

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Commandes électriques

*Optimisation du contrôle MPPT des panneaux solaires
avec la prise en compte de l'ombrage partiel*

Préparées par :

DEGUI Soumia

LARBI Sara

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
M. BEKKI Brahim	MAA	Président
M. SAFA Ahmed	MCA	Examinateur
M. TAHRI Ahmed	MCB	Encadrant
M. HASSAINE Saïd	Pr	Co-Encadrant

Promotion : 2023-2024



Remerciements

Tout d'abord Nous remercions Allah le Tout Puissant qui nous a donné la volonté, le courage et la patience pour terminer ce travail.

*Nous tenons à exprimer nos remerciements et notre gratitude à nos encadrants, Messieurs **TAHRI AHMED** et **HASSAINE SAID**. Pour la confiance qu'ils nous ont prodigué pour la direction de ce travail, sans cesser de nous encourager et de nous pousser vers les horizons de recherche scientifique.*

Nous voudrions aussi exprimer nos remerciements aux membres de jury d'avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail.

Nos remerciements au département de Génie électrique de l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret et à tous les enseignants qui nous ont enseignés durant les années du cursus.

Enfin nous remercions aussi toutes nos familles et les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à la rédaction de ce travail.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à ceux qui sont Les plus chers à mon cœur, mes
parents (Mama et Papa) qui m'ont encouragé au cours
de ma formation.*

A mes très chers frères et ma sœur et sa petite famille

A mon fiancé et sa famille

A toute ma famille

Tous mes amis Tous mes collègues d'études.

Dequi Soumia

Dédicaces

Avec merveilleux sentiment je dédie ce travail :

À ma précieuse mère,

Quoi que je fasse ou dise, je sais que mes remerciements ne pourront jamais égaler l'amour et le dévouement que tu me témoignes. Ta tendresse me berce comme une douce caresse, ta bienveillance éclaire mon chemin, et ta présence à mes côtés est un réconfort inestimable qui me donne la force de surmonter tous les défis de la vie.

À mon cher père,

Tu as toujours été mon pilier, mon héros, toujours prêt à me soutenir et à m'encourager dans toutes mes entreprises. Ce simple message ne peut pas exprimer toute la gratitude et l'amour profond que j'ai pour toi.

À mes chères sœurs : Souad, Kaouthar et à mes chers frères: Abdeldjalil, Younes, Ilyes.

À mon oncle M'hamed et ma tante Khaiera.

À mes amis, à tous ceux qui m'ont apporté de l'aide lors de la réalisation de ce travail.

Tous ceux qui m'aiment et que j'aime

Votre présence dans ma vie est un trésor inestimable. Que Dieu vous accorde ses plus belles bénédictions et vous guide sur le chemin de la vie.

LARBI SARA

Table des matières

<i>Remerciements</i>	3
<i>Dédicaces</i>	4
<i>Dédicaces</i>	5
Chapitre I : Les Approches MPPT pour le système photovoltaïque	3
I.1 Introduction	4
I.2 L'énergie solaire photovoltaïque	4
I.3 Application des systèmes photovoltaïques	4
I.3.1 Application des systèmes autonomes	5
I.4 Notions préliminaires sur le rayonnement solaire [3]	5
I.5 La cellule photovoltaïque	6
I.5.1 Définition	6
I.5.2 Les différents types des cellules photovoltaïques	7
I.6 Module photovoltaïque <i>GPV</i>	7
I.6.1 Protections d'un <i>GPV</i>	8
I.7 Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque	8
I.8 Les techniques MPPT classiques [6]	9
I.8.1 Optimisation par Perturbe et Observation (<i>P&O</i>)	9
I.8.2 Optimisation par l'Incrémentation de Conductance (INC) [7]	11
I.8.3 Algorithme de fraction de la tension V_{co} (FCO) [7]	12
I.8.4 Algorithme de fraction du courant I_{cc} (FCC)	13
I.9 Les techniques MPPT intelligentes	13
I.9.1 Optimisation par la Logique floue (<i>FLC</i>)	13
I.9.2 Optimisation par le réseau neuronal artificiel (RNA - ANN)	14
I.9.3 L'optimisation par essais des particules	15
I.9.4 Optimisation par l'algorithme génétique (<i>GA</i>)[6]	15
I.10 Récapitulation générale (comparaison analytique)	16
I.11 Conclusion	17
Chapitre II :Modélisationdu système PV	18
II.1 Introduction	19
II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque	19
II.2.1 Modèle à une seule diode	19
II.2.2 Modèle du Générateur <i>PV</i>	21
II.2.3 Présentation et simulation du panneau <i>PV</i> (sans effet d'ombrage)	21
II.2.4 Résultats de simulation	22
II.2.4.1 Influence de l'éclairement sur la cellule <i>PV</i>	23
II.2.4.2 Influence de la température sur la cellule <i>PV</i>	24
II.3 Le convertisseur DC/DC	24
II.3.1 Convertisseur Buck-Boost [16]	25
II.3.2 Conception et dimensionnement du convertisseur Buck-Boost[16]	27
II.4 Comparaison entre les techniques <i>MPPT</i> classique	28
II.4.1 Environnement stable	29
II.5 Cas d'ombrage	31
II.6 Conclusion	33
ChapitreIII : Application de l'approche (<i>PSO</i>) pour la recherche du <i>MPPT</i> dans un système <i>PV</i> partiellement ombragé	34
III.1 Introduction	35
III.2 Une vue d'ensemble générale sur les algorithmes méta-heuristiques	35
III.3 Optimisation des essais de particules (<i>PSO</i>)	36
III.3.1 Présentation générale de l'algorithme <i>PSO</i> [22]	36
III.3.2 Formalisation	37
III.3.2.1 Application du <i>PSO</i> pour <i>MPPT</i>	38
III.3.2.1 Les méthodes de <i>PSO</i>	39

Sommaire

III.4 Le contrôleur (<i>PID</i>).....	39
III.5 Résultats de simulation	41
III.5.1 Environnement stable.....	41
III.5.2 Cas d'ombrage.....	42
III.6 Conclusion	46
Bibliographie	54

Chapitre I : Approches MPPT pour le système photovoltaïque

Figure I. 1 : Système photovoltaïque..... 4
 Figure I. 2 : Types du rayonnement solaire..... 6
 Figure I. 3 : Structure d'une cellule photovoltaïque (Présence d'une jonction PN)..... 6
 Figure I. 4 : Les différents types de cellules photovoltaïques..... 7
 Figure I. 5 : Cellule, module, panneau et champ PV..... 8
 Figure I. 6 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti retour 8
 Figure I. 7 : Organigramme de l'algorithme FCO..... 10
 Figure I. 8 : Organigramme de l'algorithme P&O..... 10
 Figure I. 9 : Positionnement du point de fonctionnement suivant la valeur de $\Delta I_{pv}/\Delta V_{pv}$ sur les caractéristiques de I-V [9] 11
 Figure I. 10 : Organigramme de l'algorithme INC..... 12
 Figure I. 11 : Organigramme de l'algorithme FCO..... 12
 Figure I. 12 : Organigramme de l'algorithme FCC..... 13
 Figure I. 13 : Exemple de commande MPPT floue..... 14
 Figure I. 14 : Schéma de principe de la structure d'anticipation multicouche..... 15
 Figure I. 15 : Organigramme du Génétique Algorithme..... 15

Chapitre II: Modélisation des système PV

Figure II. 1 : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV..... 19
 Figure II. 2 : bloc Simulink d'un générateur PV sou Matlab-Simulink..... 22
 Figure II. 3 : Schéma block de l'équation constituant le modèle PV à une diode..... 22
 Figure II. 4 : Caractéristique I-V du GPV avec les conditions standard..... 22
Figure II. 5 : Caractéristique P-V du GPV avec les conditions standard..... 23
 Figure II. 6: Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ 23
 Figure II. 7: Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ 23
 Figure II. 8: Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ 24
 Figure II. 9: Influence la température sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ 24
 Figure II. 10: Convertisseur DC/DC..... 25
 Figure II. 11: Schéma électrique d'un convertisseur Buck-Boost..... 25
 Figure II. 12: Convertisseur Buck-Boost durant l'état ON.[6]..... 26
 Figure II. 13: Convertisseur Buck-Boost durant l'état OFF [6]..... 26
 Figure II. 14: Forme d'onde du convertisseur Buck-Boost..... 27
 Figure II. 15: Schéma de commande..... 29
 Figure II. 16: Puissance de sortie du GPV..... 29
 Figure II. 17: Tension de sortie du GPV..... 30
 Figure II. 18: Courant de sortie du GPV..... 30
 Figure II. 19: Puissance de la charge..... 31
 Figure II. 20: Tension de la charge..... 31
 Figure II. 21: Courant de la charge..... 31
 Figure II. 22: Schéma bloc de deux modules en série..... 32
 Figure II. 23: Effet de l'ombrage sur la courbe $P(V)$ 32
 Figure II. 24: Puissance de sortie du PV..... 32

Chapitre III: Application de l'approche (PSO) pour la recherche du MPPT dans un système PV partiellement ombragé

Figure III. 1: Mouvement de particule..... 36
 Figure III. 2: Schéma bloc Simulink..... 41
 Figure III. 3: Puissance de sortie du GPV..... 42
 Figure III. 4: L'évolution de la courbe de puissance pour le cas d'ombrage..... 42
 Figure III. 5: Schéma de commande de deux modelés en série..... 43
 Figure III. 6: Puissance de sortie du GPV de deux modelés en série..... 43
 Figure III. 7: Puissance de sortie d'hacheur de deux modelés en série..... 43

Liste des Figures et tableaux

Figure III. 8: Le rapport cyclique.	44
Figure III. 9: G_{best} dans le cas de <i>PSO</i> direct.	44
Figure III. 10: G_{best} dans le cas de <i>PSO</i> adaptative.	44
Figure III. 11: Effet de l'ombrage sur la courbe $P(V)$	45
Figure III. 12: Schéma de commande de trois modelés en série.	45
Figure III. 13: Schéma de commande de trois modelés en série.	46
Figure III. 14 : Puissance de sortie d'hacheur.	46

Liste des Figures et tableaux

Chapitre I

Tableau I. 1 :Résumé de l'algorithme <i>P&O</i>	12
Tableau I.2 : Comparaison des différentes techniques <i>MPPT</i>	23

Chapitre II

Tableau II.1 :Caractéristiques électriques du panneau photovoltaïque(<i>CST</i>).....	27
---	----

Liste des abréviations

Liste des nomenclatures et abréviations

Nomenclatures

V_{CO} : Tension de circuit ouvert.

I : Courant de sortie [A].

V : Tension de sortie [V].

V_T : Tension thermique de diode [V].

V_{PV} : tension de sortie.

I_d : Courant traversant la diode [A].

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode (courant d'obscurité) [A].

I_{ph} : Photo courant de la cellule [A].

q : Charge d'électron [C°].

K : Constante de Boltzmann [J/K].

n : Facteur d'idéalité de la diode (Coefficient dépendant du matériau de la cellule).

T : Température de la cellule [K].

R_s : La résistance série.

R_{sh} : Résistance parallèle (shunt).

