REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de Technologie

Département du Génie Electrique

Mémoire de fin d'études de Master

Spécialité : Automatique et Systèmes

COMMANDE MPPT-PSO & MPPT-WOA D'UN PV SOUS CONDITION D'OMBRAGE PARTIEL

Présenté par :

METIDJI ZINEB

Proposé et Dirigé par :

Dr. Hamidia Fethia

Dr. Abbadi Amel

Promotion 2022

REMERCIEMENT

Avant tout, je remercie le Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage, la patience et la force durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Je tiens à exprimer mon remerciement et ma gratitude à ma promotrice : Dr. HAMIDIA Fethia pour la confiance qu'il m'a prodigué pour la direction de ce travail, sans cesser de m'encourager et de me pousser vers les horizons de recherche scientifique.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ma co-promotrice Dr ABBADI Amel pour ses nombreux conseils et ses encouragements.

Je suis très honorée que Dr, Skender Mohamed Reda ait accepté de présider le jury. Qu'il soit assuré de mon profond respect et de mes sincères remerciements.

Je remercie vivement Dr Bettache Farouk, d'avoir consenti à évaluer ce travail et pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de faire partie du jury

Mes remerciements au département de Science et Technologie de l'université de Médéa et à tous les enseignants qui nous enseignés durant les années du cursus.

Enfin, je remercie aussi tous les membres de ma famille et les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à la rédaction de ce travail.

DIDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents
Qui n'ont jamais cessé de m'encourager et de me pousser vers les horizons.

Mes frères et Ma sœur
Vous avez de près ou de loin contribué à ma formation. Tous mes meilleurs vœux de succès dans vos études et dans votre vie.

A mes oncles,
Tantes,
Cousins, cousines
Et à toute ma famille.
Vous m'avez soutenu et aidé quand j'avais besoin de vous,

A tous mes enseignants, du primaire à l'université,
A tous mes amis et collègues de cette promotion,
A tous ceux qui ont participés de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

METIDJI Zineb

RESUME

ملخص

تظهر خاصية الطاقة-والجهد الكهربائي ، للوحة الكهروضوئية في حالة الظل الجزئي عدة نقاط محلية ، ومن الصعب على التقنيات التقليدية أن تتقارب نحو النقطة الشاملة مما يتسبب في فقد الطاقة.

يقترح هذا العمل متتبعا حديثا لنقطة الطاقة القصوى لتتبع أقصى نقطة شاملة في خصائص النظام الكهروضوئي ؛ يعتمد هذا المتعقب على خوارزمية تحسين يدعى سرب الجسيمات ، وهو نهج أثبت فعاليته في عدة مجالات .تم إجراء دراسة مقارنة مع خوارزمية تحسين الحوت لتقييم أداء وكفاءة هذا المتعقب.

كلمات مفتاحية : نظام فوطوضوئي، تتبع أقصى نقطة للطاقة بتقنية سرب الجسيمات ، خوارزمية تحسين الحوت ، محول مستمر-مستمر، الظل الجزئي.

Résumé

La caractéristique, puissance-tension, d'un panneau photovoltaïque dans le cas d'ombrage partiel montre plusieurs points locaux, il est difficile aux techniques classiques de converger vers le point global entrainant ainsi une perte de puissance.

Ce travail propose un traqueur de point de puissance maximale moderne (MPPT) pour suivre le point de puissance maximale global dans les caractéristiques du système PV; ce traqueur est basé sur l'algorithme d'optimisation par Essaim de Particules (PSO), une approche qui a prouvé son efficacité dans plusieurs domaines. Une étude comparative avec l'algorithme d'optimisation de baleine (WOA) a été faite pour évaluer les performances et l'efficacité de ce traqueur.

Mots clés : MPPT, Essaim de Particules, Algorithme de Baleine, Condition d'Ombrage partiel, Convertisseur DC-DC

Abstract

The characteristic, power-voltage, of a photovoltaic panel in the case of partial shade shows several local points, it is difficult for conventional techniques to converge towards the global point thus causing a loss of power.

This work proposes a modern maximum power point tracker (MPPT) to track the global maximum power point in PV system characteristics; this tracker is based on the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, an approach that has proven its effectiveness in several areas.

A comparative study with the Whale Optimization Algorithm (WOA) was added to evaluate the performance and efficiency of this tracker.

Key Words: Photovoltaic Panel, Maximum power point Tracking-Particle Swarm Optimization, Whale Optimization Algorithm, Converter DC-DC, Partial Shading Condition

LISTE DES FEGURES

Figure I.1	Principe de fonctionnement photovoltaïque.....05
Figure I.2	Cellule au silicium monocristallin.....07
Figure I.333	Cellule au Silicium Poly-cristallin.....07
Figure I.4	Cellule à couche très mince.....08
Figure I.5	Organigramme représentant les différentes générations de cellules PV…….....08
Figure I.6	Modélisation électrique d'une cellule PV….....09
Figure I.7	Composants d'un générateur PV……..…….10
Figure I.8	Courbe P=f(V) d'un module photovoltaïque ……..13
Figure I.9	Caractéristique I =f (V) d'un module photovoltaïque……...14
Figure I.10	Caractéristique P(V) pour différentes températures (G=1000W/m²)……..15
Figure I.11	Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement(G=1000W/m²).....16
Figure I.12	Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).....16
Figure I.13	Module photovoltaïque.....17
Figure I.14	Groupement de cellules en série…….....17
Figure I.15	Groupement des cellules en parallèle.....18
Figure I.16	Groupement de cellules série- parallèle……..... 19
Figure I.17	Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti- retour. 20
Figure I.18	Schémas équivalent d'un panneau photovoltaïque ombragé.....22
Figure II.1	La fonction hacheur Boost..... ;;.....28
Figure II.2	Formes d'ondes de la tension de sortie d'un hacheur de type BOOST……..…21
Figure II.3	Structure de convertisseur BUCK.……..……23
Figure II.4	Circuit électrique de base du hacheur dévolteur /survolteur ……..…….24

LISTE DES FEGURES

Figure II.5	circuit électrique de base du hacheur dévolteur /survolteur.....25
Figure II.6	Caractéristique de la tension et du courant du Buck-Boost.……26
Figure II.7	Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT ……28
Figure III.1	Déplacement d'une particule……..37
Figure III.2	Topologie du voisinage (a) anneau, (b) rayon, (c) étoile, (d) pyramide, (e) la topologie de Von eumann……31
Figure III.3	Structure du système photovoltaïque proposé partiellement ombragé……....32
Figure III.4	Impacts de l'ombrage partiel sur la caractéristique P(V) à T=25 °C.....33
Figure III.5	Impacts de l'ombrage partiel sur la caractéristique I(V) à T=25 °**C**…… 34
Figure III.6	Schéma de bloc du MPPT-PSO (Entrée/Sortie) ……35
Figure III.7	L'organigramme de la méthode proposée MPPT-PSO ……38
Figure III.8	Courbe P=f(V) d'un PV sous l'ombrage avec MPPT-PSO…….. 40
Figure III.9	Caractéristique I =f(V) d'un PV sous l'ombrage avec MPPT-PSO ……41
Figure III.10	Caractéristique I =f(V) d'un PV sous l'ombrage avec MPPT-PSO ……42
Figure III.11	Chasse aux baleines à bosse. ……45
Figure III.12	Mouvement en spirale ……..…….46
Figure III.13	Topologie de PSO.……...……49
Figure III.14	l'organigramme de la méthode MPPT-WOA**…**……..…50
Figure III.15	Courbe P=f(V) d'un PV sous l'ombrage avec MPPT-WOA…….. 50
Figure III.16	Caractéristique I =f(V) d'un PV sous l'ombrage avec MPPT-WOA ……...……...53
Figure III.17	Caractéristique I =f(V) d'un PV sous l'ombrage avec MPPT-PSO.....…...55
Figure III.18	réponse de (a) la puissance;(b) : le rapport cyclique des deux méthodes PSO&WOA …….56
Figure III.19	**(**a) puissance des deux méthodes ;(b) : rapport cyclique PSO&WOA ……..... .57

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.1 : Différentes stratégies de commutation……...…….53

NOTATIONS ET ABREVIATIONS

Ipv	Le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur (A)
Iph	Les photo- courants générés par les cellules solaires (A).
Isat	Le courant de saturation (A).
Icc	Le courant de court-circuit (A).
Vpv	La tension aux bornes du PV (V).
Vco	La tension de circuit ouvert (V).
Rs	La résistance série (Ω).
Rp	La résistance parallèle (Ω).
E	La charge de l'électron e =1.6 10^{-19}C.
N	Le facteur de qualité de la diode.
K	la constante de Boltzmann K = 1.1.385410^{-23} J.K^{-1}.
T	La température des cellules en Kelvin (K).
Pmax	La puissance maximale (W).
Vmax	La tension maximale (V).
Imax	Le courant maximal (A).
FF	Facteur de forme.
η	Le rendement.
D	Rapport Cyclique

NOTATIONS ET ABREVIATIONS

PSC	Partial Shading Condition.
MPPT	Maximum Power Point Tracking.
PSO	Particle Swarm Optimization.
WOA	Whale optimization algorithm.
GPV	Générateur photovoltaïque.
GMPP	Global maximal Power point
LMPP	Local Maximal Power Point

TABLEAU DES MATIERES

INTRODUCTION GÉNÉRALE..... 01

CHAPITRE I: ÉTAT DE L'ART DE SYSTÈMES PHOTOVOLTAIQUES 03

I.1-Introduction générale……04

I.2-Définition du photovoltaïque..... 05

I.3-L'effet photovoltaïque..... 05

I.4-La cellule photovoltaïque..... 06

I.5-Types des cellules PV 07

I.5-1 Modélisation des cellules photovoltaïque 08

I.6- Les paramètres d'une cellule photovoltaïque 10

I.6.1- Courant de court-circuit (I_{cc}) 10

I.6.2 -Tension de circuit–ouvert V_{co}..... 11

I.6.3 -Puissance maximale..... 11

I.6.4 -Facteur de forme 12

I.6.5 -Le rendement..... 12

I.7- Générateur PV 12

I.7.1- Caractéristique d'un Générateur PV 13

I.7.2-Caractéristique courant-tension 14

I.8-Effet climatique sur la cellule PV 14

I.8.1-Influence de la température..... 14

I.8.2-Influence de l'ensoleillement 15

I.8.3 -Influence de l'association en série & en parallèle des cellules PV..... 16

I.9-Protection d'un PV..... 19

I.9.1-Système de refroidissement 20

I.9.2-Effet de l'ombrage sur les systèmes photovoltaïques 20

I.10-Définition d'un ombrage..... 21

I.10.1-Effet de l'ombrage 21

I.10.2-Circuit électrique équivalent d'une cellule sous ombrage..... 22

I.10.3-Caractéristiques électrique d'une cellule PV sous l'ombrage..... 23

TABLEAU DES MATIERES

I.11-Conclusion 24
CHAPITRE II: CONVERTISSEURS DC-DC 25
II.1-Introduction 26
II.2-Étages d'adaptations 26
II.3-Les convertisseurs DC-DC (Hacheurs) 27
II.4-Type de convertisseurs 27
II.4.1-Hacheur survolteur (Boost) 27
II.4.1.1-Principe de fonctionnement 28
II.4-1-2-Démonstration 28
II.4.2-Hacheur dévolteur (Buck) 29
II.4.3-Convertisseur Buck-Boost 31
II.5-Commande MPPT des convertisseurs DC-DC 32
II.5.1-MPPT indirecte 33
II.5.2-MPPT directe 34
II.5.3-Poursuite du point de puissance maximale du générateur PV 35
II.5.3.1-Les commandes classiques(P&O,INC) 35
II.5.3.2-Les modernes commandes 37
II.6-Conclusion 38
CHAPITRE III: PV basé sur MPPT-PSO&WOA 37
III.1-Introduction 38
III.2-Définition de l'Optimisation 38
III.3-L'algorithme d'optimisation par essaims particulaires 38
III.3.1-Concept de base de PSO 39
III.3.2-Principe de l'Algorithme PSO ..... ….41
III.3.3-Formulation du problème 42
III.3.4-Configuration de la méthode 43
III.3.4.1-Nombre de particules 43
III 3.4.2-Topologie du voisinage 43
III.3.4.3-Coefficient d'inertie 44
III.3.4.4-Coefficients de confiance 44
III.3.4.5-Critères d'arrêt 45
III.3.4.6-Avantages et inconvénients de PSO……45

III.4-Problème du MPPT sous ombrage partiel..... 46

III.4.1-MPPT basé sur l'algorithme PSO……...……...48

III.4.1.2-Résultat de simulation…….…….49

III.5-Définition de l'Optimisation des baleines à bosse……51

III.5.1-Proie encerclant……...……..…51

III.5.2-Rechercher une proie ……53

III.5.3-MPPT basé sur l'algorithme WOA……53

III.5.3.1-Description ……53

III.5.3.2-Résultat de simulation ……54

III.5.3.3-Etude comparative ……...…56

III.6-Conclusion 58

CONCLUSION GÉNÉRALE..... 59

INTRODUCTION

INTRODUCTION GENERALE

La consommation mondiale d'énergie observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie. Cette consommation ne cesse de croître alors que les ressources non renouvelables comme le charbon, les hydrocarbures et l'uranium, aisément exploitables mais épuisables, ne cessent de diminuer car leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine. D'autre part, cette consommation rapide des combustibles fossiles engendre des effets secondaires (augmentation de la pollution, dérèglement climatique …) pouvant hypothéquer l'avenir de l'humanité. Ce constat associé au souci croissant de protection de notre environnement entraîne une montée en puissance des énergies renouvelables, en particulier énergie photovoltaïque.

Les caractéristiques du module PV sont considérablement influencées par les conditions environnementales et les phénomènes d'ombrage car les multiples pics sont observés dans la caractéristique de tension/puissance (P-V) avec un pic global et d'autres pics locaux. Cette caractéristique entraîne une réduction de la puissance produite par le module PV et nuit à sa durée de vie. Par conséquent, plusieurs travaux ont été proposés pour lutter contre l'impact des phénomènes d'ombrage dans le but de capturer de manière optimale la puissance maximale disponible du système PV. Le rendement des systèmes PV peut être alors amélioré par des méthodes dites techniques de Poursuite du Point de Puissance Maximale (MPPT). Ces méthodes, comme leur nom l'indique, permet de tirer le maximum de puissance que le panneau est apte à fournir.

Au fil des années, l'introduction d'approches MPPT robustes pour suivre le MPP du système PV est le titre principal de plusieurs recherches actuelles. Même si ces approches sont conçues pour la même raison, elles diffèrent significativement en termes de performances, de vitesse de suivi, de complexité logicielle, d'exécution matérielle, d'oscillations en régime permanent et de détection du MPP global ou non avec des changements soudains dans les conditions environnementales.

Malgré les points forts des nombreux techniques traditionnels d'optimisation dans la littérature (P&O ; INC) qu'aucun d'entre eux ne peut pas gérer tous les problèmes d'optimisation.

INTRODUCTION GENERALE

L'être humain a toujours utilisé la nature comme source d'inspiration pour résoudre des problèmes complexes, vu qu'elle présente des phénomènes très diversifiés, dynamiques, adaptatifs et robustes. La nature trouve toujours la solution optimale pour résoudre ses problèmes et maintenir l'équilibre parfait entre ses composantes. Les algorithmes bio-inspirés sont des méta-heuristiques stochastiques, pour l'optimisation, inspirées de différents phénomènes du monde naturel.

Ces algorithmes s'inspirent particulièrement des comportements sociaux des animaux et insectes, les évolutions des espèces ou les comportements intelligents de certains organismes. On prend à titre d'exemple algorithme de colonie de fourmi, loups gris….

L'objectif de notre travail est alors de proposer la méthode MPPT basée sur un algorithme méta-heuristique très utilisés, nommé l'algorithme de l'essaim de particules (PSO), qui sera par la suite le comparer avec algorithme de baleine (WOA), ces deux algorithmes ont été étudiées et présentés sous les mêmes conditions (nombre de population, nombre d'itération…).

Le mémoire présenté est organisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, on va présenter les différents types de cellules PV et leur structure de fonctionnement. On va approfondir cette étude par la modélisation des cellules PV ainsi que leurs caractéristiques électriques. Nous allons présenter aussi l'influence des conditions métrologiques (la température et l'éclairement) sur le GPV ainsi que l'effet de l'ombrage partiel. A la fin, nous allons exposer les avantages et les inconvénients des systèmes GPV.

Dans le deuxième chapitre, nous allons nous intéresser à la modélisation d'un système PV, en commençant par le générateur PV puis le convertisseur hacheur survolteur.

Ensuite, nous allons donner un aperçu sur quelques commandes MPPT comme, Perturbation et Observation (P&O), Incrémental Conduction (INC), réseau de neurons et logique floue…etc.

Dans le troisième chapitre, nous allons appliquer les deux stratégies de commande moderne MPPT dans un système PV, ces techniques sont basées sur les algorithmes méta-heuristique PSO et WOA. Les résultats de simulations vont nous permettre de faire une comparaison entre ces deux méthodes métaheuristique.

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART DE SYSTEMES

I.1-Introduction :

Devant la demande croissante d'énergie électrique essentiellement pour les besoins des régions éloignées, désertes et montagneuses ; les systèmes photovoltaïques commencent à trouver de grandes applications.

Ce chapitre est donc consacré à la production de l'électricité à partir de l'énergie solaire ainsi que les éléments liés à cette ressource et sa transformation en énergie électrique, il présente le principe de l'effet photoélectrique, la cellule photovoltaïque et leurs propriétés.

I.2-Définition du photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique, par le biais de capteurs fabriqués avec des cellules PV.

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant en fonction de tension I(V) non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM).

I.3-L'effet photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique, le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteur. Ainsi le choix des matériaux utilisés pour concevoir des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques de certains de leurs électrons susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire et possédant une certaine quantité d'énergie selon leurs longueurs d'onde. Une fois libérés, ces charges se déplacent dans le matériau formant globalement un courant électrique de nature continu (DC). Le flux de courant à travers un semi-conducteur (le silicium le plus couramment utilisé), qui est causé par un phénomène physique appelé effet photoélectrique, génère une force électromotrice (fém) **[GOW99].**

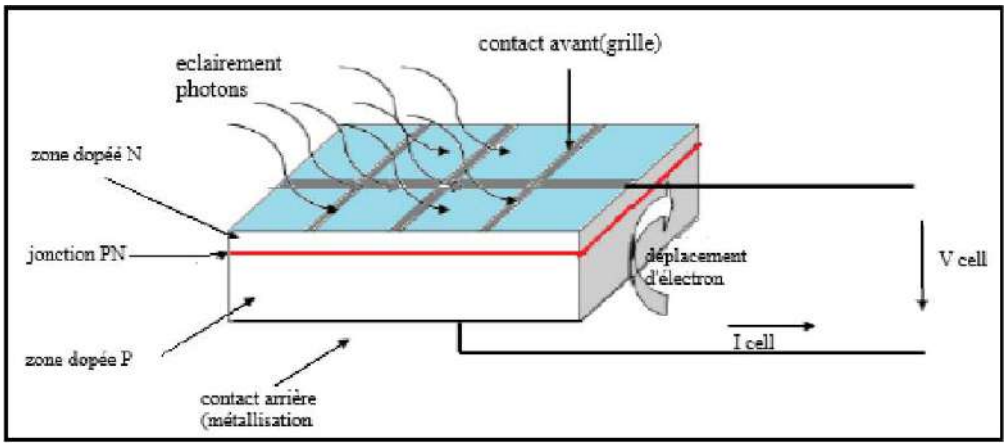


Figure I-1 : Principe de fonctionnement photovoltaïque.

La conversion photovoltaïque Elle met en jeu trois phénomènes physiques intimement liés et simultanés :

- L'absorption de la lumière dans le matériau.
- Le transfert d'énergies des photons aux charges électriques.
- La collecte des charges.

