13
<b>Tab.II.2</b> Caractéristiques du module KC-60.....	15
<b>Tab.II.3</b> Complexité de chaque type de convertisseur DC-DC.....	24

### Chapitre III

<b>Tab.III.1</b> Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue .....	39
--	----

### Chapitre IV

<b>Tab.IV.1</b> paramètres de Algorithme Gray Wolf utilisé.....	57
---	----

## Introduction générale

La croissance de la population et le développement de la technologie ont entraîné une Augmentation de la consommation d'énergie, en particulier dans le secteur d'électricité, Surtout au cours de ces dernières années. Toutefois, il y existe plusieurs régions rurales et Eloignées notamment dans les pays en développement qui n'ont pas accès à l'électricité.

De ce fait, et afin de résoudre ces problèmes, la production d'électricité devrait être Augmentée. En outre, un grand pourcentage de l'électricité mondiale est alimenté par les Ressources en combustibles fossiles. Cependant, ces ressources ne peuvent pas satisfaire Aux besoins futurs de l'électricité en raison de leurs problèmes économiques et Environnementaux. Aussi, en vue de minimiser l'exploitation des combustibles fossiles Polluants (pétrole, gaz,...), plusieurs pays ont accordé une attention capitale à l'énergie Renouvelable, à savoir : Les biocarburants, l'énergie éolienne, l'énergie photovoltaïque, les Concentrateurs solaires, hydro, géothermique, marémotrice et l'énergie des vagues. De Même, les ressources énergétiques renouvelables sont devenues des alternatives efficaces.

Pour les ressources en combustibles fossiles. Néanmoins, de nombreux problèmes sont Créés, tels que les coûts d'investissement élevés et la faible sécurité de L'approvisionnement en raison de la nature intermittente et incertaine d'entre eux. Pour Résoudre ces problèmes, une nouvelle solution est atteinte, à savoir les systèmes Multi-sources. De surcroît, le système multi-sources représente une combinaison des ressources Renouvelables et les ressources énergétiques traditionnelles, ainsi que le stockage d'énergie Pour répondre à la charge localement dans les deux modes tant connectés au réseau Qu'autonomes.

L'énergie est la complication essentielle pour l'homme dans le monde actuel, ses sources, est la question que le futur va poser à l'homme. Cependant l'histoire réserve parfois des surprises. Avec la diminution du stock mondial d'hydrocarbures d'origine fossile (pétrole, gaz et charbon), la demande énergétique sans cesse croissante, la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante, les énergies renouvelables (solaire, marine, éolienne, etc.) reviennent au premier plan de l'actualité ; leur exploitation arrange beaucoup l'environnement.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables les plus utilisées. Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques (PV) ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le

rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT).

Cette mémoire comporte quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté généralité sur les systèmes photovoltaïques et construction des cellules photovoltaïques et l'effet photovoltaïque et principe de fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre, on va étudier la Modélisation d'un système photovoltaïque , Dans le troisième chapitre, nous avons étudié la Simulation et analyse de MPPT par la commande (P&O) d'un système photovoltaïque

Dans le quatrième chapitre, nous allons présenter un nouvelle algorithme MPPT à pas variable proposé utilisant GWO et WOA. de nombreux simulation et analyse sont présenté, montre les résultats obtenus dans lesquels une étude comparative a été réalisée

En fin, une conclusion générale couronne ce mémoire pour récapituler nos analyses, nos résultats et nos commentaires.

# Chapitre I : Système photovoltaïque

## I.1 Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers De fois notre consommation globale d'énergie [1]. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis Longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Le nom Photovoltaïque vient du Grec, il est composé de deux parties :

- Photos : Lumière.
- Volt : Unité de tension électrique, du nom Alessandro volta.

Ce phénomène fut découvert au 19<sup>ème</sup> siècle par le physicien [Alexandre Edmond Becquerel].

La première cellule photovoltaïque fut développée début 1954 pour l'alimentation en énergie des satellites.

Depuis 1958, les cellules photovoltaïques alimentent seulement le système énergétique des satellites jusqu'à ses premières applications terrestres au début des années 70.

Le photovoltaïque fut utiliser pour l'alimentation en énergie de petites maisons isolées et d'équipements de télécommunications. [2]

## I.2 la cellule photovoltaïque

### I.2.1.Historique

IL est important de citer les dates les plus importantes dans l'histoire du photovoltaïque qui Noté**9586** : Le physicien français [edmond becquerel] découvre le processus de l'utilisation de L'enseillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet Photovoltaïque.

**9541** : Werner von siemens expose devant l'académie des Sciences de Berlin Un article sur l'effet Photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le Phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

**9617** : Trois chercheurs américains, chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule Photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des Solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

**9615** : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites AlimentésPar des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

**9648** : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à L'université

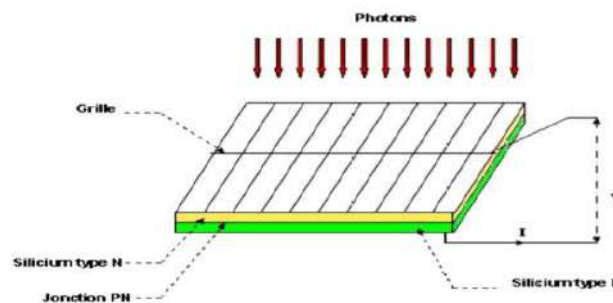
DeDelaware.

**9658** : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000km en Australie.

## I.2.2. Constitution de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible. Son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs.

Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur qui sont dopées différemment, Figure (I.1). Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons, les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches du semi-conducteur. L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche anti-reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée. [3], [4]



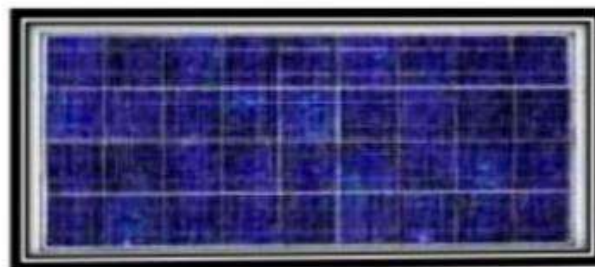
**Figure I.1** : Schéma d'une cellule élémentaire.

## I.3. Les différents types des cellules photovoltaïques

Il existe trois types principaux des cellules :

### a) monocristallin

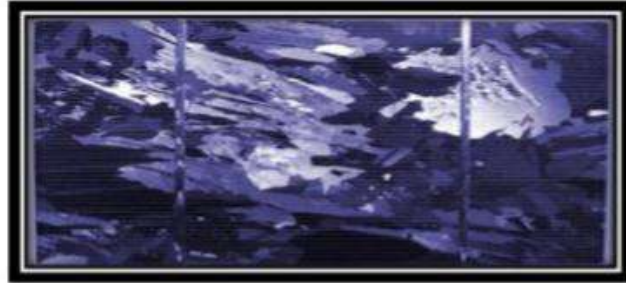
Matériau le plus répandu, présentant un bon rendement à fort et moyen éclairage, il est à la base des panneaux «terrestres» les plus performants après ceux à l'arséniure de Gallium.



**Figure I.2**: Cellule en silicium monocristallin [5].

**b) Silicium poly cristallin**

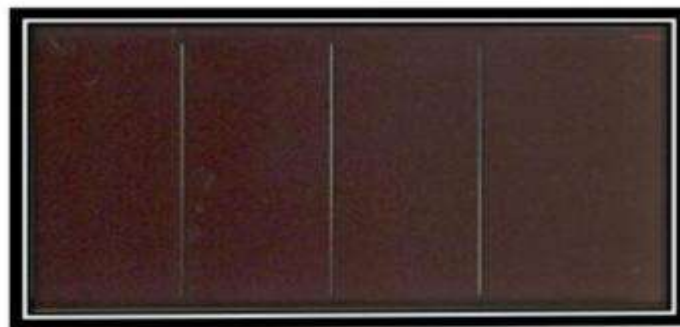
Cousin germain du précédent (composés de multi cristaux), il est un peu moins Performant, Essentiellement aux éclairagements modérés, et également moins onéreux.



**Figure I.3** : Cellule en silicium poly cristallin [5].

**c) Silicium amorphe**

Nettement moins puissant au soleil que les deux précédents, ce silicium en couche très Mince répond par contre à tous les éclairagements, extérieur et intérieur. Sa technologie de Fabrication est Théoriquement moins onéreuse (mais la production n'a pas atteint des niveaux Comparables) et Permet de réaliser des petits formats, grâce à la mise en série intégrée et la Simplicité de découpe



**Figure I.4** : Cellule silicium amorphe [5].

**I.4.Association des modules photovoltaïques**

Un module des cellules connecté en parallèle est suffisant pour augmenter le courant du Générateur en, associe “ $N_p$ ” modules en parallèle comme montrer dans les figures (I.5.b) et (I.5.a).

Pour obtenir une augmentation de la tension du générateur en, associe “ $N_s$ ” modules En série comme Le montrent les figures précédentes.

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire D'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque Figure (I.5.c). [6].

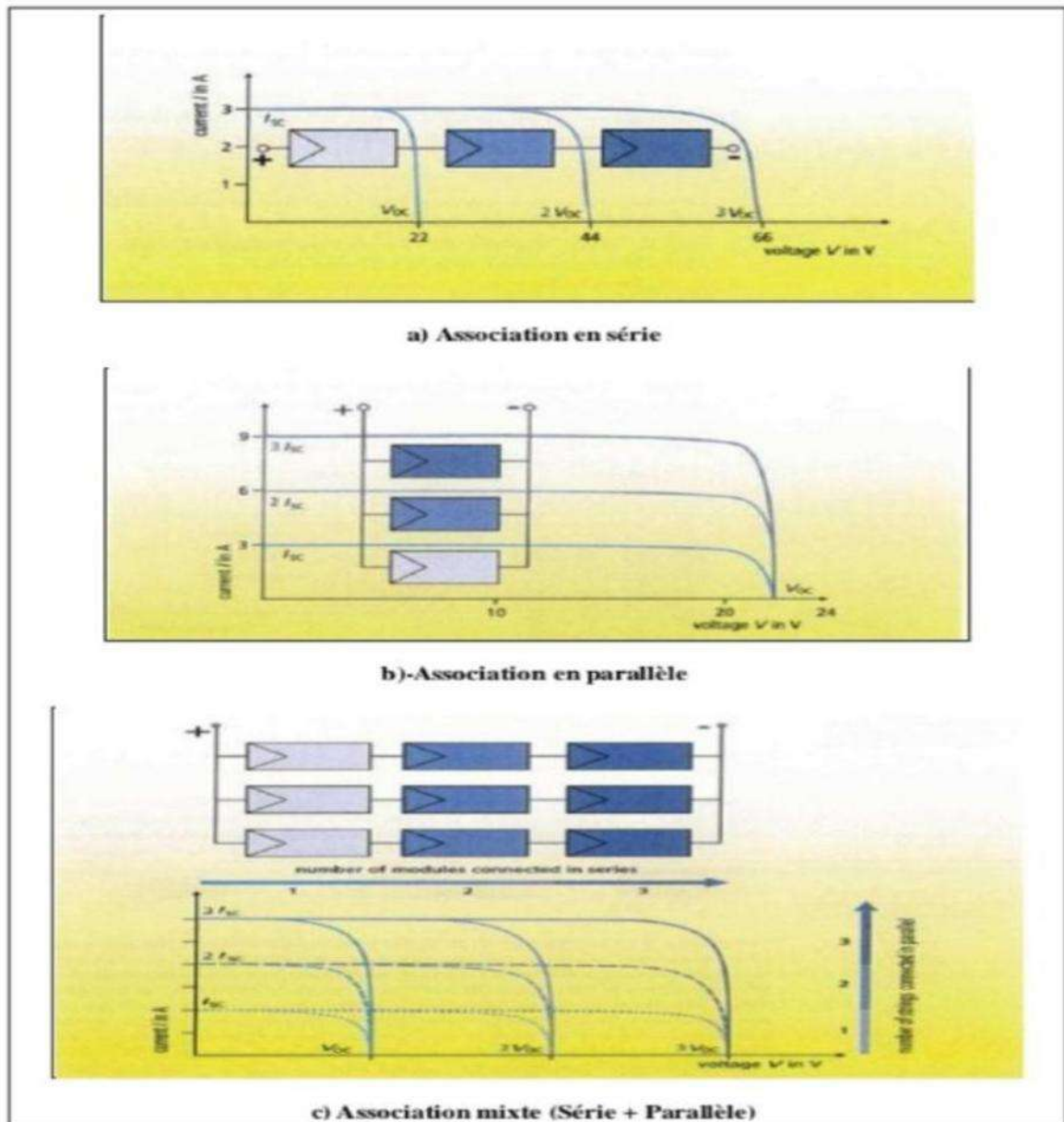


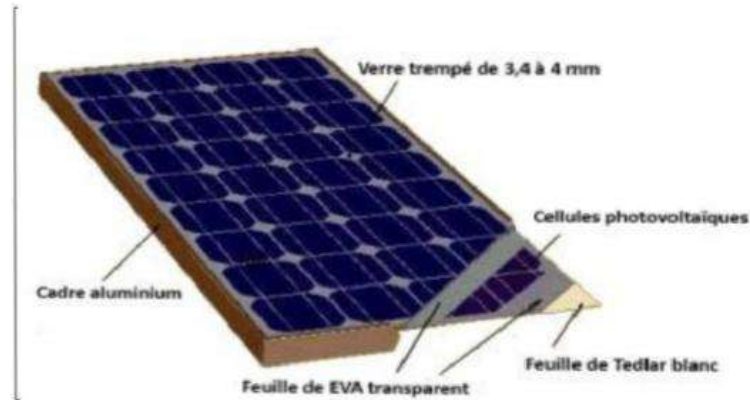
Figure I.5 : Association des modules photovoltaïques.

## I.5. Le module photovoltaïque :

Rappelons tout d'abord que les modules photovoltaïques sont des convertisseurs D'énergie Lumineuse en électricité, à ne pas confondre avec les capteurs solaires thermiques Ou Capteurs Plans, qui eux produisent de la chaleur à partir des rayons solaires.

Le module photovoltaïque est par définition un ensemble de photopiles assemblées pour Générer

Une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. En effet, une Photopile Élémentaire ne génère pas suffisamment de tension entre : 0,5 et 1,5 selon les Technologies .Il faut Presque toujours plusieurs photopiles en série pour générer une tension Utilisable [7].



FigureI .6 :Un module photovoltaïque [8].

## I.6.Caractéristiques d'un module

Voici la description des paramètres d'un module :

- **La puissance crête  $P_c$**  : Puissance électrique maximum que peut fournir le module Dans la condition standard ( $25^\circ\text{C}$  et un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$ ).
- **La caractéristique  $I(V)$**  : Courbe représentant le courant  $I$  débité par le module en Fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- **Tension à vide  $V_{co}$**  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, Pour un éclairement « plein soleil ».
- **Courant de court-circuit  $I_{cc}$**  : Courant débité par un module en court-circuit pour Eclairement « plein soleil ».
- **Point de fonctionnement optimum ( $U_m, I_m$ )** : Lorsque la puissance de crête est Maximum en plein soleil,  $P_m = U_m \cdot I_m$
- **Rendement maximal** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de Radiation incidente.
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale Que peut avoir la cellule :  $V_{co} \cdot I_{cc}$  [9].

## I.7. Influence de l'éclairement

En faisant varier l'éclairement entre  $200 \text{ w/m}^2$  et  $1000 \text{ w/m}^2$ , la caractéristique ( $I_{pv}=f(V_{pv})$ ) est donnée par les figures (II.17-18). On remarque 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, elle reste quasiment identique même à faible Éclairement. L'irradiation standard internationalement acceptée pour mesurer la réponse des Panneaux photovoltaïque est une intensité rayonnante de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température  $25^\circ\text{C}$

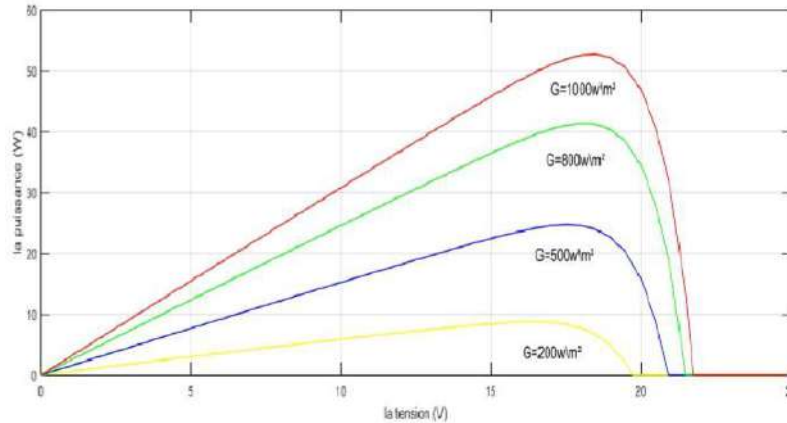


Figure I -7 :Caractéristique P-V du modulePV selon l'éclairement

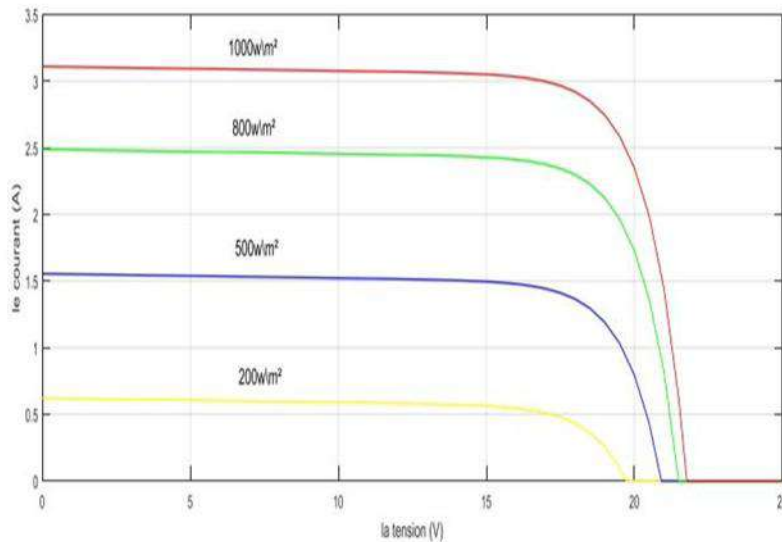
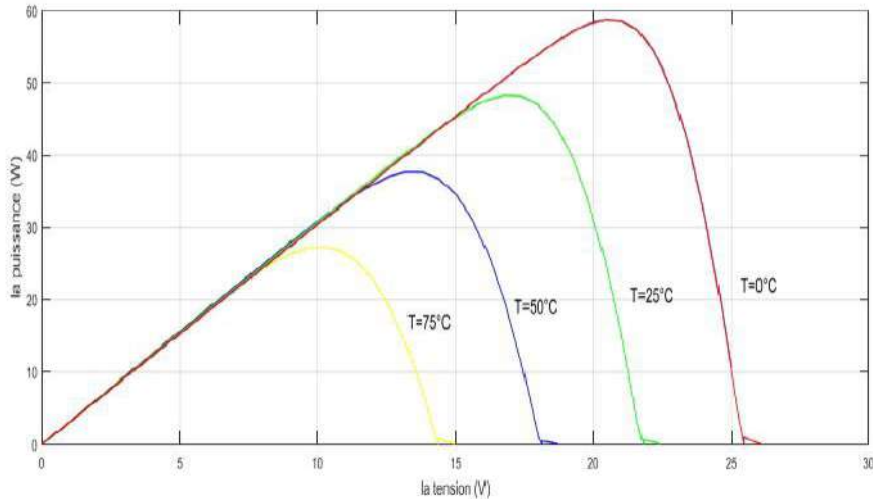


Figure I -8 : Caractéristique I-V du module PV selon L'éclairement

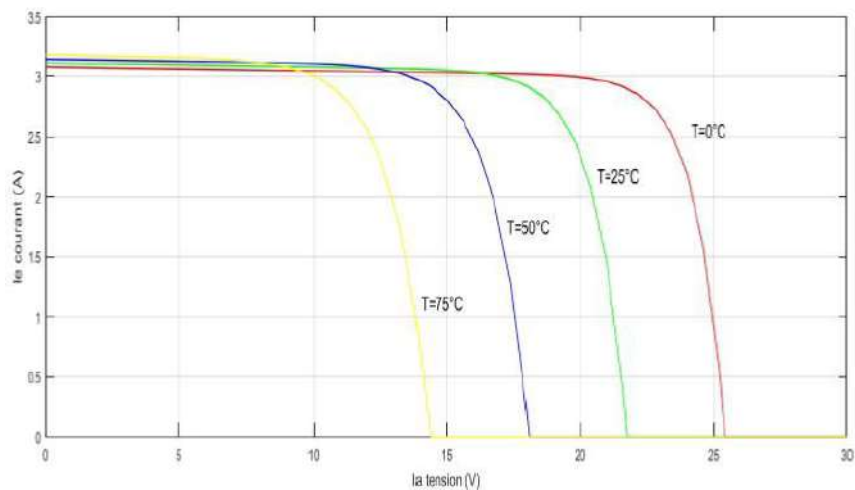
## I.8. Influence de la Température :

En faisant varier la température de  $0^\circ\text{C}$  jusqu'à  $75^\circ\text{C}$ , la caractéristique ( $I_{pv}=f(V_{pv})$ ) est donnée par Les figures (II. (19-20)).

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.