R_p : La résistance parallèle [Ω].

I_{sc} : Le courant de court-circuit.

G : Ensoleillement de fonctionnement [W/m^2].

G_n : Ensoleillement nominal ($1000 W/m^2$).

T_n : Température nominale, [K°] ou [C°].

$I_{sc,n}$: Courant du court-circuit aux conditions nominales [A].

K_i : Coefficient de température du courant au court-circuit, [A/K] ou [A/C°].

I_{pv} : Courant de la sortie [A].

N_s : Nombre de cellules connectées en série par module

V_d : Tension aux bornes de la diode.

V_K : Tension aux bornes du transistor.

V_s : Tension de sortie.

V_e : Tension d'entrée.

I_L : Courant traversant l'inductance.

D : rapport cyclique.

T : Période de découpage.

G_m : Marge de gain.

P_m : Marge de phase.

L : l'inductance.

C : capacité.

Liste des abréviations

η : Rendement de la cellule PV.

w : le poids d'inertie.

$c1, c2$: les coefficients d'accélération.

$r1, r2$: des nombres positifs aléatoires

P_{besti} : La meilleure position personnelle de la particule i

G_{best} : La meilleure position des particules dans l'ensemble population

Abréviation :

I-V: courant-tension

P-V : Puissance-tension

STC : Standard Test Condition

DC-DC: Direct Courent-Direct Courent (Courant Continu-Courant Continu)

MPPT: Maximum Power Point Tracking

MPP/PPM: Maximum Power Point/ Point De Puissance Maximal

P&O : Perturbation Et Observation.

CI: conductance incrémentielle

INC : Incrémentation de Conductance

FCO : Fraction de la Tension V_{co}

FCC : Fraction du Courant I_{cc}

FLC : La Logique floue

RNA - ANN : Le Réseau neuronal artificiel

PSO: L'optimisation par essaims des particules

PV : Photovoltaïque

PI : Proportionnel Intégral

PWM: Pulse Width Modulation

PSC : Partial shading conditions

Liste des abréviations

Introduction Générale

Les énergies renouvelables apparaissent comme une solution potentielle pour réduire la pollution de l'atmosphère. Lorsqu'on dit renouvelables, on entend des énergies produites du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau et de la biomasse. Le type choisi dans cette contribution est l'énergie photovoltaïque (*PV*).

L'énergie solaire est une alternative intéressante à l'énergie des combustibles fossiles. La conversion directe du rayonnement solaire en électricité est connue sous le nom d'effet photovoltaïque. L'énergie *PV* se développe très rapidement. Elle est durable, propre et sans pollution de l'environnement.

Cependant, les systèmes de génération photovoltaïque font face à des défis majeurs tels qu'une faible efficacité de conversion en cas de faible irradiation solaire et une production d'énergie électrique fluctuant en fonction des conditions météorologiques. Afin de maximiser la puissance produite par les panneaux solaires, il est essentiel d'utiliser des techniques de suivi du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking - *MPPT*).

Le phénomène de l'ombrage dans les panneaux solaires se produit lorsqu'une partie du panneau est à l'ombre, ce qui réduit l'efficacité de la production d'énergie en raison de la variation de l'éclairage entre les cellules photovoltaïques. Cet ombrage provoque des points chauds et rend difficile la détermination du point de puissance maximale (*MPP*). Il est cependant crucial de penser à développer des stratégies et approches qui permettent de chercher les points maximums de puissance afin de garantir le fonctionnement du système *PV* à haute performance correspondant aux points max global, à l'opposée des algorithmes classiques disponibles.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres. Dans le premier chapitre, on présente une description du système *PV*, le principe de fonctionnement du générateur photovoltaïque est étudié, avec la mise au point de l'effet *PV*, les cellules *PV*...etc. Ensuite les avantages et les inconvénients de ce système sont cités. On présente par ailleurs, les approches *MPPT* aussi bien classiques qu'avancées permettant le contrôle des systèmes *PV*.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et à la simulation du système photovoltaïque. La conception du convertisseur Buck-Boost et l'analyse de son fonctionnement sont étudiées et discutées. Ensuite la simulation et l'optimisation du système photovoltaïque par la méthode de *MPPT* classique (*P&O*, *CI*) sont effectuées, en utilisant *Matlab/Simpowersystems*.

Dans le troisième chapitre, on s'est concentré sur la mise en œuvre de la méthode basée sur l'approche d'optimisation de la méthode dite "*PSO*". Cette stratégie se prête bien dans le cas où les panneaux photovoltaïques sont exposés au phénomène d'ombrage partiel et la recherche du point maximum global s'effectue convenablement à l'opposée des méthodes classiques étudiées dans le second chapitre. On note ici que deux structures basées sur le *PSO* sont développées, étudiées et validées par simulation numérique.

Nous terminerons ce modeste travail par une conclusion générale qui résume notre étude.

Chapitre I: Les Approches *MPPT* pour le système photovoltaïque

I.1 Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque, pour comprendre l'effet de cette énergie et en optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre le principe de l'effet photovoltaïque, le générateur solaire photovoltaïque, et pour fonctionnement à des points de puissance maximale de ses source énergétiques(panneau solaire) on utilise un type de commande nommé "Recherche du Point de Puissance Maximum" ou bien "Maximum Power Point Tracking" en anglais (*MPPT*). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximale (*PPM*) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

I.2 L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro-puissance calculé en watt crête (WC) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur. L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau.

Un générateur solaire photovoltaïque est composé de modules photovoltaïques eux même composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles. Les performances d'une installation photovoltaïque dépendent de l'orientation des panneaux solaires et des zones d'ensoleillement. [1]

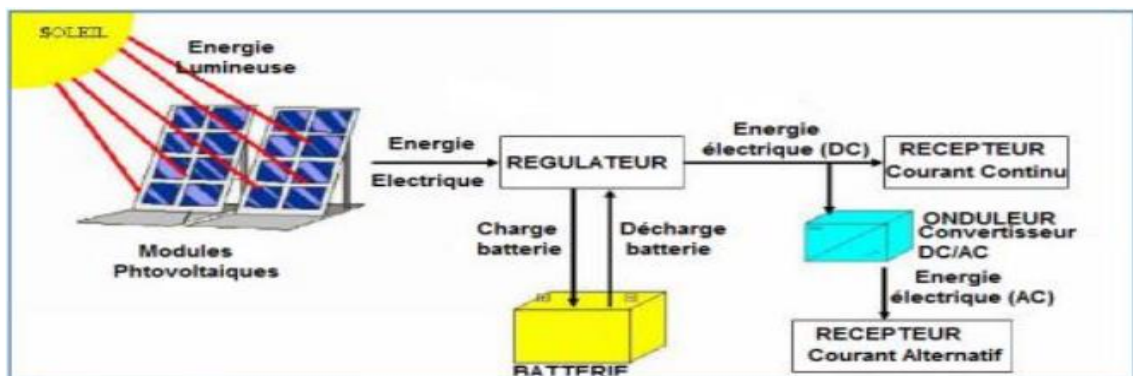


Figure I. 1: Système photovoltaïque.

I.3 Application des systèmes photovoltaïques

Les principales applications des systèmes photovoltaïques peuvent être divisées en deux grandes catégories :

I.3.1 Application des systèmes autonomes

Les applications d'un système photovoltaïque autonome (non raccordées au réseau électrique) couvrent les domaines suivants [2] :

- Les satellites artificiels pour lesquels le photovoltaïque constitue la seule source d'énergie qui répond à toutes les contraintes.
- Les appareils portables, aujourd'hui calculettes et montre, demain téléphones micro-ordinateurs.
- Les applications professionnelles, relais de télécommunications, balises maritimes ou aéroportuaires, signalisation routière, bornes de secours autoroutières, horodateurs de stationnement, etc.
- L'électrification rurale des sites isolés, habitat dispersé, refuges, dispensaires, et écoles dans les pays en voie de développement,...

I.3.2. Application des systèmes raccordés au réseau électrique

On peut les subdiviser en trois grands domaines [2]:

- Les systèmes attachés à un bâtiment consommateur d'électricité, qu'il soit à usages résidentiel (habitat collectif social ou privé) ou professionnel (bureaux, commerces, équipements publics, industrie, agriculture,...). Les modules peuvent être surimposés à la toiture (toit en pente ou toiture-terrasse) sans assurer le clos ni le couvert ou bien intégrés au bâti dans une logique de double fonction (clos et couvert, bardage, verrière, garde-corps,..). Leur surface active va de quelques dizaines à quelque milliers de mètres carrés, soit des puissances de quelque kilowatts crêtes à quelque mégawatts crêtes.
- Les systèmes posés sur ou intégrés à des structures non consommatrices d'électricité parelles mêmes mais pour lesquelles les panneaux remplissent une fonction bien identifiée en sus de la production d'électricité (combière de parking, couverture de passage public ou de quai de gare, mur antibruit,..). Leur surface active va en général de quelque centaines à quelque milliers de mètres carrés, soit des puissance de quelque dizaines à quelques centaines de kilowatts crêtes.
- Les parcs photovoltaïques au sol, constitués de quantités importantes de modules posés sur des structures porteuses dont la production est exclusivement destinée à l'alimentation direct du réseau électrique. Leur surface active va de quelque millier à plusieurs dizaines de milliers de mètres carrés (puissance de quelque centaine de kilowatts à plusieurs dizaines de mégawatts).

I.4 Notions préliminaires sur le rayonnement solaire [3]

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0.2\mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2.5\mu\text{m}$). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons, il est nécessaire d'introduire une notion de masse d'air (AM), elle correspond à la longueur relative du parcours à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct. La masse d'air est exprimée un multiple du trajet parcouru en un point au niveau de la mer, le soleil étant directement à l'aplomb.

Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales.

- **Le rayonnement direct:** Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.
- **Le rayonnement diffus:** C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère.
- **L'albédo:** C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lieu appelé Albédo (ϵ) $0 \leq \epsilon \leq 1$.
- **Global:** Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi.

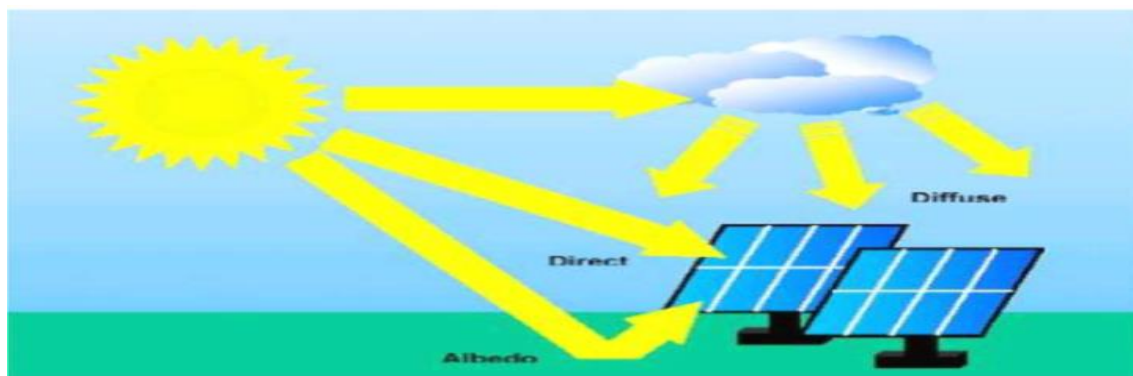


Figure I.2: Types du rayonnement solaire.