La cellule de base pour cette conversion est appelée cellule solaire ou photovoltaïque.

I.4-La cellule photovoltaïque :

On appelle cellule solaire, un convertisseur qui assure la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. La photopile ou cellule photovoltaïque est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque **[GOW99].**

La cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de deux couches de silicium (matériau semi-conducteur) :

- Une couche dopée avec du bore qui possède moins d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée positivement (zone P).
- Une couche dopée avec du phosphore qui possède plus d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée négativement (zone N).

Lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N.

Les cellules solaires sont recouvertes d'une couche antireflet qui protège la cellule et réduit les pertes par réflexion. C'est une couche qui donne aux cellules solaires leur aspect bleu foncé.

Il existe trois grands types de silicium : mono cristallin, poly cristallin et amorphe.

I.5-Types des cellules PV :

A-Cellule au silicium monocristallin :

Pour ce genre d'applications technologiques, le silicium pur est obtenu à partir de la silice de quartz ou de sable par transformation chimique métallurgique.

Le silicium a un rendement électrique et une durée de vie de l'ordre de deux fois celle du silicium amorphe, mais il est nettement plus cher **[MOU02].**

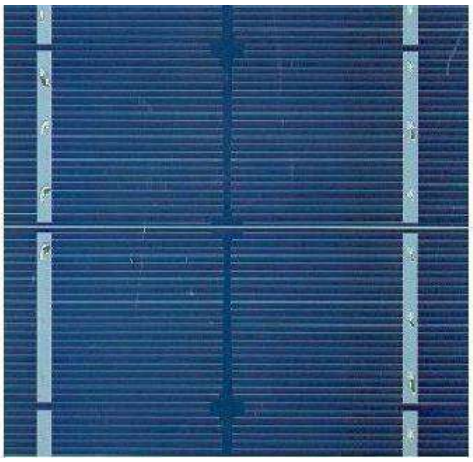


Figure I-2 : cellule au silicium monocristallin.

B -Cellule au silicium poly-cristallin

Le silicium poly-cristallin est un matériau composé de cristaux juxtaposés obtenus par moulage. Ce matériau est moins coûteux (que le monocristallin). Les cellules carrées ou rectangulaires sont faciles à utiliser **[MOU20].**

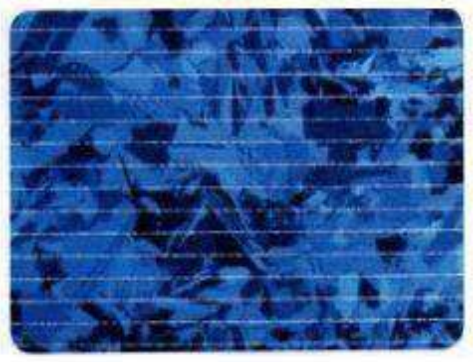


Figure I-3 : Cellule au Silicium Poly-cristallin.

C-Cellule au silicium amorphe :

Le silicium absorbe le rayonnement solaire jusqu'à 100 fois mieux qu'en état cristallin.

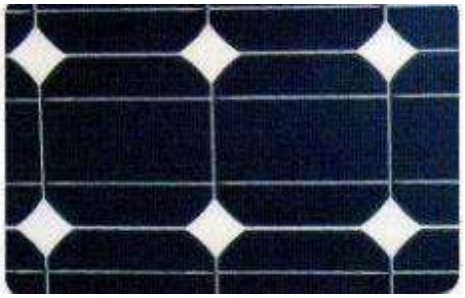


Figure I-4 : cellule à couche très mince.

L'organigramme suivant classe les modèles des cellules photovoltaïques :

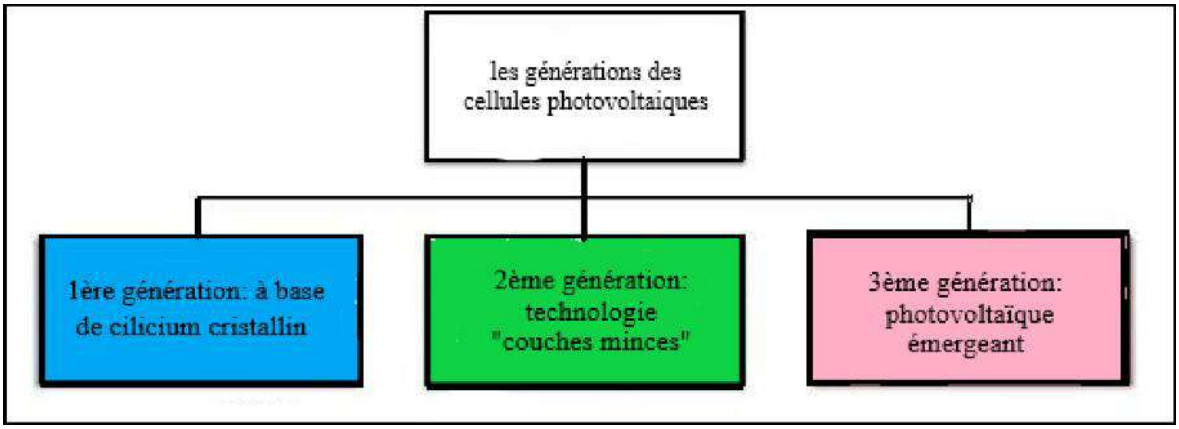


Figure I-5 : Organigramme représentant les différentes générations de cellules photovoltaïques.

I.5.1 Modélisation des cellules photovoltaïque :

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie, plusieurs modèles électriques ont été proposés dans la littérature pour représenter la cellule photovoltaïque. Pour tenir compte des différentes limitations de la cellule photovoltaïque, on introduit la figure(I-6) représentant ces différentes limitations :

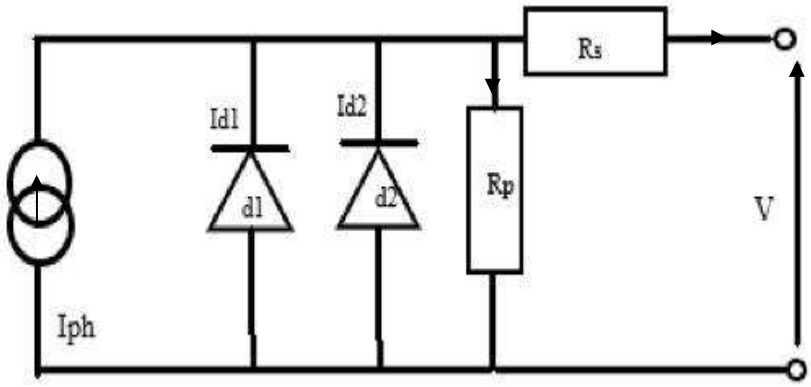


Figure I-6 : Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque.

Les différents paramètres de ce modèle sont :

A. I_{ph}: Le photo-courant (A)

B. La résistance (R_s) : également connue sous le nom de résistance série

C. La résistance parallèle (R_p) : la résistance parallèle (shunt)

Cette valeur devra être la plus élevée possible. Son effet est beaucoup moins remarquable dans un module photovoltaïque par rapport à la résistance série, et il deviendra seulement apparent quand un certain nombre de modules photovoltaïques sont reliés en parallèle pour un plus grand système.

D. La diode (d1): modélise la diffusion des porteurs dans la base et l'émetteur. Son influence sera d'autant plus grande que le matériau présentera une bonne longueur de diffusion.

E. La diode (d2): modélise la génération/recombinaison dans la zone de charge d'espace. Récapitulant ces effets, le rapport courant-tension de la cellule photovoltaïque est donc donné par la relation **[KER15]** :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat}\left(\exp\frac{(v_{pv} + (I_{pv} * R_s))}{nKT} - 1\right) - \frac{(v_{pv} + (I_{pv} * R_s))}{R_s} \qquad \textbf{(I-1)}$$

I_{sat} : Le courant de saturation (A).

K : La constante de Boltzmann ($1.3810*10^{-23}$ J/K).

T : La température effective des cellules en Kelvin (K).

n : Le facteur d'idéalité de la jonction (1<n<2).

I_{pv} : Le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur.

V_{pv}: La tension aux bornes de cette cellule.

I_{ph} : Le photo- courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court-circuit).

R_s : La résistance série représentant les diverses résistances de constants et de connexions.

R_p : La résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction **[GOW99].**

I.6-Les paramètres d'une cellule photovoltaïque :

Les paramètres d'une cellule photovoltaïque sont déterminés à partir de la courbe caractéristique courant-tension (I=f(V)). Ces paramètres permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

I.6.1-Courant de court-circuit (I_{cc}) :

C'est le courant pour laquelle la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (Rs nulle et Rp infinie) **[DIO19]**.

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat}\left[\exp\left(\frac{e(I_{cc}.R_s)}{n.K.T}\right) - 1\right] - \frac{I_{cc}.R_s}{R_p} \qquad \textbf{(I-2)}$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme :

$$I_{sat}\left[\exp\left(\frac{e(I_{pv}.R_s)}{n.K.T}\right) - 1\right] \qquad \textbf{(I-3)}$$

Devant I_{ph} l'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{(1+\frac{R_s}{R_p})} \qquad \textbf{(I-4)}$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule pratiquement ($I_{cc} = I_{ph}$) **[MOU16].**

I.6.2-Tension de circuit-ouvert (V_{co}) :

La tension à circuit ouvert est définie comme la tension maximale générée par la cellule photovoltaïque. Elle représente la tension aux bornes de la cellule sous éclairement sans circuit de charge c'est-à-dire lorsque le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et du matériau de la couche active.

La tension V est donnée par la relation :

$$V_{co} = Vt.\ln\left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}}+1\right) \quad \textbf{(I-5)}$$

$$\text{Avec : } Vt=\frac{n.K.T}{e}$$

I.6.3-Puissance maximale :

Le point de fonctionnement de la cellule est imposé par la résistance de charge. Un choix judicieux de la résistance de charge permettra d'obtenir la puissance maximale. **[FON09].**

V_m: tension correspondante à la puissance maximale fournie.

I_m: courant correspondant à la puissance maximale fournie.

$$P_{max} = V_{max}.I_{max} \quad \textbf{(I-6)}$$

I.6.4-Facteur de forme :

Le facteur de forme détermine la qualité électrique de la cellule, il représente le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule sur le produit de $V_{co}.I_{cc}$

Ce rapport doit avoir une valeur la plus proche possible de (1/100%) :

$$FF=\frac{P_{max}}{I_{cc}.V_{co}} \quad \textbf{(I-7)}$$

Dans le cas d'une cellule idéale, le facteur de forme FF ne peut pas être supérieur à 0,89 du fait de la relation exponentielle liant courant et tension **[DIO19].**

I.6.5-Le rendement η :

C'est le paramètre le plus important d'une cellule car il permet d'évaluer ces performances. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivré par la cellule puissance maximale et la puissance lumineuse de la Puissance incident du rayonnement lumineux **[DIO19].**

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} \qquad \textbf{(I-8)}$$

I.7 - Générateur photovoltaïque :

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 **[KHA20].**

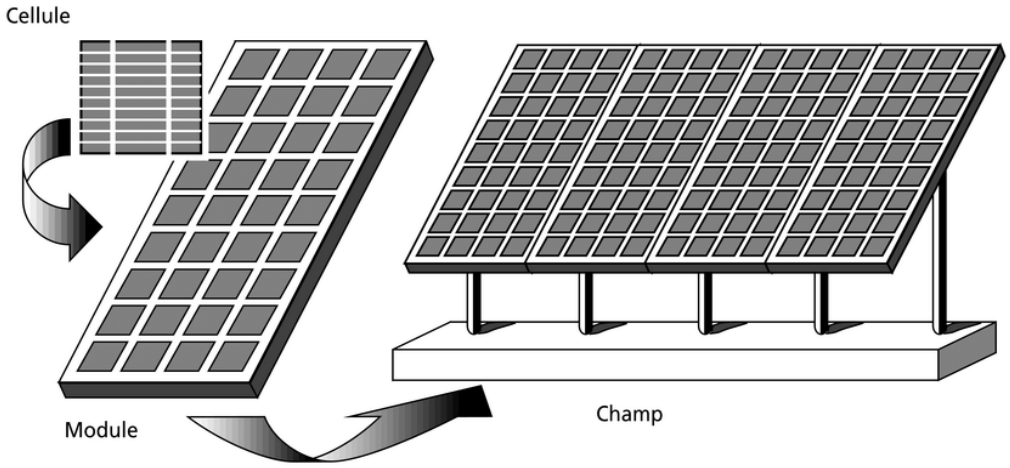


Figure I-7 : Composants d'un générateur PV

I.7.1 -Caractéristique d'un Générateur PV :

La puissance délivrée par la cellule du panneau photovoltaïque a pour expression P=V.I, pour chaque point, on peut calculer la puissance P et tracer sa courbe en fonction de la tension, voir la figure présentée ci-dessous.

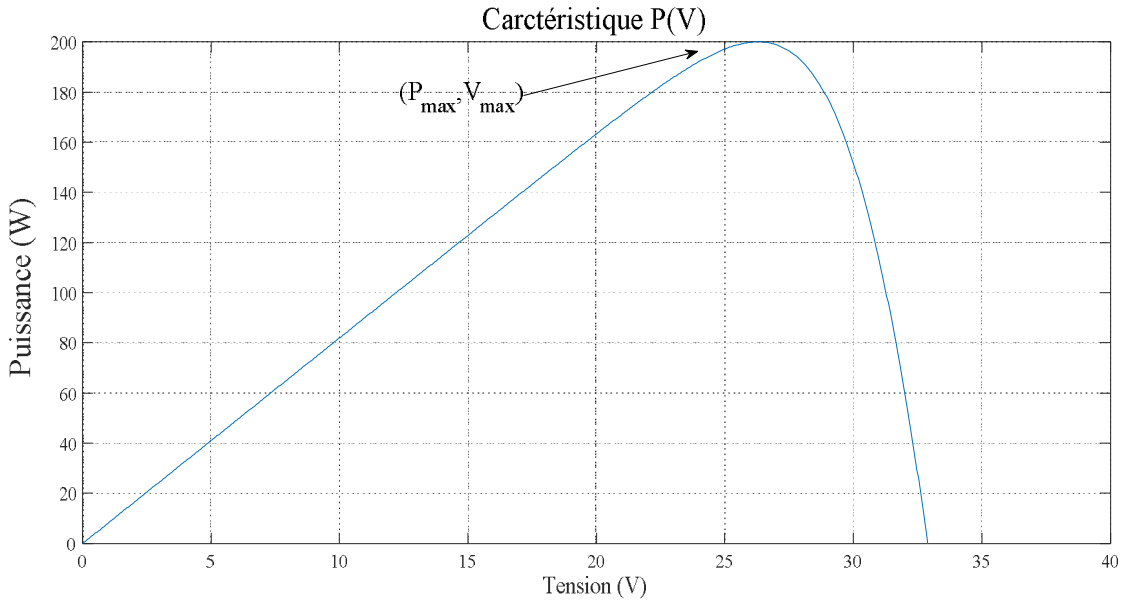


Figure I-8 : Courbe P=f(V) d'un module photovoltaïque.

I.7.2 -Caractéristique courant-tension :

La figure (I.8) représente la courbe I =f (V) d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température. L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m2 et une température de 25°C.

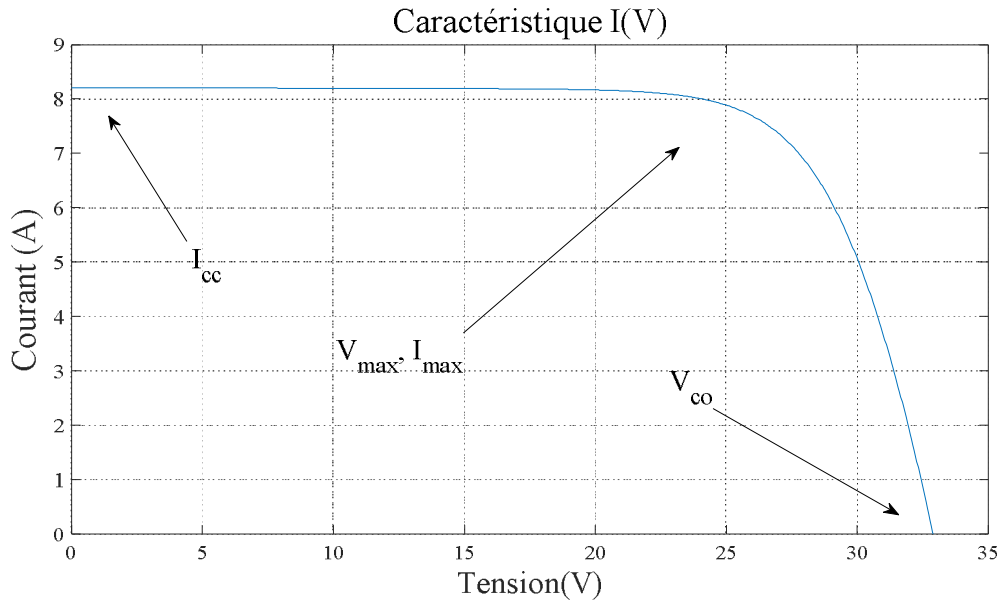


Figure I.9 : Caractéristique I =f (V) d'un module photovoltaïque.

La caractéristique se divise en trois parties :

- **La zone (a)** : où le courant reste constant, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- **La zone (b) :** représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- **La zone (c)** : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension Presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension **[SAL12].**

I.8 -Effets climatiques sur la cellule PV :

I.8.1 -Influence de la température :

On peut remarquer que la caractéristique I(V) d'un panneau photovoltaïque dépend fortement de la température. Ceci devient très évident en évaluant l'équation pour des valeurs choisies de la température en traçant les résultats suivants :

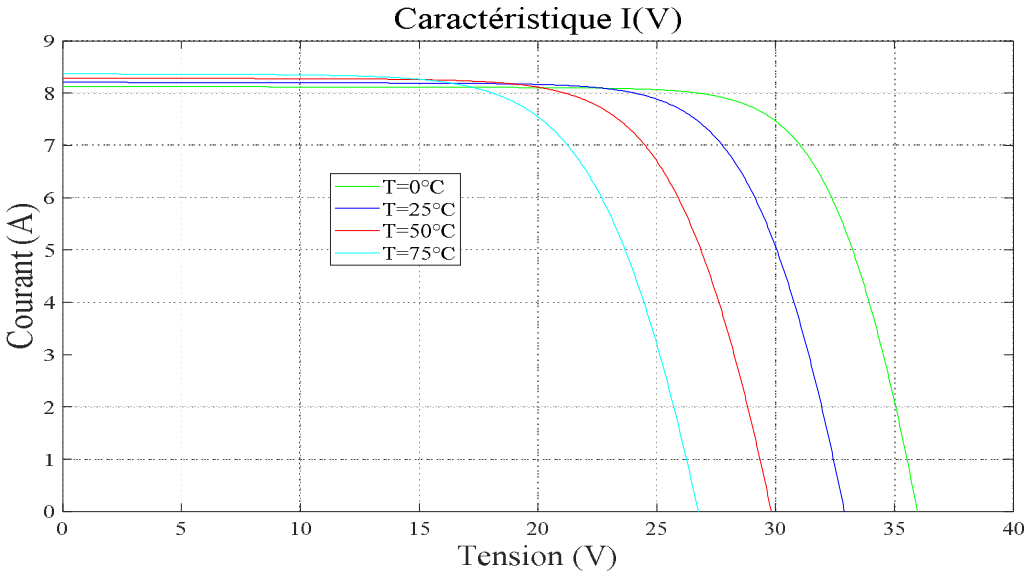


Figure I-9 : La caractéristique de I=f(V) pour différentes températures (G=1000W/m²)

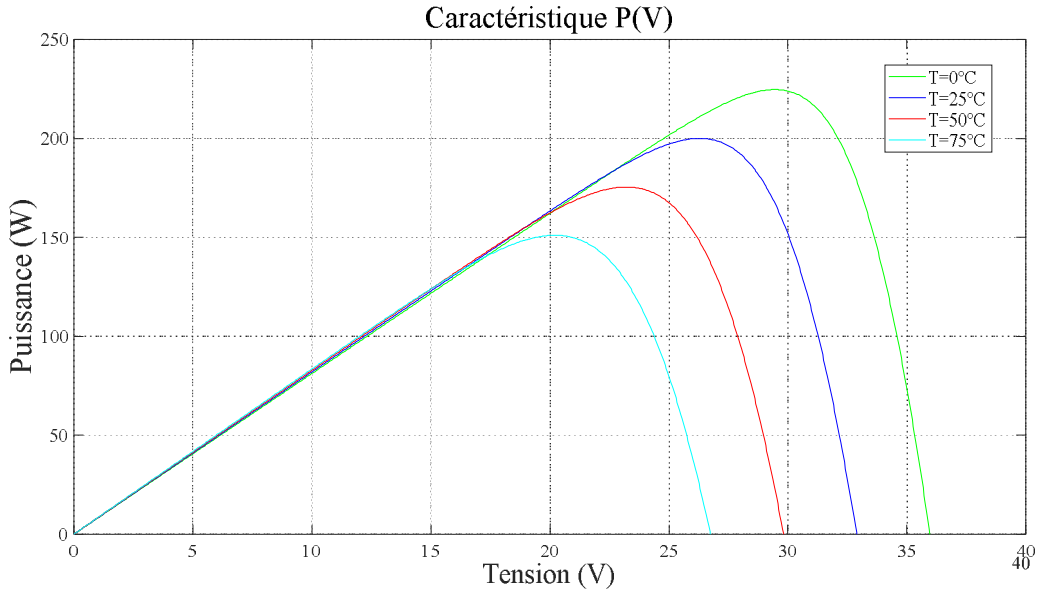


Figure I-10 : Caractéristique P(V) pour différentes températures (G=1000W/m²).