**Figure I.9 :** Caractéristique P-V du module PV selon la Température



**Figure I.10 :** Caractéristique I-V du module PV selon la Température

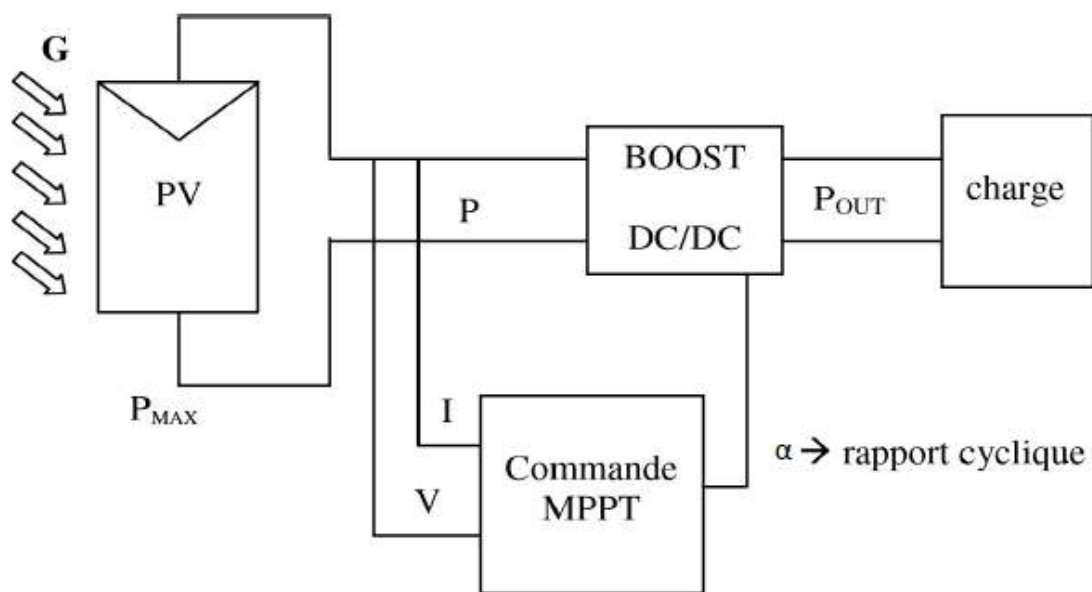
## I.9.conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du Sujet. Nous avons aussi expliqué la constitution de cellules photovoltaïques et leurs types Rappelé aussi les Modules photovoltaïques et leurs associations, exposé Les principales Caractéristiques d'un module PV.

## Chapitre II : Modélisation d'un system photovoltaïque.

### II.1 Introduction

Un système photovoltaïque se compose de plusieurs éléments interconnectés destinés à réaliser une tâche bien déterminée, qui peut être fournir de l'électricité au réseau public de distribution, pomper de l'eau d'un puits, alimenter une petite calculatrice ou l'une des nombreuses utilisations possibles de l'électricité solaire .il est généralement constitué d'un module photovoltaïque, d'un régulateur, d'une batterie, d'un récepteur « courant continu » et d'un onduleur si il existe un récepteur « courant alternatif ». La figure suivante décrit le système qui nous sera utilisé dans notre travail



**Figure II.1 :** Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.

### II.2.Générateur Photovoltaïque GPV

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel (figure II.2). Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules [10].

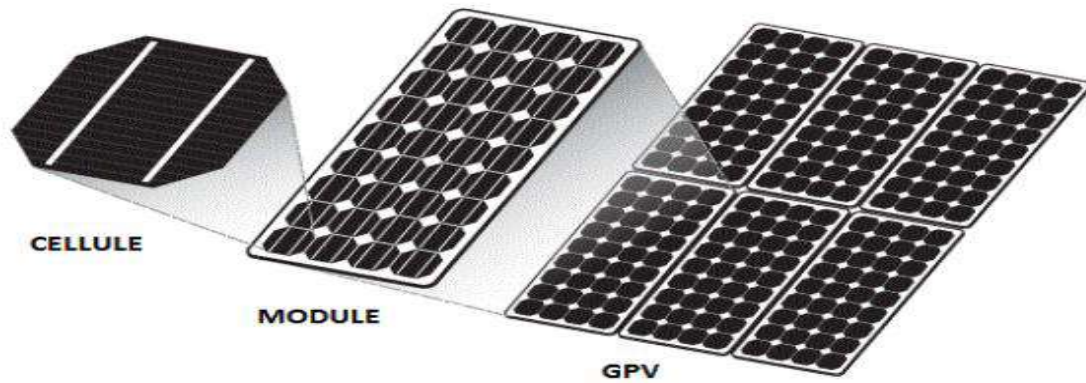


Figure II.2 : Composants d'un GPV

## II.2.1 Modélisation D'un Cellule Photovoltaïque

La caractéristique  $I-V$  du générateur PV est basée sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par un circuit équivalent. Il existe plusieurs modèles électriques de la cellule photovoltaïque, mais dans cette étude, nous utilisons le modèle schématisé dans par FigureII.3. Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle, ainsi que des résistances série  $R_s$  et parallèle  $R_p$  pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule [11].

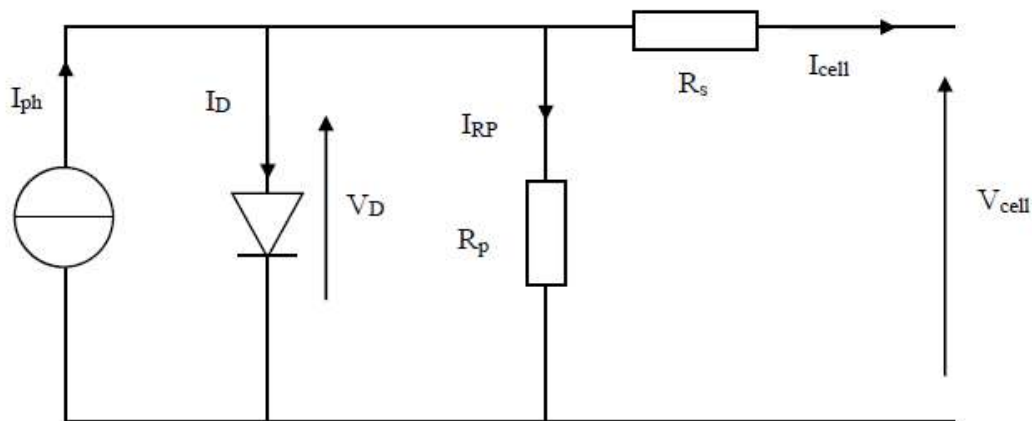


Figure II.3 : Modèle électrique équivalent à la cellule solaire

Ce modèle représente la cellule solaire comme source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique. La résistance montée en série  $R_s$  représente la résistance De Contact et de connexion, une autre résistance en parallèle dite la résistance shunt  $R_p$  représente le courant de fuite. Une diode  $D$  en parallèle qui modélise la jonction PN .Ce circuit peut être utilisée aussi bien pour une cellule élémentaire, que pour un module ou un panneau constitué de plusieurs modules [10].

Avec un tel circuit électrique équivalent, on peut écrire :

$$I_{Cell} = I_{ph} - I_D - I_{RP} \quad (II-1)$$

$$I_{RP} = V_D / R_P \quad (II-2)$$

$$I_D = I_S (e^{V_D / V_{th}} - 1) \quad (II-3)$$

$$V_D = V_{Cell} + R_S I_{Cell} \quad (II-4)$$

Alors

$$I_{Cell} = I_{ph} - I_S (e^{(V_{Cell} + R_S I_{Cell}) / V_{th}} - 1) - V_{Cell} + R_S I_{Cell} / R_P \quad (II-5)$$

Avec

- **I<sub>s</sub>** : courant de saturation de la diode donné par :

$$I = k_1 T^3 e^{-\frac{V_g}{KT}} \quad (II-6)$$

- **V<sub>th</sub>** tension thermique à la température T :

$$V_{th} = K_T / q \quad (II-7)$$

q : charge d'électron ( $1.602 \times 10^{-19}$  C)

K : constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23}$  J/k)

K1 : constante (1.2 A/cm<sup>2</sup> K<sup>3</sup>)

T : température effective de la cellule en Kelvin

V<sub>g</sub> : énergie de gap (pour le silicium cristalline est égale à 1.12 eV)

Généralement la résistance (R<sub>P</sub>) est plus élevée et son influence n'est prépondérante que pour des niveaux d'éclairement très bas, donc on peut négliger le courant I<sub>RP</sub> [12], Le courant délivré par La cellule est alors donnée par l'expression :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_S e^{(V_{Cell} + R_S I_{Cell}) / V_{th}} - 1 \quad (II-8)$$

Et la tension à ses bornes est donnée par :

$$V_{Cell} = -R_S I_{Cell} + V_{th} \ln (I_{ph} - I_{Cell} - I_S / I_S) \quad (II-9)$$

Pour une modélisation plus précise de la cellule PV, l'influence du niveau d'éclairement ainsi que celle de la température doivent être prises en compte. En pratique, les paramètres de la cellule sont donnés (par le fabricant) dans des conditions de test standard (STC : Standard Test Conditions) ou nominales comme l'indique le tableau suivant :

conditions de test standard	conditions nominales
Eclairement G0=1000W/m <sup>2</sup>	Eclairement Gnom=800W/m <sup>2</sup>
Température de la cellule T0=25°C	Température ambiante Ta,nom=20°C

**Tableau II.1** Conditions de test.

Sous les conditions de test standard, les paramètres mesurés sont :

- le courant de court-circuit  $I_{sc, 0}$ ,
- la tension de circuit ouvert  $V_{oc, 0}$ ,
- la puissance maximale  $P_{max,0}$ .

Sous les conditions nominales, la température de la cellule TNOCT (NOCT : Nominal Operating Cell Température) est mentionnée sur le catalogue du fabricant.

Le photo-courant  $I_{ph}$  est directement proportionnel à l'éclairement. Si  $I_{sc, 0}$  est donnée sur le catalogue en STC, alors le photo-courant généré pour n'importe quel autre valeur de G, est donné par:

$$I_{ph|T_0} = (I_{sc, 0})/G_0 \cdot G = G_1 G \text{ (II-10)}$$

Le photo-courant dépend aussi de la température son expression est donnée par :

$$I_{ph} = I_{ph |T_0} \cdot (1 + K_0(T - T_0)) \text{ (II-11)}$$

D'où

$$K_0 = \frac{I_{sc|T_2} - I_{sc,0}}{T_2 - T_0} \text{ (II-12)}$$

$$T^C = T_a + C_2 G \text{ (II-13)}$$

Avec

$$C_2 = \frac{T_{NOCT} - T_{a, nom}}{G_{nom}} \text{ (II-14)}$$

Si la température TNOCT n'est pas connue, la constante C2 est approximée par  $0.03^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$ . (en pratique C2 varie entre  $0.01$  et  $0.03^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$ )

La tension de circuit ouvert dépend de la température selon l'expression :

$$V_{OC} = V_{OC,0} + C_3 (T_C - T_0) \text{ (II-15)}$$

Où  $C_3 = -2.3\text{mV}/^\circ\text{C}$

Le courant de saturation  $I_s$  de la diode pour la température  $T_0$ , est donné par :

$$I_{s, 0} = \frac{I_{sc,0}}{(e^{V_{oc,0}/V_{th}} - 1)} \text{ (II-16)}$$

Le courant de saturation dépend de la température. Sa valeur pour une température donnée est calculée par l'équation suivante :

$$I_s = I_{s,0} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/n} e^{-\frac{qV_g}{nK} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \text{ (II-17)}$$

La résistance série  $R_s$  a un impact sur la pente de la courbe caractéristique près de la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$ . La valeur de  $R_s$  est alors donnée en évaluant la pente  $dV/dI$  de la courbe  $I/V$

Pour

$V = V_{oc}$ . L'expression de  $R_s$  est donnée en dérivant  $I$  et en réarrangeant en fonction de  $R_s$  :

$$I = I_{ph} - I_s (e^{(V + R_s I) / V_{th}} - 1) \tag{II-18}$$

$$dI = 0 - \frac{I_s}{V_{th}} (dV + R_s dI) \cdot e^{(V + R_s I) / V_{th}} \tag{II-19}$$

$$R_s = -\frac{dV}{dI} |_{VOC,0} - \frac{1}{X_v} \tag{II-20}$$

$$X = \frac{I_{s,0}}{V_{th,0}} \cdot e^{\frac{VOC,0}{V_{th,0}}} \tag{II-21}$$

La résistance série peut aussi être calculée en utilisant l'expression :

$$R_s = R_{s|T_0} (1 + K_3(T - T_0)) \tag{II-22}$$

Avec k3 coefficient de température de la résistance série.

### II.2.2 Caractéristique D'une Cellule Photovoltaïque

En prend par exemple une cellule de module KC-60 Ce module possède les caractéristiques suivantes à 1000 (w/m<sup>2</sup>) et 25°C.

Puissance optimale	Courant de court-circuit	Tension a circuit ouvert	Courant optimale	Tension optimale
60 w	3.73 A	20 V	3.55 A	16.9 V

Tableau II.2 Caractéristiques du module KC-60[14].

Les figures suivantes représentent les caractéristiques d'une cellule PV pour un rayonnement constant de 1000W/m<sup>2</sup> et une température de 25°C.

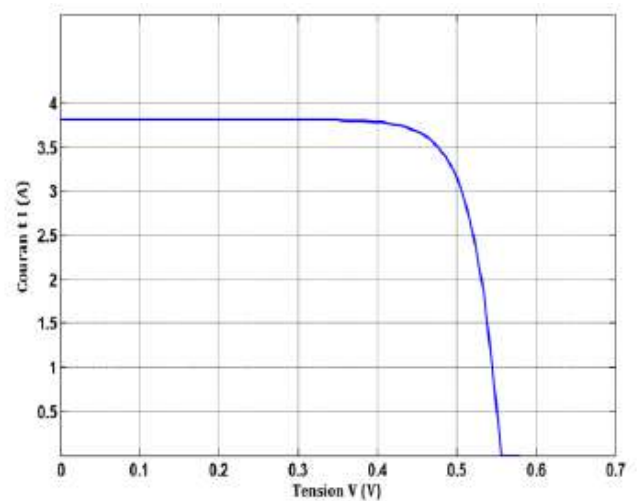
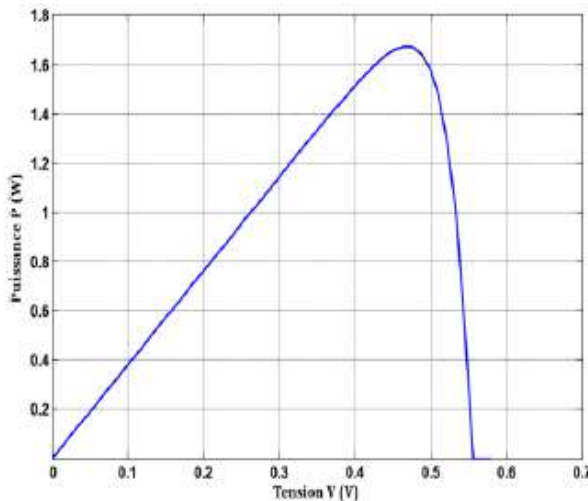


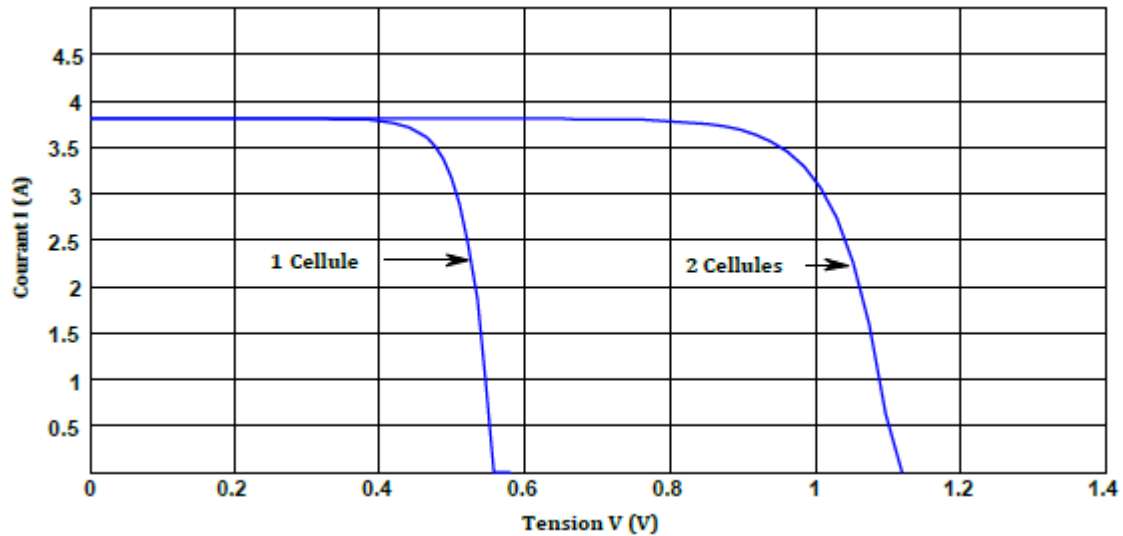
Figure.II.4 Caractéristique P-V d'une cellule Figure.II.5 Caractéristique I-V d'une cellule

### II.2.3 Groupement de Cellules Photovoltaïques

La puissance fournie par une seule cellule solaire étant très faible, plusieurs cellules dont les caractéristiques sont semblables doivent être électriquement associées et encapsulées dans un plastique pour former un GPV pratique.

### II.2.3.1 Association De Cellules Photovoltaïques En Série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. Figure.II.6 montre la caractéristique résultante (ICS, VCS) obtenue en associant en série NS cellules identiques (IC, VC) [15].



**Figure.II.6** Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en série.

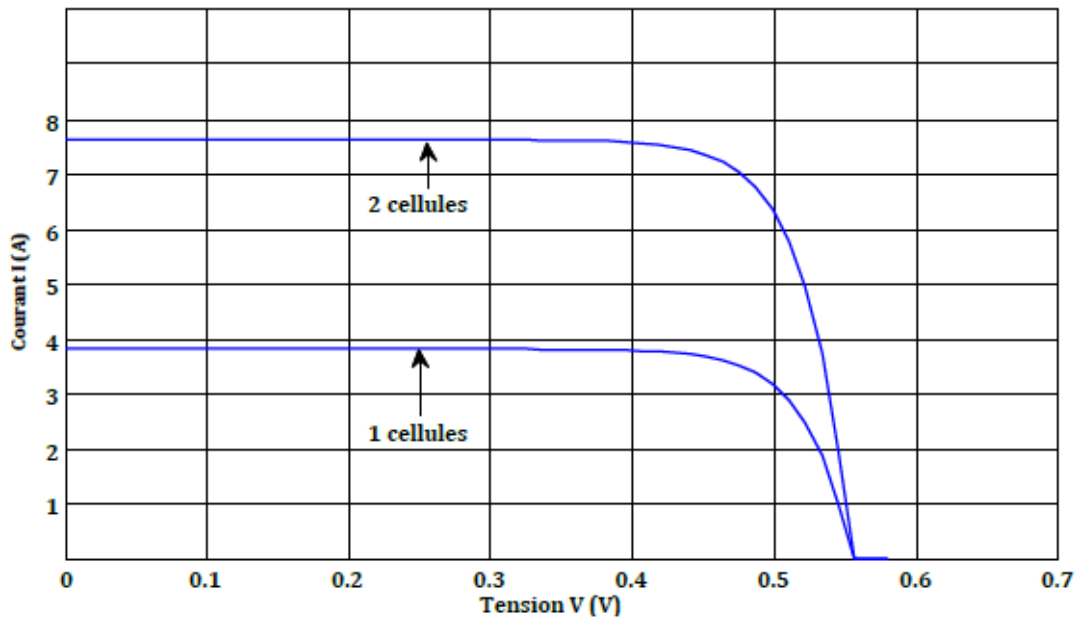
$$I_{CS} = I_C \quad (\text{II-23})$$

Et

$$V_{CS} = N_S V_C (\text{II-24})$$

### II.2.3.2 Association de Cellules Photovoltaïques en Parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. (Figure II.7) montre la caractéristique résultante (I CP, VCP) obtenue en associant en parallèle NP cellules identiques (IC, VC) [15] :



**Figure.II.7** Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en parallèle.

$$I_{CP} = N_P I_C \quad (\text{II-25})$$

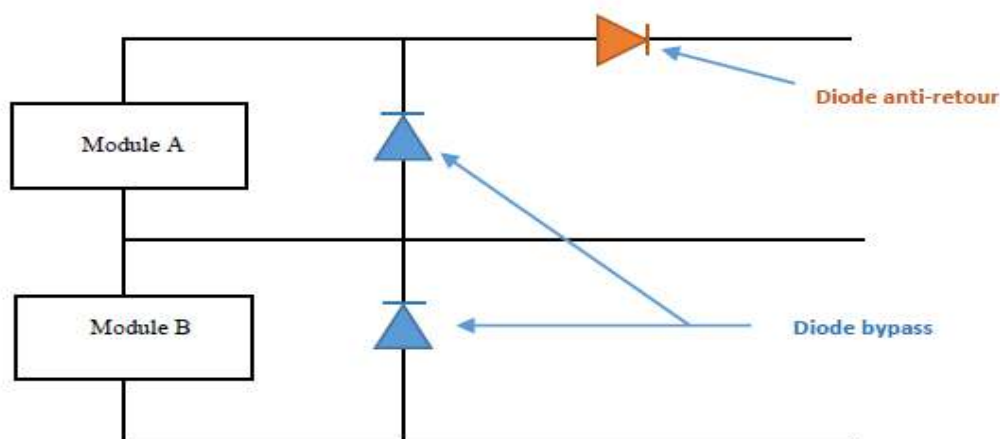
Et

$$V_{CP} = V_C \quad (\text{II-26})$$

## II.2.4 Protections D'un Générateur

Le groupement des cellules photovoltaïque présente un effet indésirable lorsque le module est partiellement à l'ombre ou lorsque les cellules ne sont pas éclairées équitablement (éclairage non homogène). donc pour résoudre ce problème et pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en série et de panneaux en parallèles [16-17].

Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles (Figure II.8)



**Figure.II.8** Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour

- la diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les PV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.
- les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène (effet d'ombrage) évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées.

## II.2.5 Modélisation D'un GPV

Nous avons vu que le modèle mathématique d'une cellule PV est donné par :

$$I_{Cell} = I_{Ph} - I_S (e^{V_{Cell} + R_S I_{Cell}} / V_{th} - 1) \quad (II-8)$$

Cette expression ne peut être utilisée directement pour prédire le comportement du GPV, car quelques paramètres,  $I_{ph}$  et  $I_s$  en particulier, ne peuvent être établies à partir des informations habituellement disponibles. Ces dernières sont restreintes aux valeurs de  $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$  et  $P_{max}$  qui sont toujours incluses dans le catalogue du fabricant.

Pour pallier à ce problème, des simplifications peuvent être faites en faisant les suppositions suivantes, qui sont généralement valides pour les cellules au silicium [10] :

- Le photo-courant et le courant de court-circuit sont égaux
- $e^{(V + IR_S / V_{th})} \gg 1$  Pour toutes les conditions de fonctionnement

Par conséquent, l'équation (3) devient :

$$I_{Cell} = I_{SC} - I_S \cdot e^{(V_{Cell} + R_S I_{Cell}) / V_{th}} \quad (II-27)$$

Et la tension de circuit ouvert est donnée par :

$$V_{OC} = V_{th} \ln \left( \frac{I_{SC}}{I_S} \right) \quad (II-28)$$

D' où :

$$I_S = I_{SC} e^{-\frac{V_{OC}}{V_{th}}} \quad (II-29)$$

Finalement, on obtient :

$$I = I_{SC} \left( 1 - e^{(V - V_{OC} + R_S I) / V_{th}} \right) \quad (II-30)$$

Cette expression est très pratique, car ces paramètres sont facilement déterminés, ce qui permet l'application directe de cette dernière.