I.5 La cellule photovoltaïque

I.5.1 Définition

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode phot-sensible, son principe de fonctionnement est basé sur les propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Elle permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur. Ces deux couches sont dopées différemment.

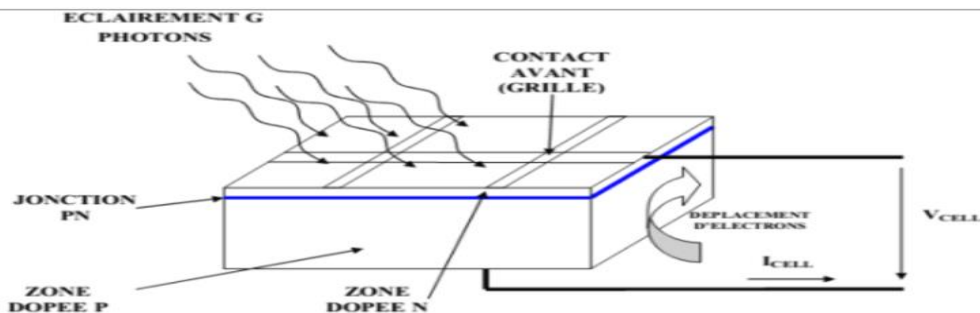


Figure I. 3: Structure d'une cellule photovoltaïque (Présence d'une jonction PN).

Pour la couche (N) c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche (P) c'est un déficit d'électrons. Les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel, l'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N), leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches du semi-conducteur (Figure I.4).

L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche anti reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée. [4]

I.5.2 Les différents types des cellules photovoltaïques

Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle :

A. Les cellules monocristallines: c'est historiquement la plus largement utilisée et commercialisée. La fabrication de cellules de silicium commence avec l'extraction du cristal de dioxyde de silicium. Ce matériel est désoxydé dans de grands fours, purifié et solidifié.

B. Les cellules polycristallines: Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible : (11% -13%).

C. Les cellules amorphes : Elles ont un faible rendement (8% - 10%), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans les produits de petite consommation tel que les calculatrices solaires ou encore les montres.

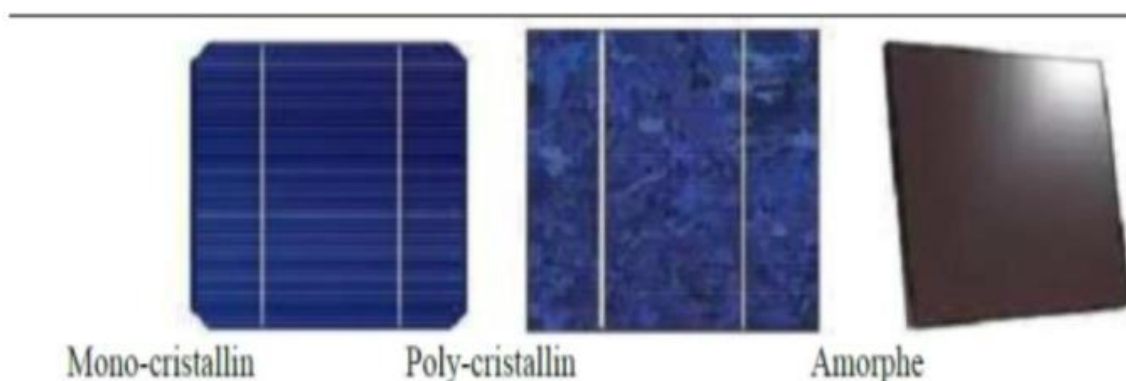


Figure I. 4: Les différents types de cellules photovoltaïques.

I.6 Module photovoltaïque GPV

Dans une centrale solaire photovoltaïque, le champ photovoltaïque consiste de regroupement de plusieurs panneaux solaires (modules). Donc, le panneau solaire est composé de plusieurs cellules PV connectées en série, parallèles ou série parallèle pour former le module photovoltaïque.

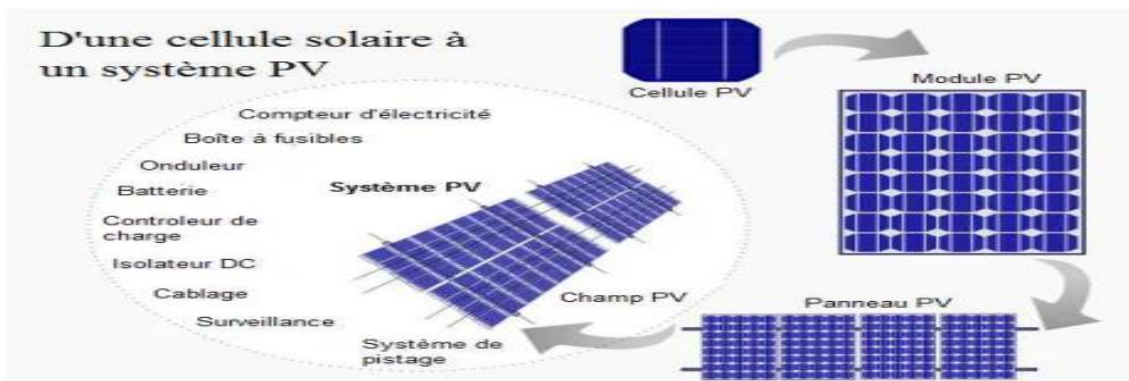


Figure I. 5 : Cellule, module, panneau et champ PV.

I.6.1 Protections d'un GPV

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules photovoltaïques afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en séries et de panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protection classiques sont utilisés dans les installations actuelles (figure I.6):

- a) **La diode anti retour** empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.
- b) **Les diodes by-pass** peuvent isoler un sous réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur, par la perte d'une partie de production d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance.

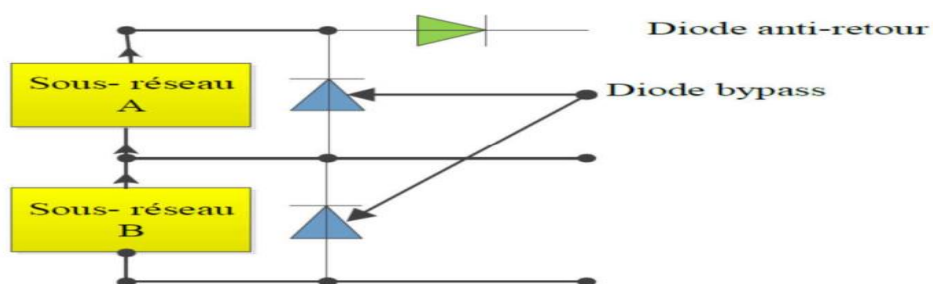


Figure I. 6: Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti retour.

I.7 Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque

A- Avantages

D'abord une haute fiabilité, l'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux. Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au

Mégawatt. Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé. La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions. [5]

B- Inconvénients

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé. Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² par an pour le *BENELUX*) avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées. Qui dépend des conditions météorologiques. Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru. Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur. [5]

I.8 Les techniques MPPT classiques [6]

Pour améliorer l'efficacité globale des systèmes *PV*, de nombreuses méthodes de suivi du point de puissance maximale (*MPPT*) ont été développées, permettant au convertisseur d'extraire le maximum de puissance du panneau photovoltaïque. Il est à noter que le principe de ces méthodes repose sur l'adaptation automatique du rapport cyclique (α) à une valeur optimale maximisant la puissance délivrée par le(s) panneau(x) *PV*. Le lecteur trouvera dans la suite des sous sections à venir quelques approches *MPPT* classiques qu'on trouve dans la littérature.

I.9 Optimisation par Perturbe et Observation (*P&O*)

La méthode *P&O* est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Cet Algorithme utilisée comme entrée les valeurs de tension V_{pv} et de courant I_{pv} , et comme sortie la valeur de rapport cyclique α . Le principe de cet algorithme comme son nom l'indique et comme représente la figure (I.7) est d'effectuer une perturbation sur la tension V_{pv} tout en agissant sur le rapport cyclique α puis suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau $P(k)$ et la compare à la précédente $P(k-1)$. Si la puissance augmente, on s'approche du (*MPP*) et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire si la puissance diminue, on s'éloigne du *MPP*. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique. Comme illustre la figure (I.8).

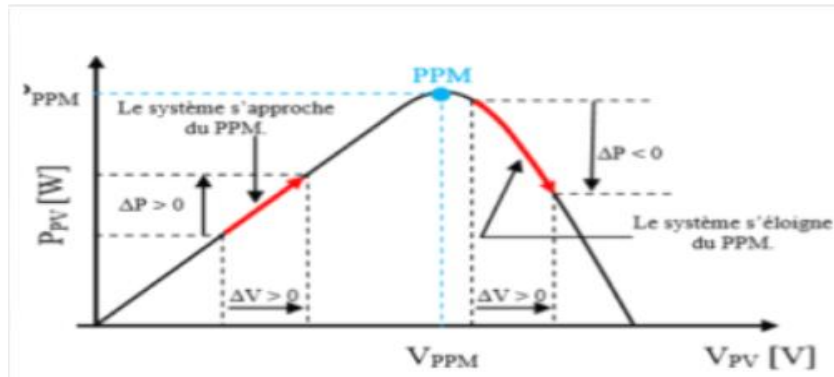


Figure I. 7 : Organigramme de l'algorithme FCO.

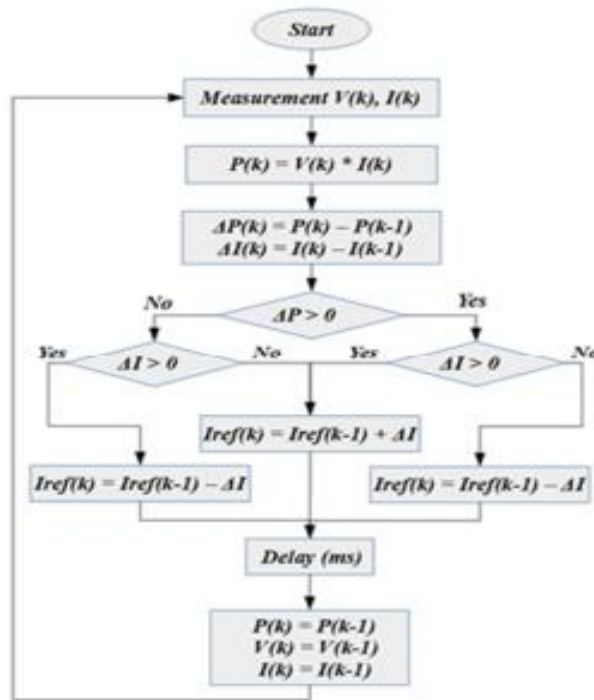


Figure I. 8 : Organigramme de l'algorithme P&O.