Ces figures (I-9 et I-10) montrent que si l'éclairement est constant (1000 W/m2) et la température augmente, la tension V_{oc} et la puissance diminue par contre le courant I_{sc} varie peut. Donc le fonctionnement de module PV dépend essentiellement des conditions environnementales auxquelles il est soumis. A cet effet, il faut prendre en considération ces facteurs afin de dimensionner correctement le générateur PV qui permettra d'obtenir la puissance souhaitée.

I.8.2 -Influence de l'ensoleillement :

En fixant maintenant la température T=25°C pour différents éclairements, voir figure (I.11) et (I.12), on constate que le courant subit à une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Ce qui se traduit par une augmentation de la puissance, lorsque l'éclairement est augmenté figure (I-11).

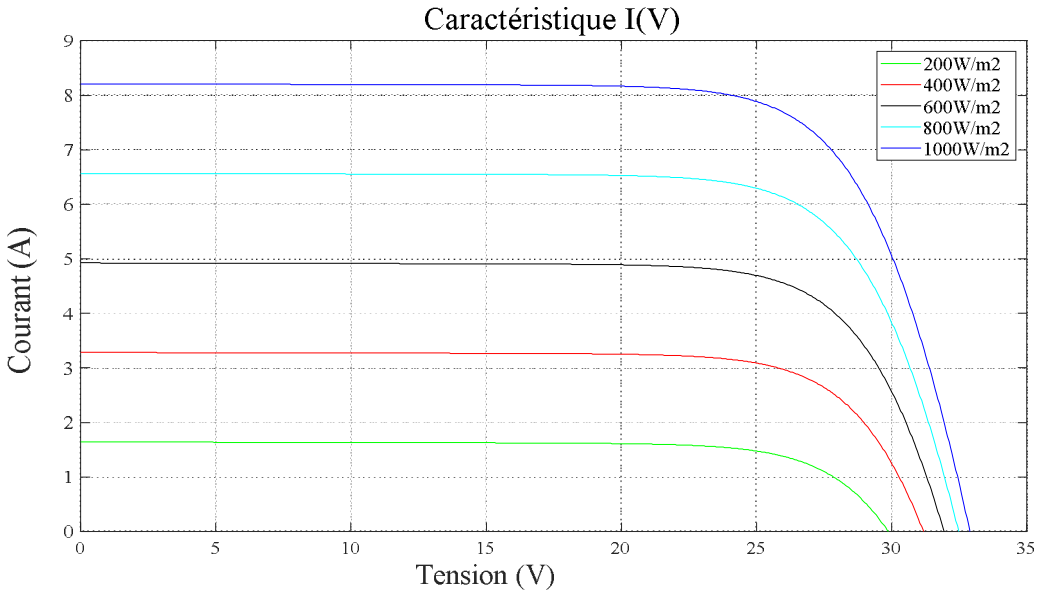


Figure I-11 : Caractéristique I(V) pour différents niveaux de température.

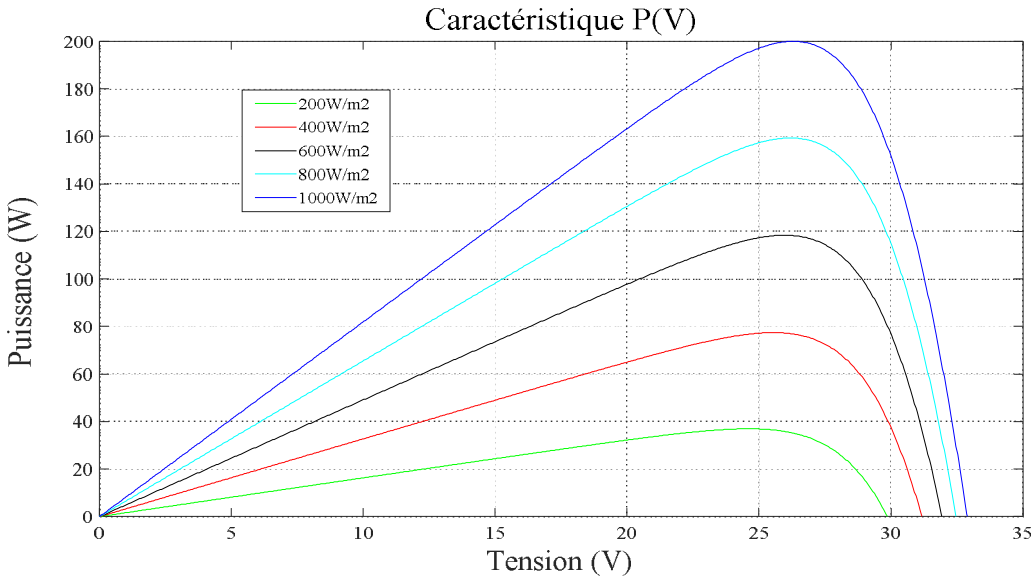


Figure I-12 : Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement(T=25°C).

I.8.3 -Influence de l'association série & en parallèle des cellules PV :

Le module photovoltaïque est par définition un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition au rayonnement utile. En effet, une photopile élémentaire ne produit qu'une très faible puissance électrique moins de 3 W avec une tension de l'ordre d'un volt (1 V) : entre 0,5 et 1,5 V selon les

technologies. Afin de produire plus de puissance, les cellules sont assemblées en série et en parallèle pour former un module photovoltaïque figure (I.13).



Figure I-13 : Module photovoltaïque.

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique.

a) Association en série :

Dans un groupement de *Ns* cellules ou de modules identiques en série figure (I-14), le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série.

La caractéristique du groupement est obtenue en multipliant point par point et pour un même courant, la tension individuelle par *Ns*. En particulier, l'impédance optimale du groupement sera *Ns* fois plus grande que celle de la cellule (module) de base. Les résistances en série s'ajoutent et les résistances parallèles s'ajoutent également aussi :

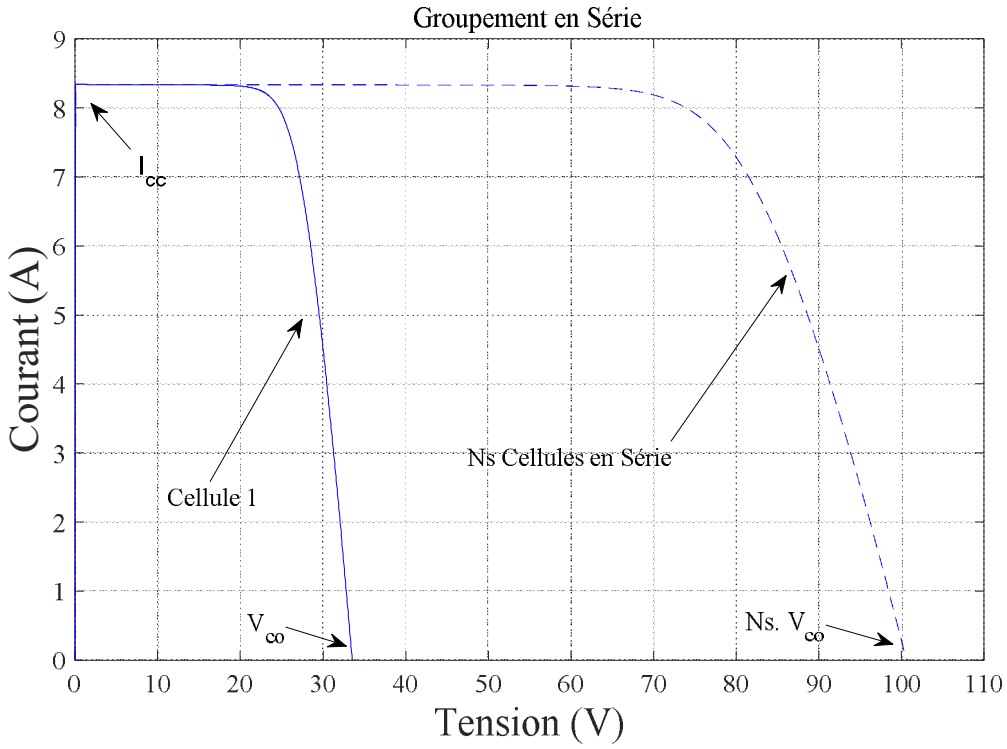


Figure I-14 : Groupement de cellules en série.

b) Association en parallèle :

La figure (I-15) présente la courbe de puissance de Np cellules (ou de modules) en parallèles. Cette fois-ci, c'est la tension de chacun des éléments qui doit être identique, les courants s'ajoutant, la nouvelle courbe est obtenue en multipliant point par point et pour chaque valeur de tension, le courant de la cellule élémentaire par Np.

L'impédance optimale du groupement sera Np fois plus faible que celle de l'élément de base. Ce sont les inverses des résistances série qui s'ajoutent, ainsi que les conductances shunts **[ANN10].**

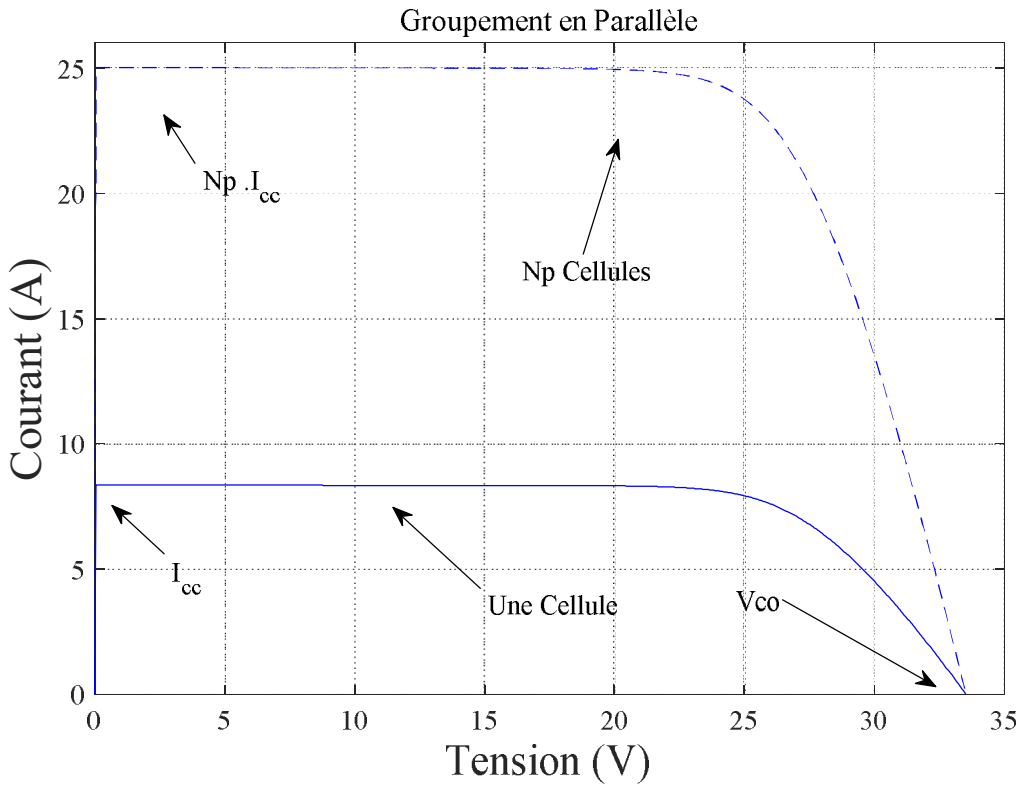


Figure I-15 : Groupement des cellules en parallèle.

b) Association en série -parallèle :

La connexion en série de plusieurs cellules forme une branche de cellules où on a une augmentation de tension pour même courant, un assemblage de plusieurs branches de cellules en parallèle forme un module où on a un accroissement du courant et une conservation de tension. Et une association de plusieurs modules dans un même plan (voir figure I-16) s'appelle un panneau et le montage de plusieurs panneaux en rangées de panneaux série et parallèle forme un champ photovoltaïque ou ce que l'on appelle parfois une sous-station photovoltaïque.

le champ photovoltaïque est l'ensemble des panneaux photovoltaïques montés en série et en parallèle pour atteindre une tension et un courant plus grands. Une association série-parallèle de panneaux photovoltaïques aura une caractéristique I(V) théorique en tout point homothétique à celle des modules de base et obtenue en modifiant les échelles sur les deux axes **[ANN10].**

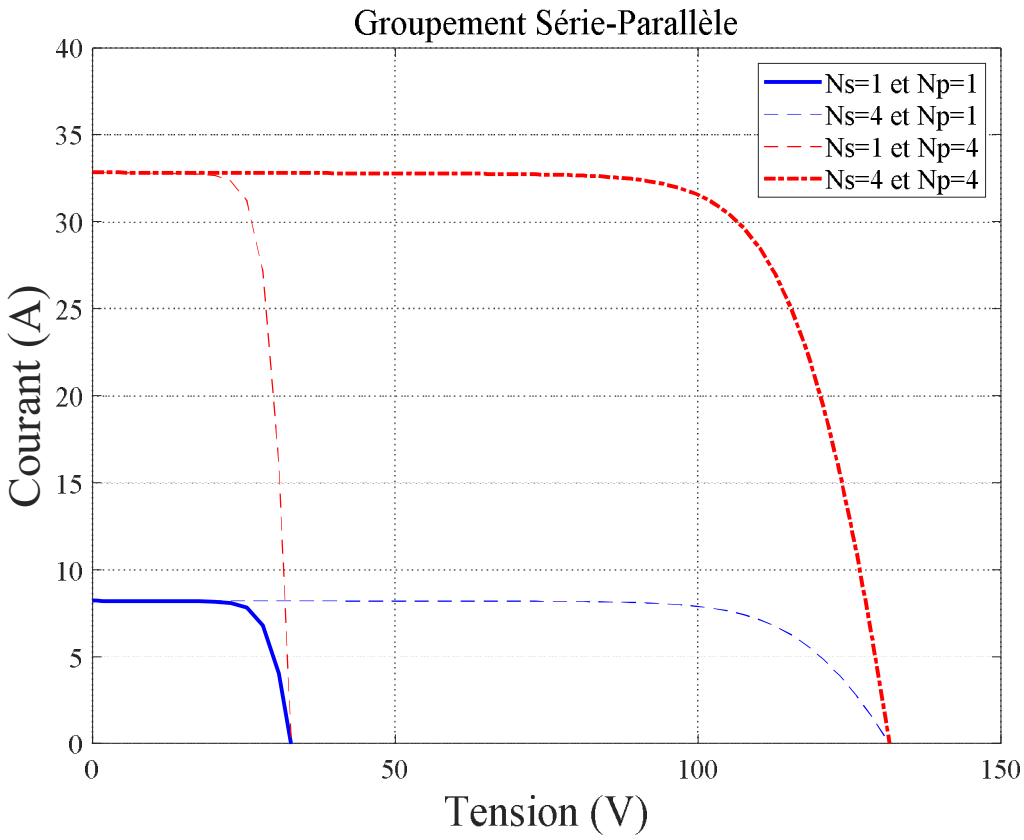


Figure I-16 : Groupement des cellules en Série-parallèle.

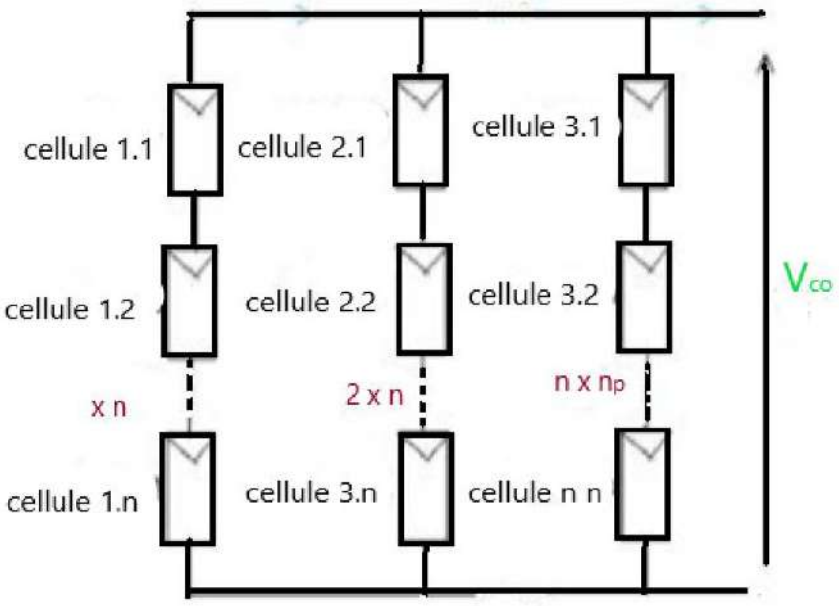


Figure I-17 : Groupement de cellules série- parallèle.

I.9 -Protection d'un PV :

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles:

- La protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).

- La protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds **[ANG06].**

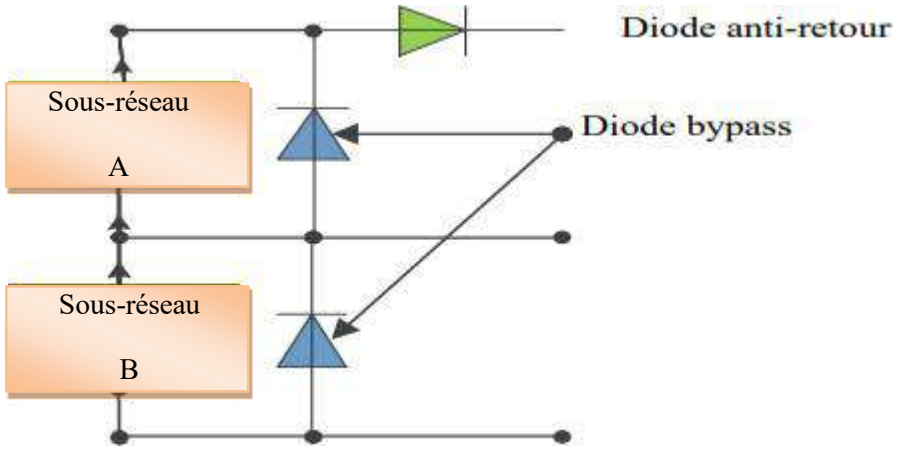


Figure I-18 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.