Nous avons vu que plusieurs cellules PV sont groupées pour constituer des modules ou des panneaux PV. Ces derniers contiennent NP branches en parallèle, chacune avec NS cellules connectées en série. En considérant que les cellules sont semblables et sont soumises aux mêmes conditions, donc le courant  $I_P$ , généré par le module PV sera exprimé par :

$$I^P = N_P I_{SC} \left( 1 - e^{(V^P - N_S V_{OC} + \frac{N_S}{N_P} R_S I^P) / V_{th}} \right) \quad (II-31)$$

## II.2.6 Caractéristique D'un Générateur PV

Les figures suivant présentent les Caractéristique d'un générateur PV pour un rayonnement constant de  $1000\text{W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ .

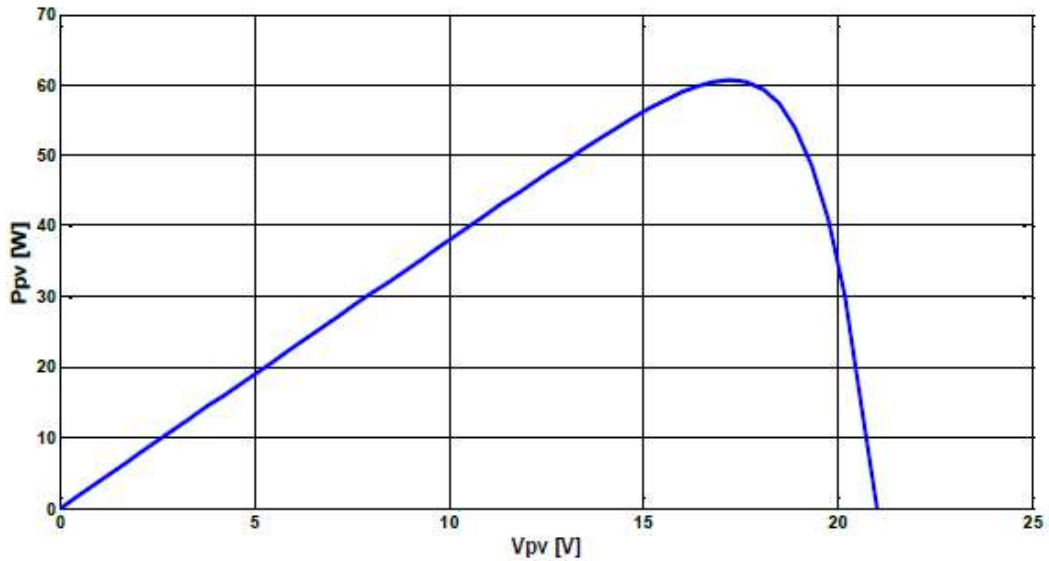


Figure.II.9 Caractéristique P/V d'un panneau PV

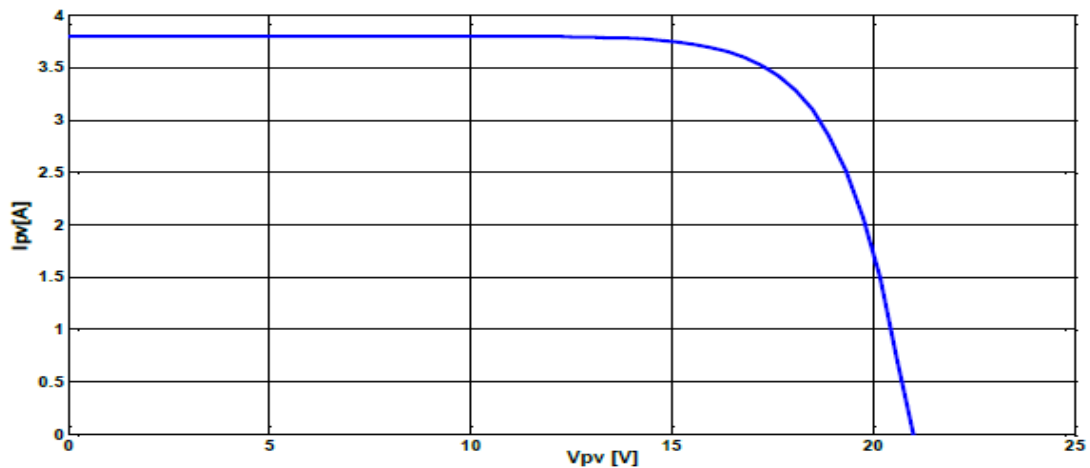


Figure.II.10 Caractéristique I/V d'un panneau PV

## II.2.7 Influence De La Température Et L'ensoleillement Sur Le GPV

### II.2.7.1 Influence De L'ensoleillement

Une baisse de l'ensoleillement provoque une diminution de la création de paires électron-trou avec un courant à l'obscurité inchangée. Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction du photo-courant et du courant de diode à l'obscurité, il y'a une baisse du courant solaire ICCM proportionnelle à la variation de l'ensoleillement accompagnée d'une très légère diminution de la

tension VCOM et donc un décalage du point Pmax du panneau solaire vers les puissances inférieures

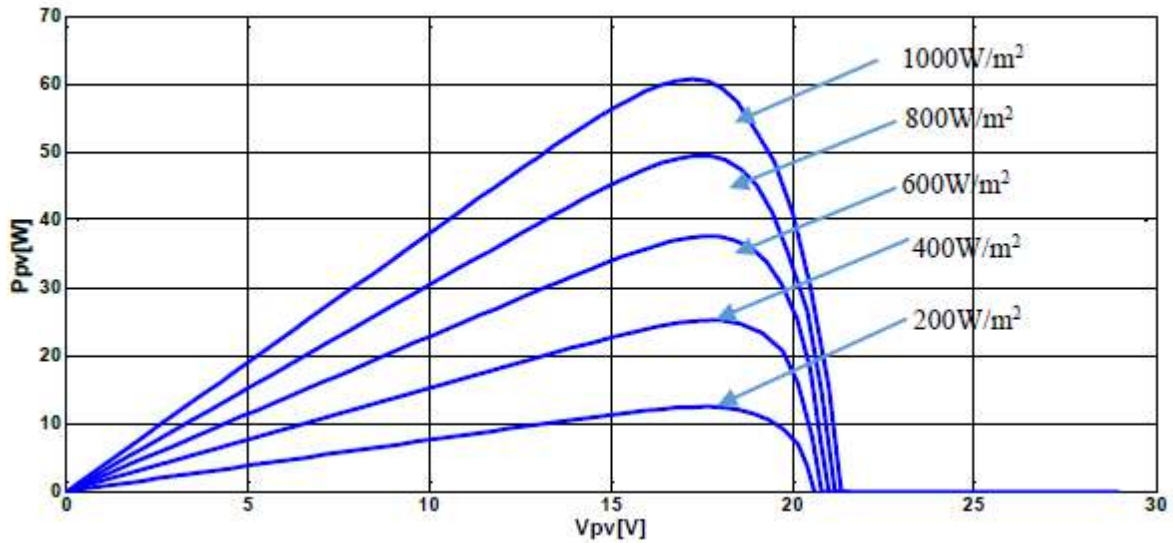
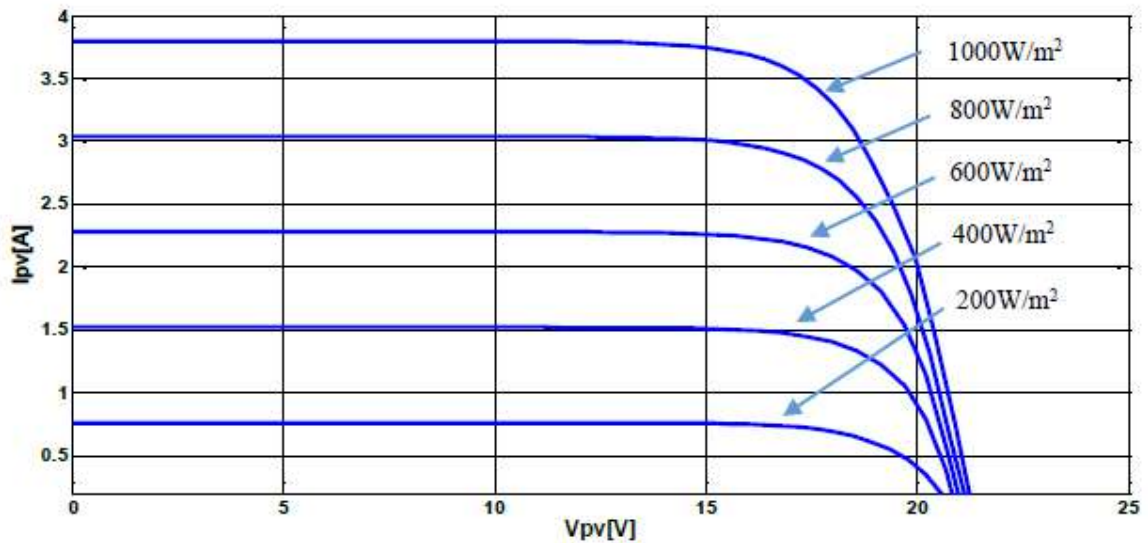


Figure.II.11 Caractéristique P/V d'un panneau PV



pour une température constante de 25°C et un rayonnement variable.

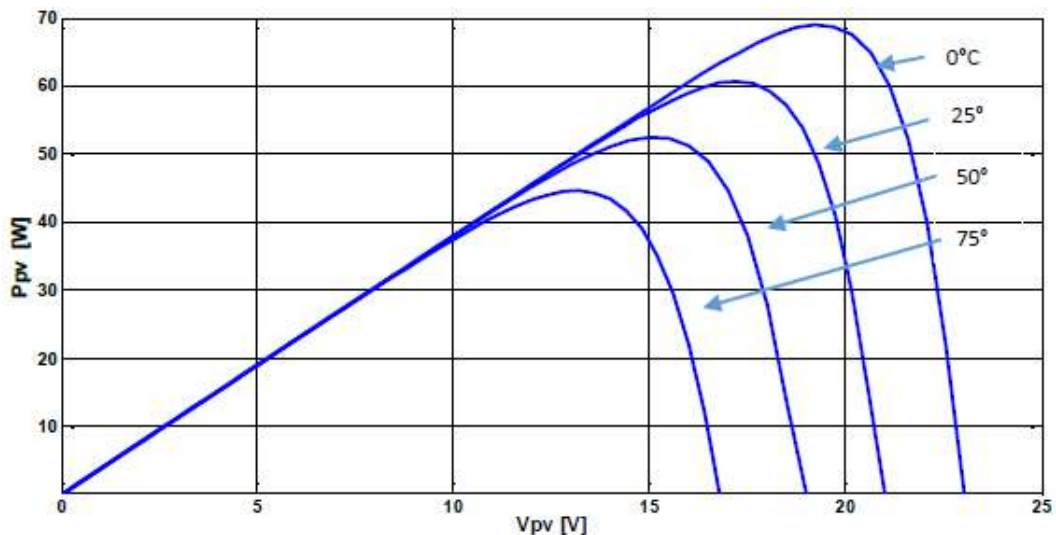
Figure.II.12 Caractéristique I/V d'un panneau PV

Pour une température constante de 25°C et un rayonnement variable.

Les figures précédant montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. A une température constante 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 reste quasiment identique même à faible éclairement. Ceci implique que La puissance optimale de la cellule (Pmax) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement. Ainsi Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

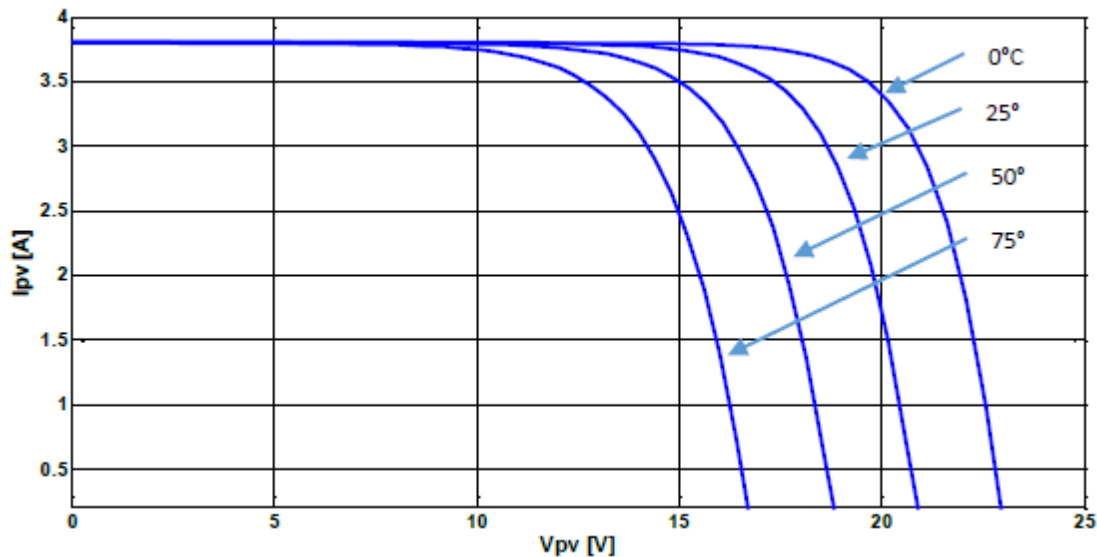
### II.2.7.2 Influence de la température

On s'aperçoit que le courant délivré par chaque cellule dépend de la température interne de la jonction PN qui constitue la cellule PV. Si on considère le réchauffement d'un module PV de 25°C à 50°C et si l'on considère en première approximation que la température face arrière de chaque cellule est proche de la température de la jonction PN, alors on peut considérer que l'influence de la température. On s'aperçoit que la tension de circuit ouvert décroît en fonction d'une augmentation de la température. Par conséquent, on perd de la puissance disponible aux bornes du module PV. Les figures suivantes représentent les caractéristiques Courant -Tension et Puissance- Tension pour un rayonnement constant et différentes températures.



**Figure.II.13** Caractéristique P/V d'un panneau PV

Pour un rayonnement constant de 1000W/m<sup>2</sup> et une température variable.



**Figure.II.14** Caractéristique I/V d'un panneau PV

Pour un rayonnement constant de  $1000\text{W/m}^2$  et une température variable

Nous remarquons que la tension à vide d'un module photovoltaïque (une cellule solaire) diminue avec l'augmentation de la température du module PV (de la cellule). Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température du module PV (de la cellule solaire).

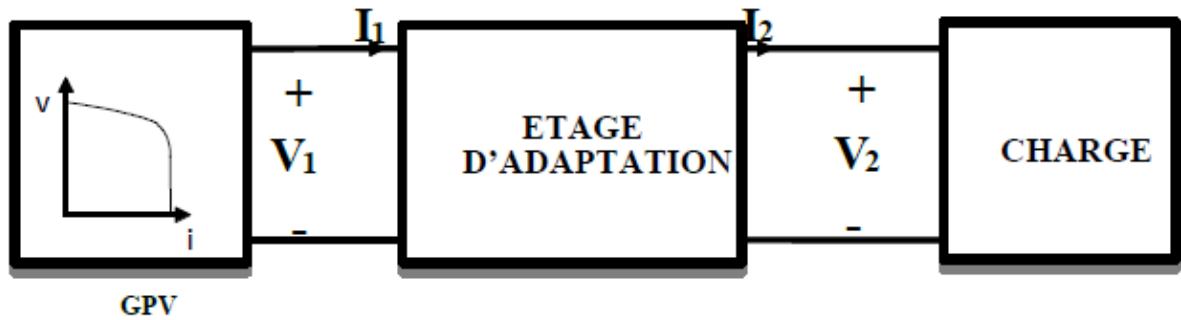
Nous pouvons remarquer aussi que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

## II.3 Les Principes de Conversion dans les Systèmes PV

Le générateur PV est l'élément principal d'un système PV. Cependant, pour une application pratique, d'autres éléments sont nécessaires, par exemple pour le stockage de l'énergie, pour la régulation de la circulation du flux d'énergie ou pour l'alimentation du réseau alternatif. Ces composants supplémentaires représentent une part considérable du coût, provoquent la réduction du rendement et influencent considérablement le comportement et les performances de tout le système.

### II.3.1 Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge

Un GPV présente des caractéristiques  $I(V)$  non linéaires avec des points de puissance maximaux (PPM). Ces caractéristiques dépendent au 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 transférée à la charge en mode connexion directe. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de 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 II.15 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<sub>MAX</sub> disponible [15].

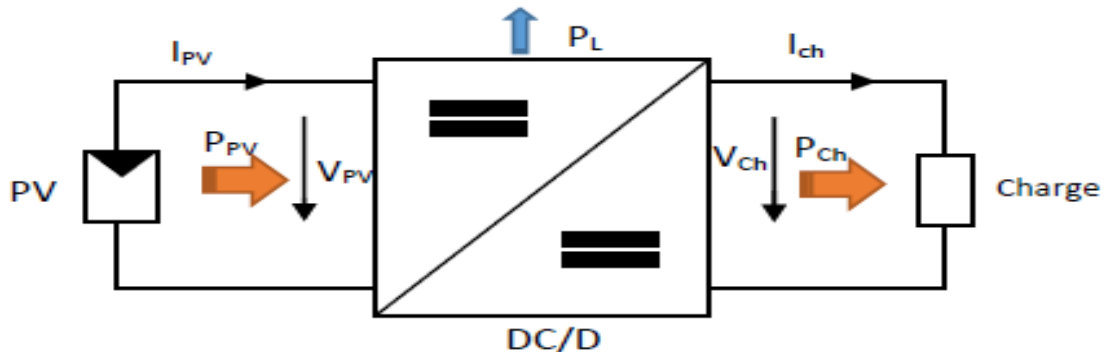


**Figure.II.15** Etage d'adaptation entre un GPV et une charge

L'adaptateur communément utilisé en PV est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC).

### II.3.2 Convertisseur DC/DC

La figure.II.16 montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge.



**Figure.II.16** convertisseurs DC-DC

L'utilisation des convertisseurs DC-DC permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Les circuits des hacheurs se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements. Le commutateur est réalisé avec un dispositif semi-conducteur, habituellement un transistor MOSFET ou un IGBT fonctionnant en mode (bloqué/saturé). Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro d'où une dissipation de puissance nulle.

Si le dispositif est dans l'état saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque nulle et par conséquent la puissance perdue sera très faible

Il y a différents types de convertisseurs DC-DC. Le tableau suivant donne une idée sur la complexité de chaque type de convertisseur

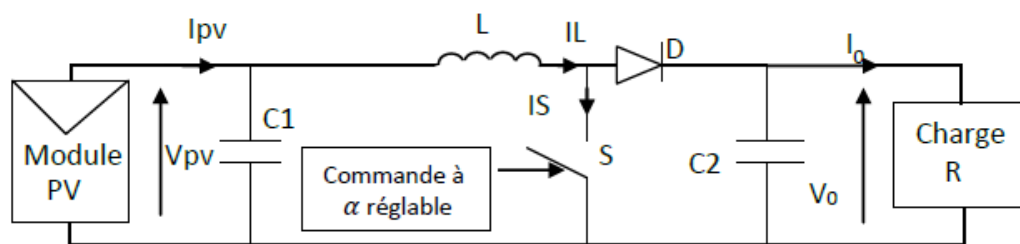
Type	Fonction	Interrupteur	Diode	Transformateur	Complexité
Buck	Abaisseur	1	1	Non	Faible
Boost	Élévateur	1	1	Non	Faible
Buck-Boost	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Non	Faible
Flyback	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Oui	Moyen
Half Forward	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Oui	Moyen
Push Pull	Abaisseur/ Elévateur	2	2	Oui	Forte
Half Bridge	Abaisseur/ Elévateur	2	2	Oui	Forte
Full Bridge	Abaisseur/ Elévateur	4	4	Oui	Très Forte

**Tableau II.3** Complexité de chaque type de convertisseur DC-DC.

Dans notre étude nous présentons le principe d'un convertisseur DC/DC de types Boost, qui est utilisé fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseur 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 [18].

### II.3.3 Étage d'Adaptation de Type BOOST

Considérons l'exemple de la figure II.7 correspondant à un convertisseur DC-DC élévateur (boost). Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source charge lorsque la charge a besoin d'une tension supérieure à celle du générateur PV [21]:



**Figure.II.17** Exemple de convertisseur statique DC-DC

Pouvant être utilisé comme adaptateur entre un générateur PV et une charge

Au premier temps ( $\alpha T$ ), le transistor ( $S$ ) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin du premier intervalle. Ensuite, le transistor ( $S$ ) s'ouvre et l'inductance ( $L$ ) s'opposant à la diminution de courant ( $IL$ ), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge ( $R$ ) à travers la diode ( $D$ ) [19].