En particulier, l'incrément (décrément) de la tension augmente (diminue) la puissance lors du fonctionnement à gauche du *MPP* et diminue (augmente) la puissance lorsqu'elle est à droite du *MPP*. Par conséquent, s'il y a une augmentation de puissance, la perturbation subséquente doit être maintenue pour atteindre le *MPP* et s'il y a une diminution de puissance, la perturbation doit être inversée. Cet algorithme est résumé dans le tableau I.1.

Perturbation	Changement de puissance	Prochaine perturbation
Positif	Positif	Positif
Positif	Négatif	Négatif
Négatif	Positif	Négatif
Négatif	Négatif	Positif

Tableau I.1. Résumé de l'algorithme P&O.

I.9.1 Optimisation par l'Incrémentation de Conductance (INC) [7]

L'algorithme de la conductance incrémentale est un algorithme qui s'adapte bien aux variations rapides des conditions météorologiques du site, il est relativement plus stable que la méthode *P&O*, cependant son implémentation pratique est plus difficile. Le principe de cet algorithme est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance $G=I/V$ et l'incrément de la conductance ($\Delta I/\Delta V$) pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport *MPP*.

- Si l'incrément de conductance ($\Delta I/\Delta V$) est supérieur à l'opposé de la conductance ($-G$), on diminue le rapport cyclique.
 - Si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique.
- Ce processus est répété jusqu'à atteindre le *MPP*, ou la dérivée de la puissance est égale à zéro comme indiquée dans l'équation (I.1)

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \tag{I.1}$$

Cette équation peut être réécrite comme suit :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(I_{pv} \times V_{pv})}{dV_{pv}} = \frac{V_{pv} \times dI_{pv}}{dV_{pv}} + \frac{I_{pv} \times dV_{pv}}{dV_{pv}} \tag{I.2}$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} + I_{pv} \tag{I.3}$$

Ce qui implique que :

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} + \frac{I_{pv}}{V_{pv}} = 0 \tag{I.4}$$

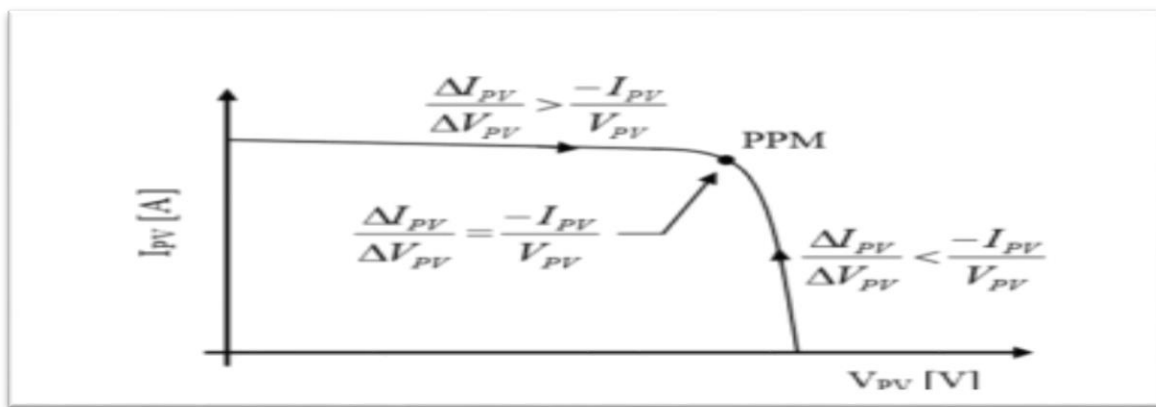


Figure I.9: Positionnement du point de fonctionnement suivant la valeur de $\Delta I_{pv}/\Delta V_{pv}$ sur les caractéristiques de I/V [9].

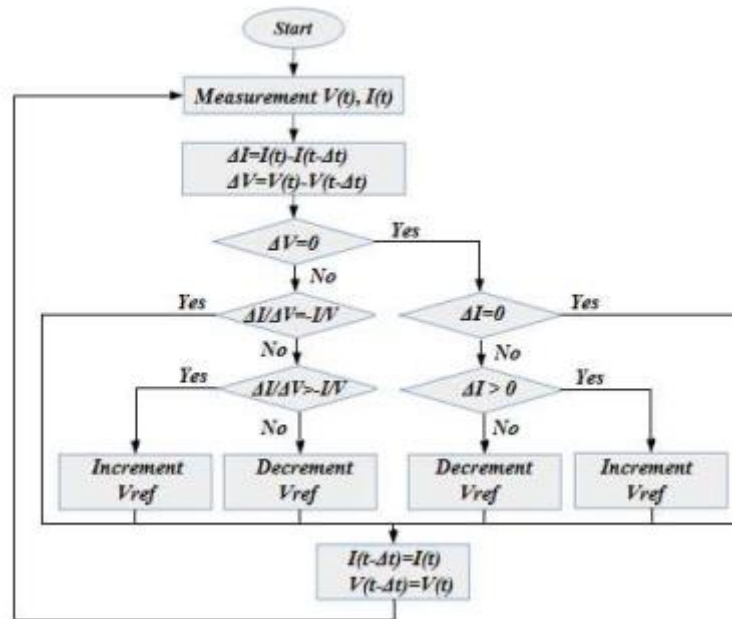


Figure I. 10: Organigramme de l'algorithme INC.

I.9.2 Algorithme de fraction de la tension V_{co} (FCO) [7]

Cette technique de recherche du PPM est consistée à comparer la tension du panneau VPV avec une tension de référence qui correspond à la tension optimale V_{mpp} . L'erreur de tension est alors utilisée pour ajuster le rapport cyclique du convertisseur. La tension de référence est obtenue à partir de la connaissance de la relation linéaire existante entre V_{mpp} et V_{co} d'un module PV:

$$V_{mpp} = k_v \cdot V_{co} \tag{I.5}$$

Où k_v est un facteur de tension dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.73 et 0.8 [8].

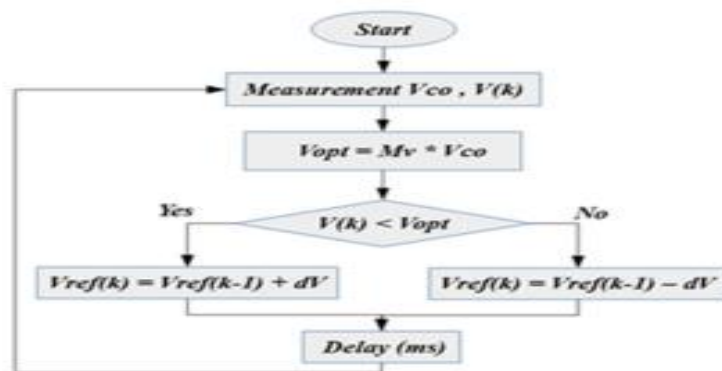


Figure I. 11: Organigramme de l'algorithme FCO.

Pour en déduire la tension optimale, on doit mesurer la tension du circuit ouvert V_{co} . Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau est maintenu proche de point optimal en ajustant la tension de panneau à la tension optimale calculée. Le processus permet d'agir cycliquement sur le rapport cyclique pour atteindre la tension optimale.

L'inconvénient majeur de cette technique réside dans la nécessité d'effectuer la mesure de V_{co} de temps en temps et l'obligation de déconnecter la charge du PV durant cette mesure impliquant une perte de transfert de puissance à chaque mesure.

I.9.3 Algorithme de fraction du courant I_{cc} (FCC)

Cette technique est basée sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant optimal donnée par l'équation suivante :

$$I_{mpp} = k_i \cdot I_{cc} \tag{I.6}$$

Où k_i est un facteur de courant dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.85 et 0.92. En effet, le PPM est obtenu en amenant le courant du panneau au courant optimal.

L'équation (I.6) montre que le courant I_{mpp} peut être déterminé par une mesure de I_{cc} . La mesure de I_{cc} implique une perte de transfert de puissance due à la mise en court-circuit du GPV.

Cependant, cette méthode peut s'avérer plus précise que la précédente car la température n'influence pas trop ce coefficient [8] [9]

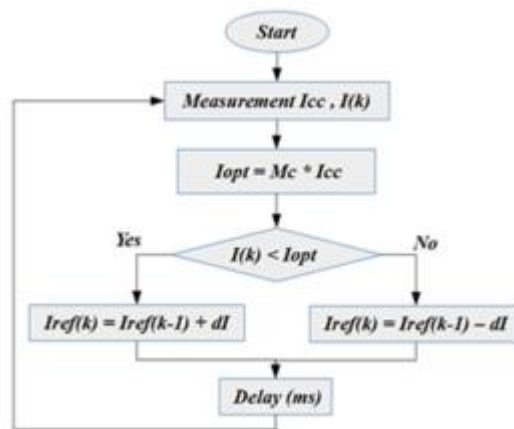


Figure I. 12: Organigramme de l'algorithme FCC.

I.10 Les techniques MPPT intelligentes

Afin de maximiser la puissance de sortie du système PV, des recherches approfondies sur les stratégies de contrôle pour les méthodes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) ont été menées. Des méthodes MPPT basées sur l'intelligence artificielle ont été récemment appliquées à divers systèmes sous différentes conditions grâce à ces performances de robustesse, fiabilité et rapidité. Compte tenu de la diversité des progrès récents des approches MPPT, il est nécessaire d'établir un réexamen axé sur les performances et la fiabilité de ces méthodes dans diverses conditions.

I.10.1 Optimisation par la Logique floue (FLC)

Les commandes MPPT floues proposées dans plusieurs travaux (Cheikh, 2007), (Hatti. M, 2008), (Bernard. C, 2009) et (Chekireda. F, 2011) sont basées, comme tout contrôle flou, sur les trois étapes suivantes: la fuzzification, le raisonnement flou et la défuzzification.

La première étape, avant d'entamer ces trois grandes parties, est de choisir les variables d'entrées et de sorties du bloc de commande. Dans la plupart des travaux sur les commandes MPPT floues apparus dans la littérature, les variables d'entrées sont l'erreur E de $\frac{dP}{dV}$ et la variation de cet erreur ΔE . La variable de sortie n'est

autre que la variation du rapport cyclique du convertisseur comme l'expliquent (Bernard. C, 2009) et (Chekireda. F, 2011). Les trois étapes de la construction d'une commande *MPPT* floue sont présentées et expliquées dans (Timothy, 2004). La Figure I.13 illustre un exemple d'une telle commande :

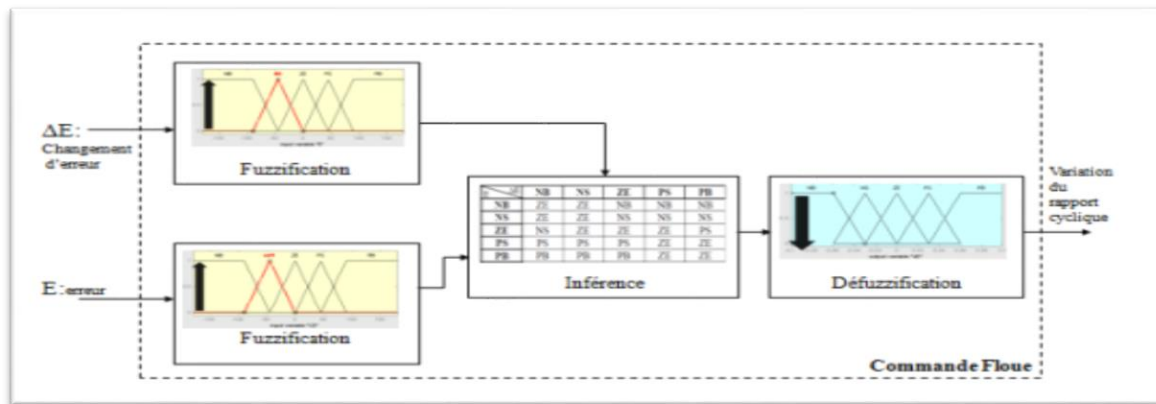


Figure I. 13: Exemple de commande MPPT floue.