I.9.1- Système de refroidissement :

La température intérieure d'un panneau solaire peut facilement atteindre 100°C. En conséquence, la température intérieure du panneau ne dépasse jamais 75 °C même si le système est éteint.

Le système de refroidissement est automatique, avec des ventilateurs qui nous a permis de placer la cellule PV à l'intérieur du panneau, placée derrière une couche plastique robuste qui protège contre les jets de pierre **[ANG06].**

I.10- Définition d'un ombrage :

Fasse de l'ombre aux panneaux solaires qu'Il se peut qu'un obstacle, de quelque nature qu'il soit (bâtiment, arbre, etc.)

Un ombrage sur les capteurs photovoltaïques entraine une perte de production d'énergie. Cette perte de production varie en fonction de la taille et de la densité de l'obstacle. Mieux vaut quantifier l'importance de la perte avant d'entreprendre de poser ses panneaux photovoltaïques.

On peut distinguer deux types d'ombrages : l'un partiel et l'autre total.

On appelle ombrage total ou complet ce qui vient couvrir le panneau (couverture, branche, cassée, saleté de toute nature, etc.). L'ombrage partiel laisse passer en partiels des rayons du soleil **[KHA20].**

Il faut savoir que les cellules photovoltaïques sont montées en série. La cellule la plus faible va donc avoir un impact sur le rendement des autres cellules. Ainsi, l'ombrage total d'une rangée de cellules peut rendre l'ensemble du module photovoltaïque inefficace.

Toutefois, les panneaux photovoltaïques sont aujourd'hui équipés de diodes by-pass, ce qui permet de limiter l'impact d'une ombre sur une partie du panneau.

I.10.1- Effet de l'ombrage :

La figure I-19 montre une connexion série d'un ensemble de cellules éclairées avec un ensemble de cellules ombrées. Notez que le photo-courant I_{ph} des cellules ombrées est assez petit que le courant photonique I_{ph} des cellules éclairées. Par conséquent, si le courant du module I_{ms} est faible par rapport aux I_{ph} alors, la diode I_{DS} est polarisée en direct et il n'y a aucun risque.

Mais, si I_{ms} est élevé par rapport à I_{ph} , alors, la diode est polarisée en inverse ; La diode polarisée en inverse I_{DS} offre une résistance élevée consomme de l'énergie et réduira considérablement la charge courant I lui-même. Cela provoque une baisse de la tension de sortie.

Si la différence des niveaux d'éclairage est élevée, I_{DS} peut être endommagé en raison d'une surchauffe **[KHA20].**

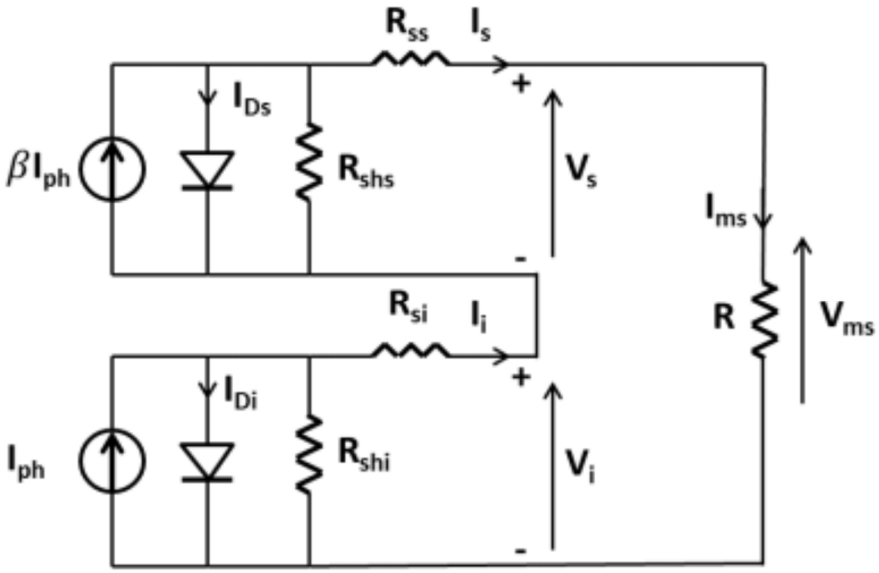


Figure I-19 : Schémas équivalent d'un panneau photovoltaïque ombragé.

I.11-Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes technologies de fabrication des cellules solaire et la modulation mathématique d'une cellule solaire et les diverses caractéristiques d'un panneau solaire,

Dans le chapitre suivant, nous présentons les convertisseurs statiques et les différentes techniques de commande de MPPT.

Chapitre II

convertisseurs DC-DC

II.1- Introduction :

Dans ce chapitre nous allons étudier les convertisseurs DC/DC, qui a pour le but d'assurer l'énergie entre une source de tension continue fixe et une source de tension réglable.

Pour ce type de convertisseur statique, la gamme de puissance que l'on peut « traiter » s'étend de quelques watts, à une trentaine de kilowatts environ.

Cependant, l'apparition de composants de puissance sans cesse plus performants, tout comme la définition de nouvelles structures (multi-niveau en particulier), permettent d'envisager le traitement de puissances plus élevées. Nous distinguons deux types de convertisseurs continus/continus :

- Les convertisseurs appelés ((hacheurs)), qu'ils soient abaisseurs, élévateurs ou bien dévolteurs {survolteurs, qui correspondent aux applications moyennes et fortes puissances,
- Les alimentations à découpages, qui correspondent aux applications petites puissances de la conversion DC/DC **[TOU14].**

II.2- L'étages d'adaptations :

Dans les chaines de conversion photovoltaïque à connexion directe entre un GPV et une charge continue exige l'existence d'un point de fonctionnement qui correspondant à l'intersection entre la caractéristique I(V) du GPV et la caractéristique I(V) de la charge électrique quel que soit sa nature.

Il est possible d'insérer un convertisseur DC-DC entre le générateur PV et la charge, en commandant un suiveur de point maximum de la puissance (PPM). Ce convertisseur est appelé traqueur maximum de point de puissance (MPPT) géré par un algorithme de suiveurs de PPM. L'entrée du convertisseur DC-DC est le générateur photovoltaïque (GPV) et la sortie est la charge.

Le rôle du MPPT est d'assurer le fonctionnement du générateur PV à son PPM, extrayant la puissance disponible maximale **[TIG19].**

II.3- les convertisseurs DC-DC (Hacheur) :

Le convertisseur DC-DC permet d'alimenter une charge sous une tension continue réglable à partir d'une source continue fixe. On obtient une tension de valeur moyenne variable en établissant et interrompant périodiquement l'alimentation de la charge par la source grâce à des interrupteurs.

II.4- Types des convertisseurs (DC-DC) :

Selon la position du commutateur du hacheur, différents types de convertisseurs de tension peuvent être réalisés :

- Abaisseur de tension «Buck ».
- Abaisseur élévateur de tension « Buck-Boost ».
- Élévateur de tension « Boost ».

II.4.1- Hacheur survolteur (Boost) :

Hacheur élévateur, hacheur survolteur, on peut s'appeler aussi hacheur parallèle ou hacheur de type Boost.

C'est un convertisseur direct DC–DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive).

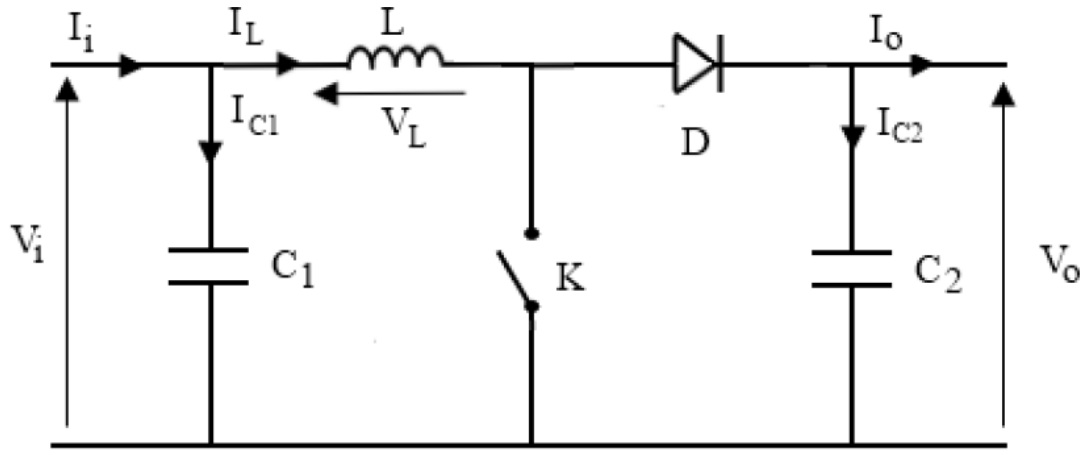


Figure II-1: Schéma électrique d'un hacheur boost.

- **Fonctionnement :**

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée, αTe le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps Tϵ [αTe;Te] l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a alors Vo=Vk En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à **[BOG08]** :

$$V_i=(1-\alpha)V_0 \qquad \textbf{(II-1)}$$

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. celui de la figure (II.2), présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c.-à-d. entre **[0, αTe] [ABO09].**

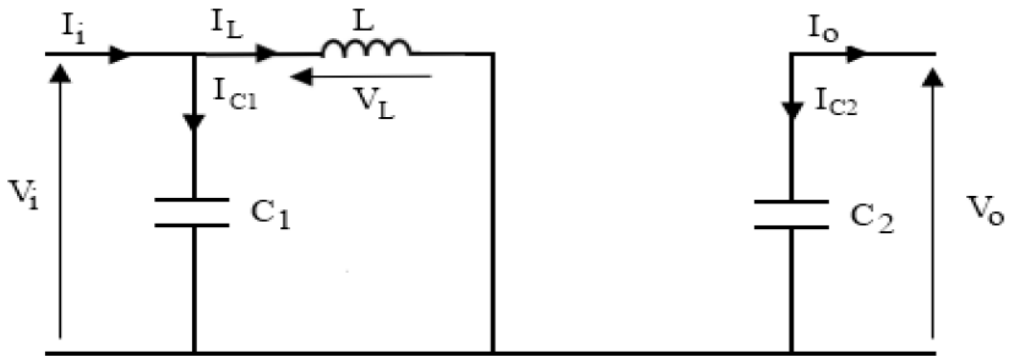


Figure II-2: Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.

Comme pour le circuit buck, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

$$I_{C1}=C_1\frac{dV_i(t)}{dt}=I_i(t)-I_L(t) \qquad \textbf{(II-2)}$$

$$I_{C2}=C_2\frac{dV_0(t)}{dt}=-I_0(t) \qquad \textbf{(II-3)}$$

$$V_L=L\frac{dV_L(t)}{dt}=V_i(t) \qquad \textbf{(II-4)}$$

À l'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant:

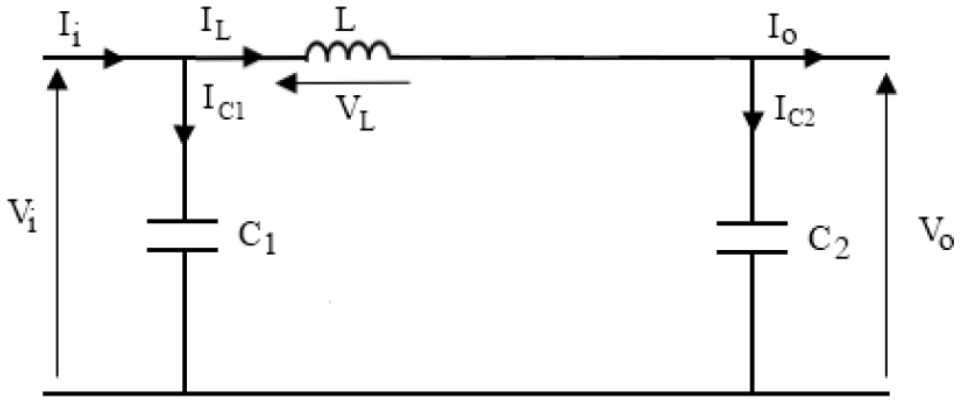


Figure II-3: Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad \textbf{(II-5)}$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \quad \textbf{(II-6)}$$

$$V_L = L \frac{dV_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \quad \textbf{(II-7)}$$

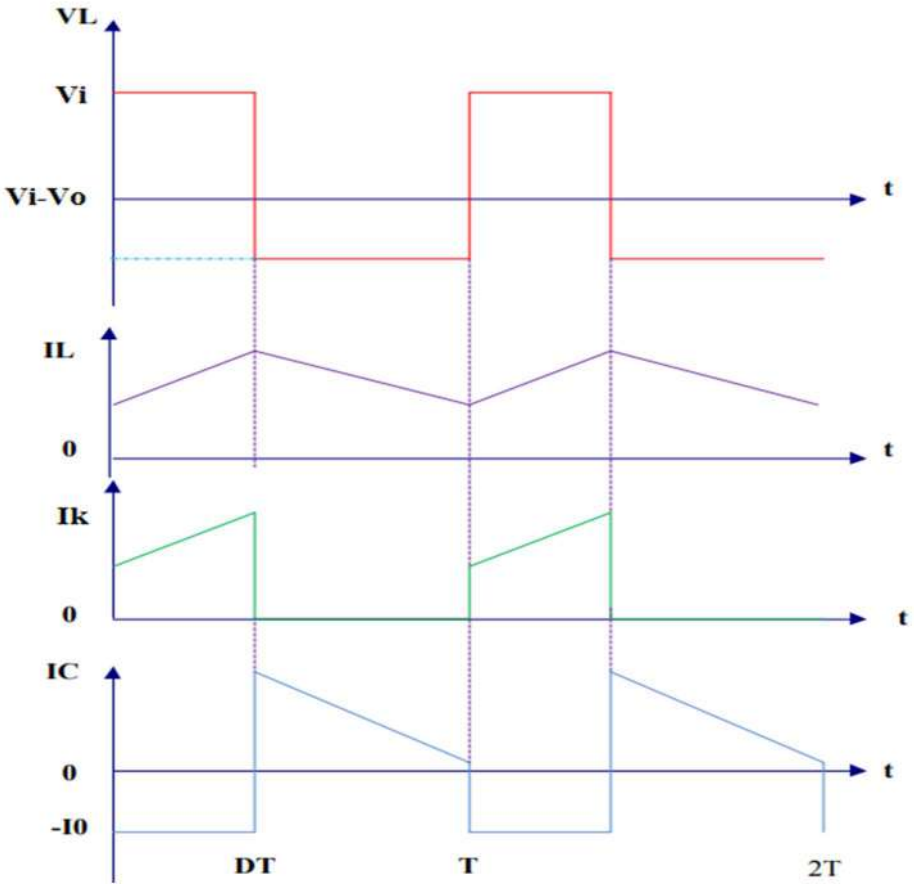


Figure II-4 : Caractéristique de la tension et du courant du Boost.

II.4.2- Hacheur Buck :

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) **[THI05]**.

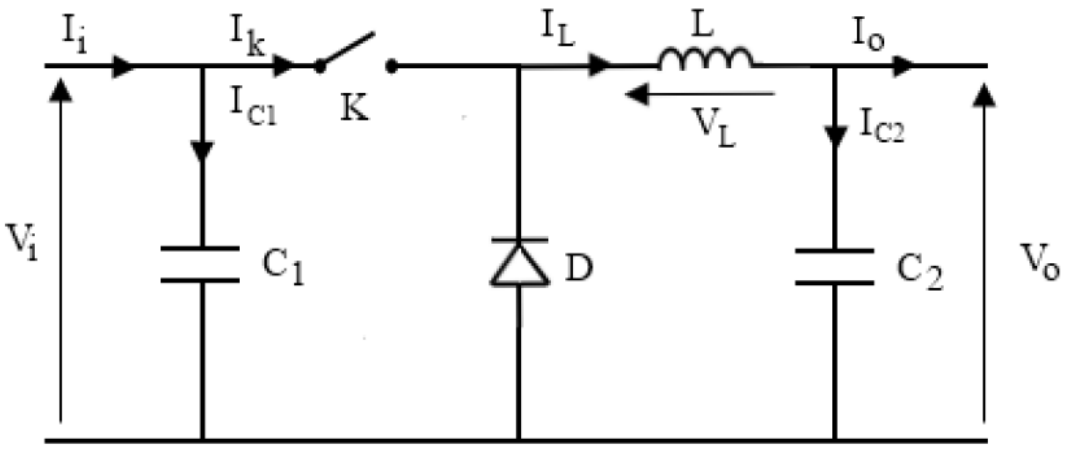


Figure II-5: Schéma électrique d'un hacheur buck.

- **Fonctionnement :**

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , la tension appliquée aux bornes de la diode est Vi , l'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage fe =1/Te .La source Vi fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance.

Pendant le temps Tϵ [αTe, Te] l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle **[BOG08]**.

Les Chronogrammes de la figure (II-6) sont tracés dans le cas d'une conduction continue (tracés dans le cas idéal), c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro. Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle **[BOG08]**:

$$V_0 = \alpha . V_i \qquad \textbf{(II-8)}$$

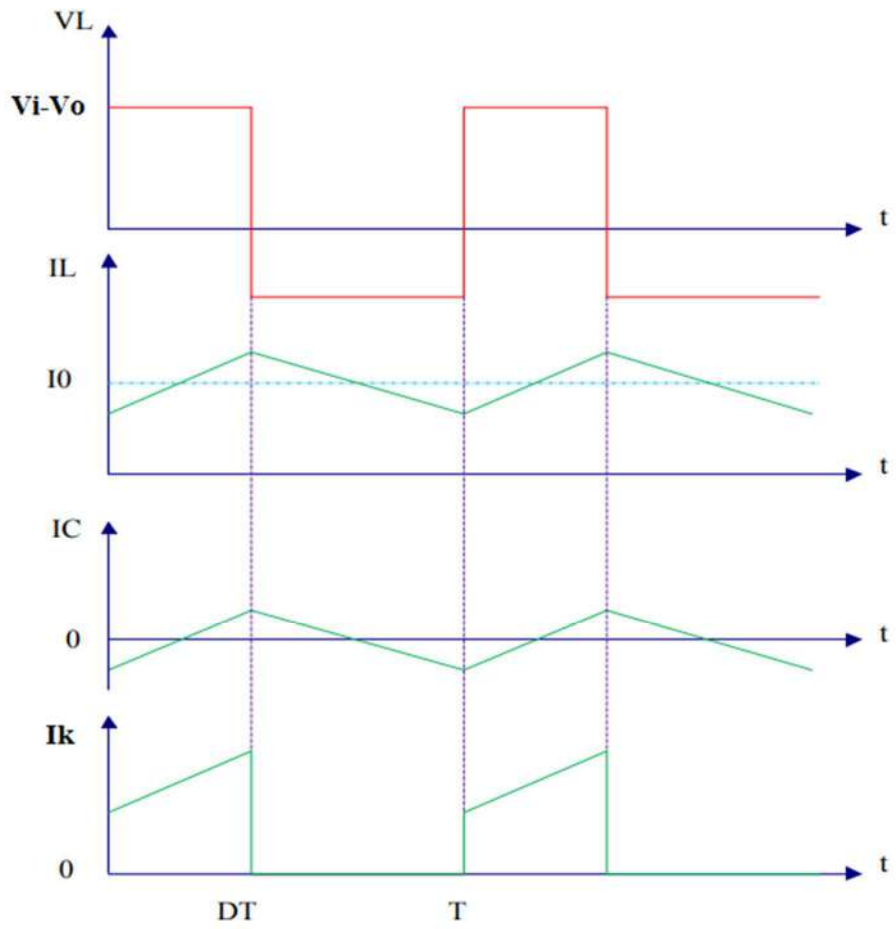


Figure II-6: Caractéristique de la tension et du courant du Buck.