### II.3.4 Modèle mathématique équivalent

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

Pour le premier intervalle  $\alpha T_s$  :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_{pv}}{dt} = I_{PV} - I_L \quad (\text{II-32})$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = -I_0 \quad (\text{II-33})$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{PV} - R_L I_L \quad (\text{II-34})$$

Pour le deuxième intervalle  $(1 - \alpha) T_s$  :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_{pv}}{dt} = I_{PV} - I_L \quad (\text{II-35})$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \quad (\text{II-36})$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{PV} - V_0 - R_L I_L \quad (\text{II-37})$$

### II.3.5 Modèle approximé du convertisseur Boost

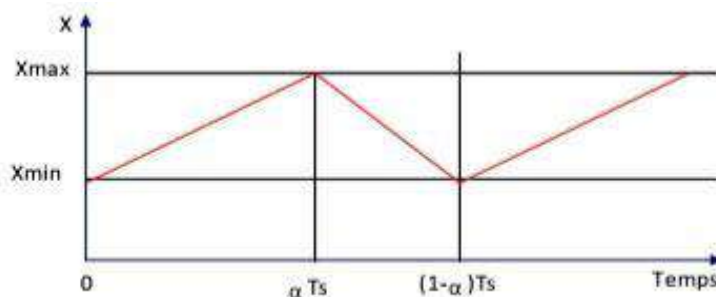
Les systèmes d'équations de base (II-39 à II-41) représentent le convertisseur Boost pour un intervalle du temps  $\alpha T_s$  et  $(1 - \alpha) T_s$  respectivement. Le convertisseur oscillant entre ces deux états avec une fréquence élevée, nous devons trouver une représentation dynamique approximée valable pour les deux intervalles de temps. Pour cela nous considérons que la variation des variables dynamiques  $C1$ ,  $V_L$  est de forme linéaire, en d'autres termes nous pouvons faire une approche d'exponentielle par un segment ( $e^\xi \approx 1 + \xi$  si  $\xi \ll 1$ ) et ainsi la dérivée de ces grandeurs sera constante. Cette approche nous permet de décomposer l'expression de la valeur moyenne de la dérivée de la variable dynamique  $x$  sur les deux intervalles du temps  $\alpha T_s$  et  $(1 - \alpha) T_s$  :

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_{T_s} = \frac{dx}{dt(\alpha T_s)} \alpha T_s + \frac{dx}{dt((1-\alpha)T_s)} (1 - \alpha) T_s \quad (\text{II-38})$$

Où  $\left(\frac{dx}{dt}\right)$  est la valeur moyenne de la dérivée de  $x$  sur un intervalle  $T_s$ . Cette relation est valide si :

$\frac{dx}{dt(\alpha T_s)}$  et  $\frac{dx}{dt((1-\alpha)T_s)}$  sont constants sur les intervalles  $\alpha T_s$  et  $(1 - \alpha) T_s$  respectivement

Dans ce cas la forme exponentielle du courant qui parcourt la self et la tension aux bornes de la capacité est de forme linéaire comme le montre la figure II.18.



**Figure II.18** Allure des variables dynamiques  $I_L$ .

En appliquant la relation (II-38) sur les systèmes d'équations (II-32 a II-37)) obtient les équations qui régissent le système sur un intervalle entier :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_{pv}}{dt} \alpha T_s = (I_{PV} - I_L) \alpha T_s + (1 - \alpha) T_s (I_{PV} - I_L) \quad (\text{II-39})$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} \alpha T_s = -\alpha T_s I_0 (1 - \alpha) T_s (I_L - I_0) \quad (\text{II-40})$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \alpha T_s = (V_{PV} - R_L I_L) \alpha T_s + (1 - \alpha) T_s (V_{PV} - R_L I_L - V_0) \quad (\text{II-41})$$

En arrangeant les termes des équations précédentes, (pour qu'on puisse interconnecter le Boost avec les autres blocs de simulation), on obtient la modélisation dynamique du convertisseur Boost

$$I_L = I_{PV} - C_1 \frac{dV_{pv}}{dt} \quad (\text{II-42})$$

$$I_0 = (1 - \alpha) I_L - C_2 \frac{dV_0}{dt} \quad (\text{II-43})$$

$$V_{PV} = (1 - \alpha) V_0 + L \frac{dI_L}{dt} + R_L I_L \quad (\text{II-44})$$

## II.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'un système photovoltaïque en commençant par le générateur photovoltaïque en observant les caractéristiques du générateur photovoltaïque GPV ainsi que ses performances sous l'influence de quelques paramètres atmosphériques (température et ensoleillement). Puis nous avons détaillé le modèle du convertisseur Boost qui représente étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge.

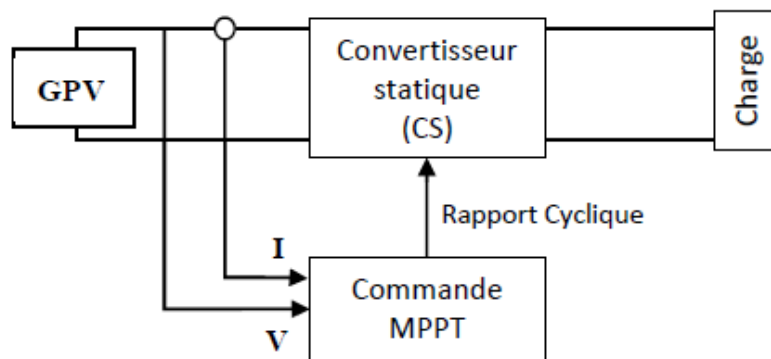
## Chapitre III : Simulation et analyse de MPPT par la commande (P&O)

### III.1.Introduction

Des lois de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'a priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT). 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.

### III.2Principe De La Commande MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (VPPM et IPPM). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT [20]. Il peut être représenté par le schéma de la Figure III.1



*Figure III.1* Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant Un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir.

L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP

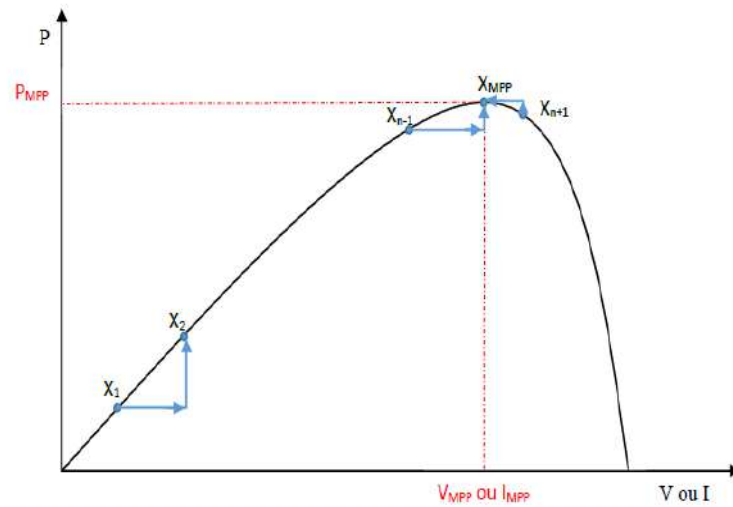


Figure III.2 Principe de la commande MPPT

### III.3.1 Classification Des Commandes MPPT

Nous pouvons classer d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT [21].

#### A) Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectue une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Comme la méthode de Perturb&Observe, les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien Les commandes qui sont basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (VOPT et IOPT) et les paramètres caractéristiques du module PV (VOC et ICC). Notamment, les MPPT inspirées des réseaux de neurones. Dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction [21].

#### B) Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des CS. Par exemple Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie.

Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de  $P_{max}$  est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial [21].

### **III.3.2 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche**

#### **a.MPPT Indirect**

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées ( $I_{sc}$  ou  $V_{oc}$ ), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques [21].

#### **b.MPPT Direct**

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du

Courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du

convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP.

L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction [21]

### III.4 Les Algorithmes MPPT

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants dans ce chapitre nous a permis de bien identifier l'existant et les points qu'il restait à améliorer. Ceci a constitué la base théorique pour nos travaux concernant les simulations dans le chapitre suivant.

#### III.4.1 Approche de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)

La méthode de tension constante également appelée la méthode de circuit ouvert (open circuit voltage) est basée sur la mesure en temps réel de la tension de circuit ouvert VOC et la relation linéaire approximative (III-1) liant cette tension avec la tension de point maximal VMPP du GPV [20-21] :

$$VMPP = K1 * VOC \quad (III-1)$$

Où k1 est une constante de proportionnalité. il est généralement compris entre 0.71 et 0.86. Une fois que k1 est déterminé, le VMPP peut être calculé à l'aide de l'expression précédant (III-1) avec VOC mesurée périodiquement en ouvrant momentanément le convertisseur de puissance (circuit ouvert). La tension VMPP est alors prise comme tension de référence.

Le principe de cette méthode est basé sur la comparaison entre la tension du panneau photovoltaïque réelle VPV et la tension de référence Vref(VMPP). Le signal d'erreur est traité pour rendre  $V = V_{ref}$ . (Figure III.3)

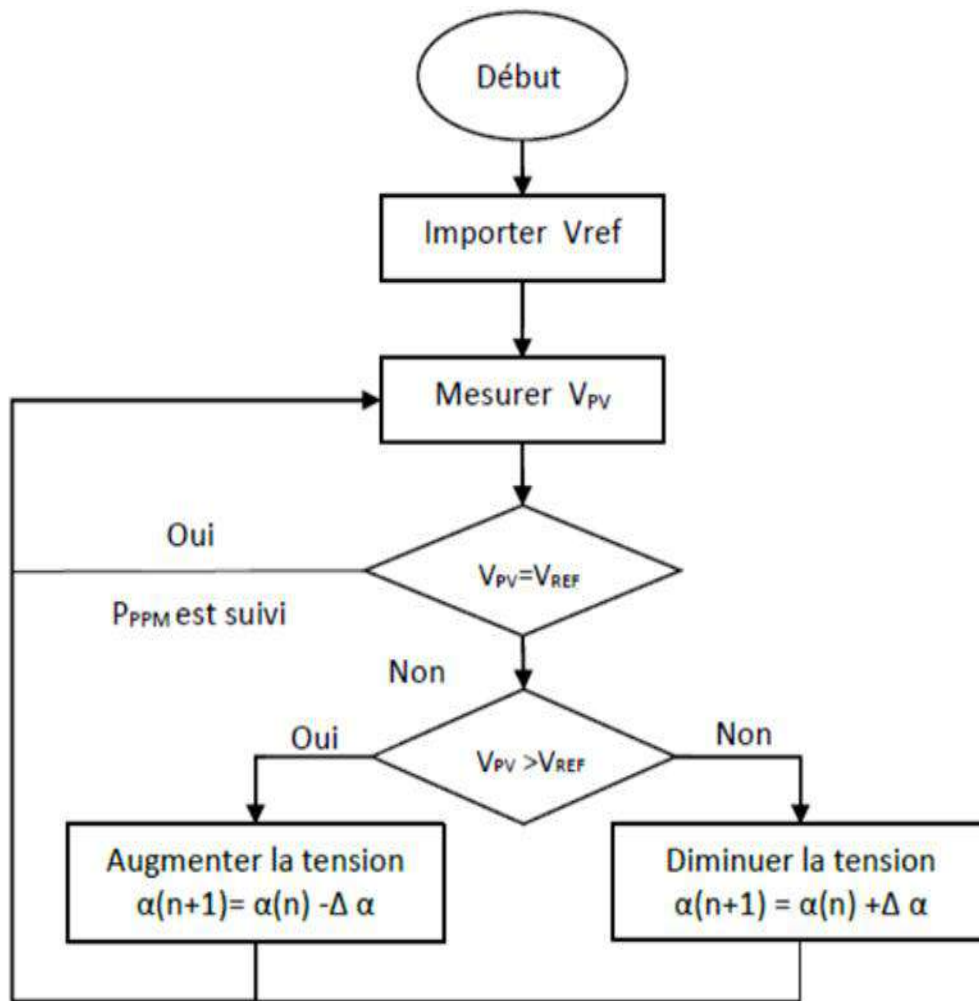


Figure III.3 Algorithme de la Tension Constante

Cette méthode présente deux avantages : la rapidité de la réponse aux fluctuations et l'absence de variations (même infimes) en état stationnaire [20]. Cependant, ces points forts ne peuvent cacher leurs défauts, à 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 Aussi, le MPP n'est pas toujours entre 71% et 78% de la tension Voc. et ne oublier pas la perte de la puissance disponible lors de la déconnection de la charge du GPV [22].

### III.4.2 Approche Du Courant Constant (Constant Current) :

La méthode du Courant constant également appelée la méthode de court-circuit est basée sur la mesure en temps réel du courant de court-circuit  $I_{sc}$  (short-circuit current) et la relation linéaire approximative (III-2) liant cette courant avec le courant de point maximal  $I_{MPP}$  du GPV [21] :

$$I_{MPP} = k_2 * I_{sc} \quad (II-2)$$

Avec  $k_2$  constante de proportionnalité. Comme pour la méthode CV,  $k_2$  est déterminée pour le GPV utilisé. La constante  $k_2$  est généralement comprise entre 0.78 et 0.92 [23].

La mesure du courant ISC durant le fonctionnement est problématique. Un commutateur est généralement ajouté au convertisseur de puissance pour court-circuiter le panneau et mesurer le courant ISC à l'aide d'un capteur de courant.

Pour cette valeur constante du courant, la puissance est calculée pour des tensions différentes. Si la différence entre la puissance calculée et la puissance de crête est supérieure à la valeur de tolérance, alors la valeur de la tension est soit incrémenté ou décrétementé en fonction de la puissance obtenue. Pour que la tension et le courant MPP (IMPP) correspondant, ce procédé est répété jusqu'à ce que la différence se situe dans la plage de tolérance [20]. Figure III.4

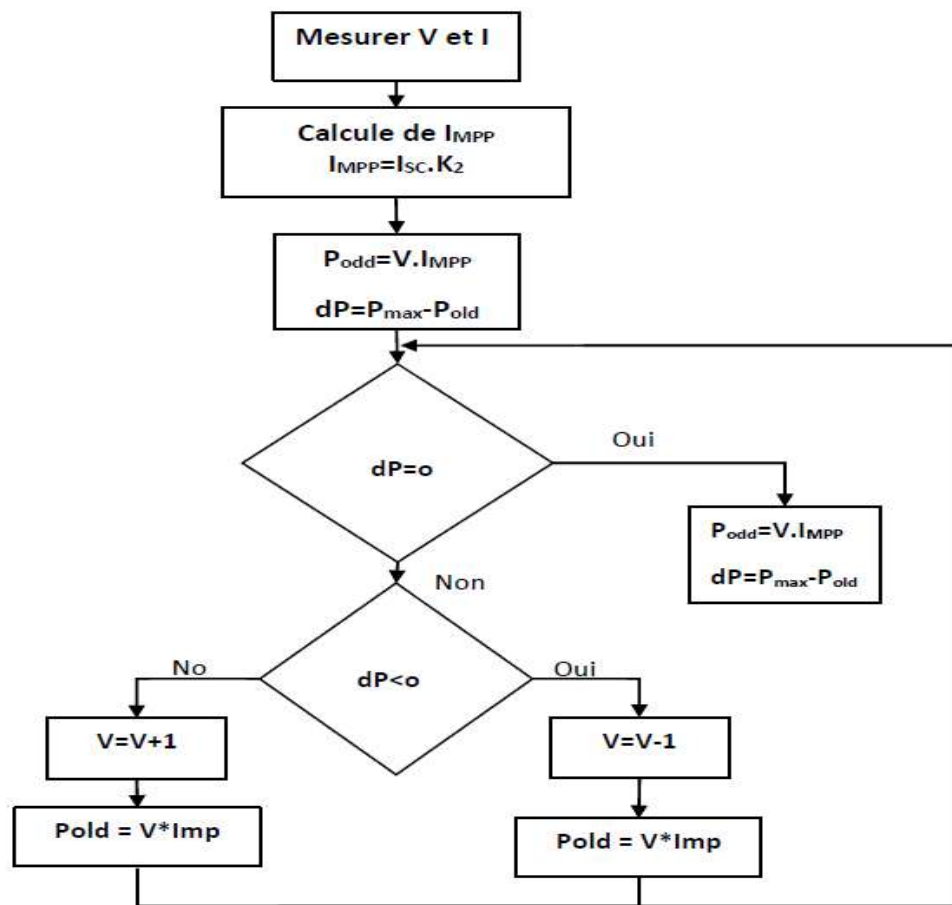


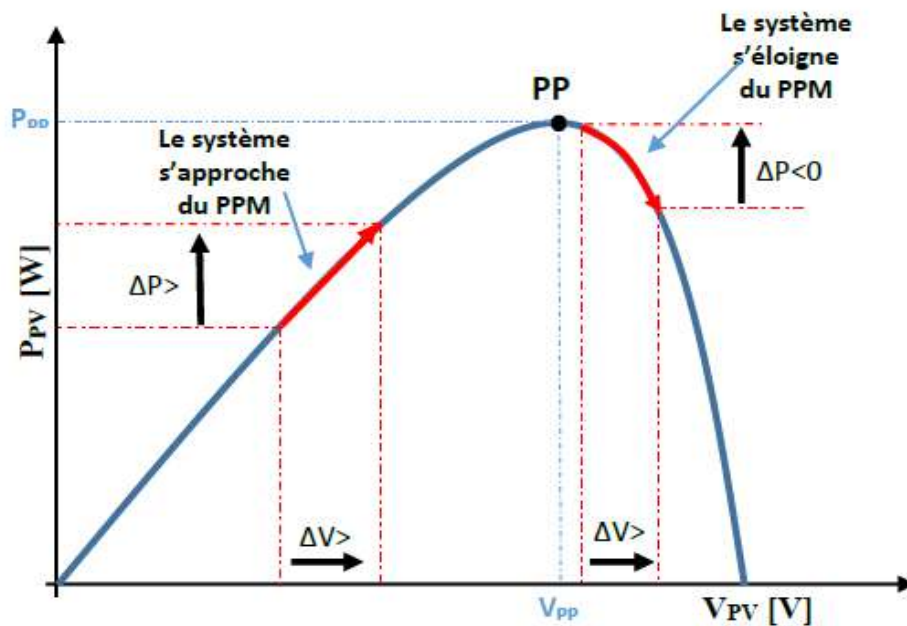
Figure III.4 Algorithme du constant courant

### III.4.3 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension  $V_{ref}$ , ou du courant  $I_{ref}$ , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ( $P=VI$ ) [24]. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du

rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV [25].

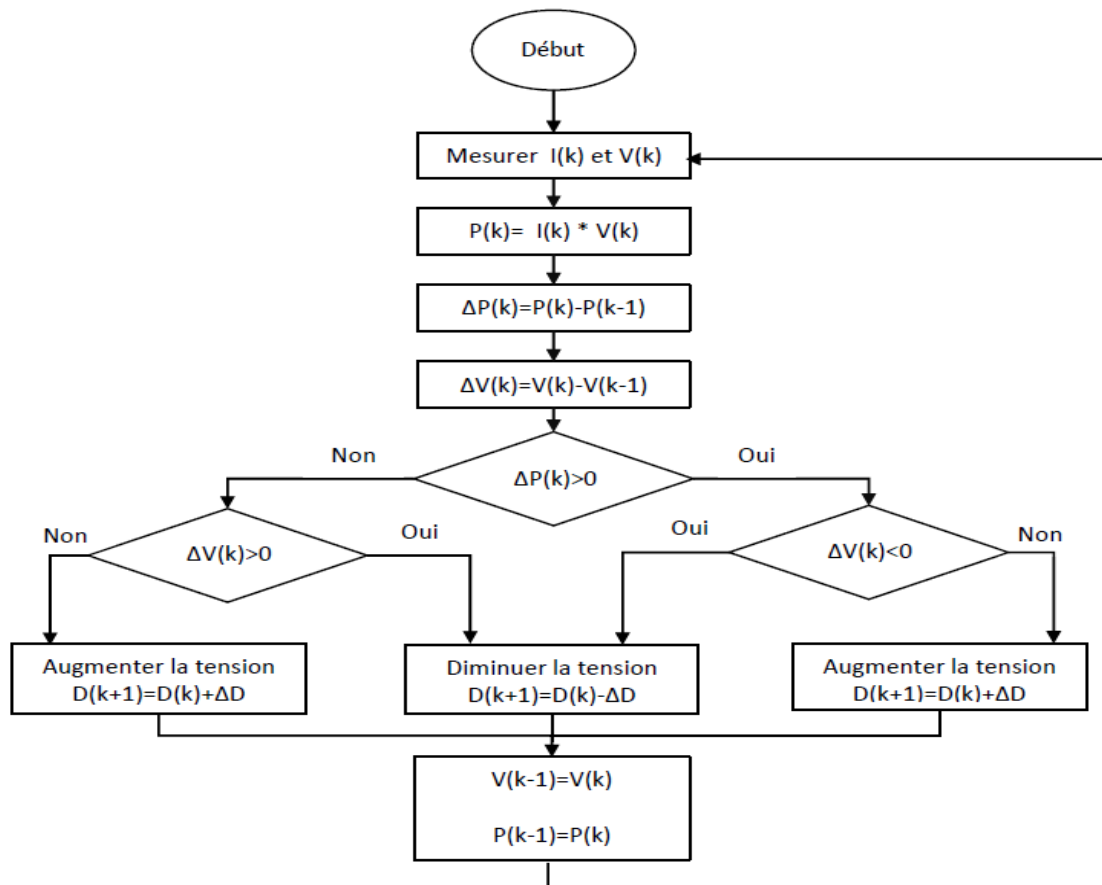
Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension VPV, ce qui engendre une variation de la puissance [26]. Figure III.5 montre qu'on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension VPV engendre un accroissement de la puissance PPV, cela signifie 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. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique P(V), 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 III.5** Recherche du PPM par la méthode (P&O)

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $p(v)$ , 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. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant. L'utilisation d'un microprocesseur est plus appropriée pour la réalisation de la méthode P&O, même si des circuits analogiques peuvent être utilisés [23].

La Figure III.6 représente l'algorithme classique d'une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.



**Figure III.6** l'algorithme de P&O classique

La méthode P&O est largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint[28]. Ces oscillations dépendent de la largeur du pas de la perturbation [2] :

- Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes.
- Si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

Il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser. Un autre inconvénient de la méthode P&O lors d'un changement rapide des conditions

atmosphériques. Figure III.7 Commenant par un point de fonctionnement A, si les conditions climatiques restent constantes, une perturbation  $\Delta V$  dans la tension  $V$  amènera le point de fonctionnement au point B, et le sens de la perturbation sera inversé à cause de la diminution de la puissance. Par contre, si par exemple l'éclairement augmente et déplace la courbe de puissance de  $P_1$  à  $P_2$ , sur un cycle du MPPT, le point de fonctionnement sera déplacé de A vers C. Cela représente une augmentation de la puissance, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qu'il éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continu jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement où il revient au vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance [23].