I.10.2 Optimisation par le réseau neuronal artificiel (RNA- ANN)

Le réseau de neurones artificiels (*RNA*) est l'une des méthodes les plus réputées parmi toutes les méthodes informatiques douces qui modélisent les opérations des systèmes neuronaux biologiques. Fondamentalement, les réseaux de neurones sont des ensembles d'unités de traitement interconnectées appelées neurones, à travers lesquelles passent les signaux et les informations. L'*ANN* peut être considérée comme un modèle mathématique d'un système semblable au cerveau qui fonctionne comme un réseau de traitement parallèle. Ce système devrait subir un processus de formation approfondi et minutieux pour apprendre à refléter les modèles d'entrée dans le système réel. Notamment, tout système ANN est normalement formé pour fonctionner dans des systèmes et des conditions prédéterminés parce que les neurones ANN sont formés pour traiter et répondre en fonction de la relation de modèle (*IN-OUT*) du système. Par conséquent, pour tout changement de système, le RNA conçu doit subir un processus de recyclage pour éviter de produire des réponses non fiables et inexacts [10, 11].

Un ANN ne nécessite pas de fonctions mathématiques complexes ni de modèles physiques lors de la gestion d'un système. Un système ANN est favorable aux problèmes complexes et mal définis, où des informations floues ou incomplètes sont impliquées. Cependant, un tel système ne peut normalement pas gérer les problèmes qui nécessitent une exactitude et une précision élevées [12].

La structure de base d'un ANN comprend les trois couches suivantes : entrée, cachée et sortie. Le diagramme schématique d'une structure d'anticipation multicouche est présenté sur la figure (I.14).

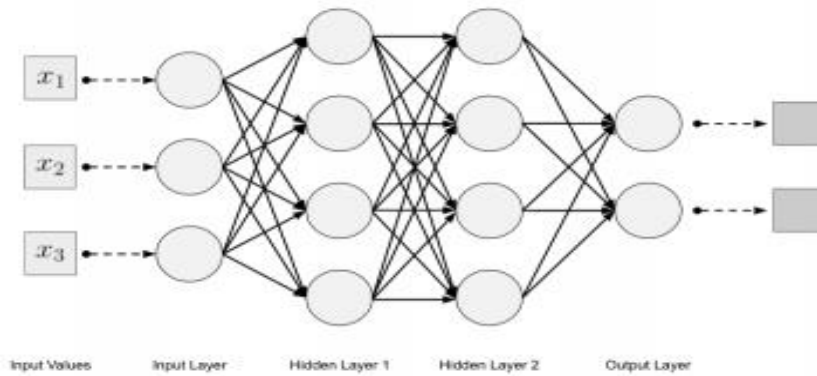


Figure I. 14: Schéma de principe de la structure d'anticipation multicouche.

I.10.3 L'optimisation par essais des particules

Inspirés du comportement social des animaux, tels que les poissons et les oiseaux, James Kennedy & Russell Eberhart ont élaboré en 1995 une technique d'optimisation stochastique appelée algorithme d'optimisation de groupe de particules (Particle Swarm Optimization (PSO)).

PSO en tant que méthode méta-heuristique est utilisée pour optimiser une fonction difficile à exprimer analytiquement. L'algorithme PSO maintient un groupe d'individus (appelés particules), où chaque particule représente une solution candidate. (Nous l'expliquerons plus en détail au chapitre trois).

I.10.4 Optimisation par l'algorithme génétique (GA)[6]

L'optimisation GA a été utilisée dans différents problèmes d'optimisation rencontrés par les secteurs des énergies renouvelables, tels que MPPT. Le GA a une vitesse de convergence rapide dans différents problèmes d'optimisation. De plus, la méthode a montré des performances satisfaisantes pour réduire le risque d'être piégée dans l'optimum local. Cependant, cette méthode n'est pas recommandée pour optimiser des problèmes très volumineux ou trop complexes.

La figure (I.18) représente l'organigramme de la technique GA qui indique l'évaluation des paramètres de sortie du panneau PV jusqu'à ce qu'il atteigne la valeur optimale.

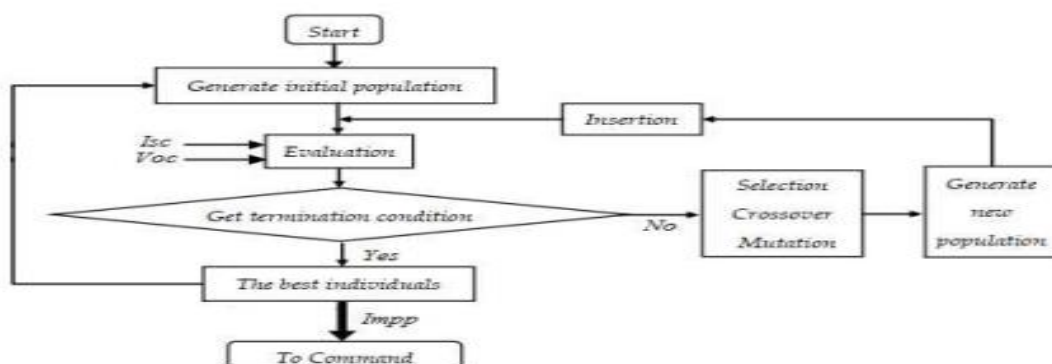


Figure I. 15 : Organigramme de l'algorithme génétique.

Parmi les méthodes d'intelligence artificielle mentionnées, le GA a été la moins utilisée dans le problème MPPT. Par conséquent, peu de références utilisant le GA comme méthode MPPT principale sont disponibles. Dans l'une des études de [13], le GA a été appliqué pour trouver le point de puissance maximum global du

système PV sous certains PSC (Partial shading conditions) simplifiés. Un contrôleur MPPT a été développé sur la base de l'approche GA, et la méthode proposée a été vérifiée à travers deux études de cas différentes, chacune présentant différents modèles de PS. Cependant, la partie vérification des deux études est limitée aux validations de simulation et la faisabilité de la méthode dans un environnement pratique réel n'a pas été présentée. Dans une autre étude, les performances de la méthode MPPT basée sur le GA ont été comparées à celles de la P&O conventionnelle et de la méthode de conductance incrémentielle sous deux CSP prédéfinies. Cependant, comme dans les travaux précédents, la partie vérification est limitée à des simulations. Da raban a intégré la méthode P&O avec GA, avec une réduction de la taille de la population tout en diminuant le nombre d'itérations. La méthode proposée montre une convergence plus rapide, ainsi qu'une sortie plus précise, pour un système PV sous divers modèles d'ombrage partiel.

I.11 Récapitulation générale (comparaison analytique)

Les recherches publiées dans le domaine d'optimisation indiquent la difficulté d'évaluer et de comparer les meilleures approches et techniques MPPT. En général, la technique MPPT finale est sélectionnée en fonction des exigences et des préférences de l'application.

Tableau I.2.comparaison des différentes technique MPPT

Critère	P&O	INC	FCO	FCC	FLC	ANN	PSO	GA
Vitesse de convergence	Variable	Variable	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Rapide	Rapide
Indépendance du système	Pauvre	Pauvre	Pauvre	Pauvre	Pauvre	Pauvre	Haute	Haute
Capacité à suivre dans des conditions normale	Pauvre–moyen	Pauvre–moyen	Pauvre–moyen	Pauvre–moyen	Haute	Haute	Haute	Haute
efficacité	Pauvre dans les PSCs	Pauvre dans les PSCs	Pauvre dans les PSCs	Pauvre dans les PSCs	Pauvre dans les PSCs	Pauvre dans les PSCs	Haute	Haute
Complexité de l'algorithme	Simple	Simple	Simple	Simple	Moyen	Simple	Simple	Complexe
Coût et complexité de la mise en œuvre	Bas	Bas	Bas	Bas	Haute	Haute	Moyen–Bas	Moyen–Bas
Réglage périodique	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non
Dépendance de la conception initiale	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Haute	Haute	Moyen	Moyen
Oscillation autour du MPP	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non
Possibilité de suivre sous PSC	Pauvre	Pauvre	Pauvre	Pauvre	Pauvre	Pauvre	Haute	Moyen–élevé

Par conséquent, la connaissance de la nature du projet et de ses limites est une condition préalable essentielle. De plus, les bancs d'essai, les applications et les conditions environnementales utilisées pour

vérifier les performances des techniques *MPPT* conçues ne sont pas similaires. Par conséquent, une comparaison entre ces méthodes devrait être équitable. Par rapport aux techniques *MPPT* conventionnelles, les approches intelligentes ont généralement une oscillation plus faible autour du *MPPT* et une plus grande fiabilité pour les changements soudains des niveaux d'irradiance. De plus, ils affichent le plus souvent de meilleures performances sur les critères les plus significatifs. Cependant, leur comportement vis-à-vis des principaux critères, tels que l'efficacité, la fiabilité sous les *PSC*, la vitesse de convergence, l'indépendance du système et l'oscillation en régime permanent, pourrait être différent. La performance de ces techniques conformément à la littérature accréditée est discutée et présentée dans le tableau (I.2).

I.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis l'accent sur plusieurs points liés à l'énergie solaire. Par la suite, on s'est concentré sur la citation des différentes approches de suivi du *MPP* des systèmes *PV*. Nous avons présenté les principes de chaque approche. Quatre approches *MPPT* classiques et quatre approches *MPPT* intelligentes. On a finalisé par une comparaison analytique sur les approches *MPPT* dont le lecteur le trouvera résumé dans un tableau.

Dans le prochain chapitre, on présentera la modélisation d'un module photovoltaïque suivi par une étude et une modélisation des convertisseurs statiques *DC/DC*, tout en développant et programmant les approches classiques *MPPT*, à savoir le *P&O* et le *CI*, aussi bien dans le cas standard qu'en présence de l'ombrage partiel.

Chapitre II: Modélisation du système *PV*

II.1 Introduction

Dans le cadre de l'optimisation d'un générateur photovoltaïque et pour mieux utiliser l'énergie soutirée, on doit adapter la caractéristique non linéaire (courant-tension) du générateur photovoltaïque au point de fonctionnement de la charge utilisée. Pour avoir le point optimal qui correspond au point de la puissance maximale, il est évident de modéliser le générateur photovoltaïque. [14]

Dans ce chapitre, nous allons présenter la modélisation d'un module photovoltaïque. L'analyse de fonctionnement et la conception d'un Buck-Boost nous facilite le calcul de la commande *MPPT* du *PV*. On finalise l'analyse de deux techniques de la commande *MPPT* (*P&O*, *CI*). Le logiciel utilisé pour la mise en œuvre de la simulation du système complet est Matlab/Simpower system.