II.4.3- Hacheur Buck-Boost :

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents.

Il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée; son schéma de base est illustré par la figure (II-7) **[ABO09]** :

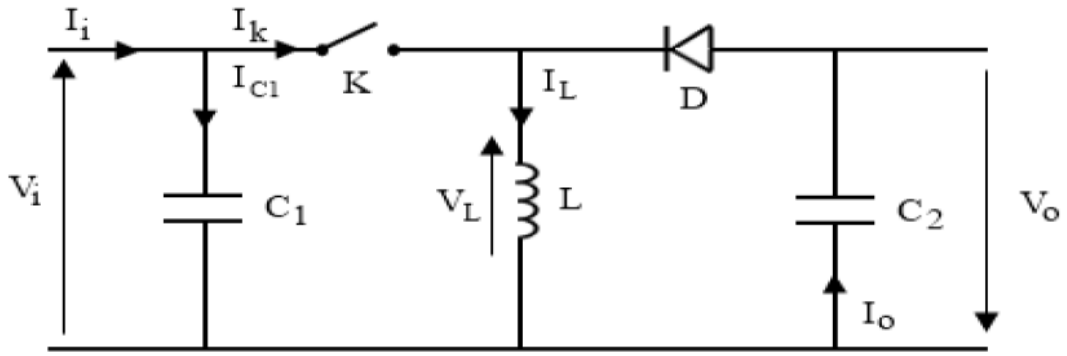


Figure II-7: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost.

- **Fonctionnement :**

Cette structure de convertisseur permet d'obtenir des tensions négatives à partir de tension positive. Le schéma de principe est présenté par la figure (II.8).

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αTe, le courant augmente linéairement. La tension est égale à Vi. À l'ouverture de K, la diode prend le relais et la tension V_i est égale à $(-V_0)$.

Par définition la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle. Il en résulte que **[BOG08]** :

$$V_i.\alpha T_e = V_0(1-\alpha)T \qquad \textbf{(II-9)}$$

Quand le rapport cyclique **α>0.5** le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur boost.

Et si le rapport cyclique **α<0.5** le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur buck.

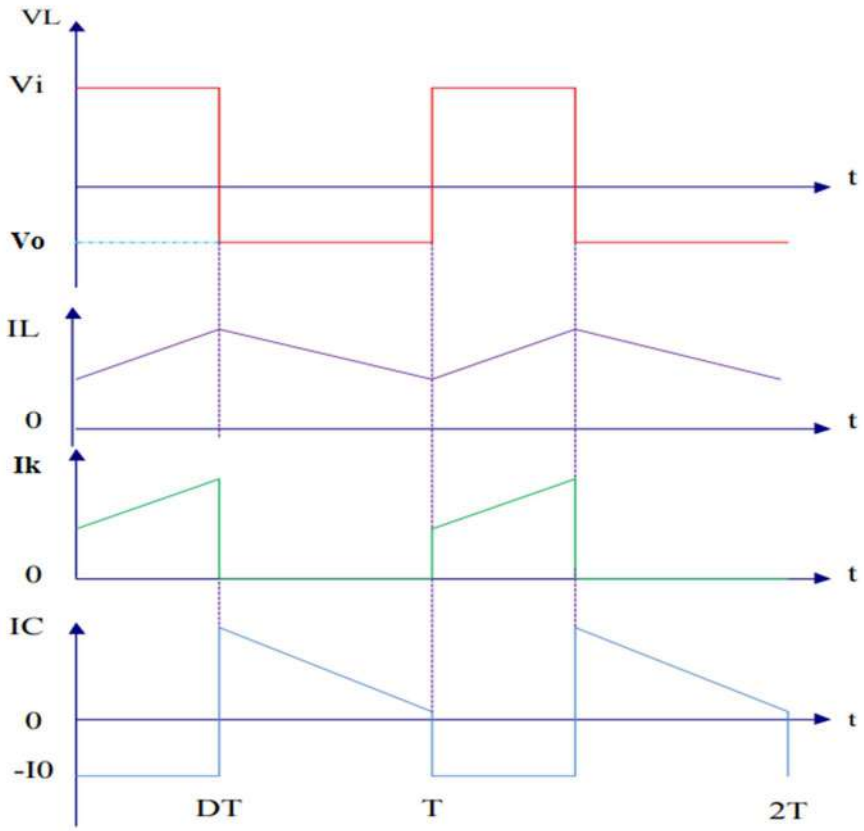


Figure II-8: Caractéristique de la tension et de courant du Buck-Boost.

II.5- Commande MPPT des convertisseurs DC-DC :

Une commande MPPT (Maximum Power Point Tracker), 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 (V_{PPM} et I_{PPM}).

La figure (II-9) montre la chaîne de conversion photovoltaïque, avec un module MPPT qui a pour entrées la tension et le courant de sortie du module. Dans la plupart des cas, on fait une maximisation de la puissance fournie par le module solaire **[HAR16].**

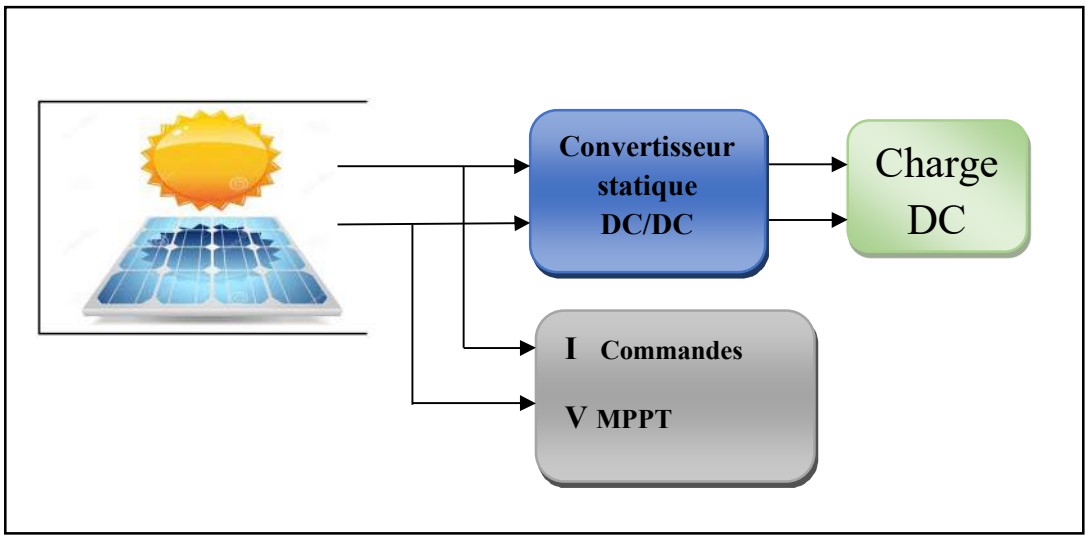


Figure II-9 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT.

La puissance extraite du module est calculée à partir des mesures de courant (I) et de tension (V) du module et la multiplication de ces deux grandeurs **[ABO9].**

$$P_{pv} = I_{pv}.V_{pv} \qquad \textbf{(II-10)}$$

II.5.1- MPPT indirect:

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{cc} ou V_{oc}), il compte aussi les commandes en 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 dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques **[HAR16].**

II.5.2- MPPT directe :

Ces méthodes utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des GPV **[KAM12].**

II.5.3- Poursuite du point de puissance maximale du générateur photovoltaïque :

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïque. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 c'est la date de publication de la première loi de commande de ce type, adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV.

Ces techniques se diffèrent entre eux par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application **[BEL19]** : on cite

Les techniques MPPT classiques :

- Algorithme de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)
- Algorithme du Courant constant (Constant Current)
- P&O,
- INC,
- Hill Climbing, …

Les techniques MPPT basées sur l'intelligence artificielle :

- MPPT base sur la logique floue,
- MPPT base sur les réseaux de neurones,
- MPPT base sur les systèmes hybrides intelligents…

Les techniques MPPT basées sur Optimisation méta-heuristique :

- MPPT basé sur Algorithme de Colonie de fourmi,
- MPPT basé sur Algorithme de Corbeau,
- MPPT basé sur Algorithme de Loups Gris,
- MPPT basé sur Algorithme de Essaim de particules et Algorithme de baleine (qui seront présenter dans le prochain chapitre).

II.5.3.1- La commande MPPT classique :

A) Algorithme de la tension constante (Constant Voltage)

La relation linéaire approximative (II.11) liant les tensions V_{MPP} et V_{oc} du GPV a donné lieu à la méthode dite de la Tension Constante (CV: Constant Voltage):

$$V_{MPPT} \cong k_1 V_{oc} \quad \textbf{(II-10)}$$

Où k_1 est une constante de proportionnalité. Puisque k_1 dépend des caractéristiques du panneau utilisé, il doit être calculé à l'avance en déterminant empiriquement V_{MPP} e t V_{oc} pour différentes conditions atmosphériques.

D'après les résultats de recherches, le facteur k_1 est généralement compris entre 0.71 et 0.78. Une fois que k_1 est déterminé, le V_{MPP} peut être calculé à l'aide de l'expression (II.10), avec V_{oc} mesurée périodiquement en ouvrant momentanément le convertisseur de puissance (circuit ouvert). La tension V_{MPP} est alors prise comme tension de fonctionnement pour un certain temps, puis le cycle est répété.

Le problème avec cet algorithme est la perte de la puissance disponible lors de la déconnection de la charge du GPV. Aussi, le MPP n'est pas toujours entre 71% et 78% de la tension V_{oc}.

Pour pallier à ce problème, des cellules pilotes sont utilisées pour obtenir V_{oc}. Ces cellules doivent être choisies avec précaution, afin de représenter le plus fidèlement possible les caractéristiques du GPV. Une fois que la tension V_{MPP} a été approximée, un contrôle en boucle fermée sur le convertisseur de puissance peut être utilisé pour atteindre asymptotiquement cette tension désirée. Puisque l'expression est juste une approximation, le panneau n'opère jamais au MPP. En plus, dans le cas d'**ombrage partiel**, k_1 n'est plus valide. Même si cette technique n'est pas vraiment une méthode MPPT, elle est facile et pas chère à réaliser. **[LAM14].**

B) Algorithme du courant constant (Constant Current)

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

$$I_{MPPT} \cong k_2 I_{sc} \quad \textbf{(II-11)}$$

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.

La mesure du courant I_{sc} durant le fonctionnement est problématique. Un commutateur est généralement ajouté au convertisseur de puissance pour court-circuiter le panneau et mesurer le courant I_{sc} à l'aide d'un capteur de courant. Ceci augmente le nombre de composants et donc le confit.

La puissance de sortie est réduite lors de la mesure du courant I_{sc}. De plus, le MPP n'est jamais atteint **[LAM14]**

C) 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 Vref, ou du courant Iref, et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée (P=VI**) [AKI05].**

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 **[HAJ15].**

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension V_{PV}, ce qui engendre une variation de la puissance **[DAL13].**

D) Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance) :

Pour rechercher les PPM, cette autre technique se base sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM. Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous.

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad \textbf{(II-12)}$$

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

$$\Delta G = \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} \quad \textbf{(II.13)}$$

D'autre part, l'évolution de la puissance du module (P_{PV}) par rapport à la tension (V_{PV}) donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Lorsque la dérivée de puissance est nulle, cela signifie que l'on est sur le PPM, si elle est positive le point d'opération se trouve à gauche du maximum, lorsqu'elle est négative, on se situe à droite. **[BED12].**

E) **Hill Climbing**

Les algorithmes P &O et IncCond font partie de la technique appelée Hill Climbing (monté de pente) **[LAM14]**

II.5.3.2- Les commandes basées sur l'intelligence artificielle

a) La Commande MPPT Floue :

La commande basée sur la logique floue (dans la littérature anglo-saxonne Fuzzy Logic Control) est de plus en plus populaire grâce à l'évolution des microcontrôleurs **[NAD10][DOL09]**.

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 ΔE et une variable de sortie Δα (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 défuzzification

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

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

b) Les techniques MPPT de réseaux de neurones artificiels :

La technique de réseaux de neurones est, elle aussi, de plus en plus utilisée, car elle offre une grande alternative pour résoudre des problèmes complexes.

Ces dernières années, l'utilisation de cette méthode dans divers domaines d'application ne cesse d'augmenter car elle fonctionne à partir d'une boite noire qui n'exige pas d'informations détaillées sur le fonctionnement du système. Elle établit des relations entre les variables d'entrée et de sortie en analysant les précédentes données mémorisées. Un autre avantage est qu'elle peut traiter des problèmes d'une grande complexité grâce à des paramètres interdépendants.

Les réseaux de neurones sont composés généralement de trois couches différenciées, nommées **[CED08]** :

- Couche d'entrée (Input layer),
- Couche cachée (Hidden layer),
- Couche de sortie (Output layer).

II.5.3.3- Les commandes basées sur l'algorithme méta-heuristique

Les algorithmes métaheuristiques sont des algorithmes d'optimisations qui s'appuient sur l'évolution naturelle. Le problème d'optimisation est défini comme la recherche du minimum ou maximum d'une fonction donnée.

Il existe plusieurs méthodes pour le calcul évolutif, leur principe général est de modéliser les notions d'évolution dans la nature.

Parmi elles et récemment, l'optimisation par essaim de particules (PSO) est apparue comme une méthode prometteuse en raison de ses capacités à optimiser dans des espaces de recherche multimodaux complexes et peut être même appliquée à des fonctions non différentiables, cette technique sera présentée en détaille avec la méthode de baleine dans le prochain chapitre.

II.6- Conclusion :

Dans ce chapitre, on a vu quelques topologies de base des convertisseurs continu-continu (DC-DC), on a présenté leur fonctionnement et on a basé sur l'hacheur BOOST. On a défini la commande MPPT et on a cité quelques techniques classiques et modernes.

Chapitre III

PV basé sur MPPT -PSO ET MPPT-WOA

III.1-Introduction :

Les méthodes heuristiques trouvent des difficultés à obtenir des solutions optimales souvent utilisés pour résoudre de nombreux problèmes surtout la commande MPPT appliquée sur les convertisseurs pour traquer le point de puissance maximale globale mais parfois on rencontre les MPPT locaux.

L'optimisation est une discipline mathématique qui cherche à trouver la valeur minimale ou maximale d'une équation. Pour résoudre le système optimisé, des heuristiques sont utilisées conjointement avec des méthodes mathématiques.

Dans la littérature, le terme méta-heuristique est formé de la combinaison des deux termes méta et heuristique, et est défini comme un ensemble de méthodes pour résoudre des problèmes à travers certaines règles et procédures **[BEL20]**.

Plusieurs méta-heuristiques différentes ont été proposées dans la littérature pour résoudre différents types de problèmes. Nous allons nous intéresser dans ce chapitre à l'application des deux méthodes méta-heuristiques à population, nous proposons, en premier lieu, algorithme de l'essaim de particules PSO pour trouver le maximum de la puissance délivrée par le panneau, avec et sans ombrage. En second lieu, on propose l'algorithme de baleine pour le comparer avec l'algorithme PSO.

III.2-Définition de l'Optimisation :

Un problème d'optimisation se définit comme la recherche du minimum ou du maximum (de l'optimum), on peut aussi trouver des problèmes d'optimisation pour lesquelles les variables de la fonction à optimiser sont contraintes d'évoluer dans une certaine partie de l'espace de recherche **[MOO21]**.

III.3-L'algorithme d'optimisation par essaims particulaires :

Le PSO est un algorithme inspiré des mouvements d'un essaim d'oiseaux. Il a été développé au milieu des années 90 par deux chercheurs américains, Russel Eberhart, ingénieur électricien, et James Kennedy, socio-psychologue, le PSO fait varier la vitesse et la position de chaque individu à l'itération k.

III.3.1- Concept de base de PSO :

La méthode met en jeu de larges groupes de particules sous forme de vecteurs se déplaçant sur l'espace de recherche. Chaque particule **i** est caractérisée par sa position $\mathbf{x_i}$ et par un vecteur de changement de position appelé vélocité $\mathbf{V_i}$. La $i^{ème}$ particule est représentée comme $\mathbf{X_i = (X_{i1}, X_{i2}, ..., X_{iN})}$. Le cœur de la méthode consiste à choisir comment définir $\mathbf{V_i}$.

D'après la socio-psychologie, chaque individu est influencé par son comportement passé et par celui de ses voisins pour décider de son propre déplacement **[BES15].**

Autrement dit, à chaque itération, chaque particule se déplace en fonction des deux meilleures valeurs suivantes :

- La meilleure position passée de la particule, appelée $\mathbf{p_{best}}$.
- La meilleure position obtenue parmi n'importe quel voisin (voisin dans le réseau social et non, nécessairement, dans l'espace), appelée $\mathbf{g_{best}}$.

Lorsqu'une particule considère une partie de la population comme ses voisins topologiques (voisins dans l'espace de recherche), la meilleure valeur est une meilleure position locale, appelée dans ce cas $\mathbf{l_{best}}$.

À chaque itération, ces deux meilleures valeurs sont combinées afin d'ajuster la vélocité et calculer ainsi un nouveau mouvement pour la particule. $\mathbf{p_{best}}$ est considéré comme étant le composant cognitif (cognition component) relatif à l'expérience individuelle et $\mathbf{g_{best}}$ (ou $\mathbf{l_{best}}$) est considéré comme étant le composant social (social component) relatif à la communication sociale.

Notons qu'il semble être communément admis qu'un voisinage social $\mathbf{g_{best}}$ (un individu $\mathbf{X_2}$ ayant, par exemple, pour voisins les individus X_1et X_3, quelles que soient les localisations spatiales de (X_1, X_2, X_3) donne de meilleurs résultats qu'un voisinage spatial $\mathbf{l_{best}}$ (fonction de la proximité des individus dans l'espace de recherche).

La Figure III-1 schématise le déplacement d'une particule selon ces informations **[BES15].**

Le déplacement d'une particule donc est influencé par les trois composantes suivantes:

- **Une composante physique** : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement.
- **Une composante cognitive** : la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée.
- **Une composante sociale** : la particule tend à se fier à l'expérience de ses congénères et, ainsi, à se diriger vers le meilleur site déjà atteint par ses voisins.

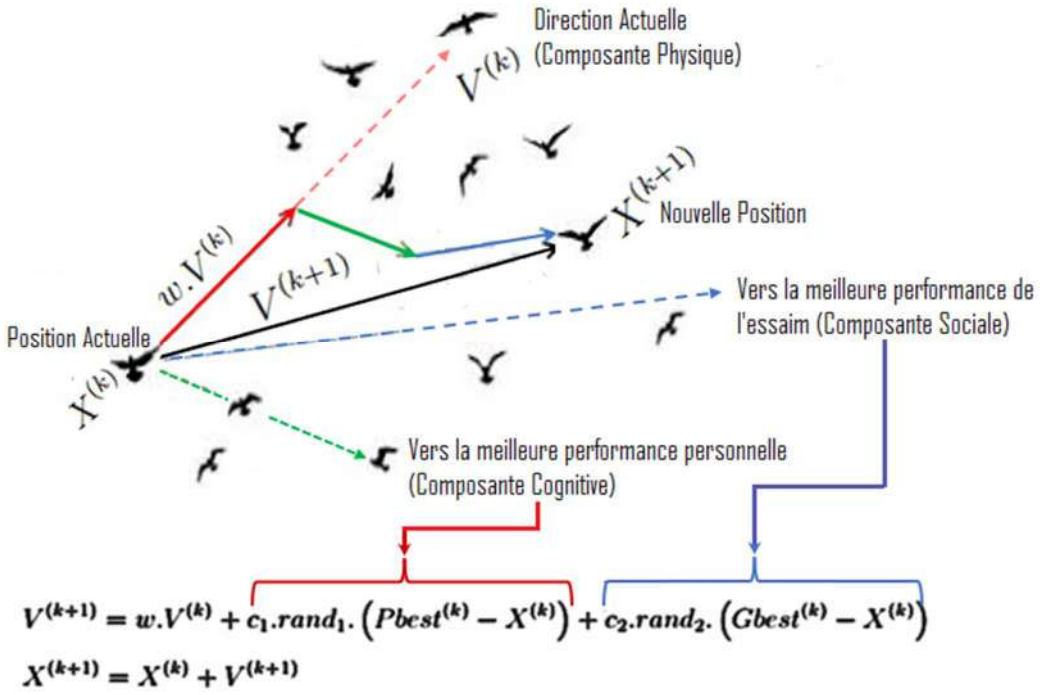


Figure III-1 : Déplacement d'une particule.