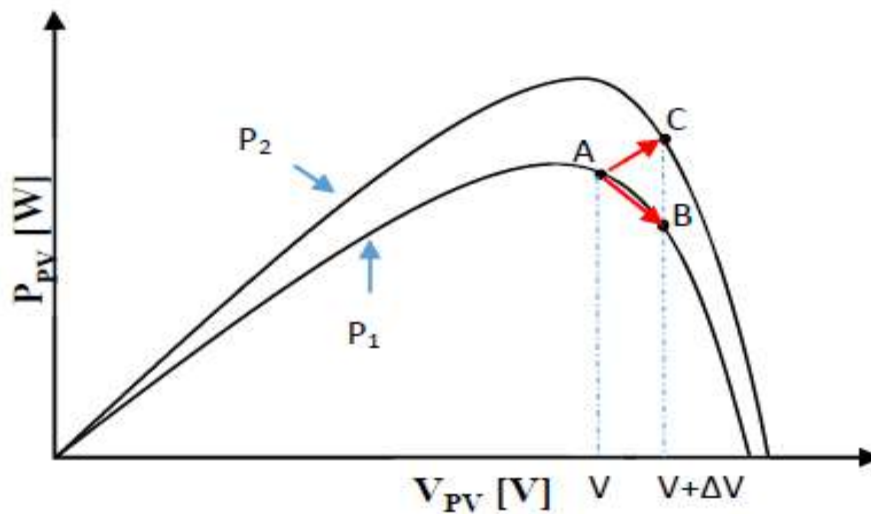


Figure III.7 Divergence de la méthode P&O

Pour remédier à l'inconvénient de la méthode P&O simple, des versions améliorées de l'algorithme P&O sont proposées :

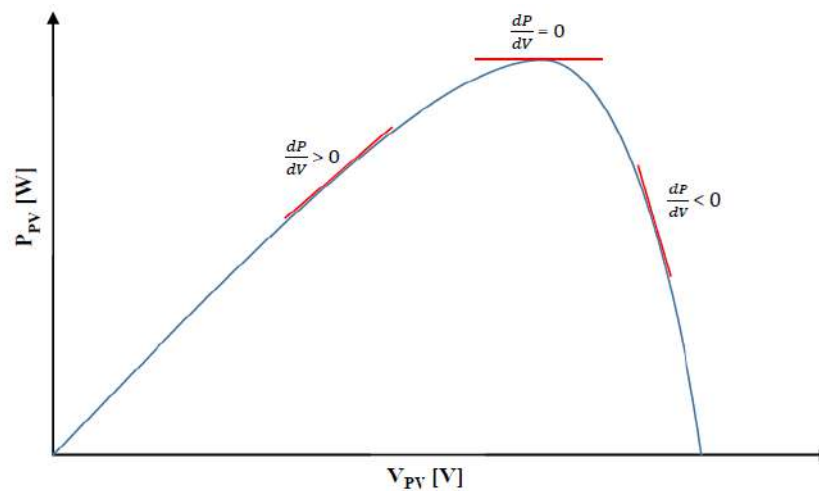
On pourra ajouter le poids d'un troisième point et le comparer aux deux autres avant de prendre une décision sur le sens de la perturbation. L'algorithme de cette méthode (the three-point weightcomparison) a été présenté dans la Figure III.8 avec les trois points sont point actuel A, un point B perturbé d'un point A et un point C doublement perturbée dans le sens opposé du point B [29].

$$\alpha(k) = \alpha(k-1) \pm N \times \left| \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \right| \quad (\text{III-3})$$

La recherche dans ce domaine est toujours en cours.

#### III.4.4 Conductance Incrémentale

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



**Figure III.8** caractéristique de tension-puissance du panneau

On observe que :

$dP/dV = 0$  au PPM

$dP/dV > 0$  à gauche du PPM (III-4)

$dP/dV < 0$  à droite du PPM

Puisque :

La puissance du panneau solaire est donnée par :

$$P = V \times I \quad (III-5)$$

Et sa dérivée partielle est donnée par :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (III-6)$$

Donc, l'équation (III-4) peut être écrite comme suit :

$\Delta I / \Delta V = -I/V$  le point de fonctionnement est sur le PPM

$\Delta I / \Delta V > -I/V$  le point de fonctionnement est à gauche du PPM (III-7)

$\Delta I / \Delta V < -I/V$  le point de fonctionnement est sur la droite du PPM

Le PPM peut être atteint en comparant à chaque instant la valeur de la conductance ( $I_{PV}/V_{PV}$ ) avec celle de l'incrément de conductance ( $dI_{PV}/dV_{PV}$ ). Si l'incrément de conductance ( $dG$ ) est supérieur à l'opposé de la conductance ( $-G$ ), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le PPM. La Figure III.10 montre l'algorithme de cette méthode.

Pratiquement, comme la méthode P&O, cette technique présente des oscillations autour du MPP car il est difficile de remplir la condition  $dP/dV = 0$ , ce qui fait que le système reste toujours en train de la chercher. L'algorithme IncCond est plus complexe que celui du P&O, ce qui engendre un temps d'exécution plus long.

Cette méthode peut être améliorée en amenant le point de fonctionnement près du MPP dans une première étape, puis d'utiliser l'algorithme IncCond pour suivre exactement le MPP dans une deuxième étape. Généralement, le point de fonctionnement initial est réglé pour correspondre à une charge résistive proportionnelle au rapport de la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  sur le courant de court-circuit  $I_{sc}$ . Ces deux solutions assurent que le vrai MPP est poursuivi s'il existe plusieurs maxima locaux. Une manière moins évidente pour effectuer la méthode IncCond est d'utiliser la conductance instantanée et l'incrémentation de la conductance pour générer un signal d'erreur [25]

$$e = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \quad (\text{III-8})$$

D'après l'équation (III-8), l'erreur est nulle au MPP. Un régulateur PI peut donc être utilisé pour annuler cette erreur. La mesure de la tension et du courant instantanés du panneau PV nécessite deux capteurs. La méthode IncCond se prête parfaitement à la commande par DSP ou microcontrôleur, qui peut garder en mémoire les valeurs précédentes de la tension et du courant.

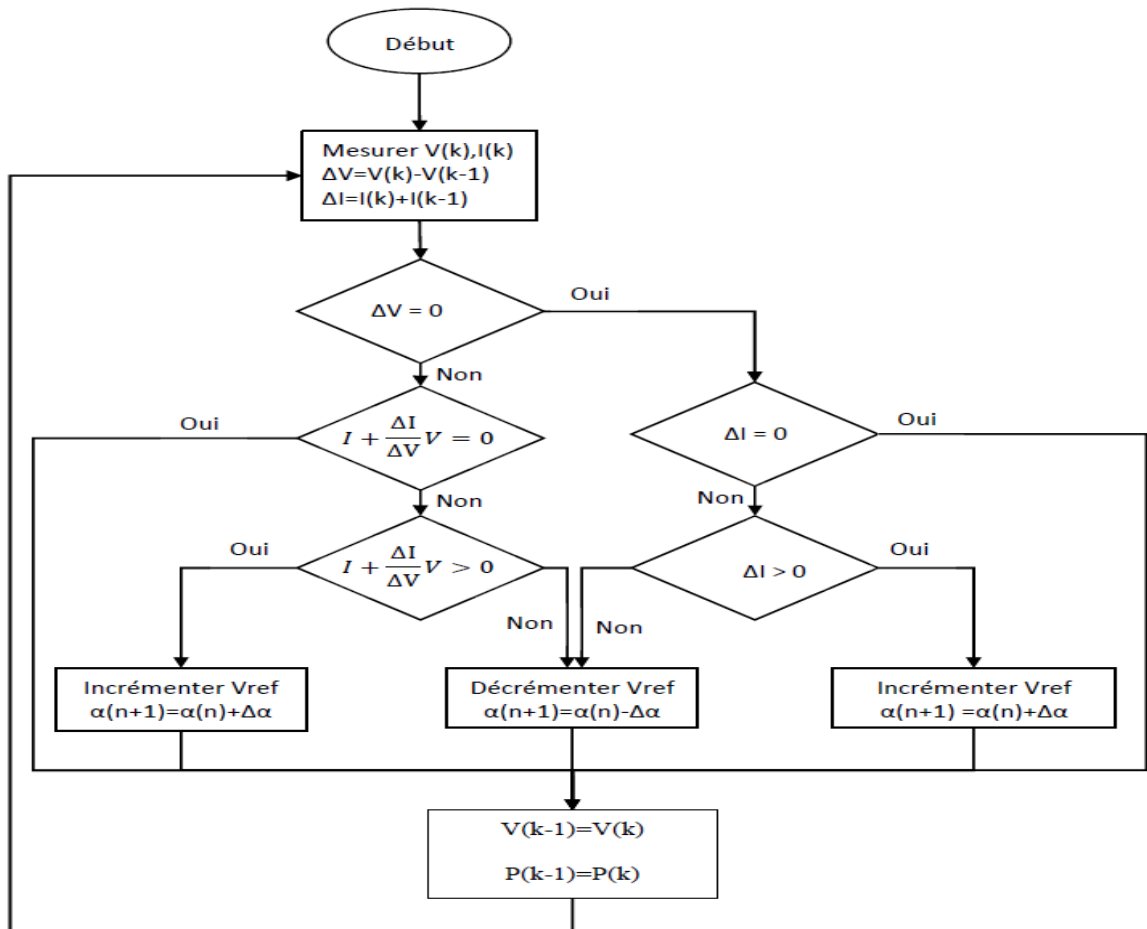


Figure III.9) l'algorithme IncCond classique

Une autre solution est possible encore comme la méthode de p&o .c'est aussi de garder le même algorithme de la méthode IncCond classique ou le pas de perturbation est variable le pas propose est [30] :

$$\alpha(k) = \alpha(k-1) \pm N \times \frac{p(k)-P(k-1)}{V(k)-V(k-1)} \quad (\text{III-9})$$

### III.4.5 La Commande Mppt Flou

La commande basée sur la logique floue (dans la littérature anglo-saxonne FuzzyLogic Control) est de plus en plus populaire grâce à l'évolution des microcontrôleurs [31-32]. L'avantage de cette technique est qu'elle peut fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elle n'a pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De plus, elle peut traiter des non linéarités. Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et le Changement d'erreur  $\Delta E$  et une variable de sortie  $\Delta\alpha$  (variation du rapport cyclique). La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée.

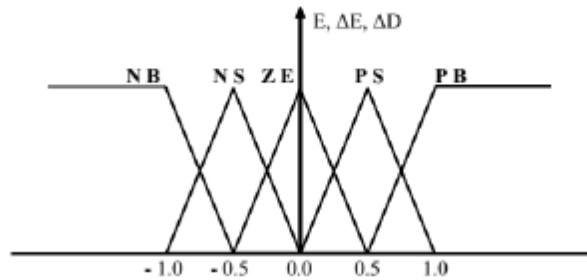
En général, la commande logique floue comprend donc trois étapes communément nommées dans la littérature :

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

Durant la fuzzification, les variables d'entrées numériques sont converties en variable linguistique pouvant prendre les cinq valeurs suivantes :

- NB : NegativeBig,
- NS : Negative Small,
- ZE : Zéro,
- PS : Positive Small,
- PB : Positive Big.

Comme le montre la structure de base de la commande logique floue illustrée en Figure III.10



**Figure III.10** structure de base de la commande floue

Les paramètres d'entrées E et ΔE sont liées aux équations suivantes :

$$E(n) = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)} \quad (\text{III-10})$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1) \quad (\text{III-11})$$

En fonction de leurs évolutions et d'une table de vérité comme indiquée dans le tableau I, une valeur est attribuée au paramètre de sortie Δ α.

E \ ΔE	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

**Tableau III.1**Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue

La variable linguistique assignée à  $\Delta\alpha$ , dépend des différentes combinaisons entre E et  $\Delta E$ . Par exemple, si les variables d'entrée (E et  $\Delta E$ ), ont comme valeur PB et ZE correspondant à un point de fonctionnement très éloigné du PPM, d'après la table de vérité la valeur donnée à la variable de sortie  $\Delta\alpha$  est PB, ce qui implique une forte variation positive du rapport cyclique pour atteindre le PPM. En résumé, les variations du rapport cyclique dépendent de la différence de position entre le point de fonctionnement et un PPM. Ainsi, dès que ce dernier s'approche du PPM, les incréments appliqués à  $\Delta\alpha$  s'affinent jusqu'à atteindre le PPM.

La defuzzification, consiste à convertir cette fois, une variable linguistique en variable numérique. Cette étape ne s'applique qu'à la variable de sortie  $\Delta\alpha$ , afin de pouvoir piloter le convertisseur de puissance pour atteindre le PPM.

En résumé, cette méthode s'avère être très performante lors de changement des conditions climatiques, cependant sa précision en statique est fortement liée à la complexité de la table de vérité employée entraînant la nécessité du choix obligatoire d'un microcontrôleur ayant une grande capacité de calculs tenant compte des nombreuses disparités des paramètres électriques du panneau. Ici, typiquement, cette commande peut présenter les meilleures performances en termes de précision et de rapidité de recouvrement de PPM mais elle entraîne obligatoirement une consommation énergétique non négligeable liée au microprocesseur ainsi qu'un surcoût [33-34].

### **III.4.6 Autres Méthodes**

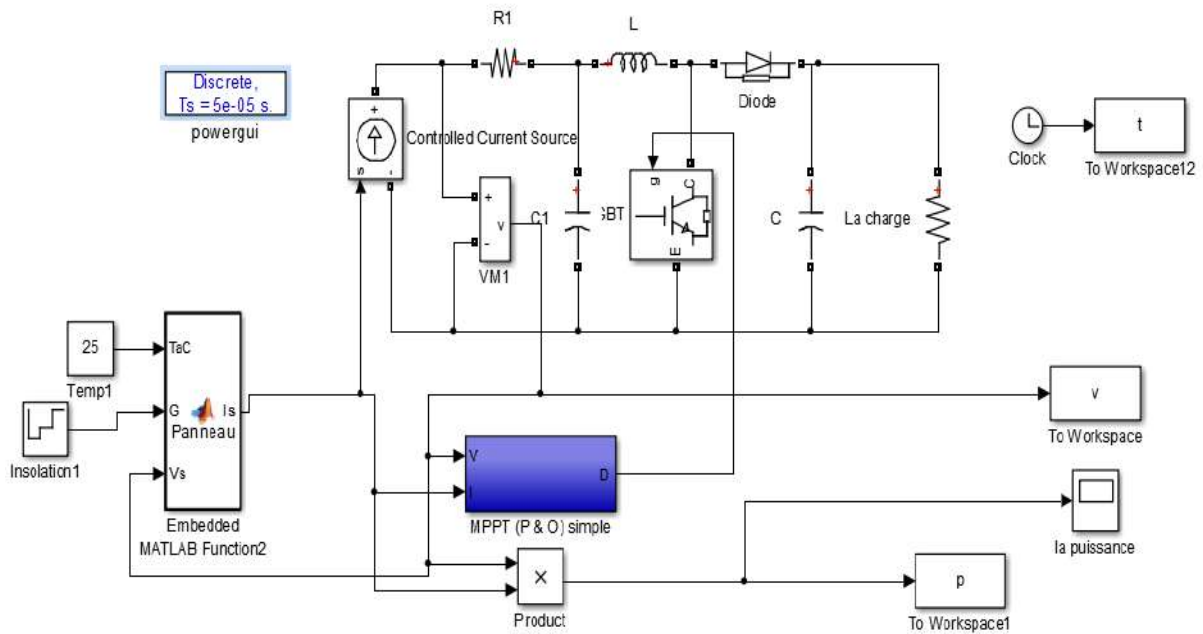
Il existe dans la littérature d'autres algorithmes MPPT plus complexes qui font parfois appel à des techniques nouvelles. On peut citer [35-36] :

- les algorithmes à base de réseau de neurones
- méthode de look-up table
- les algorithmes d'identification en temps réel du MPP
- Méthode de  $\beta$
- l'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance)
- La méthode de balayage du courant (CurrentSweep)

## **III.5 Simulation du système photovoltaïque**

### **III.5.1 L'algorithme perturbation et observation (P&O)**

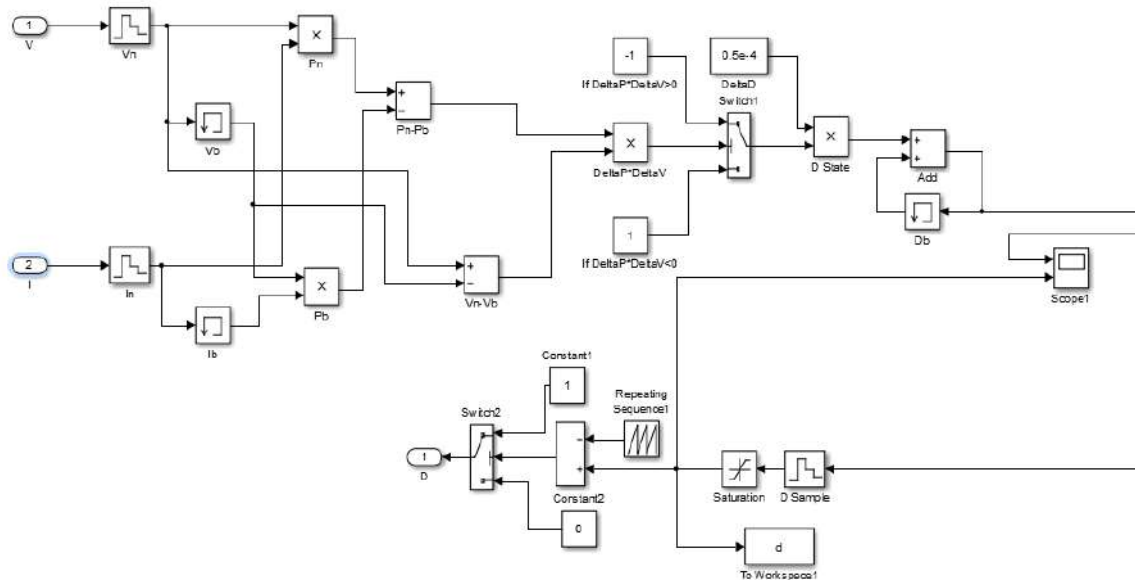
La figure(III.11): présente Schéma bloc SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O), composé avec un module PV avec un hacheur commandé en MPPT qui a pointées la tension et le courant de sortie du module.



**Figure III.11** :Schéma bloc SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O)

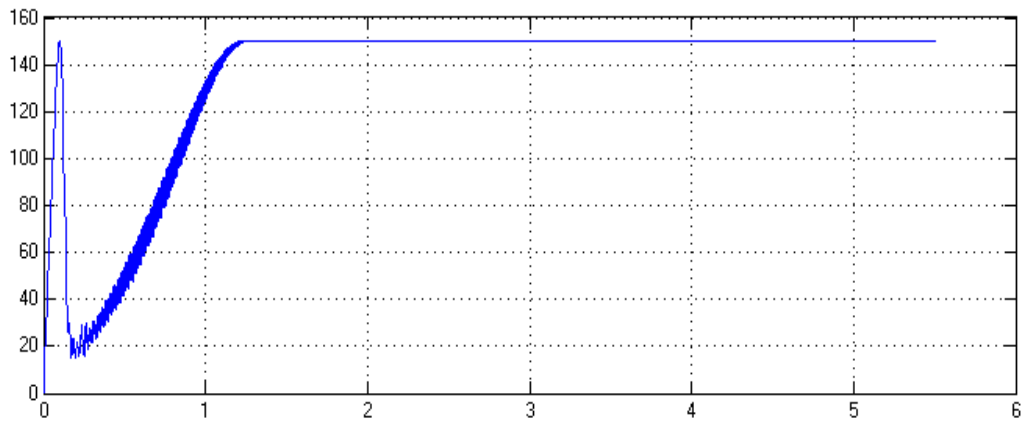
Dans cette simulation on a utilisé un Module photovoltaïque BP SX 150W de BP, un hacheur Boost caractérisé par :  $C1 = 3000 \times 10^{-6} F$ ,  $C2 = 2 \times 10^{-3} F$ ,  $L = 0.01 H$ ,  $R = 0.01 \Omega$ , on a utilisé aussi une commande MPPT de type P&O et une charge  $R = 500 \Omega$ .

On représente le modèle mathématique de l'Algorithme (P&O) sous le programme MATLAB Comme suit :



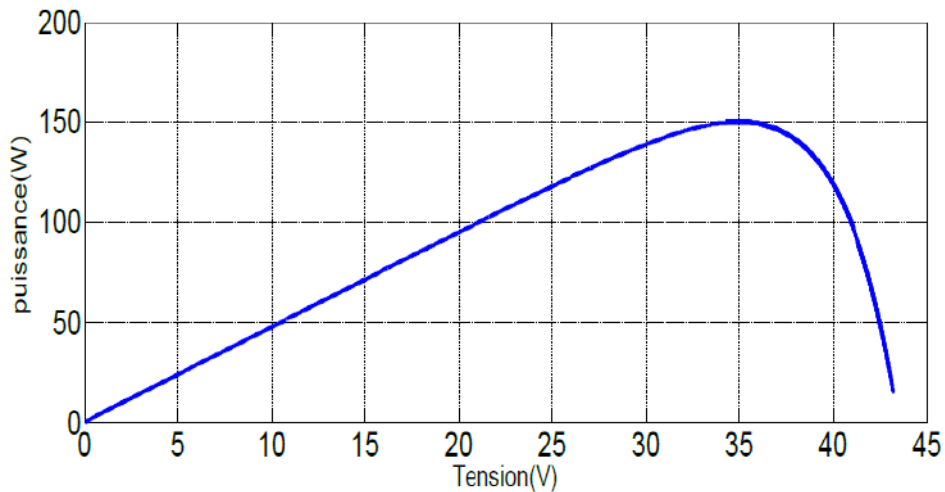
**Figure III.12** Schéma de simulation de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P&O)

Les résultats de la simulation du système PV utilisant l'algorithme de perturbation et d'observation sont présentés à les figures ci-dessus.



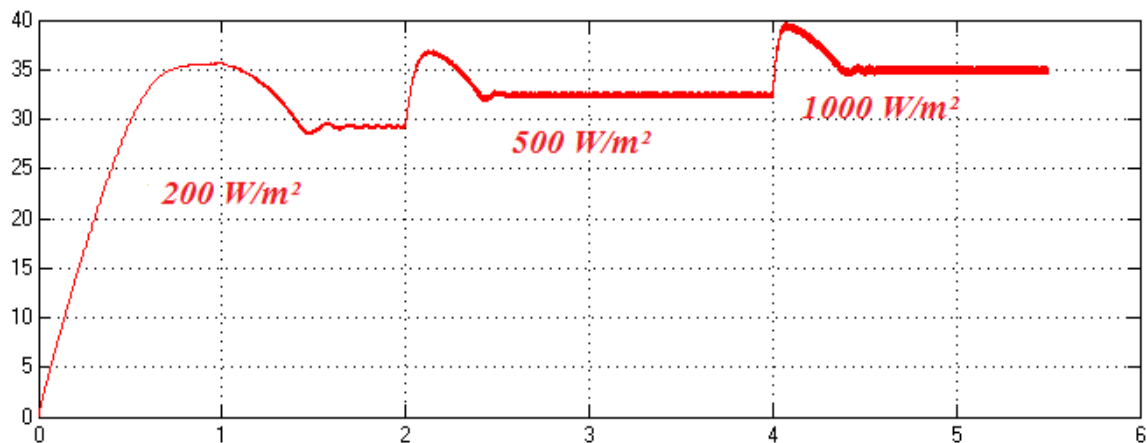
**Figure III.13 :** Allure de la puissance en fonction de temps pour ( $T=25^{\circ}\text{C}, G=1000\text{W}/\text{m}^2$ ).