II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

II.2.1.1 Modèle à une seule diode

La figure (II.1) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairage. Il correspond à un générateur de courant I monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma. Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule [15]:

- La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule: elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt (R_{sh}) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

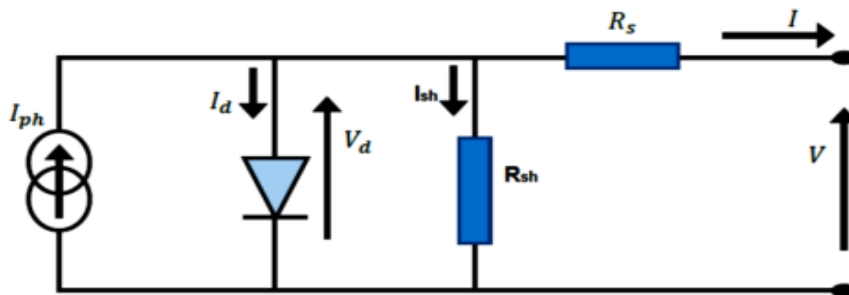


Figure II. 1: Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.

La loi de Kirchhoff, appliquée au circuit précédent donne :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (II.1)$$

avec :

$$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{V_d}{n \times V_T} \right) - 1 \right] \quad (II.2)$$

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} \quad (II.3)$$

$$V_T = \frac{k.T}{q} \quad (II.14)$$

$$V_d = V + I \cdot R_s \quad (II.5)$$

$$I_0 = I_{0n} \cdot \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \cdot \exp\left[\frac{E_{gref}}{K_1 \cdot T_n} - \frac{E_g}{K_1 \cdot T}\right] \quad (II.6)$$

$$K_1 = \frac{K}{q} \quad (II.7)$$

$$E_g = E_{gref} \cdot (1 + (T - T_n) \cdot degdt) \quad (II.8)$$

$$I_{sh} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (II.9)$$

De (II.2) et (II.9), l'équation (II.1) peut être écrit comme suit:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (II.10)$$

I : Courant de sortie [A] ;

V : Tension de sortie [V] ;

V_T : Tension thermique de diode [V] ;

I_d : Courant traversant la diode [A] ;

I_{ph} : Photo courant de la cellule [A];

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode (courant d'obscurité) [A];

q: Charge d'électron[C°];

K: Constante de Boltzmann [J/K];

n : Facteur d'idéalité de la diode (Coefficient dépendant du matériau de la cellule)

T : Température de la cellule [K°].

R_s : La résistance série [Ω]

R_{sh} : La résistance parallèle [Ω].

$$I_{ph} \approx I_{sc} \quad (II.11)$$

I_{sc} : Le courant de court-circuit

Donc l'équation (II.12) devient

$$I = I_{sc} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (II.12)$$

- à température constante :

$$I_{sc} = I_{sc_n} \frac{G}{G_n} \quad (II.13)$$

- à l'ensoleillement constant :

$$I_{sc} = I_{sc_n} + K_i \cdot \Delta T \quad (II.14)$$

$$\Delta T = T - T_n \quad (II.15)$$

D'après les équations (II.13) et (II.14) en peut écrire :

$$I_{sc} = (I_{sc_n} + K_i \cdot \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (II.16)$$

G: Ensoleillement de fonctionnement [W /m²]

G_n : Ensoleillement nominal (1000 W/m²)

T_n : Température nominale, [K°] ou [C°]

I_{sc_n} : Courant du court-circuit aux conditions nominales [A]

K_i : Coefficient de température du courant au court-circuit, [A/K] ou [A/C].

Donc on peut écrire à partir de l'équation (II.10) et (II.15):

$$I_{ph} = (I_{sc,n} + K_i(T - T_n)) \frac{G}{1000} \quad (\text{II.17})$$

II.2.1.2 Modèle du Générateur PV

Le modèle cité précédemment concerne une seule cellule PV, pour le modèle du GPV, il faut intégrer le nombre de cellules en série, formant un module.

Donc l'équation (II.10) devient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{n \times K \times T \times N_s} \right) - 1 \right] - I_{sh} \quad (\text{II.18})$$

Où,

I_{pv} : Courant du GPV [A] ;

V_{pv} : Tension du GPV [V] ;

N_s : Nombre de cellules connectées en série par module.

II.2.1.3 Présentation et simulation du panneau PV (sans effet d'ombrage)

Le module PV utilisé dans ce travail est un modèle *STP0500-12MEA* de la société *SUNTECH*, ces caractéristiques électriques sont représentées dans le tableau suivant :

Grandeurs	Valeurs
éclairage standard, G	1000w/m ²
Température standard, T	25°C
Puissance crête maximale, P_m	50W
Tension à P_m	17.4V
Courant à P_m	2.93A
Tension de circuit ouvert V_{co}	21.8V
Courant decourt-circuit, I_{sc}	3.13A
Nombre de cellules	36

Tableau II.1: Caractéristiques électriques du panneau photovoltaïque (CST).

Nous examinerons le comportement de notre panneau photovoltaïque dans des conditions standard de fonctionnement avec un ensoleillement $G=1000 \text{ W/m}^2$ et une température $T=25^\circ\text{C}$.

Les résultats de simulation obtenus, sous Matlab, des caractéristiques courant-tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$ de la cellule photovoltaïque, dont les conditions standards ($T=25^\circ\text{C}$, $E=1000 \text{ W/m}^2$) sont représentées dans les figures suivantes. Nous pouvons observer trois points très importants qui fournissent les grandeurs électriques du système en court-circuit ($I=8.1 \text{ A}$, $V=0$), en circuit ouvert ($I=0$, $V=32.9 \text{ V}$) et le point de puissance maximale de 212 W correspondant à ($I=7.6 \text{ A}$, $V=27.9 \text{ V}$).

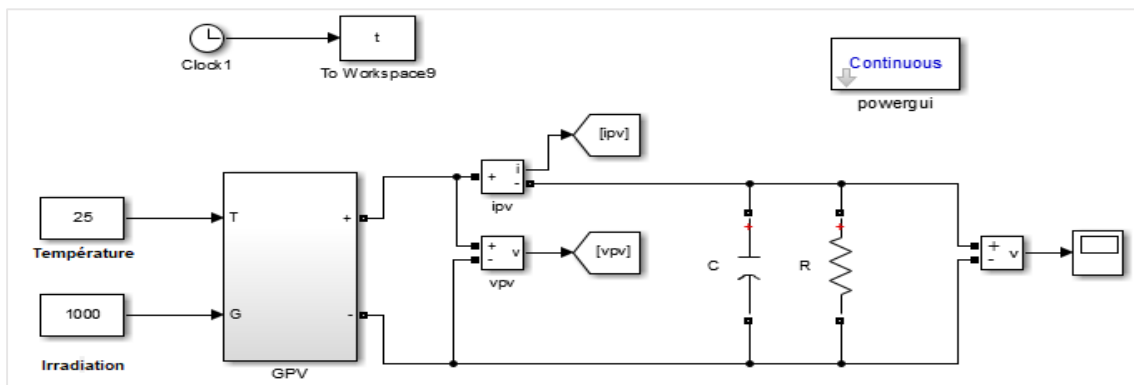


Figure II. 2: Bloc Simulink d'un générateur PV sous Matlab-Simulink.

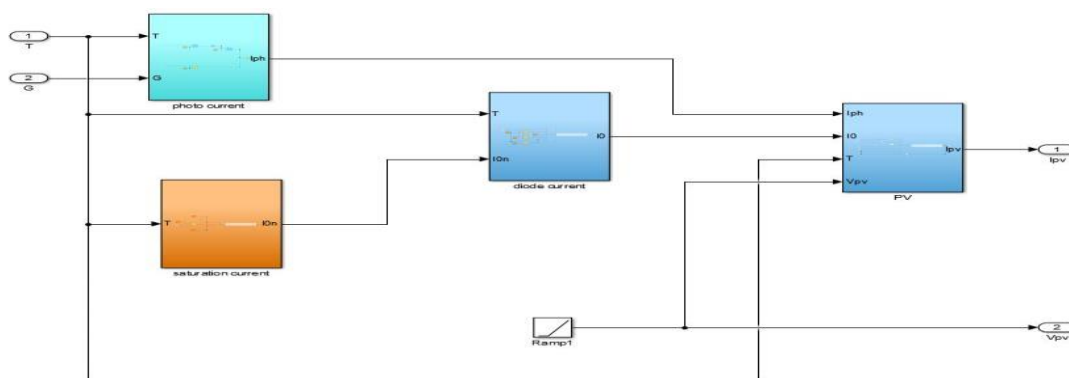


Figure II. 3: Schéma block de l'équation constituante le modèle PV à une diode.

II.2.1.4 Résultats de simulation

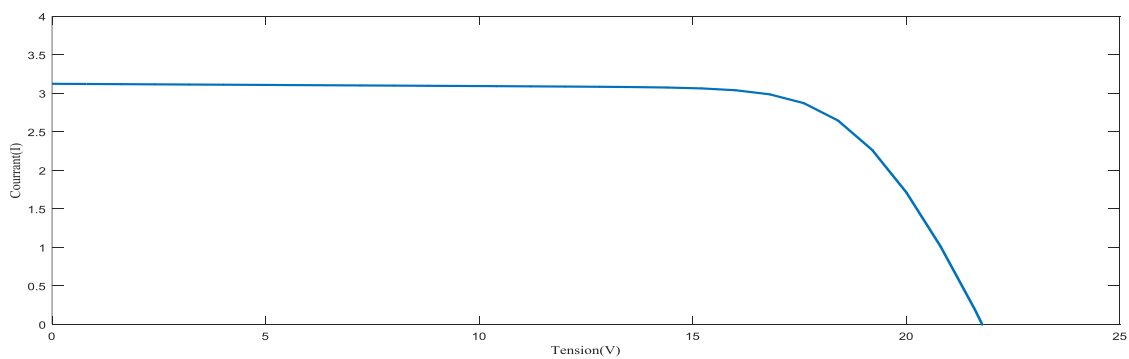


Figure II. 4: Caractéristique I-V du GPV avec les conditions standard.

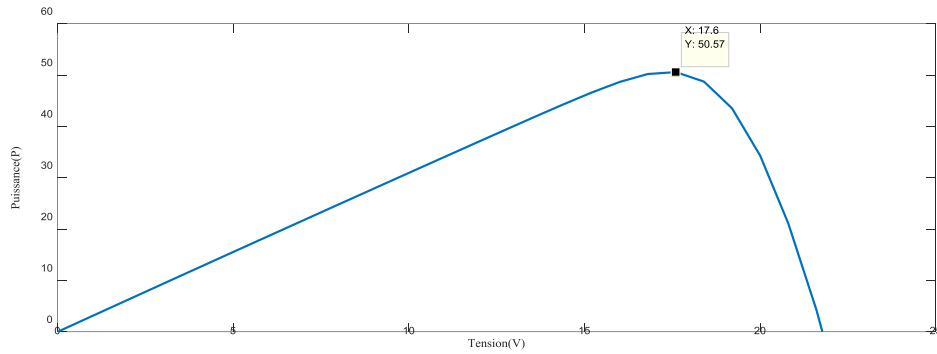


Figure II. 5: Caractéristique P - V du GPV avec les conditions standard.