Il faut ensuite définir les voisinages et leur structure, il en existe de deux types : **[BES15]**

- **Les voisinages géographiques** : les voisins d'une particule sont ses voisines les plus proches. Ce type de voisinage impose l'utilisation d'une distance pour recalculer à chaque itération (ou toutes les k itérations) les voisins de chaque particule **[BES15].**
- **Les voisinages sociaux** : les voisinages sont établis à l'initialisation et ne sont pas modifiés ensuite. Il existe différentes structures de voisinages sociaux, nous allons vous en présenter quelques-uns (Figure III.2) **[BES15].**

III.3.2-Principe de l'Algorithme PSO :

On dispose une fonction « objectif » à optimiser dans un sens ou dans l'autre. Un essaim est un ensemble de particules positionnées dans l'espace de recherche de la fonction objectif.

Le principe de l'algorithme consiste à déplacer ces particules dans l'espace de recherche afin de trouver la solution optimale. Au départ de l'algorithme, un essaim est réparti au hasard dans l'espace de recherche, chaque particule ayant également une vitesse aléatoire.

Ensuite, à chaque pas de temps :

Chaque particule est capable d'évaluer la qualité de sa position et de garder en mémoire sa meilleure performance, c'est-à-dire la meilleure position qu'elle a atteinte jusqu'ici (qui peut en fait être parfois la position courante) et sa qualité (la valeur en cette position de la fonction à optimiser).

Chaque particule est capable d'interroger un certain nombre de ses congénères de son voisinage et d'obtenir de chacune entre elles sa propre meilleure performance. A chaque pas de temps, chaque particule choisit la meilleure des meilleures performances dont elle a connaissance modifie sa vitesse en fonction de cette information et de ses propres données et se déplace en conséquence.

A partir des quelques informations dont elle dispose, une particule doit décider de son prochain mouvement, c'est-à-dire décider de sa nouvelle vitesse pour ce faire, elle combine trois informations :

- Sa vitesse actuelle.
- Sa meilleure position actuelle.
- La meilleure performance (vitesse et position) de ses voisines.

Le hasard joue un rôle, grâce à une modification aléatoire limitée des coefficients de confiance, ce qui favorise l'exploration de l'espace de recherche.

III.3.3-Formulation du problème :

Dans un espace de recherche de dimension '***N***'(la dimension ***N*** représente aussi le nombre de variable à optimiser), la particule '***i***' de l'essaim est caractérisée par sa position 'X_i' où

$X_i=(X_{i1}, X_{i2}, \dots , X_{iN})$

Et par son vecteur de vitesse V_i où

$V_i=(V_{i1}, V_{i2}, \dots , V_{iN})$

La qualité de cette position est déterminée par la valeur de la fonction coût (fonction objectif) en ce point. Cette particule garde toujours en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, que l'on notée :

$p_{besti}=(p_{besti1}, p_{besti2}, \dots , p_{bestiN})$

La meilleure position atteinte par l'ensemble des particules de l'essaim est notée :

$g_{besti}=(g_{besti1}, g_{besti2}, \dots , g_{bestiN})$

Nous précisons ici que p_{besti} et g_{besti} représentent respectivement, la meilleure valeur de la fonction coût de la particule et de l'essaim.

Au début de l'algorithme, les particules de l'essaim sont initialisées de manière aléatoire et régulière dans tout l'espace de recherche du problème à optimiser.

Par la suite, à chaque itération, chaque particule se déplace, en combinant linéairement les trois composantes citées précédemment. En effet, à l'itération 'k', le vecteur de vitesse et le vecteur de position sont calculés à partir de l'équation (III.1) et de l'équation (III.2), respectivement **[AMI08]**.

$$V_i(k+1)=wV_i(k)+r_1c_1\left(p_{besti}(k)-x_i(k)\right)+r_2c_2\left(g_{besti}(k)-x_i(k)\right) \quad \textbf{(III-1)}$$

$$x_i(t+1)=x_i(t)+V_i(t) \quad \textbf{(III-2)}$$

Où 'w' est une constante appelée **coefficient d'inertie**, c_1 et c_2 sont deux constantes appelées **coefficients d'accélération** et 'r_1' et 'r_2'sont deux nombres aléatoires tirés uniformément dans l'intervalle [0,1], à chaque itérations 'k'.

Dans l'équation (III-1), on peut déterminer les trois composantes mentionnées précédemment :

- $wV_i(k)$ correspond à **la composante physique** du déplacement, où le paramètre 'w' contrôle l'influence de la direction de déplacement sur le déplacement futur.
- $c_1r_1(p_{besti}(k)-x_i(k))$ correspond à **la composante cognitive** du déplacement, où le paramètre 'c_1' contrôle la composante cognitive de la particule.
- $c_2r_2(g_{besti}(k)-x_i(k))$ correspond à **la composante sociale** du déplacement, où le paramètre 'c_2'contrôle l'aptitude sociale de la particule.

III.3.4-Configuration de la méthode :

III.3.4.1-Nombre de particules :

Nous devons choisir un nombre de particules '**N**'de l'essaim qui soit bien adapté à l'espace de recherche et au temps de calcul. Trop de particules augmenteraient sensiblement le temps de calcul de la machine, alors que peu de particules conduiraient à une exploration inefficace et incomplète de l'espace de recherche **[AMI08].**

III 3.4.2-Topologie du voisinage :

La topologie du voisinage défini avec qui chacune des particules va pouvoir communiquer. Il existe de nombreuses combinaisons dont les suivantes sont les plus utilisées :

- **Topologie en étoile :** le réseau social est complet, chaque particule est attirée vers la meilleure particule et communique avec les autres **[DOU14].**
- **Topologie en anneau :** chaque particule est reliée à N particules (en général, N=3), c'est la topologie la plus utilisée **[DOU14].**

- **Topologie en rayon :** les particules ne communiquent qu'avec une seule particule centrale **[DOU14].**
- **La topologie de Von Neumann :** la topologie prend la forme d'une grille (réseau rectangulaire), où chaque particule est reliée à ses quatre particules voisines (à gauche, à droite, au-dessus et au-dessous) cette topologie ralentit la vitesse de convergence de l'algorithme **[AMI08].**
- **Topologie en pyramide :** la topologie prend la forme d'une pyramide c'est une topologie très lourde en termes de calculs car elle nécessite de recalculer le voisinage de chaque particule à chaque itération **[AMI08].**

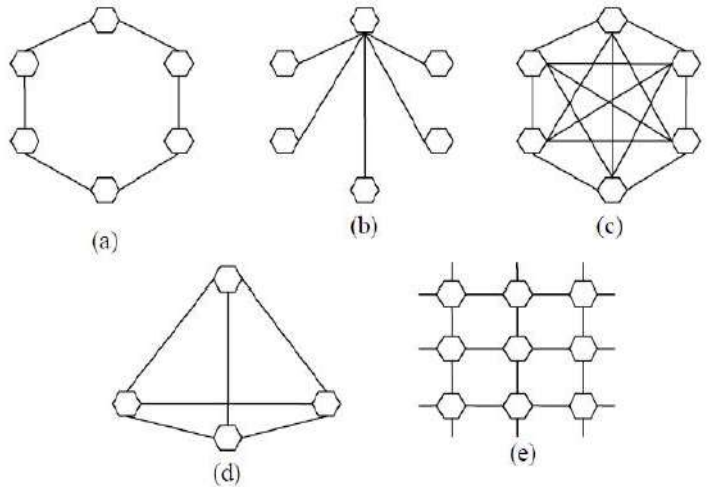


Figure III-2 : Topologie du voisinage (a) anneau, (b) rayon, (c) étoile, (d) pyramide, (e) la topologie de Von Neumann.

III.3.4.3-Coefficient d'inertie :

Le coefficient d'inertie '***w***' a été introduit la première fois par Shi et Eberhart, il contrôle l'influence de la direction de la particule sur son déplacement futur, le but de l'utilisation de ce paramètre est de réaliser un équilibre entre la recherche locale et la recherche globale.

L'intensité de l'exploration de l'espace de recherche dépend de la valeur du poids d'inertie, une grande valeur de '***w***' facilite une exploration globale, alors qu'une petite valeur facilite l'exploration locale **[DOU14].**

III.3.4.4-Coefficients de confiance :

Les coefficients de confiance c_1 et c_2 contrôlent la relation entre les deux tendances d'une particule, quand elle va progresser vers la solution optimale.

La première tendance consiste à retourner vers la meilleure solution trouvée par elle-même et la deuxième tendance est de suivre la solution des particules de voisinage.

c_1 et c_2 sont des constantes qui représentent une accélération positive, avec

$$c_1+c_2\leq 4 \qquad \textbf{(III-3)}$$

III.3.4.5-Critères d'arrêt :

Comme indiqué précédemment, la convergence vers la solution optimale globale n'est pas garantie dans tous les cas même si les expériences dénotent la grande performance de la méthode. De ce fait, il est fortement conseillé de doter l'algorithme en définissant un nombre maximum d'itération.

L'algorithme doit alors s'exécuter tant que l'un des critères de convergence suivant n'a pas été atteint :

- Nombre maximum d'itération a été atteint.
- La variation de la vitesse est proche de 0.
- Le fitness de la solution est suffisant **[DOU14]**.

III.3.4.6-Avantages et inconvénients de PSO :

L'algorithme du PSO présente un avantage certain sur les méthodes classiques dans le sens où il permet une exploration aléatoire de l'espace de solution.

De plus de sa simplicité à mettre en œuvre et son exécution conduit à l'obtention de très bon résultat, rapidement et facilement avec peu de paramètre à ajuster.

Bien que le PSO trouve de bonnes solutions dans un temps beaucoup plus court que d'autres algorithmes évolutionnaires, l'amélioration de la qualité des solutions ne peut être garantie en augmentant le nombre d'itération **[MAN 12].**

L'algorithme de PSO a deux inconvénients principaux :

- Le premier inconvénient est que l'essaim peut prématurément converger.
- Le deuxième inconvénient est que les approches stochastiques ont un problème de dépendance, tout changement d'un de leurs paramètres peut avoir un effet sur le fonctionnement de l'algorithme tout comme sur la solution obtenue.

III.4-Problème du MPPT sous ombrage partiel :

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source DC à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui nécessite généralement une tension DC constante. Un convertisseur élévateur, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur supérieure.

Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est du côté droit du MPP. C'est un convertisseur DC-DC direct. La source d'entrée est de type DC (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension DC (condensateur en parallèle avec une charge résistive). La configuration proposée dans ce travail se compose de quatre modules connectés en série (III- 3).

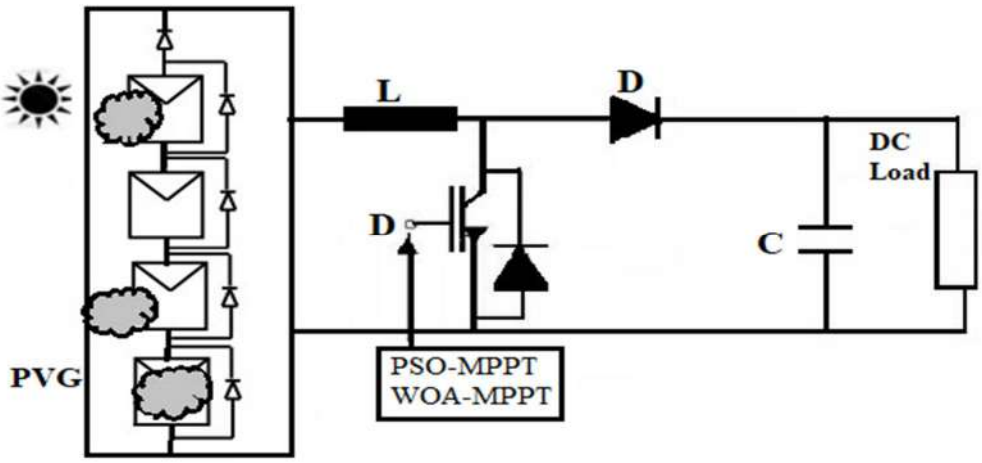


Figure III-3 : Structure du système photovoltaïque proposé partiellement ombragé.

Les courbes P-V et I-V sous divers modèles d'ombrage partiel d'un générateur photovoltaïque composé de quatre modules en série sont illustrées à la Figure III-4 et III-5, on propose dans ce travail trois scenarios.

- **Pas d'ombrage** : 1000-1000-1000-1000 W/m^2
- **Ombrage Faible** : 1000-1000-200-1000 W/m^2
- **Ombrage Fort** : 500-1000-800-200 W/m^2

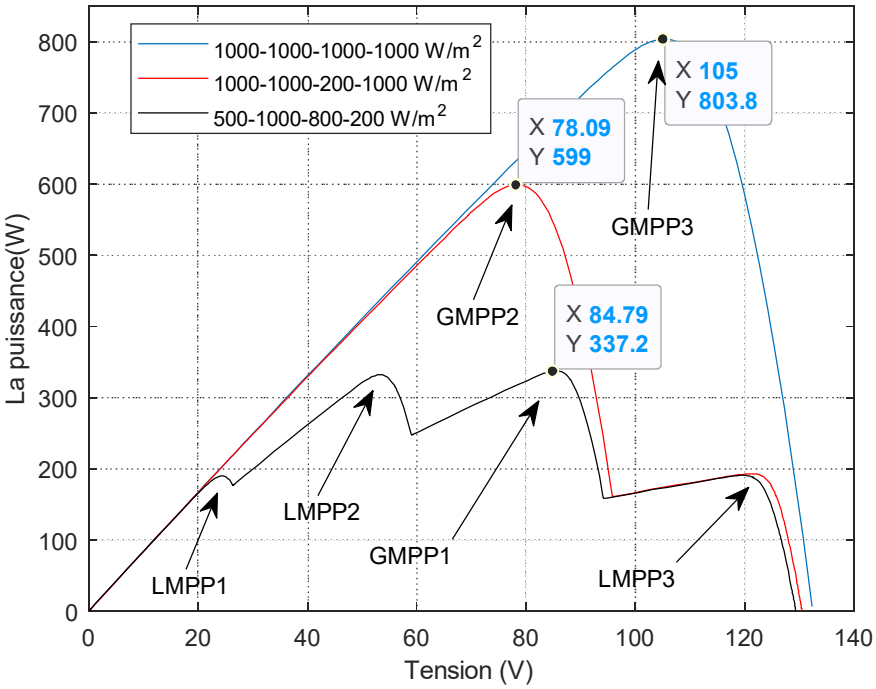


Figure III-4 : Impacts de l'ombrage partiel sur la caractéristique P(V) à T=25 °C

À partir de cette figure représentée ci-dessus, il existe plusieurs pics (Global Maximum Power Point **GMPP** et local Maximum Power Point **LMMP**) dans une courbe (P-V) sous Condition d'ombrage partiel (Partial Shading Condition PSC), et les amplitudes des GMPP et leurs emplacements dépendent du motif d'ombrage partiel.

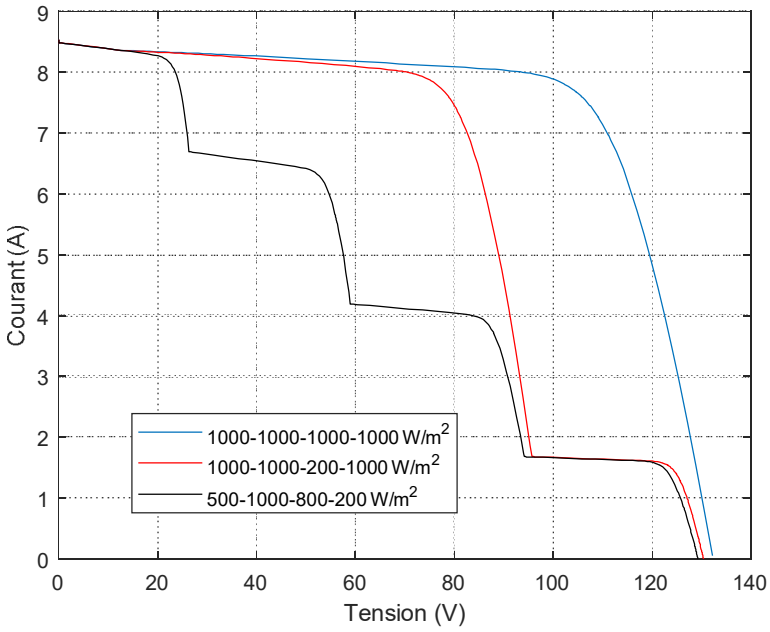


Figure III-5 : Impacts de l'ombrage partiel sur la caractéristique I(V) à T=25 °C

III.4.1 MPPT basé sur l'algorithme PSO :

III.4.1.1 Description

L'algorithme le plus puissant considéré comme idéal pour GMPPT était un algorithme d'optimisation d'essaim de particules (PSO). Cette méthode d'optimisation a été utilisée à des fins de contrôle pour localiser le pic global où il a été appliqué pour la première fois pour MPPT ;

Le suivi du point de puissance maximale par la méthode méta-heuristique (PSO) est utilisé pour obtenir la puissance optimale, l'entrée du bloc MPPT est représentée par la puissance (V_{pv}*I_{pv}) et la sortie par le rapport cyclique du convertisseur DC-DC comme le montre la figure.