De la figure (III.13), On remarque que la puissance met un temps d'oscillation de (1.2s) pour se stabiliser à la valeur maximale de la puissance (150W).

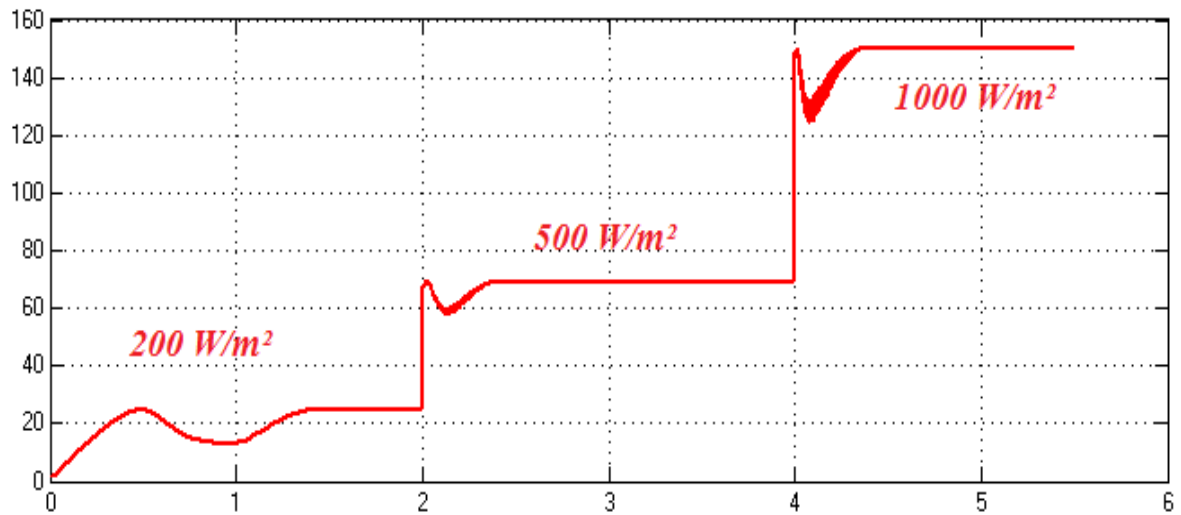


**Figure III.14:** Allure de la puissance en fonction de tension pour ( $T=25^{\circ}\text{C}, G=1000\text{W}/\text{m}^2$ )

Les figures(III.15) (III.16) suivantes présente allure de puissance et de tension en fonction de temps d'un système photovoltaïque (panneau 150W) commandé par un contrôleur P&O dans une température constante et éclairements variable ( $T=25^{\circ}\text{C}, G=200, 500, 1000\text{W}/\text{m}^2$ ) :

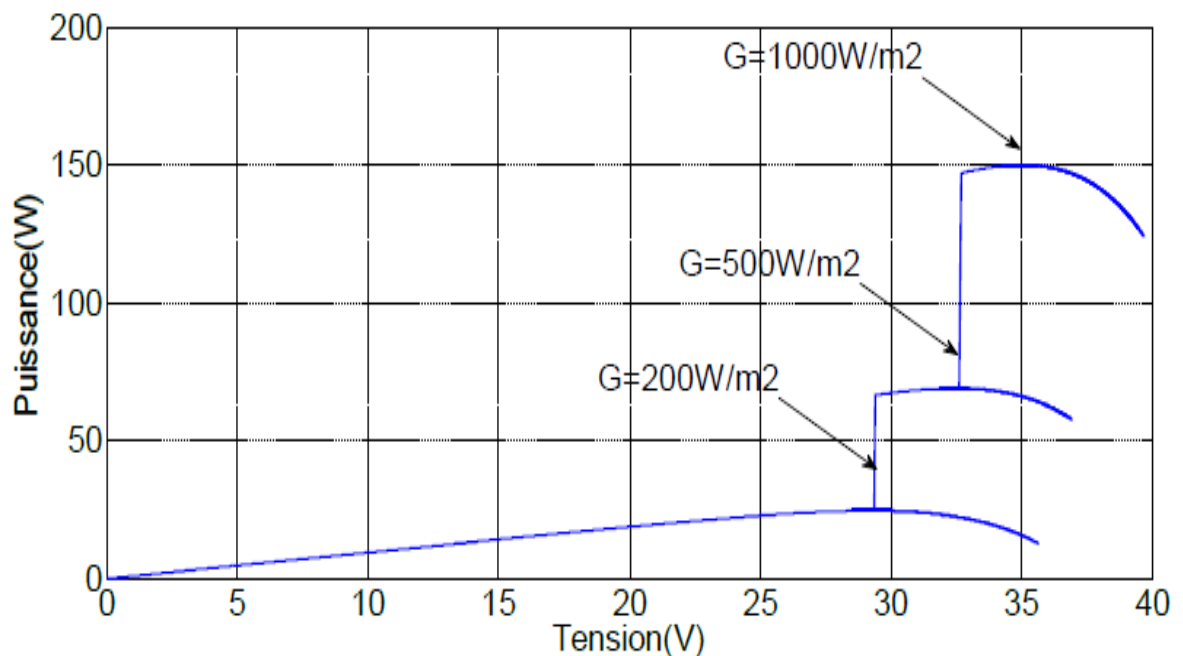


**Figure III.15 :** Allure de la tension générée en utilisant pas variable en fonction de temps ( $T=25^{\circ}\text{C}, G=200, 500, 1000\text{W}/\text{m}^2$ )

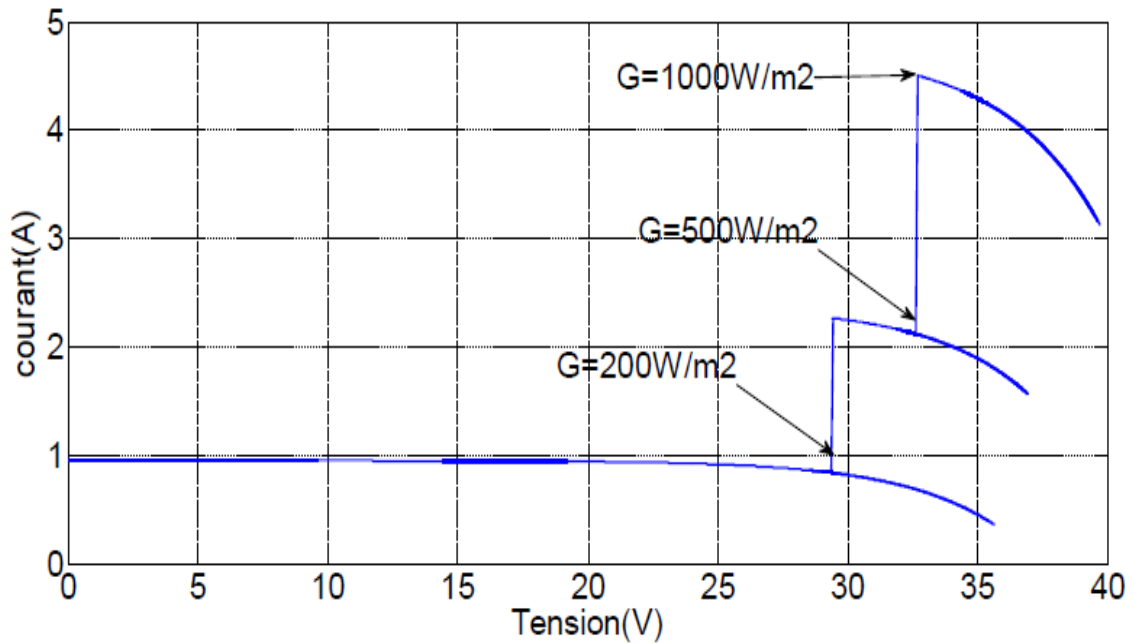


**Figure III.16 :** Allure de la puissance générée en utilisant pas variable en fonction de temps ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $G=200, 500, 1000 \text{ W/m}^2$ )

Dans un premier temps, nous avons soumis le système à une variation de luminosité de 200, 500 à 1000  $\text{W/m}^2$  à l'instant  $t=2\text{s}$  et  $t=4\text{s}$ . Par conséquent, nous constatons dans les Figures une augmentation de la tension qui induit une diminution de la puissance, le point de fonctionnement du système s'éloigne. Les figures(III.17) (III.18) suivantes présente allure de puissance et le courant en fonction de la tension d'un système photovoltaïque (panneau 150W) commandé par un contrôleur P&O dans une température constante et différents éclairagements ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $G=200, 500, 1000 \text{ W/m}^2$ ):



**Figure III.17 :** Allure de la puissance en fonction de la tension ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $G=200, 500, 1000 \text{ W/m}^2$ )



**Figure III.18 :** Allure de courant en fonction de la tension ( $T=25^\circ\text{C}$ ,  $G=200, 500, 1000\text{ W/m}^2$ )

D'après les figures obtenues on remarque que la puissance réagit en fonction de l'éclairement et ce fixe toujours à la puissance maximale et la même pour la courbe de courant.

### III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un aperçu des convertisseurs statiques (convertisseur DC-DC), courant continu (boost-buck-cuk). Nous avons présenté quelques méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrément de l'inductance (Inc.CoN), et méthode de perturbation et observation (P&O). Nous avons présenté la simulation d'un système PV utilisant la méthode (P&O), nous avons remarqué que la puissance dépend de l'éclairement et ce fixe toujours à la puissance maximale.

L'algorithme (P&O) présente des bons résultats mais les oscillations et l'overshoot temps de réponse sont les inconvénients majeurs, pour ce la dans la suite de notre travail nous allons étudier l'optimisation de puissance maximale (MPPT) en utilisant nouvelle méta-heuristique appelée Grey Wolf Optimizer (GWO) pour comparer les deux méthodes P&O Classique et P&O - GWO.

## **Chapitre IV: Optimisation de la MPPT par l'Algorithme de la Loups Gris (MPPT-GWO).**

### **IV.1 Introduction**

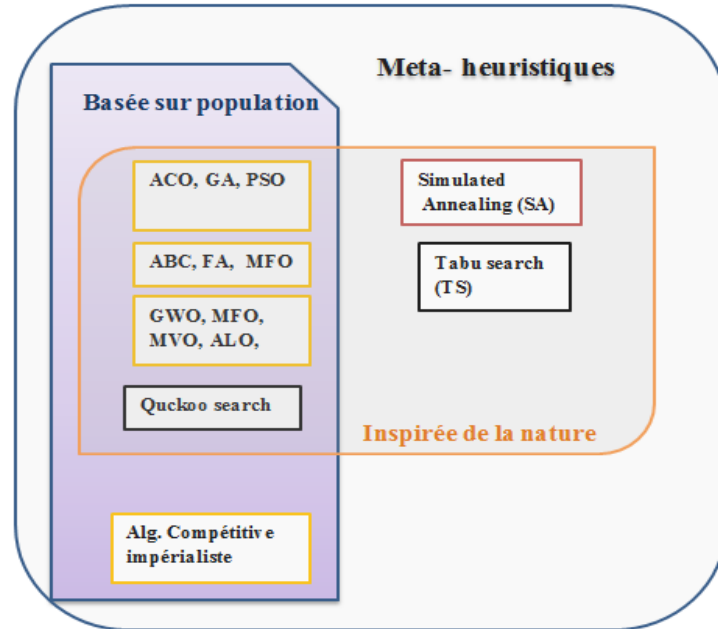
Ce travail propose une nouvelle méta-heuristique appelée Grey Wolf Optimizer (GWO) inspirée des loups gris (*Canis lupus*). L'algorithme GWO imite la hiérarchie de leadership et le mécanisme de chasse des loups gris dans la nature. Quatre types de loups gris tels que alpha, bêta, delta et oméga sont utilisés pour simuler la hiérarchie de leadership. De plus, les trois étapes principales de la chasse, de la recherche de proies, de l'encerclement des proies et de l'attaque des proies, sont mises en œuvre. L'algorithme est ensuite comparé à 29 fonctions de test bien connues, et les résultats sont vérifiés par une étude comparative avec Particle Swarm Optimization (PSO), Gravitational Search Algorithm (GSA), Differential Evolution (DE), Evolutionary Programming (EP) et Evolution Strategy (ES). Les résultats montrent que l'algorithme GWO est capable de fournir des résultats très compétitifs par rapport à ces méta-heuristiques bien connues.

### **IV.2 Algorithmes métaheuristiques ou intelligents**

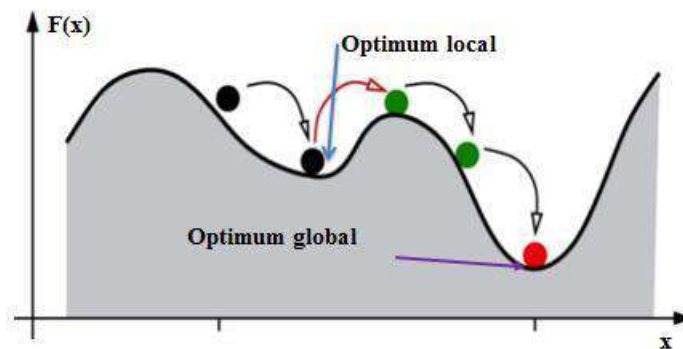
Les métaheuristiques sont un ensemble d'algorithmes d'optimisation heuristiques qui visent à la résolution des problèmes d'optimisation difficiles. Elles sont souvent inspirées par des systèmes naturels, qu'ils soient pris en physique (cas du recuit simulé « SA »), en biologie de l'évolution (cas des Algorithmes Génétiques GA) ou encore du comportement social dans la nature (cas des algorithmes de colonies de fourmis ou de l'optimisation par essais particuliers) [37].

Ces techniques métaheuristiques peuvent être classées en deux groupes: les méthodes basées sur population permettent d'atteindre des optimums globaux ou proche d'eux, comme les systèmes experts (ES), réseaux de neurones artificiels (ANN), génétique algorithme (GA), ainsi que les méthodes à solution unique comme le recuit simulé (SA). Les méthodes métaheuristiques ont prouvé leurs efficacités dans le domaine de l'optimisation mono-objectif. Actuellement les recherches qui utilisent ces algorithmes sont évoluées pour permettre la résolution des problèmes d'optimisation multi-objective, en tenant compte de plusieurs contraintes et de nouvelles configurations des réseaux électriques surtout avec la pénétration des sources d'énergie renouvelable où la résolution du problème d'optimisation constitue un défi. Un exemple de classification de ces méthodes est montré dans la figure IV.1

[38]. En effet, une grande variété des techniques d'optimisation sont appliquées, et un grand nombre d'articles sont publiés dans ce sens. Parmi ces techniques, on peut citer aussi ; recherche par colonie des formées (ACO), Colonie d'abeilles Artificielles (ABC), Différentiel Evolutionnaire (DE), plus des techniques d'intelligence artificielle hybrides [39].



**Figure IV.1** :Exemple de classification des méthodes métaheuristiques [39].



**Figure IV.2** :Exemple de l'optimum global d'un problème d'optimisation.

En effet, l'optimisation basée sur l'utilisation des algorithmes métaheuristiques démarrent avec un certain réglage initial des variables de contrôle. Ces dernières évoluent à travers la procédure d'optimisation pour obtenir l'optimum global minimal/maximal d'une fonction objective. La fonction objective est le modèle mathématique qui affecte une valeur pour chaque solution dans l'espace de recherche [40]. En commençant à partir d'une solution initiale conçue par quelques heuristiques ou méta heuristiques et puis améliorée itérativement jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt choisi soit satisfait [41]. Le critère d'arrêt peut être un temps

écoulé, nombre d'itérations,...etc.

La fonction de l'algorithme métaheuristique veille de façon à déterminer la solution finale. La recherche est effectuée sous la procédure caractérisant chaque algorithme métaheuristique, mais c'est une façon qui intelligemment tend à trouver la bonne solution possible. Cependant, il n'y a pas de garantie que la solution trouvée par la métaheuristique est toujours la bonne[42].

La procédure étape par étape de tout type d'optimisation métaheuristique est donnée par :

- Initialisation de la population dans le domaine de recherche par l'attribution des valeurs aléatoires à la population.
- Evaluation de la fitness pour chaque individu de la population.
- Générer une nouvelle population par la reproduction des individus sélectionnés à travers les opérations évolutionnaires, comme la mutation, croisement...etc.
- En bouclant avec l'étape 2 jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit satisfait.

Tous les algorithmes métaheuristiques utilisent certain compromis de exploitation locale et exploration globale, et une variété des solutions lesquelles rarement réalisées à travers le choix aléatoire. Ce dernier fournit une bonne manière de se déplacer de la recherche locale vers la recherche globale figure IV.2, ainsi, les deux concepts principaux des algorithmes métaheuristiques sont [42], [43]:

- Désertification ou exploration : qui est le moyen de générer des solutions diverses de sorte que l'espace de recherche soit exploré à une échelle globale.
- L'intensification ou exploitation : qui est le moyen de visé sur la recherche dans une région locale par exploiter l'information qu'une bonne solution actuelle est trouvée dans la région, cette dernière est en combinaison avec la bonne solution déjà trouvée, permettent d'obtenir la bonne solution du problème.

### **IV.3 Méthode d'optimisation par les loups gris GWO**

La méthode GWO est un nouveau algorithme proposé par le chercheur Iranien **Mirjalili**, en 2014 [60].L'algorithme GWO utilise la simulation de l'autorité sociale représenté par le comportement d'encerclement de la victime dans le but d'obtenir la solution optimale du problème à optimiser. Cet algorithme imite la technique de domination hiérarchique des loups gris pendant la l'opération de la chasse pour la victime, et ce jusqu'à l'arrêt de leurs mouvements. Le GWO est similaire aux algorithmes basés sur population dans la recherche de la solution, par simuler le comportement naturel des loups gris dans leur vie sociale, lorsqu'ils cherchent leur nourriture.

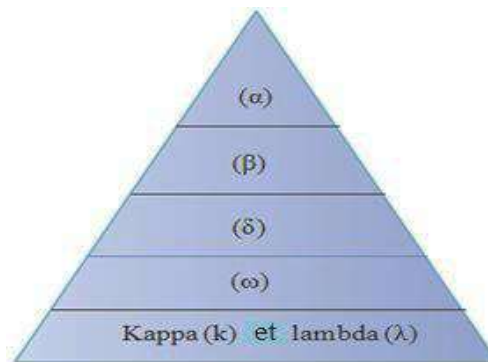
Le premier niveau représente le commandement du groupe appelé (alpha), le deuxième niveau dans la hiérarchie est appelé (beta), qui aide alpha à prendre de la décision. Le niveau suivant contient delta et oméga qui et sont les rangs les plus bas qui mangent les derniers après les loups des autres niveaux. En effet, les loups sont des chasseurs du groupe qui connaissent trois étapes principales : chasser, encercler et attaquer. L'algorithme démarre avec un nombre donné des loups gris avec leurs positions générées arbitrairement.

## IV.4 Grey Wolf Optimizer (GWO)

Dans cette section, l'inspiration de la méthode proposée est d'abord discutée. Ensuite, le modèle mathématique est fourni.

### IV.4.1 Inspiration

Le loup gris (*Canis lupus*) appartient à la famille des canidés. Les loups gris sont considérés comme des prédateurs au sommet, c'est-à-dire qu'ils sont au sommet de la chaîne alimentaire. Les loups gris préfèrent généralement vivre en meute. La taille du groupe est de 5 à 12 sur moyenne. Il est particulièrement intéressant de noter qu'ils ont une hiérarchie sociale dominante très stricte, comme le montre Figure IV.3.



**figure IV.3 :** Hiérarchie du loup gris (la dominance diminue de haut en bas)

Les leaders sont un mâle et une femelle, appelés alphas. L'alpha est principalement responsable de la prise de décision sur la chasse, le lieu de sommeil, l'heure de se réveiller, etc. Les décisions de l'alpha sont dictées à la meute. cependant, une sorte de comportement démocratique a également été observé, dans lequel un alpha suit les autres loups dans le pack. Lors des rassemblements, toute la meute reconnaît l'alpha en maintenant la queue baissée. Le loup alpha est aussi appelé le loup dominant puisque ses ordres doivent être suivis par la meute [44]. Les loups alpha ne sont que autorisés à s'accoupler dans la meute. Fait intéressant, l'alpha n'est pas nécessairement le membre le plus fort de la meute mais le mieux en termes de gestion du pack. Cela montre que l'organisation et la discipline d'une meute sont bien plus

important que sa force. Le deuxième niveau de la hiérarchie des loups gris est la version bêta. Les bêtas sont des loups subordonnés qui aident l'alpha dans la prise de décision ou d'autres activités du pack. Le loup bêta peut être un mâle ou une femelle, et il/elle est probablement le meilleur candidat pour être l'alpha au cas où l'un des loups alpha déciderait ou deviendrait très vieux.

Le loup bêta doit respecter l'alpha, mais commande également les autres loups de niveau inférieur. Il joue le rôle de conseiller de l'alpha et disciplinier de la meute. Le bêta renforce les commandes de l'alpha tout au long de la pack et donne un retour à l'alpha.

Le loup gris le moins bien classé est l'oméga. L'oméga joue le rôle de bouc émissaire. Les loups Omega ont toujours se soumettre à tous les autres loups dominants. Ce sont les derniers loups autorisés à manger. Cela peut sembler l'oméga n'est pas un individu important dans le pack, mais il a été observé que l'ensemble du pack fait face à l'intérieur combats et problèmes en cas de perte de l'oméga. Cela est dû à l'évacuation de la violence et de la frustration de tous

loups par le(s) oméga(s). Cela aide à satisfaire l'ensemble de la meute et à maintenir la structure de domination. Dans certains cas, l'oméga est aussi la baby-sitter de la meute.

Si un loup n'est pas un alpha, un bêta ou un oméga, il est appelé subordonné (ou delta dans certaines références). Les loups doivent se soumettre aux alphas et aux bêtas, mais ils dominent l'oméga.