II.2.1.5 Influence de l'éclairement sur la cellule PV

Pour voir l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques du module, on fait varier la valeur de l'éclairement tout en gardant la température constante ($T_c=25^{\circ}C$) et on trace les caractéristiques $P_{pv} - V_{pv}$ et $I_{pv} - V_{pv}$.

Il est démontré que lorsque l'irradiation augmente, la puissance et le courant du PV solaire augmentent également, car la tension en circuit ouvert augmente avec l'augmentation de l'irradiation solaire. En effet, lorsque plus de lumière solaire tombe sur la cellule solaire, les électrons acquièrent une énergie d'excitation plus élevée, augmentant ainsi la mobilité des électrons et, par conséquent, plus d'énergie est générée.

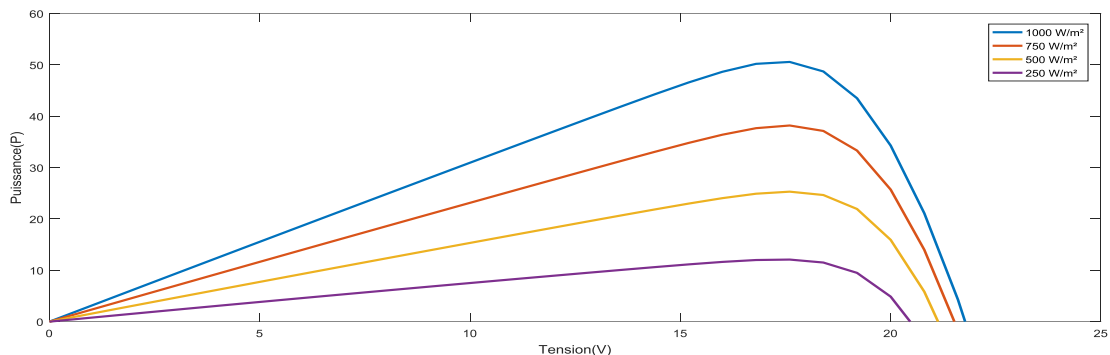


Figure II. 6: Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$.

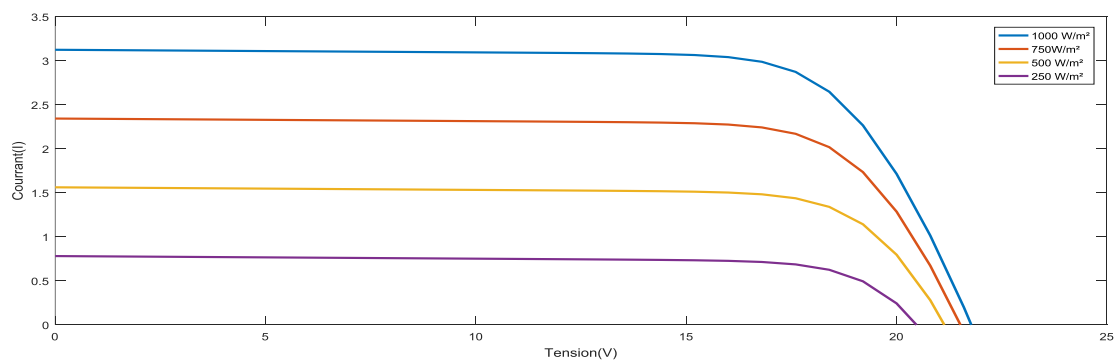


Figure II. 7: Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$.

II.2.1.6 Influence de la température sur la cellule PV

Pour voir l'influence de la température, nous avons tracé les caractéristiques $P_{pv} - V_{pv}$ et $I_{pv} - V_{pv}$, pour des différentes températures, et avec un ensoleillement constant $E = 1000 \text{ W/m}^2$

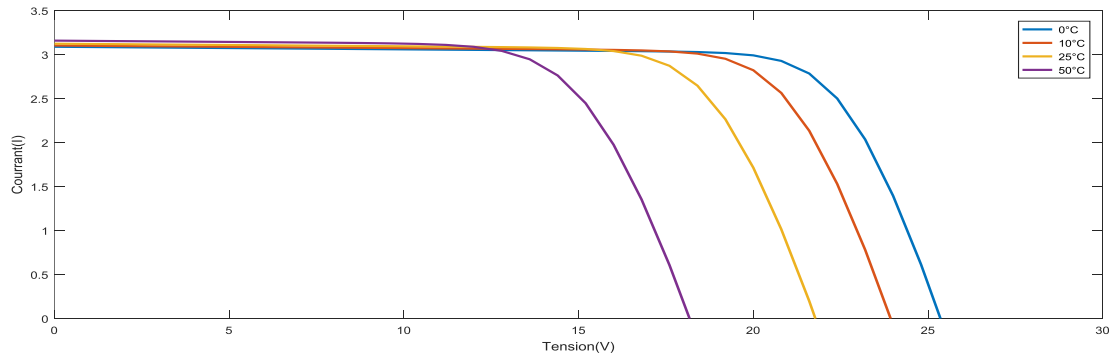


Figure II. 8: Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$.

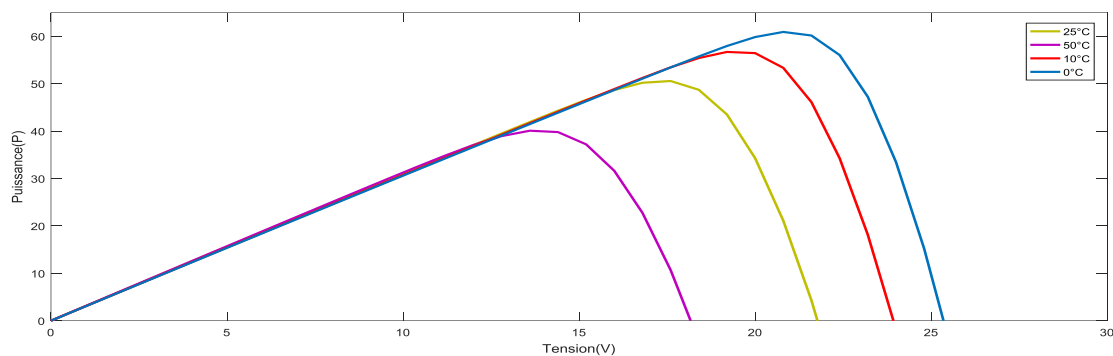


Figure II. 9: Influence la température sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$.

Au contraire, une augmentation de la température affecte négativement la capacité de production d'énergie de la cellule solaire. Une élévation de température correspond à une diminution de la tension en circuit ouvert. Par contre le courant de court-circuit augmente légèrement avec l'augmentation de la température et la puissance maximale diminue. Cela provoque une augmentation de la bande interdite du matériau, et donc plus d'énergie est nécessaire pour traverser cette barrière, ce qui entraîne une réduction de l'efficacité de la cellule solaire [15].

II.2.1.7 Le convertisseur DC/DC

Les convertisseurs $DC-DC$ présentés dans ce chapitre sont destinés aux installations photovoltaïques. La modélisation des paramètres du système est en fonction du courant et de la tension générée par le panneau photovoltaïque. La figure II.10 montre la représentation d'un convertisseur DC/DC , qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge [6].

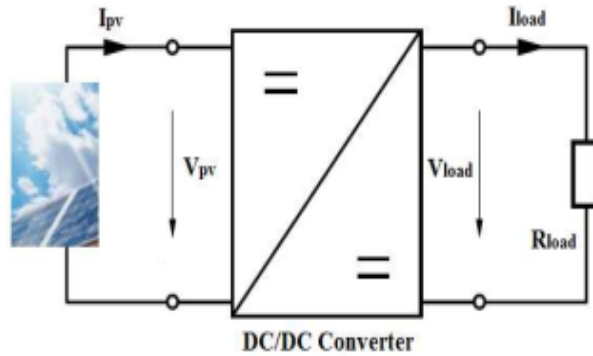


Figure II. 10 : Convertisseur *DC/DC*.

Dans le cadre du *PV*, le rôle du convertisseur *DC/DC* est de s'ajuster entre la source (panneau *PV*) et la charge pour un transfert maximal de puissance. Cela se fait en maintenant le point de fonctionnement au niveau ou suffisamment près du *MPP* dans toutes les conditions de fonctionnement, à savoir le rayonnement, la température, les caractéristiques de charge, etc. Contrairement au cas général d'utilisation d'un convertisseur *DC/DC* pour réguler la tension de sortie, ici c'est la tension d'entrée qui est régulée. La tension de référence (consigne) est alors constante ou imposée par l'algorithme de régulation. Les puissances d'entrée et de sortie sont égales lorsque les pertes internes du convertisseur sont négligeables. Le principe de fonctionnement de certains types de convertisseurs *DC/DC* est décrit ci-dessous.

II.2.1.8 Convertisseur Buck-Boost [16]

Un convertisseur abaisseur-élevateur est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur inférieure ou supérieure avec une polarité opposée.

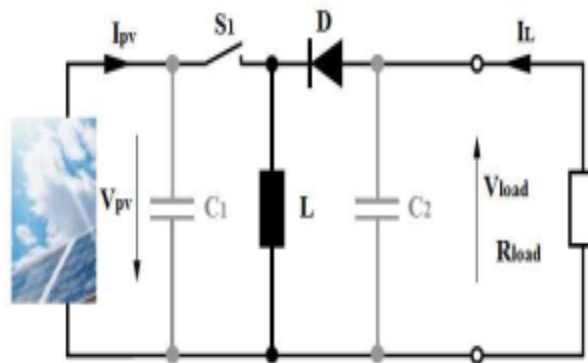


Figure II. 11: Schéma électrique d'un convertisseur Buck-Boost.

Pendant l'état (*ON*), l'énergie fournie par la source d'alimentation (générateur *PV*) est stockée dans l'inductance (L). L'énergie stockée dans l'inductance (L) est ensuite transférée à la charge pendant l'état (*ON*) (Figure II.12).

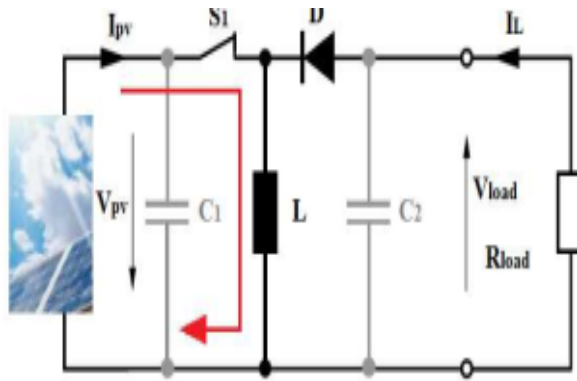


Figure II. 12: Convertisseur Buck-Boost durant l'état ON.[6].