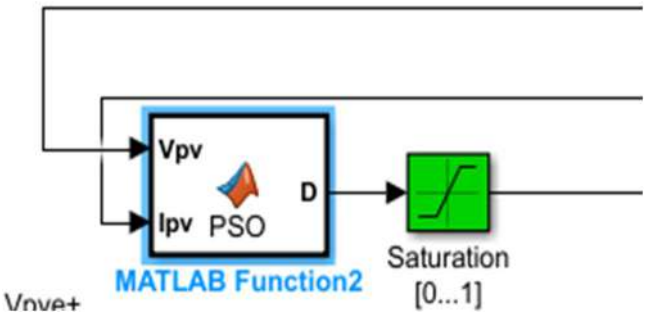


Figure III-6 : Schéma de bloc du MPPT-PSO (Entrée/Sortie)

L'organigramme suivant présente la méthode PSO-MPPT

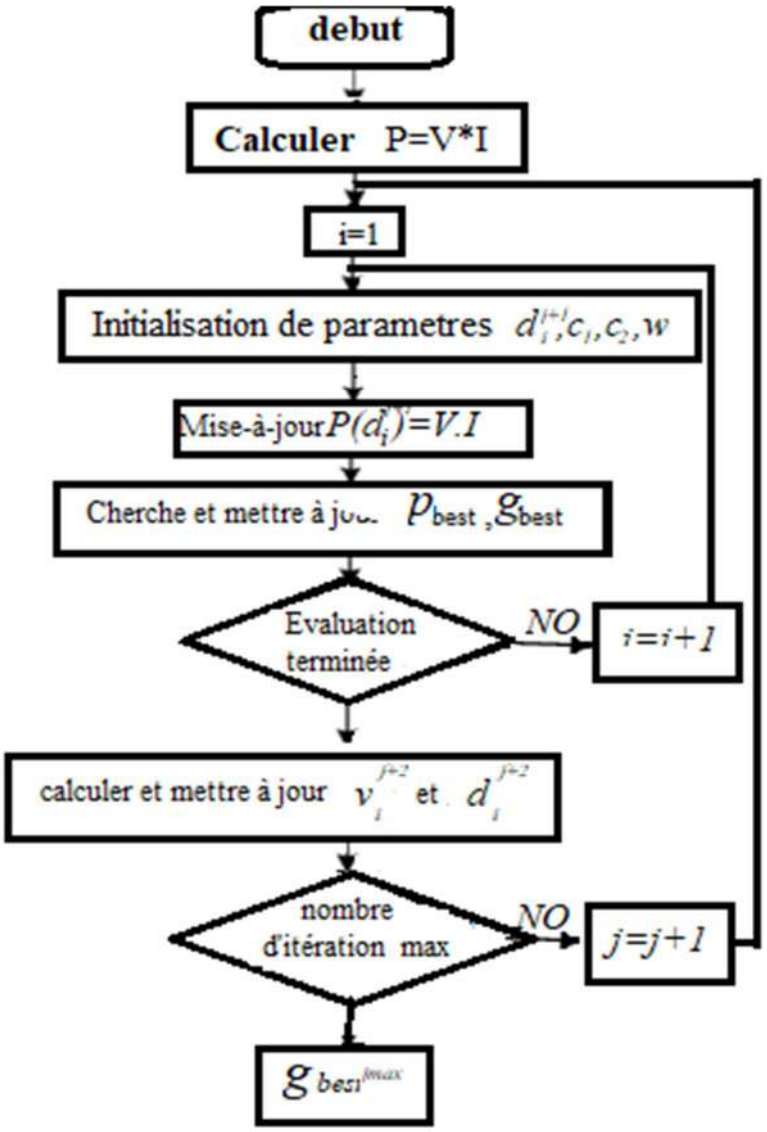


Figure III-7 : L'organigramme de la méthode proposée MPPT-PSO

III.4.1.2 Résultat de simulation

Comme le montre la figure (III-4), nous avons un seul pic (GMMP3) dans le premier cas, nous avons deux pics (GMMP2, LMMP) dans le second, et dans le troisième, nous avons quatre pics (GMMP1, trois LMMP). Les Figures III-8 et III-9 représentent la réponse de puissance (P(V)) et de courant (I(V)) et la Figure III-10 représente la réponse de la puissance et le rapport cyclique, ces trois figures sont présentées sous les trois scénarios cités précédemment en appliquant la méthode PSO. Selon la première figure, on trouve que l'algorithme cherche le GMMP (III-8a) et après un certain temps (environ deux secondes), il converge vers le MPP global (III-8b).

Comme il a été déjà cité auparavant, le système proposé se compose de quatre panneaux montés en série, la puissance maximale d'un seul panneau égale à 200W (voir annexe), selon la Figure III-10a, On observe que le PSO atteint la valeur maximale de la puissance (ex, pour le scénario-1, on trouve que l'algorithme à t=1.5sec, il réussit à atteindre le maximum 800V).

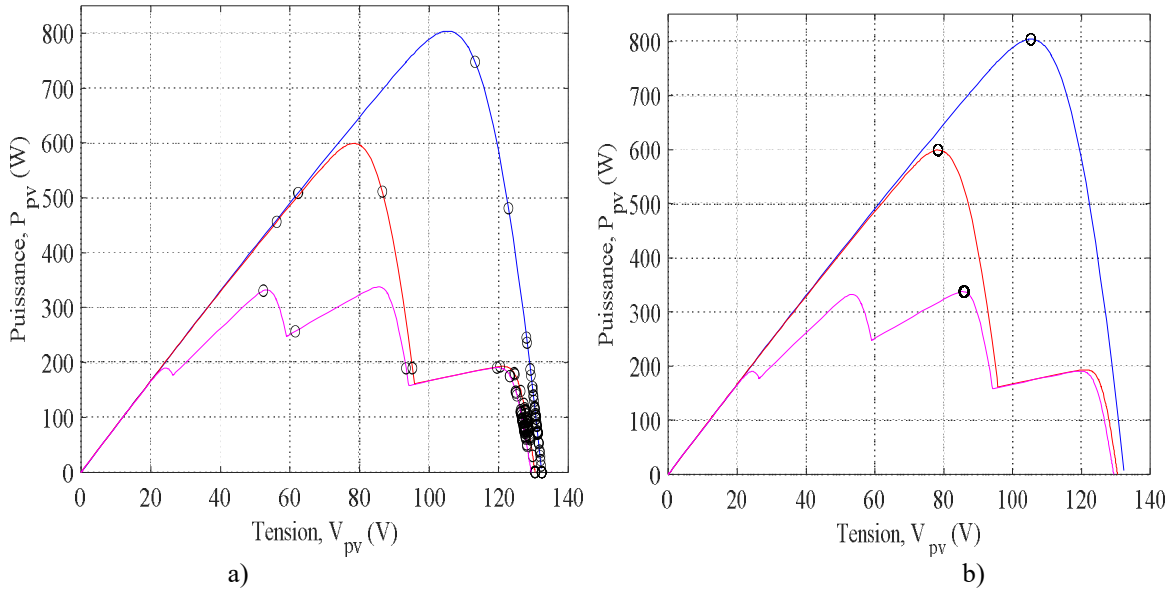


Figure III-8 : Courbe P=f(V) d'un PV sous l'ombrage avec MPPT-PSO

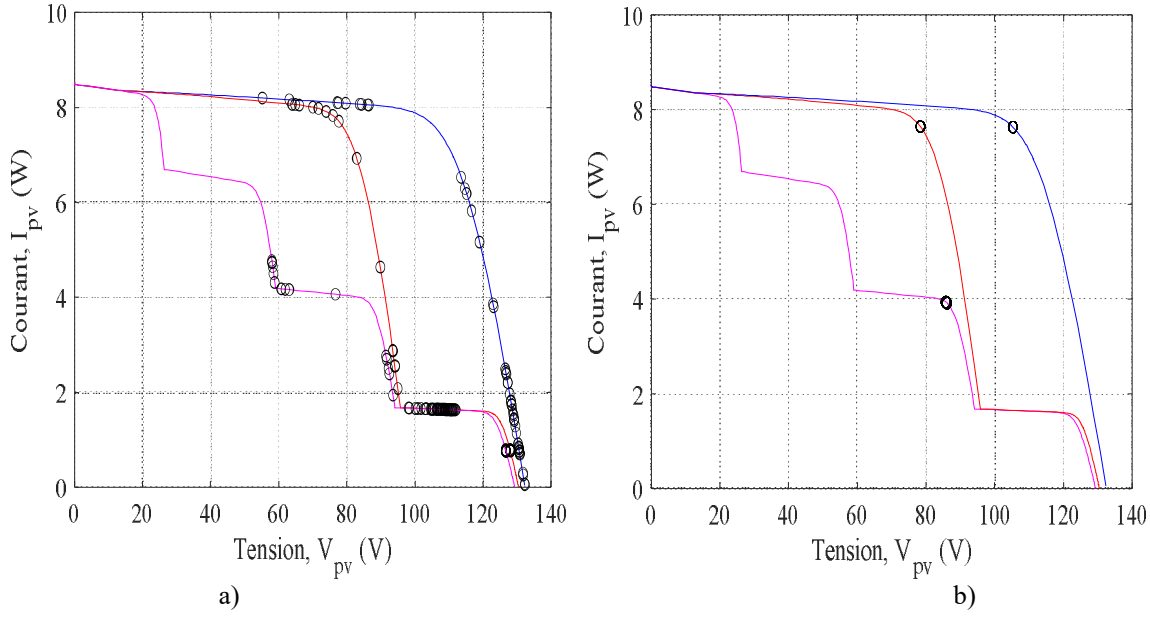
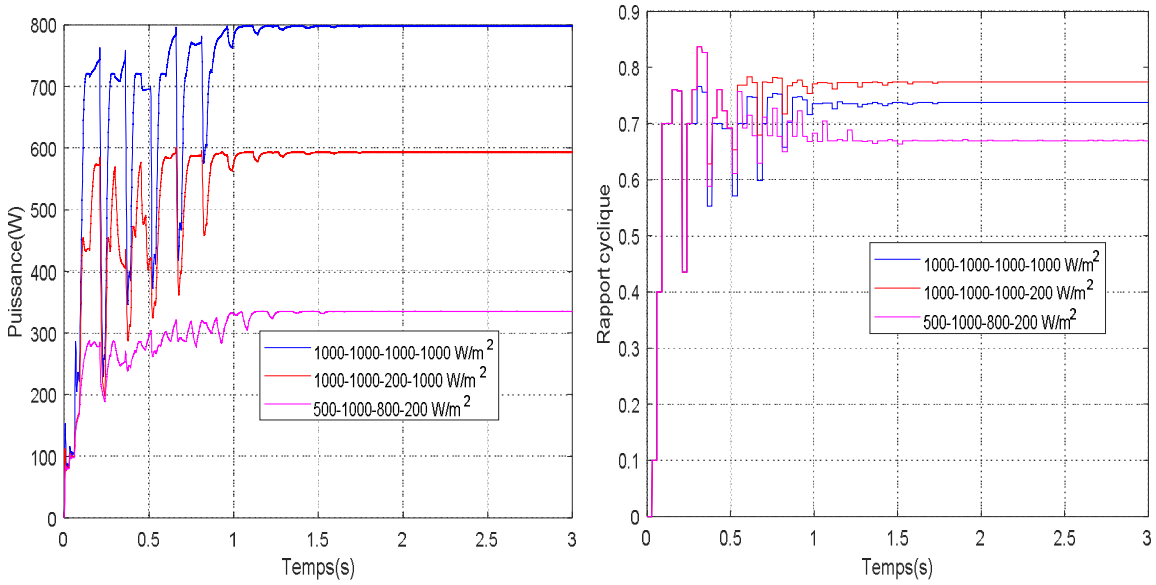


Figure III-9 : Caractéristique I =f(V) d'un PV sous l'ombrage avec MPPT-PSO.



a) b)

Figure III-10 : Réponse de la puissance et rapport cyclique PV sous l'ombrage avec MPPT-PSO

Pour montrer la faisabilité et l'efficacité de la méthode proposée, une étude comparative sera faite par un autre algorithme métaheuristique nommé algorithme de baleine à bosse (Humpback whale).

III.5 Définition de l'Optimisation des baleines à bosse :

L'algorithme d'optimisation des baleines est l'un des algorithmes méta-heuristiques développés sur la base de la stratégie de chasse au filet à bulles des baleines à bosse **[6]**. Les baleines à bosse sont généralement nourries par de petits bancs de poissons près de la surface de l'eau. Les baleines à bosse créent des bulles d'air lorsqu'elles s'approchent de la proie pour garder leur proie ensemble ainsi que pour leur permettre de s'approcher de la proie sans être vues.

La stratégie de chasse des baleines à bosse est illustrée à la Figure (III-11) **[YUK19].**

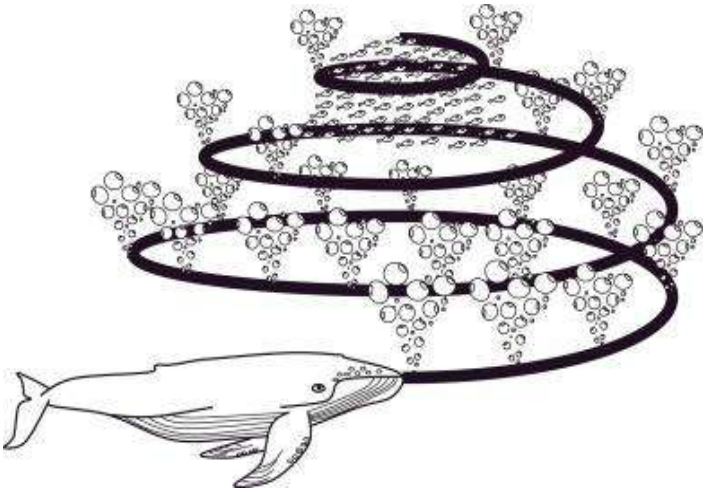


Figure III-11 : Chasse aux baleines à bosse.

L'algorithme d'optimisation des baleines est fondamentalement composé de trois parties. Ces parties sont **[YUK19].**:

- L'encerclement des proies.
- L'attaque au filet à bulles.
- La recherche de proies.

III.5.1 Proie encerclant :

Les baleines à bosse peuvent reconnaître l'emplacement des proies et les encercler. Comme les meilleures solutions non connues à priori dans les problèmes d'optimisation, la meilleure solution ou un point proche de la meilleure solution est considérée comme la meilleure solution. Une fois la meilleure solution définie, les positions des autres solutions sont mises à jour en fonction de la meilleure

Le modèle mathématique du comportement d'encerclement des baleines est présenté dans l'équation III-4 et III-5

$$\vec{D} = \left| \vec{C}.\vec{X}^{*}(t) - \vec{X}(t) \right| \quad \textbf{(III-4)}$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^{*}(t) - \vec{A}.\vec{D} \quad \textbf{(III-5)}$$

Où t+1 représente l'itération courante, $\vec{A}$ et $\vec{D}$ les vecteurs de coefficients, et X^{*} les meilleurs vecteurs solutions.

Le calcul des vecteurs $\vec{A}$ et $\vec{C}$ est démontré dans les équations III-6 et III-7 **:**

$$\vec{A} = 2\vec{a}.\vec{r} - \vec{a} \quad \textbf{(III.6)}$$

$$\vec{C} = 2.\vec{r} \quad \textbf{(III.7)}$$

Où $\vec{a}$ représente le vecteur décroissant linéairement de 2 à 0 au cours de l'itération **[YUK19].**

III.5.2. Méthode d'attaque du filet à bulles :

La position et les emplacements des baleines modélisent la figure III.12 **[YUK19].** La formule mathématique pour déterminer la différence entre le meilleur agent et l'agent de recherche pour le mouvement en spirale est présentée dans l'équation (III-5)**.**

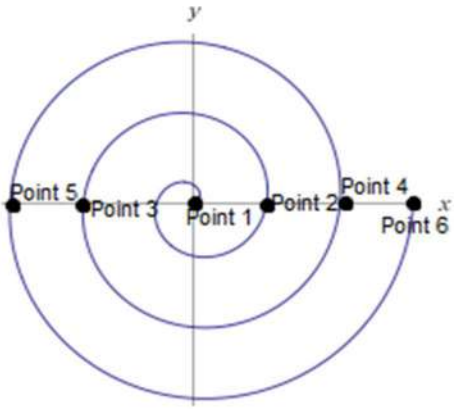


Figure III-12 : Mouvement en spirale.

Dans l'équation III.9, il est démontré que $\vec{D}'$ est la différence entre le meilleur agent de recherche et l'agent de recherche existant **[LEW16]**.

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D}'.e(bl).\cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad \textbf{(III-8)}$$

$$\vec{D}' = \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t) \quad \textbf{(III-9)}$$

Où *b* indique la constante pour la spirale logarithmique, et *l* est un nombre aléatoire dans la plage de [-1, 1]. Les points autour du meilleur agent de recherche sont positionnés par les coefficients $\vec{A}$ et $\vec{C}$.

Lorsque les baleines se dirigent vers leur proie, elles choisissent soit l'un des mouvements linéaires, soit l'un des mouvements en spirale. Dans WOA, lequel de ces mouvements linéaires ou des mouvements en spirale à choisir est effectué avec une probabilité de 50 % **[LEW16]**.

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^{*}(t) - \vec{A}.\vec{D} \qquad p< 0.5 \qquad \textbf{(III10)}$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D}'.e^{(bl)}.\cos(2\pi l) + \vec{X}^{*}(t) \qquad p\geq 0.5 \qquad \textbf{(III-11)}$$

Où p est un nombre produit aléatoirement entre [0, 1].

III.5.2 Rechercher une proie :

L'exécution d'une recherche globale ou locale est décidée en fonction de la valeur du vecteur $\vec{A}$. Dans les cas où $\vec{A}$ >1 ou $\vec{A}$ <-1, il s'agit d'une recherche globale, car dans ces cas, les points les plus éloignés des meilleurs points peuvent être choisis. La modélisation mathématique est présentée dans les équations 8 et 9 **[LEW16]**..

$$\vec{D}' = \vec{C}.\vec{X}\,rand - \vec{X} \qquad \textbf{(III-13)}$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}\,rand - \vec{A}.\vec{D} \qquad \textbf{(III-14)}$$

Le $\vec{X}\,rand$ montré dans les équations 10 et 11 indique un agent de recherche sélectionné au hasard.

III.5.3 MPPT basé sur l'algorithme WOA :

III.5.3.1 Description :

Pour atteindre l'équité de la comparaison, le rapport cyclique sera contrôlé par la deuxième méthode proposée WOA, avec la même structure (entrée/sortie) que PSO. Et les mêmes paramètres (nombre d'itération et population) sous les mêmes conditions d'ombrage.

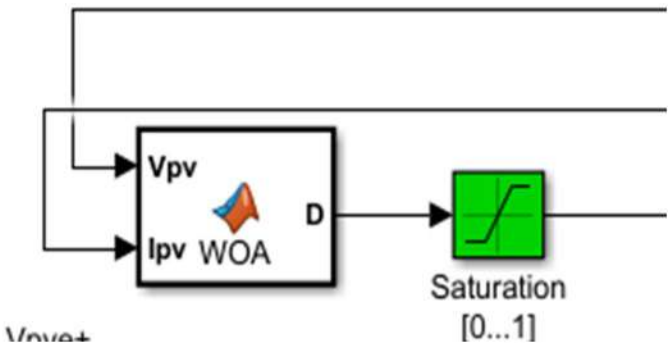


Figure III-13 : Schéma de bloc du MPPT-WOA (Entrée/Sortie)

L'organigramme suivant présente la méthode WOA-MPPT :

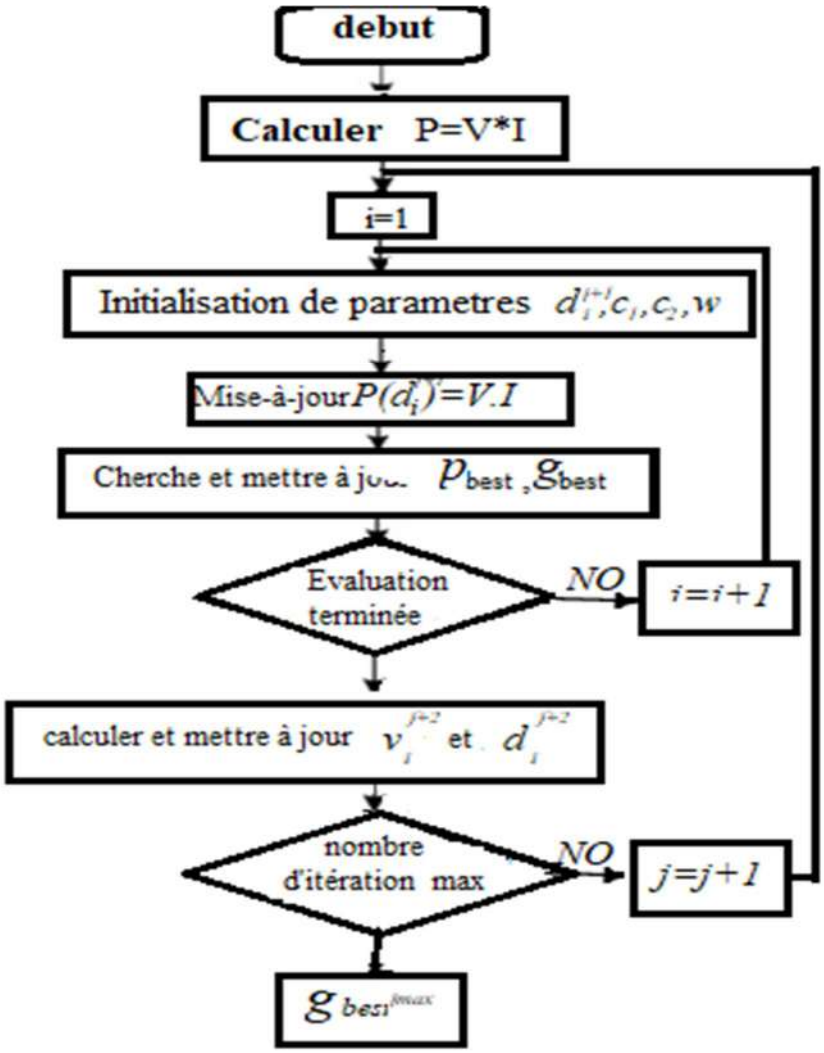
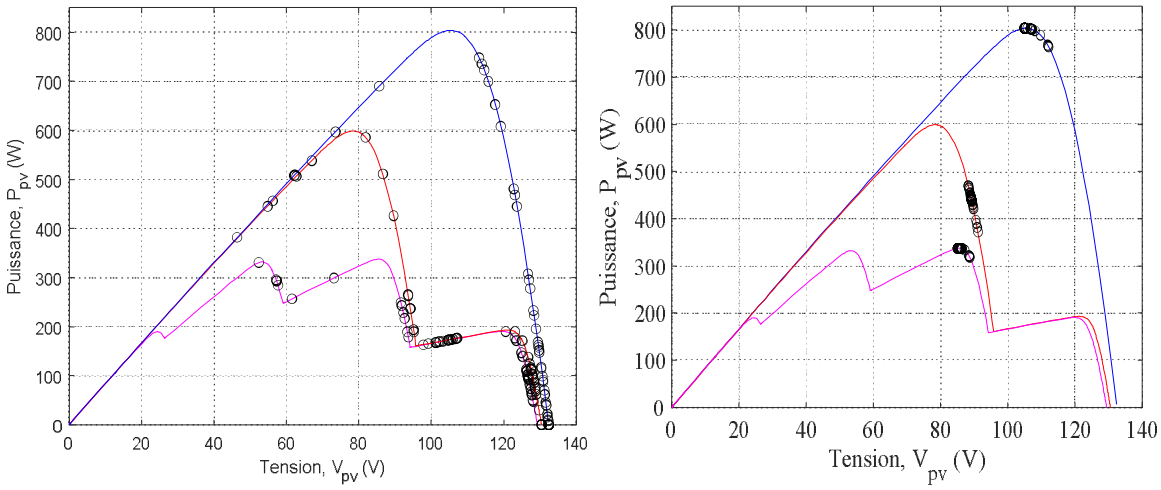


Figure III-14 : l'organigramme de la méthode MPPT-WOA.