Scouts, sentinelles, anciens, chasseurs et les gardiens appartiennent à cette catégorie. Les scouts sont chargés de surveiller les limites du territoire et avertir le pack en cas de danger. Les sentinelles protègent et garantissent la sécurité de la meute. Les aînés sont les loups expérimentés qui étaient alpha ou bêta. Les chasseurs aident les alphas et les bêtas lors de la chasse aux proies et fournir de la nourriture pour la meute. Enfin, les gardiens sont chargés de soigner les faibles, les malades et les blessés loups dans la meute.

En plus de la hiérarchie sociale des loups, la chasse en groupe est un autre comportement social intéressant des loups gris. Selon Muro et al. [45] les principales phases de la chasse au loup gris sont les suivantes :

- Suivi, poursuite et approche de la proie
- Poursuivre, encercler et harceler la proie jusqu'à ce qu'elle cesse de bouger
- Attaque vers la proie

Ces étapes sont illustrées dans Figure IV.4



**figure IV.4 :**Comportement de chasse des loups gris : (A) chasse, approche et suivi des proies (B-D) poursuite, harcèlement et encerclement (A) situation stationnaire et attaque [62]

Dans ce travail, cette technique de chasse et la hiérarchie sociale des loups gris sont modélisées mathématiquement en afin de concevoir GWO et d'effectuer l'optimisation.

#### IV.4.2 Modèle mathématique et algorithme

Dans cette sous-section, les modèles mathématiques de la hiérarchie sociale, traquant, encerclant et attaquant les proies sont prévus. Ensuite, l'algorithme GWO est décrit.

##### IV.4.2.1. Hierarchie sociale:

Afin de modéliser mathématiquement la hiérarchie sociale des loups lors de la conception de GWO, nous considérons la solution la plus adaptée comme alpha ( $\alpha$ ). Par conséquent, les deuxième et troisième meilleures solutions sont nommées bêta ( $\beta$ ) et delta ( $\delta$ ) respectivement. Le reste des solutions candidates est supposé être oméga ( $\omega$ ). Dans l'algorithme GWO, la chasse (optimisation) est guidée par  $\alpha, \beta$ , et  $\delta$ . Les loups suivent ces trois loups.

##### IV.4.2.2. Encercler la proie:

Comme mentionné ci-dessus, les loups gris encerclent leurs proies pendant la chasse. Afin de modéliser mathématiquement l'encerclement comportement, les équations suivantes sont proposées :

$$D = |CX_p(t) - X(t)| \quad (IV-1)$$

$$X(t+1) = X_p(t) - A \cdot D \quad (IV-2)$$



**IV.4.2.3 Chasse:**

Les loups gris ont la capacité de reconnaître l'emplacement des proies et de les encercler. La chasse est généralement guidée par l'alpha. Le bêta et le delta pourraient également participer à la chasse occasionnellement. Cependant, dans une recherche abstraite l'espace, nous n'avons aucune idée de l'emplacement de l'optimum (proie). Afin de simuler mathématiquement la chasse comportement des loups gris, nous supposons que l'alpha (meilleure solution candidate) bêta et delta ont une meilleure connaissance de l'emplacement potentiel des proies. Par conséquent, nous enregistrons les trois premières meilleures solutions obtenues jusqu'à présent et obliger les autres agents de recherche (y compris les omégas) à mettre à jour leurs positions en fonction de la position de meilleur agent de recherche. Les formules suivantes sont proposées à cet égard.

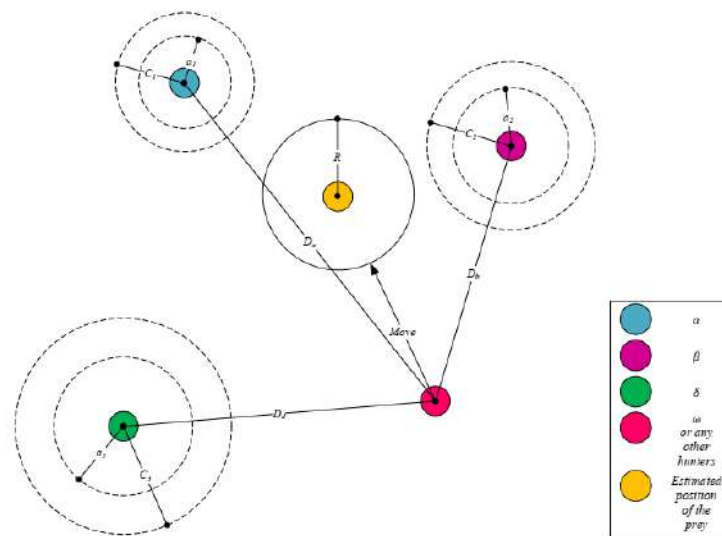
$$D_\alpha = |C_1 \cdot X_\alpha(t) - X(t)|, D_\beta = |C_2 \cdot X_\beta(t) - X(t)|, D_\delta = |C_3 \cdot X_\delta(t) - X(t)| \text{ (IV-5)}$$

$$X_1 = X_\alpha - A_1 \cdot D_\alpha, X_2 = X_\beta - A_2 \cdot D_\beta, X_3 = X_\delta - A_3 \cdot D_\delta \text{ (IV-6)}$$

$$X(t+1) = (X_1 + X_2 + X_3) / 3 \text{ (IV-7)}$$

figure.IV.5 montre comment un agent de recherche met à jour sa position selon alpha, bêta et delta dans un espace de recherche 2D.

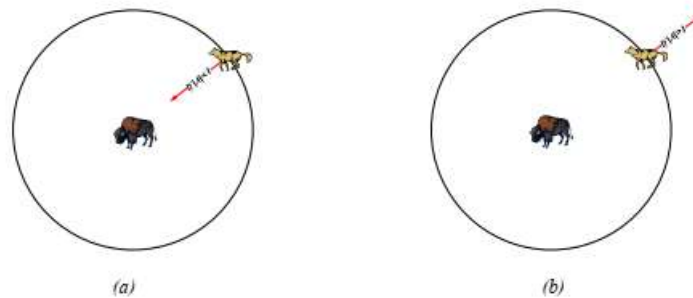
On peut observer que la position finale serait dans un endroit aléatoire à l'intérieur d'un cercle qui est défini par les positions alpha, bêta et delta dans l'espace de recherche. En d'autres termes, alpha, bêta et delta estiment la position de la proie, et les autres loups mettent à jour leurs positions au hasard autour de la proie.



**figure.IV. 6:**Mise à jour du poste dans GWO

**IV.4.2.4. Attaquer une proie (exploitation) :**

Comme mentionné ci-dessus, les loups gris finissent la chasse en attaquant la proie lorsqu'elle s'arrête de bouger. Afin de modéliser mathématiquement en approchant de la proie nous diminuons la valeur de  $\alpha$ . Notez que la plage de fluctuation de  $\alpha$  est également diminuée de  $2$  à  $0$ . En d'autres termes  $\alpha$  est une valeur aléatoire dans l'intervalle  $[-a, a]$  où  $a$  est diminué de  $2$  à  $0$  au fil des itérations. Lorsque les valeurs aléatoires de  $\alpha$  sont dans  $[-1, 1]$ , la position suivante d'un agent de recherche peut être dans n'importe quelle position entre sa position actuelle et la position de la proie. La figure IV.7 (a) montre que  $|\alpha| < 1$  force les loups à attaquer vers la proie.



**figure.IV.7** Attaquer une proie ou rechercher une proie

Avec les opérateurs proposés jusqu'à présent, l'algorithme GWO permet à ses agents de recherche de mettre à jour leur position en fonction de l'emplacement de l'alpha, du bêta et du delta ; et attaque vers la proie. Cependant, l'algorithme GWO est sujettes à la stagnation des solutions locales avec ces opérateurs. Il est vrai que le mécanisme d'encerclement proposé montre l'exploration dans une certaine mesure, mais GWO a besoin de plus d'opérateurs pour mettre l'accent sur l'exploration.

**IV.4.2.5. Recherche de proies (exploration) :**

Les loups gris recherchent principalement en fonction de la position de l'alpha, du bêta et du delta. Ils divergent de chacun l'autre pour rechercher des proies et converger pour attaquer les proies. Afin de modéliser mathématiquement la divergence, nous utilisons avec des valeurs aléatoires supérieures à  $1$  ou inférieures à  $-1$  pour obliger l'agent de recherche à s'écarter de la proie. Cela met l'accent sur l'exploration et permet à l'algorithme GWO de rechercher globalement. La figure IV.6 (b) montre également que  $|\alpha| > 1$  force

les loups gris à s'écarter de la proie pour, espérons-le, trouver une proie plus adaptée. Une autre composante de GWO qui favorise l'exploration est. Comme on peut le voir dans l'équation (IV-4), le vecteur  $\alpha$  contient des valeurs aléatoires dans  $[0, 2]$ . Cette composante fournit des poids aléatoires pour les proies afin d'accentuer ( $C > 1$ ) ou de réduire ( $C < 1$ ) de manière stochastique l'effet de la proie

dans la définition de la distance dans l'équation (IV-1). Cela aide GWO à afficher un comportement plus aléatoire tout au long de l'optimisation, favorisant l'exploration et l'évitement des optima locaux. Il convient de mentionner ici que  $C$  est pas diminué de façon linéaire contrairement à  $A$ . Nous demandons délibérément à  $C$  de fournir des valeurs aléatoires à tout moment afin de mettre l'accent sur l'exploration non seulement lors des itérations initiales, mais aussi lors des itérations finales. Ce composant est très utile en cas de stagnation des optima locaux, en particulier dans les itérations finales. Le vecteur  $C$  peut également être considéré comme l'effet des obstacles à l'approche des proies dans la nature. Généralement, les obstacles de la nature apparaissent dans les chemins de chasse des loups et les empêchent de rapidement s'approcher commodément des proies. C'est exactement ce que fait le vecteur  $C$ . Selon la position du loup, il peut donner au hasard un poids à la proie et rendre plus difficile et plus loin d'atteindre les loups, ou vice versa. En résumé, le processus de recherche commence par la création d'une population aléatoire de loups gris (solutions candidates) dans l'algorithme GWO. Au cours des itérations, les loups alpha, bêta et delta estiment la probabilité de la position de la proie. Chaque solution candidate met à jour sa distance par rapport à la proie. Le paramètre  $a$  est diminué de 2 à 0 afin de mettre l'accent respectivement sur l'exploration et l'exploitation. Les solutions candidates ont tendance à diverger de la proie quand  $|r| > 1$  et convergent vers la proie lorsque  $|r| < 1$ . Enfin, l'algorithme GWO est terminé par la satisfaction d'un critère final.

Le pseudo code de l'algorithme GWO est présenté sur la figure IV.8

```

Initialize the grey wolf population  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
Initialize  $a$ ,  $A$ , and  $C$ 
Calculate the fitness of each search agent
 $X_\alpha$  = the best search agent
 $X_\beta$  = the second best search agent
 $X_\delta$  = the third best search agent
while ( $t < \text{Max number of iterations}$ )
    for each search agent
        Update the position of the current search agent by
            equation (3.7)
        end for
        Update  $a$ ,  $A$ , and  $C$ 
        Calculate the fitness of all search agents
        Update  $X_\alpha$ ,  $X_\beta$ , and  $X_\delta$ 
         $t = t + 1$ 
    end while
    
```

**figure.IV.8** Pseudo code de l'algorithme GWO

Pour voir comment GWO est théoriquement capable de résoudre des problèmes d'optimisation, on peut noter quelques points :

- La hiérarchie sociale proposée aide GWO à enregistrer les meilleures solutions obtenues jusqu'à présent au cours de lacours d'itération
- Le mécanisme d'encerclement proposé définit un voisinage en forme de cercle autour des solutions qui peut être étendu à des dimensions supérieures en tant qu'hyper-sphère
- Les paramètres aléatoires A et C aident les solutions candidates à avoir des hyper-sphères avec des rayons aléatoires
- La méthode de chasse proposée permet aux solutions candidates de localiser la position probable de la proie
- Exploration et exploitation sont garanties par les valeurs adaptatives de a et A
- Les valeurs adaptatives des paramètres a et A permettent à GWO de passer en douceur entre l'exploration et exploitation
- Avec A décroissant, la moitié des itérations sont consacrées à l'exploration ( $|A| \geq 1$ ) et l'autre moitié sont dédiées à l'exploitation ( $|A| < 1$ )
- Le GWO n'a que deux paramètres principaux à régler (a et C).

#### IV.4.3 Organigramme de l'algorithme GWO

Le diagramme présenté dans la figure IV.9 décrit les différentes étapes suivies pour évaluer le problème de l'écoulement de puissance optimal. L'exécution du programme associé s'effectue sous l'environnement MATLAB version.17b.

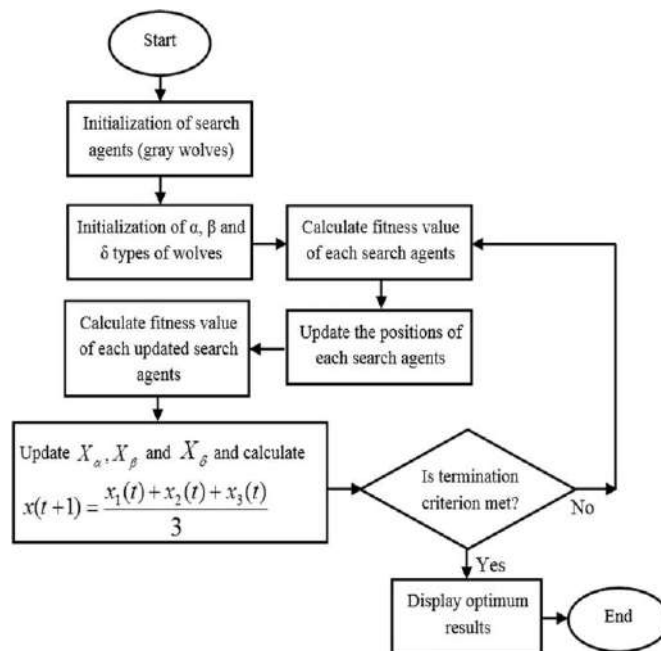


Figure.IV.9 :Organigramme de l'algorithme GWO.

L'emploi de ces trois opérations de base crée de nouveaux individus, ce qui peut être meilleur que celui de leurs parents. Ce processus est répété pendant plusieurs générations et s'arrête finalement lorsque j'obtiens des individus qui représentent la solution optimale au problème.

## IV.5 Optimisation de la MPPT par l'Algorithme Gray Wolf (GWO)

Nous avons vu précédemment que le régulateur utilisé pour MPPT ont donné des performances satisfaisantes notamment au niveau du régime dynamique. Mais l'inconvénient majeur remarqué est le manque de techniques de conception. Afin de remédier ce problème et pour améliorer les performances obtenues, cette partie est consacrée à l'application de l'algorithme Gray Wolf pour la conception et l'optimisation des gains de régulateurs PI classique.

### IV.5.1 Procédure d'optimisation de régulateur PI

La procédure d'optimisation est un algorithme génétique qui agit sur les paramètres du régulateur. La figure suivante (Figure. IV.10) illustre le schéma de cette procédure.

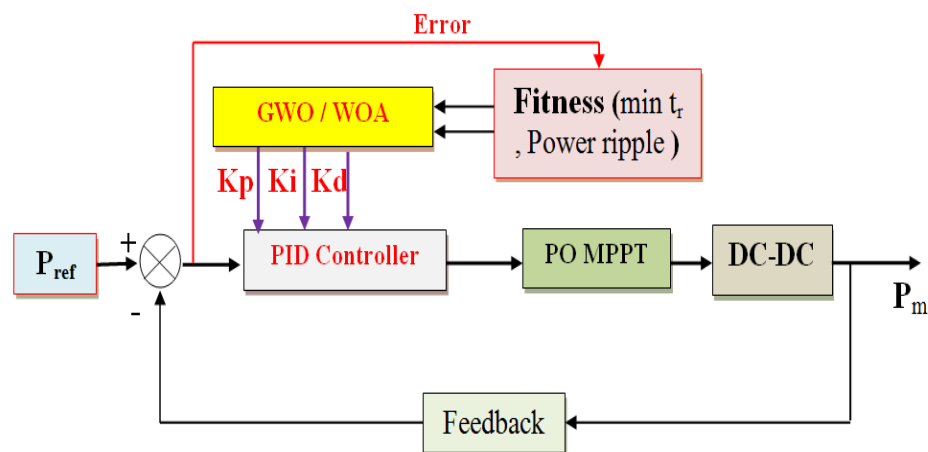


Figure. IV.10 :Principe d'optimisation MPPT par algorithme GWO.

Notre objectif est d'optimiser le temps de réponse et les ondulations de puissance de sortie, c'est-à-dire de minimiser l'erreur entre puissance de sortie et sa référence.

La procédure d'optimisation des paramètres des régulateurs peut être résumée par les étapes suivantes:

- ❖ Générer aléatoirement une population initiale ;
- ❖ Evaluer cette population ;
- ❖ Appliquer les opérateurs de l'algorithme GWO ;
- ❖ Evaluer la nouvelle population;
- ❖ Répéter la procédure pour un nombre de générations donné ;
- ❖ Choisir le meilleur solution ;
- ❖ Dans ce qui suit, on appliquera cette procédure au la régulateur PI classique MPPT .

### IV.5.2 Optimisation du régulateur PI classique

L'optimisation de ce régulateur se fait par une algorithmme génétique développée sous MATLAB.

Voici les paramètres de l'algorithme utilisé :

Description	Parameters
Nombre d'agents de recherche	30
Nombre maximal d'itérations	50
a	[0, 2]
$R_1$ et $r_2$	[0, 1]

Tableau.IV.1 :paramètres de Algorithme Gray Wolf utilisé .

### IV.5.3 Résultats de simulation de la MPPT par l'utilisation PI-GWO

Pour pouvoir montrer l'utilité de l'optimisation des gains du PI classique par l'algorithme Gray Wolf (GWO), on a effectué les mêmes étapes de simulation. D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque bien l'amélioration des performances dynamiques de la commande MPPT .

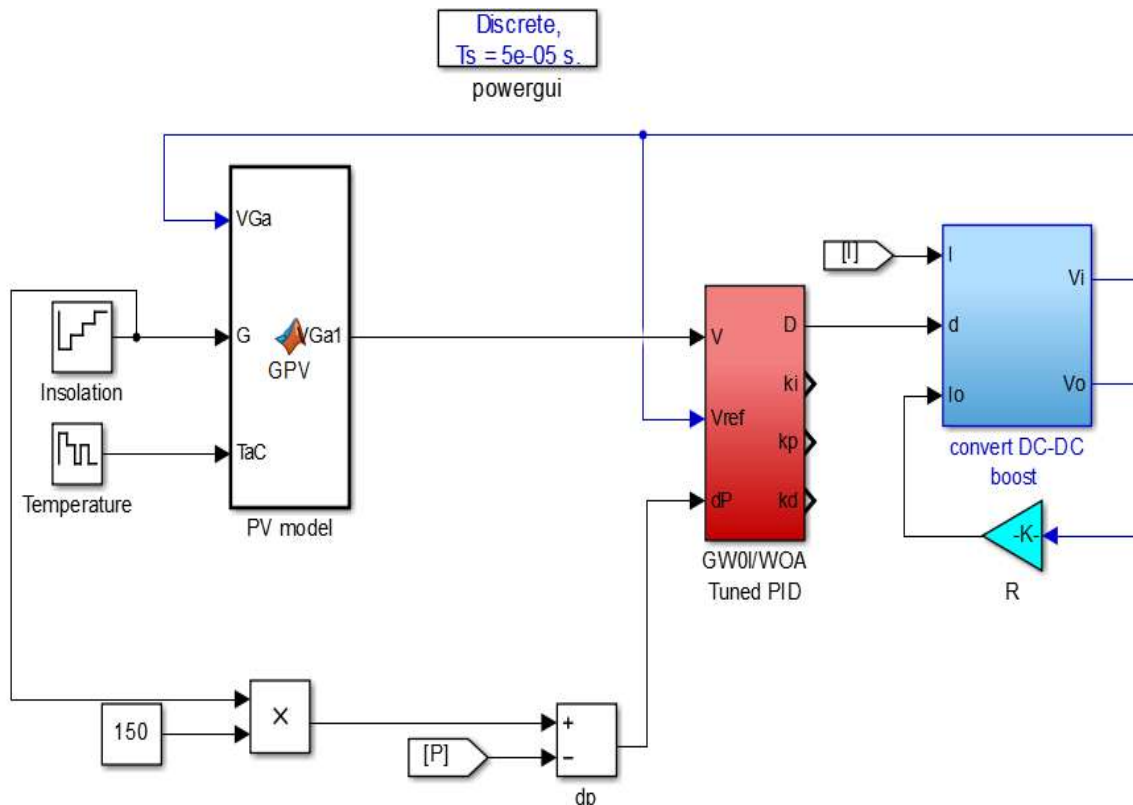


Figure. IV.11 :Schéma bloc global d'implantation de l'Algorithme Gray Wolf (GWO) pour l'ajustement des gains  $K_P$  et  $K_I$  du régulateur PI dans la commande MPPT.

L'efficacité des méthodes GWO-MPPT proposée est illustrée par une étude comparative entre MPPT à pas de taille variable et MPPT-GWO. Nous avons démontré trois améliorations :

a) la précision du suivi, b) l'ondulation. temps de réponse . La figure 12 montre les performances de GWO dans l'étape de formation hors ligne. Alors que la figure 13 montre les résultats obtenus en utilisant le MPPT de taille de pas variable optimal formé.

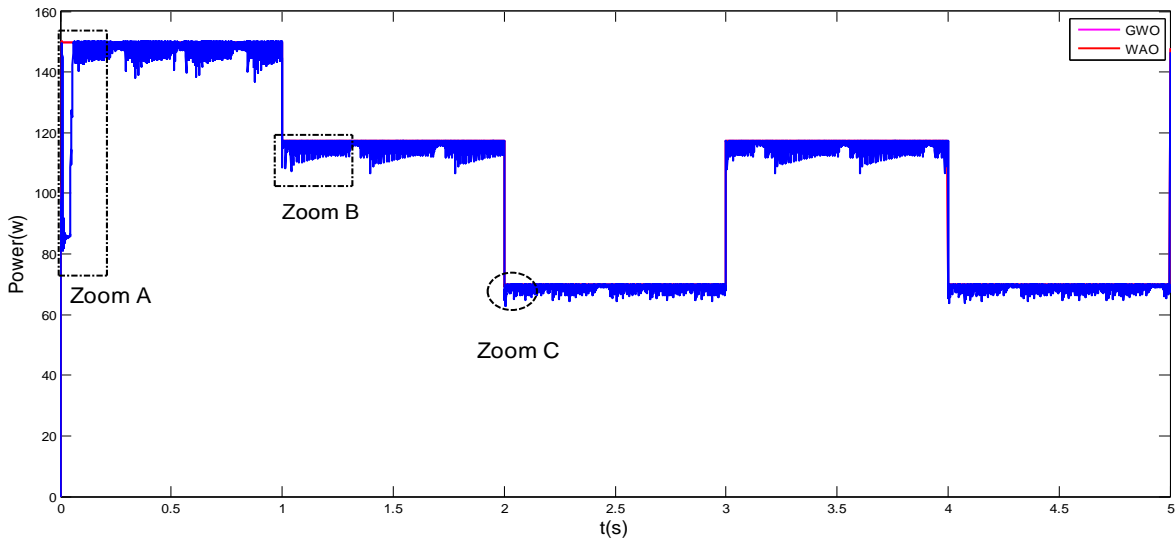
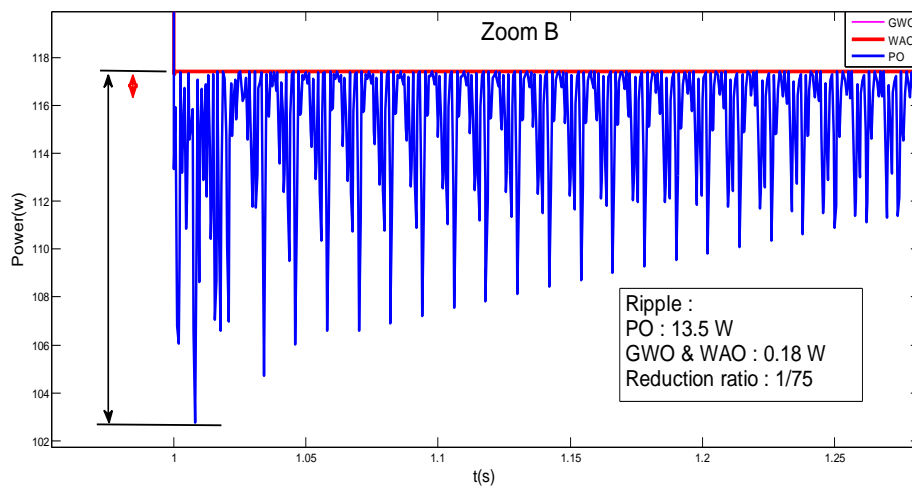
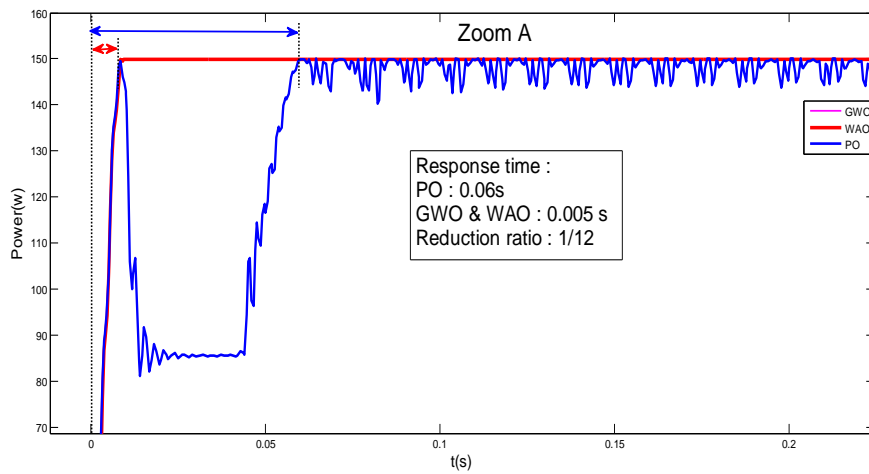
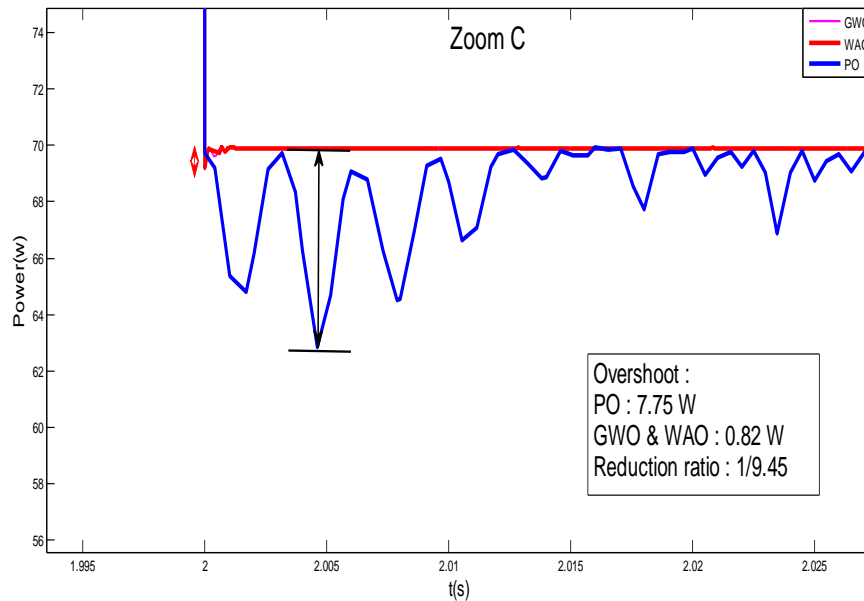


Figure IV.12. Puissance de sortie par MPPT-GWO .



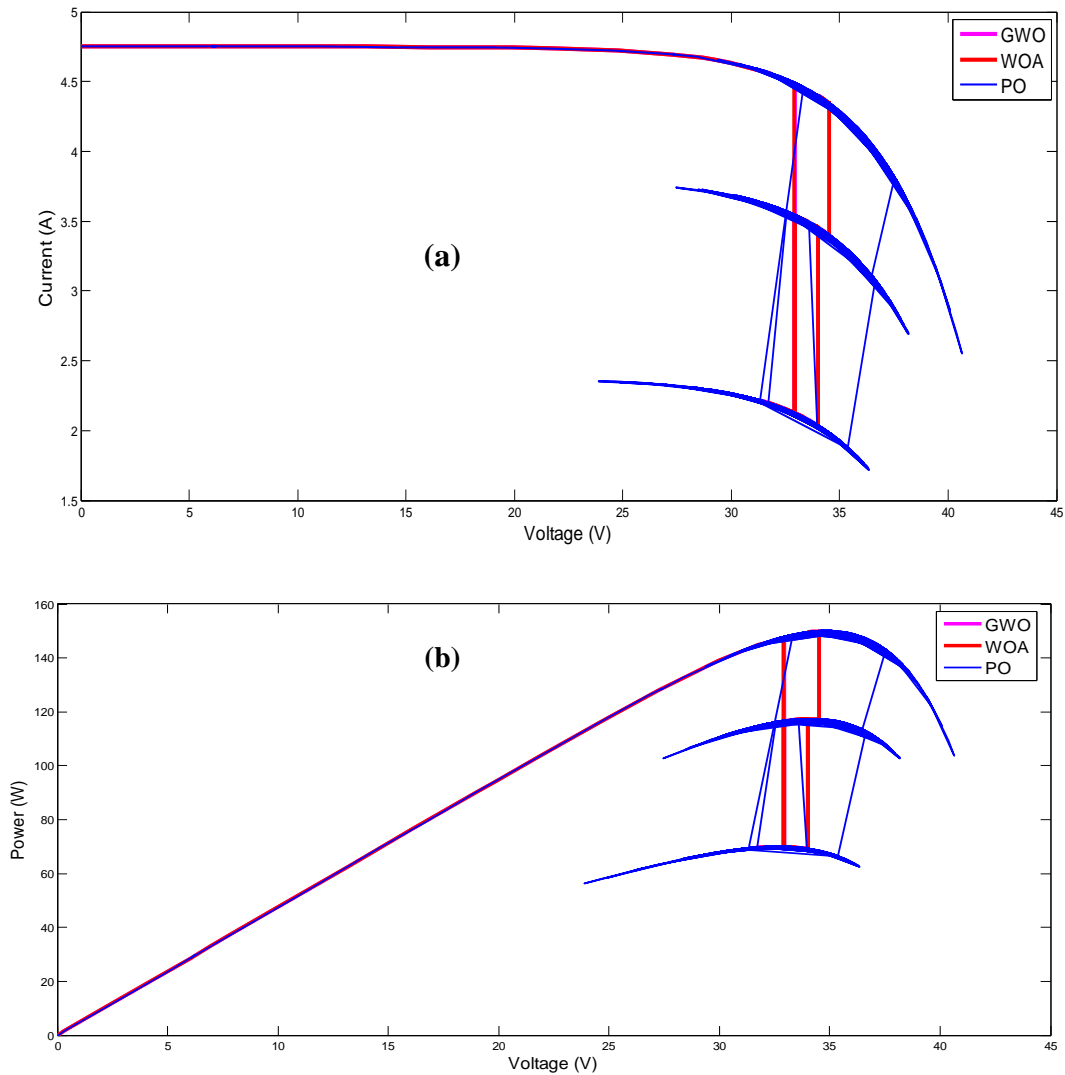


**Figure IV.13. Zoom** Puissance de sortie par MPPT-GWO  
 a) Suivi MPPT b) ondulations de puissance , C) Debasement .

D'après les résultats de la simulation, nous pouvons voir que :

- **Suivi MPPT** : les algorithmes MPPT à taille de pas fixe et variable ont tous deux une précision acceptable. Dans les deux cas, les valeurs de puissance sont très proches de la valeur théorique correspondant aux niveaux d'irradiation (Fig. 12 et Fig. 13.A).
- **Ripple** : Il est clair que la méthode MPPT à pas variable apporte une amélioration en ce qui concerne l'ondulation. La qualité de la puissance de sortie PPV (Ripple) avec l'algorithme MPPT GWO à pas variable est évidemment meilleure qu'avec l'algorithme MPPT à pas fixe (Fig. 13.B).
- **Dépassement** : la valeur de crête de puissance du dépassement en cas de changement soudain des conditions atmosphériques est plus importante avec la valeur fixe MPPT-GWO par rapport au dépassement en utilisant le régulateur MPPT-GWO à pas variable proposé (Fig. 13.C).

Le suivi des points MPPT par les deux algorithmes (P&O et PO-GOW ) est illustré par la Fig. IV.14 .



**Figure 14.** Etude comparative entre MPPT classique et MPPT-GWO .  
 (a): Les caractéristiques I-V (b): Les caractéristiques P-V.

## IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la commande MPPT en utilise la régulateur PI optimisé par L'algorithme Gray Wolf (GWO) . L'algorithme GWO employé pour trouver les gains optimaux du contrôleur PI pour la commande MPPT afin de réduire au minimum leurs ondulations par conséquence la réduction le temps de réponse . On s'avère que l'index d'exécution pour différents critères d'erreur pour le contrôleur proposé employant l'Algorithme GWO est moins que le contrôleur ajusté manuellement. D'après les résultats, il est clair qu'il y a une réduction d'ondulation et le temps de réponse au niveau de Puissance de sortie de convertisseur quand la méthode proposée de GWO est employée.

Finalement, nous pouvons dire que l'Algorithme GWO est un outil d'optimisation très puissant où les résultats que nous avons obtenu après son utilisation nous sont satisfaisants. Donc cet outil a donné un sens à notre contribution.

## Conclusion Générale

Ce travail a été consacré à une optimisation des performances d'un système photovoltaïque utilisant les Algorithmes bio inspirés. On peut rapidement comprendre et justifier l'intéressement à l'énergie solaire photovoltaïque. D'abord, l'énergie solaire photovoltaïque est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde. Afin d'améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques, différents algorithmes de commandes intelligentes ont été étudiés pour la poursuite du point maximum de puissance MPPT dans ce travail.

Nous avons commencé par la présentation de la conception et de la simulation d'un contrôleur basé sur des techniques populaires tel que la perturbation et l'observation qui offre un meilleur comportement que la P&O. La MPPT-GWO a été comparé au contrôleur de P&O a amélioré le régime transitoire et a réduit les fluctuations à l'état statique.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté une description générale sur les systèmes des énergies renouvelables et leurs types d'une part et on a mis en valeur les avantages et les inconvénients des systèmes éoliens et photovoltaïque d'une autre part.

Dans le deuxième chapitre, nous avons exposé le principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque, à cet effet ; nous avons commencé par un aperçu sur les systèmes photovoltaïques, le principe de fonctionnement et le modèle mathématique ensuite on a montré les résultats de simulation d'un panneau photovoltaïque (150W) dont les deux effets (température et rayonnement) ont été montrés et analysés.

Le troisième chapitre est consacré à la description de la commande MPPT, le principe de recherche du MPP, les différents algorithmes MPPT les plus répandus existants dans la littérature (Inc.CoN, P&O), avec des études d'amélioration de la performance de l'algorithme (P&O) avec une nouvelle technique propose le principe de pas variable. Afin d'exploité le système photovoltaïque d'une manière efficace nombreuse études méritent est considérations très important pour cela, l'objectif de cette étude est optimisation de la commande MPPT et d'analyser ainsi que comparer son comportement par rapport aux autres techniques (O&P) utilisées dans le contrôle des systèmes photovoltaïque .

Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté bien un nouvelle commande MPPT -GWO, de nombreux simulation et analyse sont présenté, puis nous montrons les résultats de simulation d'un système PV avec MPPT-GWO et nous présentons comparaison claire entre P&O et PO-GWO ,c' est bien meilleur que (P&O).

## Bibliographie

- [1] **Ali Nasr Allah Ali, Mohamed H. Saied, M. Z. Mostafa And T. M. Abdel- Moneim**, “a survey of maximum ppt techniques of pv systems”. IEEE energy tech, 2012.
- [2] **Trishan Esrarn And Patrick** “comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques” IEEE transactions on energy conversion, 2007.
- [3] **B. Fléche, D. delagnes**, «énergie solaire photovoltaïque», STI ELT juin 2007
- [4] **Y. Pankow**, «Etude de l’intégration de la production décentralisée dans un réseau basse Tension application au Générateur photovoltaïque », thèse de Doctorat, centre nationale de Recherche technologique de Lille, 2004.
- [5] <http://energies2demain.com/wpcontent/uploads/polycristaline.jpg>.
- [6] **Frank Jackson** : Planning and Installing Photovoltaic Systèmes Green Dragon Energy, A guide for installers, architects and engineers second edition Berlin October 2007
- [7] **Anne Laburet, Michel Villosz** : énergie solaire photovoltaïques 3eEdition dunod paris 2006
- [8] [www.ohmeo.com/composition-panneau-PV](http://www.ohmeo.com/composition-panneau-PV)
- [9] **F. Benyarou** « Conception assistée par ordinateur des systèmes Photovoltaïques Modélisation, dimensionnement et simulation », Thèse de Doctorat d’état. Université de Tlemcen Juillet 2004.
- [10] **A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud Et I. Youm** « etude et modélisation d’un générateur photovoltaïque » revue des energies renouvelables vol. 11 n°3 sénégal, 2008
- [11] **S. Liu And R.A. Dougal**, “dynamic multiphysics model for solar array”, IEEE transactions on energy conversion, vol. 17, n°2, pp. 285 – 294, june 2002.
- [12] **Rais Younes** « modélisation du rendement du convertisseur DC/AC dans un système photovoltaïque », mémoire de magister en génie électrique, ecole nationale polytechnique département d’électronique laboratoire des dispositifs de communication et de conversion photovoltaïque, 2012
- [13] **J. Ferrieux**, f. Forest, « alimentations a découpage convertisseurs a résonance: principes composants modélisation ». Paris, france: dunod, 1999.
- [14] **A. Benayad**, « modélisation des panneaux photovoltaïques par les méthodes de soft computing. » mémoire de magister, département de génie électrique, université de béjaia 2011.
- [15] **Alain Bilbao** « learreta réalisation de commandes mppt numériques » diplôme ingénieur technique industriel, septembre 2006
- [16] **N.Femia, G.Lisi, G. Petrone, And M.Vitelli** “distributed maximum power point tracking of photovoltaic arrays: novel approach and system analysis”. IEEE transaction on industrial electronics, vol. 55, no. 7. 2008.

- [17] **C.Andr Es, G.Spagnuolo, G. Petrone, M.Vitelli And J.David bastidas** “a multivariable mppt algorithm for granular control of photovoltaic systems” IEEE 2010
- [18] **F.Slama**, « modélisation d’un système multi générateurs photovoltaïques interconnect es au réseau electrique », mémoire de magister d’electrotechnique, sétif 2012.
- [19] **M.Obeidi**, « commande des hacheurs mppt par logique floue », mémoire de magister, ecole nationale polytechnique 2006
- [20] **Aamarouayache Mohamed**, « contribution à l’optimisation d’une chaine de conversion d’énergie photovoltaïque », doctorat en sciences en électrotechnique option ,2014
- [21] **M. Angel Cid Pastor**, « conception et realisation de modules photovoltaiques electroniques », docteur de l’institut national des sciences appliqu es de toulouse, 2006
- [22] **Anantapuram**, “investigation on potential photovoltaic power modules for higher electrical output” ph.d in electrical engineering, kiranmayi r-jawaharlal nehru technological university, 2012
- [23] **Ahmad Zbeeb**, “a new microcontroller-based mppt algorithm for photovoltaic applications” for the degree of master of applied science, concordia university montreal, quebec, canada, 2009.
- [24] **d. Lee, H. Noh, D. Hyun, And I. Choy**,”an improved mppt converter using current compensation method for small scaled pv-applications,” IEEE applied power electronics conf. And exposition, vol. 1, pp. 540-545, 2003
- [25] **Akihiro Oi**, “ design and simulation of photovoltaic water pumping system”, faculty of cali- fornia polytechnic state university, 2005
- [26] **Hajar Bagheri** “ advances in electric power engineering” publisher: lulu (usa), 2015
- [27] **Dalia Al Maamoury, Muhamad Bin Mansor, Ali Assim Al Obaidi** “active power control for a single-phase grid connected pv system”, international journal of scientific & technology research vol 2, issue 3, 2013.
- [28] **Bisker Asma, Chiri Meriem**, « commande d’un système photovoltaïque en mode isol e et en mode connect e au réseau », diplôme d’ingénieur d’état en électrotechnique,  cole nationale polytechnique, 10, av. Hassen badi, elharrach, algérie, 2012
- [29] **Nadir Mohamed, Sahraoui Ahmed, Titraoui Abdessalam** « etude d’une chaine de conversion photovoltaïque », diplôme d’ingenieur d’etat en génie electrotechnique, université de m’sila, 2010
- [30] **A. Dolara, R. Faranda, S. Leva** “energy comparison of seven mppt techniques for pv systems”, scientific research j. Electromagnetic analysis & applications, department of energy of politecnico di milano, via la masa 34, 20156, milano, italy, 2009;
- [31] **M.Hatti**, "contrôleur flou pour la poursuite du point de puissance maximum mppt d’un système photovoltaïque".jcge’08 lyon, 2008.
- [32] **N. Khaehintung, K. Pramotung, B. Tuvirat, P. Sirisuk**, “risc-microcontroller buildings fuzzy logic controller of maximum power point tracking for solar-powered lightflasher applications”, industrial electronics society, 2004.
- [33] **W. Chung-Yuen, K. Duk-Heon, K. Sei-Chan, And All**, “a new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller”, IEEE power electronics specialists conference, pesc’94, pp. 396-403, jun. 1994.

- 
- [34] **M. Veerachary, T.Senjuand K. Uezato**, “feedforward maximum power point tracking of pv systems using fuzzy controller”, IEEE trans. On aerospace and electronic systems, vol 38, no. 3, july 2002.
- [35] (2010) <http://www.solarserver.de/gclid=CJWA1ruS-K4CFS4NtAodSzY7xw>.
- [36] **"BOUALEM DENDIB"** Technique conventionnelles et avanccée de poursuite MPPT
- [37] **Ferran T.t Fontbona**, “Optimisation methods meet the smart grid New methods for solvinglocation and allocatcion problems under the smart grid Paradigm », thèse de Doctorat 2015.
- [38] **M. Madić, Danijel M., Miroslav R.**, “Comparison of Méta-heuristique Algorithms for solvingMachining Optimization Problems”, Mechanical Engineering Vol. 11, pp. 29-44, 2013.
- [39] **Khajehzadeh, M., Raihan T., M., El-Shafie, A., Eslami, M.**, “A Survey on Meta-HeuristicGlobal Optimization Algorithms”, Research Journal of Applied Sciences, Engineering andTechnology, Vol. 3, pp. 569-578, 2011.
- [40] **Blum, C., Roli, A.**, "Metaheuristics in combinatorial optimisation: Overview and conceptualcomparison", ACM Computing Surveys, Vol. 35, pp. 268-308, 2003.
- [41] **Yang, X.S.**, “Review of Metaheuristics and Generalized Evolutionary Walk Algorithm”, International Journal of Bio-Inspired Computation, Vol. 3, pp. 77-84, 2011
- [42] **Zemmit, A., Messalti, S., &Harrag, A.** (2018). A new improved DTC of doubly fed induction machine using GA-based PI controller. Ain Shams Engineering Journal, 9(4), 1877-1885.
- [43] **Omessaad Hajji**, “ Contribution au développement de méthodes d’optimisation stochastiques.Application à la conception des dispositifs Electrotechniques ”, Thèse de doctorat en génieélectrique, Ecole centrale de Lille, Université des sciences et technologies de Lille, 2003.
- [44] **J. Brownlee** « Clever algorithms- nature-inspired programming recipes » livre 2011.
- [45] **L. D. Mech**, "Alpha status, dominance, and division of labor in wolf packs," Canadian Journal of Zoology, vol. 77, pp. 1196-1203, 1999.
- [46] **C. Muro, R. Escobedo, L. Spector, and R. Coppinger**, "Wolf-pack (Canis lupus) hunting strategies emerge from simple rules incomputational simulations," Behavioural processes, vol. 88, pp. 192-197, 2011.

## **Résumé:**

Ce travail a été consacré à une optimisation des performances d'un système photovoltaïque utilisant les Algorithmes bio inspirés. On peut rapidement comprendre et justifier l'intéressement à l'énergie solaire photovoltaïque. D'abord, l'énergie solaire photovoltaïque est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde. Afin d'améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques, différents algorithmes de commandes intelligentes ont été étudiées pour la poursuite du point maximum de puissance MPPT dans ce travail.

## **Mots clés :**

System PV , MPPT , Algorithme de Gray wolf, contrôleur PI, Temps de réponse .