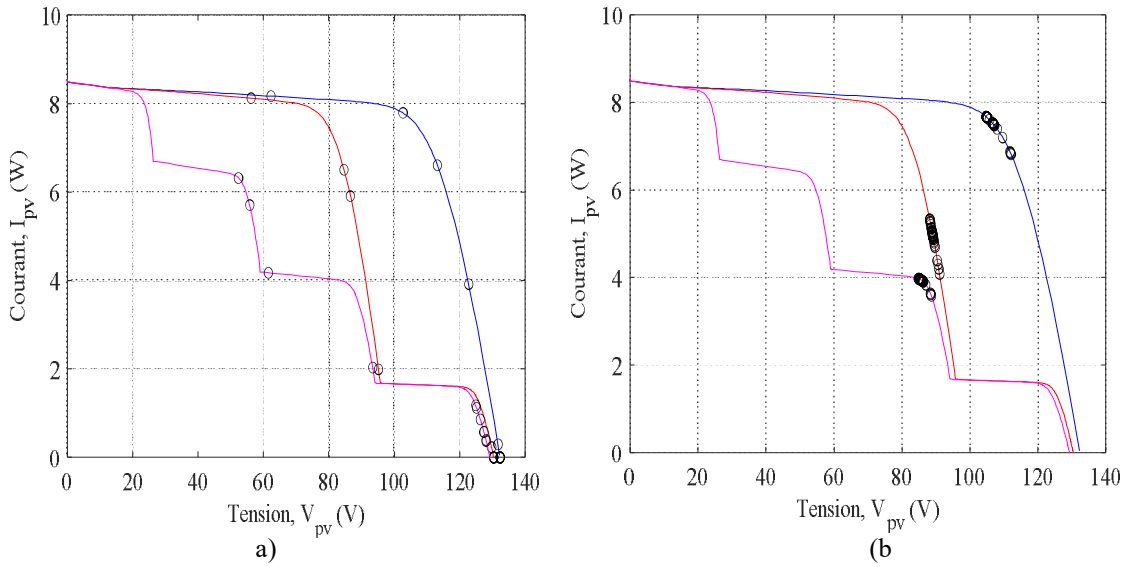
III.5.3.2 Résultat de simulation :

Comme le montre la figure ci-dessous, (la réponse de puissance (P(V), Figure III-15) et de courant (I(V), Figure III-16) sous les trois scénarios). En appliquant la méthode WOA, l'algorithme commence à chercher le GMMP (Figure III-15a), selon (Figure III-15b), on trouve que malgré que le nombre maximum d'itération a été atteint, algorithme ne converge pas vers le MPP global.



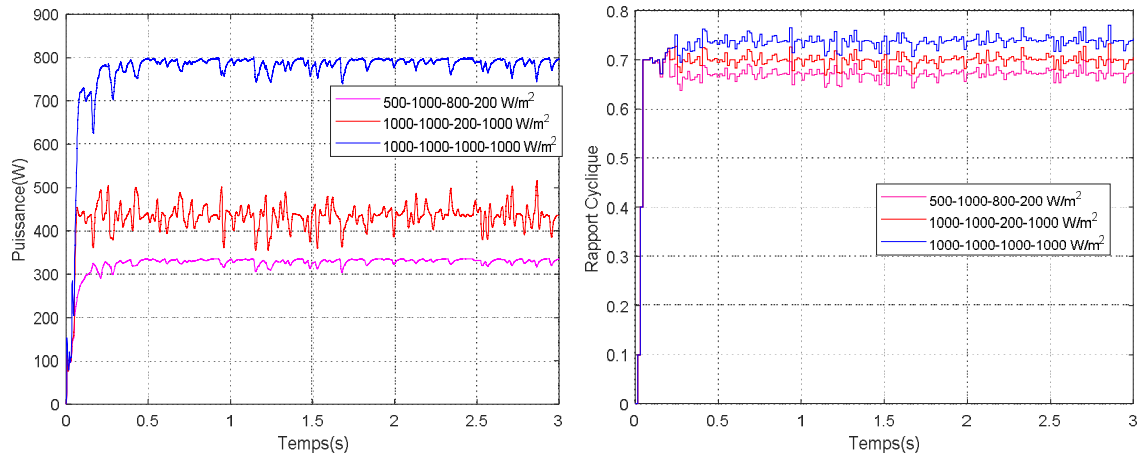
a) (b

Figure III-15 : Courbe P=f(V) d'un PV sous l'ombrage avec MPPT-WOA



a) (b

Figure III-16 : Caractéristique I =f(V) d'un PV sous l'ombrage avec MPPT-WOA



a) (b

Figure III-17 : Réponse de la puissance et rapport cyclique PV sous l'ombrage avec MPPT-PSO

La Figure III.17 fournit la réponse dynamique de la puissance, le rapport cyclique du panneau photovoltaïque. Selon cette figure, on observe que les réponses atteint les valeurs désirées mais avec ondulations.

III.5.3.3 Etude comparative :

L'objectif de cette étude est de tester l'aptitude des méthodes proposées à atteindre le point global de puissance maximale (GMPPT) lors de l'ombrage partiel. La Figure III.18 présente la réponse dynamique de la puissance PV et du rapport cyclique du panneau photovoltaïque. Les techniques GMPPT sélectionnées sont : PSO et la WOA.

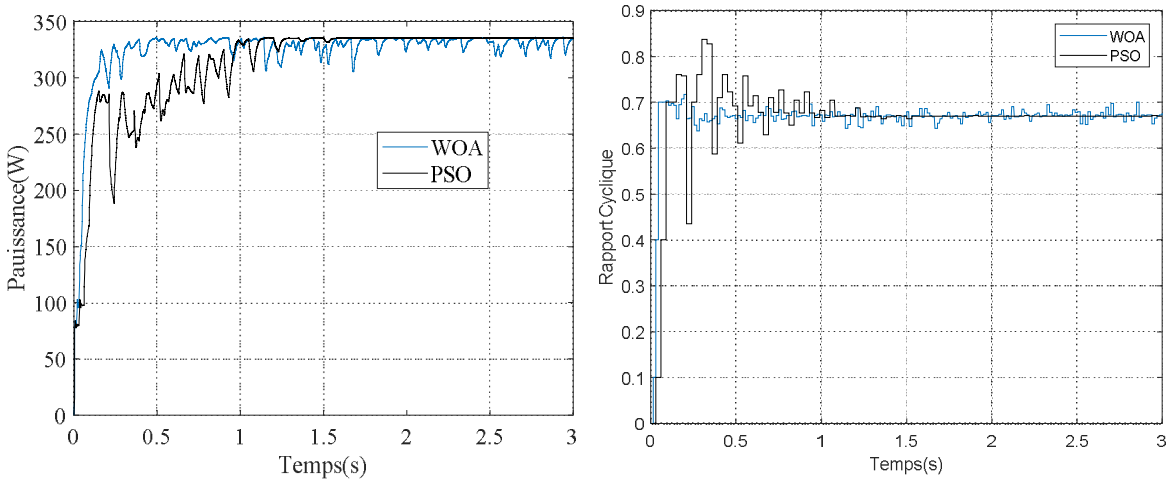


Figure III-18 : réponse de (a) la puissance;(b) : le rapport cyclique des deux méthodes PSO&WOA

On remarque que la réponse dynamique en appliquant l'algorithme WOA est caractérisée par des ondulations qui perturbent le bon fonctionnement du système PV. Alors que la technique PSO est capable de traquer correctement le GMPP et sa performance dynamique est meilleure que celles de WOA en termes d'efficacité, stabilité et robustesse car on remarque que le comportement dynamique du système PV est acceptable face aux changements climatiques tels que l'ombrage partiel.

La réponse dynamique de la puissance de système PV qui suit convenablement ces variations avec une erreur entre la réponse désirée et la réponse observée convergeant vers zéro en fonction du temps (Scénario 1 : PSO atteint la valeur maximale 803.8W, Scénario 1et 2 : PSO atteint la valeur maximale avec une erreur de 0.1W).

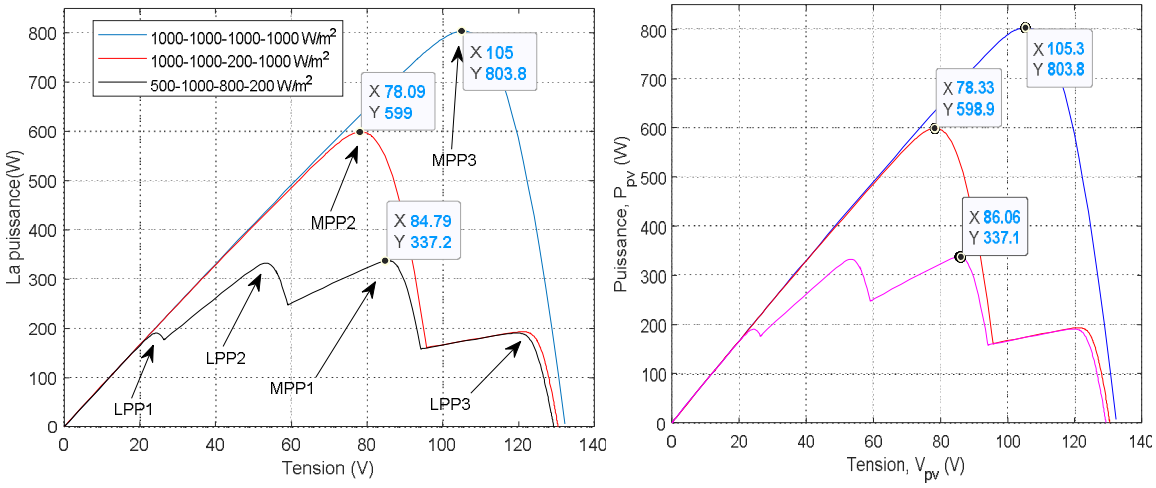


Figure III-19 : Comparaison entre GMPPT désirée et GMMPT obtenue par la technique proposée (PSO)

III.6- Conclusion :

Dans ce chapitre, on a donné une étude détaillée sur les deux techniques méta-heuristique PSO et WOA, on a étudié le comportement dynamique du système PV proposé dans le cas de l'ombrage partiel, en appliquant ces deux techniques pour trouver le GMPP.

Après l'étude comparative des deux méthode MPPT-PSO et MPPT-WOA, nous avons trouver que la première méthode nous offre des meilleures performances que la deuxième.

CONCLUSION

CO NCLUSION GENERALE

L'énergie photovoltaïque est considérée comme l'une des sources d'énergie renouvelables les plus importantes pour la production d'électricité. Cependant, la production d'énergie photovoltaïque dépend essentiellement des conditions environnementales. L'optimisation de cette production revient à concevoir un système PV performant capable de faire face aux changements atmosphériques

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés aux commandes qui contrôlent le fonctionnement de l'étage DC/DC. Nous avons entamé ce travail par une étude théorique du système photovoltaïque. On s'est focalisé sur le système PV. On a abordé le phénomène de l'ombrage partiel et on a étudié le comportement dynamique du système PV proposé dans le cas de l'ombrage partiel

Dans le deuxième chapitre, Nous avons passé en revue les différents types de convertisseur DC/DC et nous avons décrit leurs fonctionnements. Ensuite on a donné un aperçu sur quelques techniques MPPT les plus répondues et qui ont été citées dans la littérature

Dans le dernier chapitre, on a donné la description des deux méthodes méta-heuristique sélectionnée pour commander le convertisseur DC/DC. Ce modèle (Système PV raccordé au charge résistive via un BOOST) est conçu sous SIMULINK de MATLAB.

L'objectif principal était alors d'appliquer une commande MPPT performante qui contrôle le rapport cyclique du hacheur DC/DC afin de maximiser le rendement de générateur PV. A cet effet, on a proposé une commande MPPT basée sur une approche méta-heuristique qui est la PSO. Avant de tester les performances de cette technique, on a proposé une étude comparative des performances de la PSO avec une autre technique MPPT dite méthode d'optimisation baleine de bosse.

Les tests ont été effectués lors de l'ombrage partiel. Les résultats de simulations ont révélé la PSO est meilleure que la WOA en termes d'efficacité et de stabilité

A. MODULE PV :

La puissance maximale (Pmax)	**200 W**
Tension de circuit ouvert Vco	32.9 V
Courant de court-circuit Icc	8.21A
Tension au MPP(Vmpp)	27 V
Résistance parallèle (Rp)	951.9319Ω
Résistance série (Rse)	0.2172Ω

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[ABO09] N. Abouchabana. « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT ». Mémoire de Magister : Alger, Ecole Nationale Polytechnique : 2009.

[AKI05] O. Akihiro, « Design and simulation of photovoltaic water pumping system », faculty of California polytechnic state university :2005.

[AMI08] M. Amir, « Améliorations des performances des antennes imprimées basée sur des méthodes de modélisation et d'optimisation sophistiquées », thèse de Doctorat en Sciences en Electronique, Université de Batna : 2008**.**

[ANG06] P. Angel, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ». Thèse de Doctorat : France, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse : 2006.

[ANN10] L. Anne, P. Cumunel. « Cellules solaires Les bases de l'énergie photovoltaïque ». 5e édition, Paris : Dunod, 127 : 2010

[AZI06] A. Aziz, « Propriétés Electriques des Composants Electroniques Minéraux et Organiques, Conception et Modélisation d'une Chaîne Photovoltaïque Pour une Meilleure Exploitation de l'Energie Solaire ». Thèse de Doctorat : France, Université Paul Sabatier, Toulouse III : 2006.

[BED12] M. Berbane, « Etude comparative entre quelques méthodes de poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques ». Université Abderrahmane MIRA de Bejaia : 2013.

[BEN16] F. Benadel, « Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV », Mémoire Magister : M'sila, Université Mohamed Boudiaf : 2016.

[BES15] S.A. Bessedik**,** « Contournement des isolateurs pollués », Thèse de Doctorat : M'sila, Université Mohamed Boudiaf : 2015.

[BOU11] O. Boukli-Hacène. « Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour meilleur gestion énergétique », Mémoire Magistère : Tlemcen, Université Abu Bekr Belkaid : 2011.

[CAB08] C. Cabal. « Optimisation Energétique de l'Etage d'Adaptation Electronique Dédie à la Conversion Photovoltaïque ». Thèse de Doctorat : France, Université Paul Sabatier Toulouse III : 2008.

[CHI12] S. Chikha, « Optimisation de la puissance dans les systèmes photovoltaïques ». Mémoire de Magistère : Oum El Bouaghi, université de L'arbi Ben Mhidi : 2012.

[CED08] C. Cédric « Optimisation énergétique de L'étage d'adaptation électronique dédie à la conversion photovoltaïque », Thèse de doctorat université de Toulouse : 2008.

[DAL13] D. Maamoury, M. Bin Mansor, A. Al Obaidi « Active power control for a single-phase grid connected pv system », international journal of scientific & technology research Vol 2, Issue 3: 2013.

[DIO19] M. Dione, S. Merahi. « Etude du fonctionnement et commande d'un système photovoltaïque raccordé au réseau », Mémoire Magister : Tlemcen, Université Abou Baker Belkaid : 2019.

[DOL09] A. Dolara, R. Faranda, S. Leva, « Energy comparison of seven mppt techniques for pv systems », 59 scientific research j. Electromagnetic analysis & applications, department of energy of politecnico di milano, via la masa 34, 20156, Milano, Italy : 2009.

[DOU14] F.Douadi, «Méthodologie d'optimisation par les techniques intelligentes d'un contrôleur PID pour un système CSTR », Mémoire de Master, université Ferhat Abbas – Sétif : 2014**.**

[FET18] F. Fetiti, « Etude Conception, Dimensionnement et réalisation pratique d'un hacheur parallèle pour une source photovoltaïque », Mémoire Magister : Biskra, Université Mohamed Khider : 2018.

[GOW99] J. GOW. « Development of photovoltaic array mode for use in power-electronics simulation studies». 1999, 146(2): pp 193–200. Disponible sur IEE Electric Power Applications, IEE Proceedings :1999.

[HAJ15] H. Bagheri « Advances in electric power engineering" publisher: lulu (usa) : 2015.

[LAM14] M. Lamine, L. Leharani, « Contribution à la commande MPPT numérique d'un panneau photovoltaïque à travers un hacheur parallèle entrelacé, Mémoire de Master Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou : 2014.

[LEW16] A. Lewis, S. Mirjalili, "The Whale Optimization Algorithm," Advances in Engineering Software, pp. 51-67: 2016.

[MAN12] N.Mancer, « Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS) », Magister en : Electrotechnique Université Mohamed Khider – Biskra : 2012**.**

[NAD10] N. Mohamed, S. Ahmed, A. Titraoui, « Etude d‟ une chaine de conversion photovoltaïque », Mémoire d'ingénieur d'état en génie électrotechnique, Université de M'sila :2010

[RUF01] P. Rufer. « Cours d'électronique de puissance Conversion DC/DC ». Mémoire de Magistère : Suisse, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne : 2001.

[SAL13] H. Saleh. « High Efficient Interleaved Boost Converter with Novel Switch Adaptive Control in Photovoltaic Application ». Thèse de Doctorat : Angleterre, Université de Newcastle upon Tyne : 2013.

[YUK19] Y. Celik. «Whale Optimization Algorithm for Numerical Constrained Optimization ». Academic Platform Journal of Engineering and Science: journal homepage: http://apjes.com:2019