Pendant l'intervalle de temps : $0 < T \leq DT$

La tension aux bornes de l'inductance L est donnée par :

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \tag{II.9}$$

Par conséquent, on obtient le courant à travers l'inducteur L et l'interrupteur

$$i_s = i_L = \frac{1}{L} \int_0^t V_L dt + i_{L(0)} = \frac{1}{L} \int_0^t V_I dt + i_{L(0)} = \frac{V_I}{L} t + i_{L(0)} \tag{II.20}$$

Où $i_{L(0)}$ est le courant initial dans l'inductance L à l'instant $t=0$.

La tension aux bornes de l'inductance L est donnée par :

$$i_L = \frac{v_I D}{f_s L} + i_{L(0)} \tag{II.21}$$

Le courant d'ondulation à travers l'inducteur L est :

$$\Delta i_L = i_{L(DT)} - i_{L(0)} = \frac{v_I D T}{L} = \frac{v_I D}{f_s L} \tag{II.22}$$

La valeur moyenne du courant de la bobine

$$I_L = \frac{I_0}{1-D} + \frac{\Delta i_L}{2} \tag{II.23}$$

Où f_s est la fréquence de commutation la tension de la diode :

$$v_D = -\frac{v_0}{D} \tag{II.24}$$

Pendant l'intervalle de temps $DT < t \leq T$

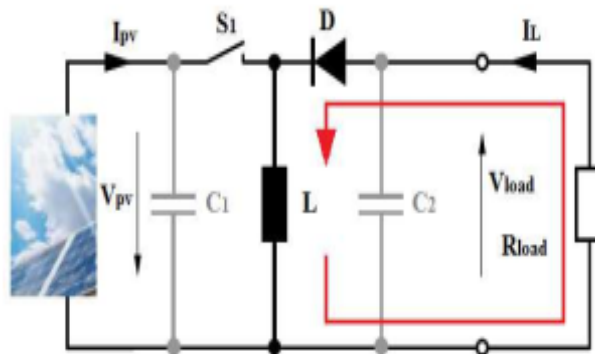


Figure II. 13: Convertisseur Buck-Boost durant l'état OFF. [6]

La tension aux bornes de l'inductance L est :

$$v_l = -v_0 = L \frac{di_l}{dt} \tag{II.25}$$

Le courant traversant l'inductance L et la diode :

$$i_D = i_L = \int_{DT}^t v_L dt + i_{L(0)} = \frac{1}{L} \int_{DT}^t (-v_0) dt + i_{L(0)} = \frac{v_l}{L} t + i_{L(0)} = -\frac{v_0}{L} (t - DT) + i_{L(0)} = -\frac{v_0}{L} (t - DT) + \frac{v_1 D}{f_s L} + i_{L(0)} \tag{II.26}$$

Où $i_{L(DT)}$ est le courant initial de l'inductance L à $t = DT$. Le courant d'ondulation à travers l'inducteur L est :

$$\Delta i_l = i_{L(DT)} - i_{L(T)} = \frac{v_0 T(1-D)}{L} = \frac{v_0(1-D)}{f_s L} \tag{II.27}$$

La tension aux bornes de l'interrupteur statique est donnée par :

$$v_s = \frac{v_0}{D} \tag{II.28}$$

La valeur crête du courant de la diode et de l'interrupteur :

$$I_{DM} = I_{L(max)} = \frac{I_0}{1-D} + \frac{\Delta i_L}{2} \tag{II.29}$$

Les formes d'ondes de la tension et de courant du convertisseur *Back-Boost* sont présentées sur les figures (II.14).

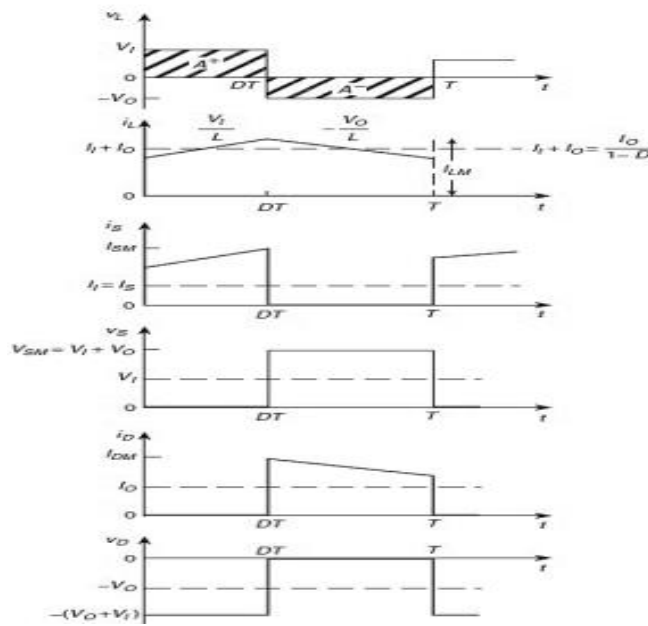


Figure II. 14: Forme d'onde du convertisseur Buck-Boost.

II.2.1.9 Conception et dimensionnement du convertisseur Buck-Boost [16]

On note la tension d'entrée ($v_i=12v$, $v_{imin}=8v$, $v_{imax}=20v$), courant de sortie ($i_{0min}=0.1A$, $i_{0max}=5A$). Supposons que notre convertisseur commence avec une tension de sortie de $V_o=11v$, pour une fréquence de commutation $f_s=62.5 \text{ kHz}$.

a) Calcul des puissances de sortie :

- La puissance maximale de sortie :

$$P_{0max} = v_0 I_{0max} = 55W \tag{II.30}$$

- La puissance minimale de sortie :

$$P_{0min} = v_0 I_{0min} = 1.1W \quad (\text{II.31})$$

b) Calcul de la résistance de charge :

- La résistance minimale

$$R_{Lmin} = \frac{v_0}{I_{0max}} = 2.2\Omega \quad (\text{II.32})$$

- La résistance maximale

$$R_{Lmax} = \frac{v_0}{I_{0min}} = 110\Omega \quad (\text{II.33})$$

c) Calcul des valeurs des gain du convertisseur :

- La valeur minimale du gain :

$$M_{VDCmin} = \frac{v_0}{v_{I_{max}}} = 0.55 \quad (\text{II.34})$$

- La valeur nominale du gain :

$$M_{VDCmon} = \frac{v_0}{v_{I_{max}}} = 0.91 \quad (\text{II.35})$$

- La valeur maximale du gain :

$$M_{VDCmax} = \frac{v_0}{v_{I_{min}}} = 1.37 \quad (\text{II.36})$$

Supposons que le rendement désiré de notre convertisseur $\eta=100\%$

d) Calcul des valeurs du rapport cyclique :

- La valeur minimale du rapport cyclique :

$$D_{min} = \frac{M_{VCDmin}}{M_{VCDmin} + \eta} = 0.37 \quad (\text{II.37})$$

- La valeur nominale du rapport cyclique :

$$D_{mon} = \frac{M_{VCDmon}}{M_{VCDmon} + \eta} = 0.5 \quad (\text{II.38})$$

- La valeur maximale du rapport cyclique :

$$D_{max} = \frac{M_{VCDmax}}{M_{VCDmax} + \eta} = 0.6 \quad (\text{II.39})$$

e) Calcul de la valeur de l'inductance :

- La valeur minimale de l'inductance

$$L_{min} = \frac{R_{I_{max}}(1-D_{min})^2}{2f_s} = 340\mu H \quad (\text{II.40})$$

f) Calcul de la valeur de la capacité :

- La valeur minimale de la capacité

$$C_{min} = \frac{D_{max}}{f_s R_{Lmin}} \frac{V_0}{V_{c_{pp}}} = 500\mu F \quad (\text{II.40})$$

II.3 Comparaison entre les techniques MPPT classique

Nous suggérons le schéma suivant pour la mise en œuvre des différents algorithmes classiques mentionnés précédemment (*P&O*, *CI*):

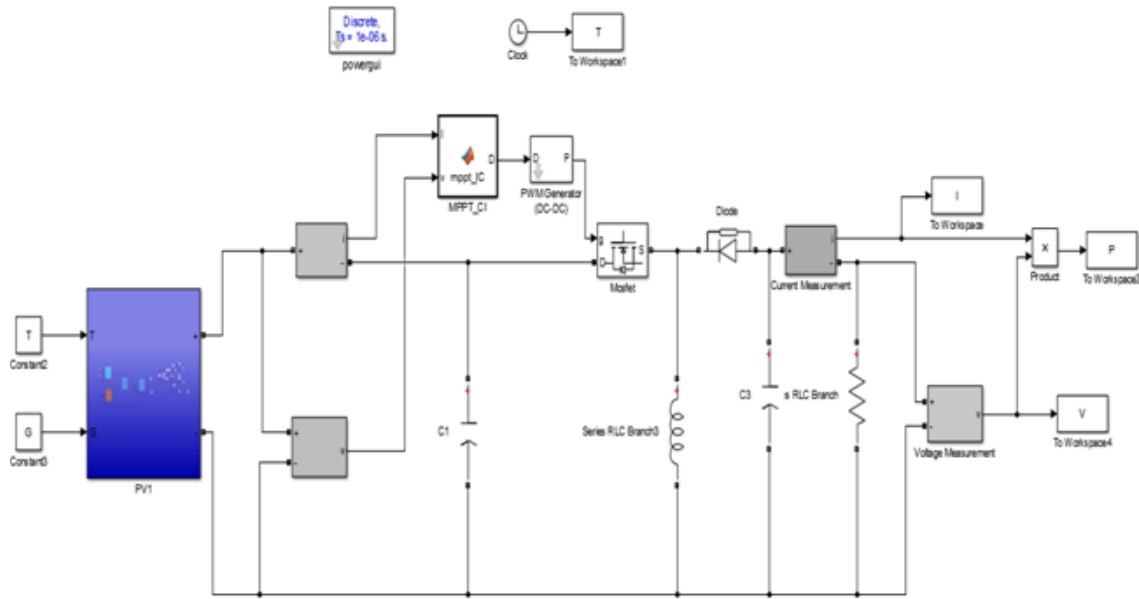


Figure II. 15: Schéma de commande.

Les algorithmes sont implémentés comme étant des fonctions Matlab qui seront appelées par le Bloc algorithmes de commande. La charge est une résistance de 30Ω .

Afin d'étudier les performances de chaque algorithme, nous allons simuler les différentes méthodes *MPPT* selon deux scenarios différents :

- { Environnement stable ($G = 1000W/m^2$, $T=25^\circ C$)
- { Cas d'ombrage (2 maximums dans la caractéristiques $P(V)$)

II.3.1.1 Environnement stable

Dans cette partie on présente la simulation pour une durée d'une seconde. Pour le test de chaque paramètre, on garde constant la température à $25^\circ C$ et l'éclairement à $1000W/m^2$ et on varie la charge (R) par un changement brusque à $t=0.4$ sec. Les résultats obtenus sont présentés dans les figures (II.16, II.17 et II.18) qui illustrent respectivement la puissance, la tension et le courant du système *PV*, ou on présente une comparaison entre les deux techniques (*P&O*) et (*CI-modifiée*). Un zoom est fait pour montrer les oscillations autour du *PPM*.

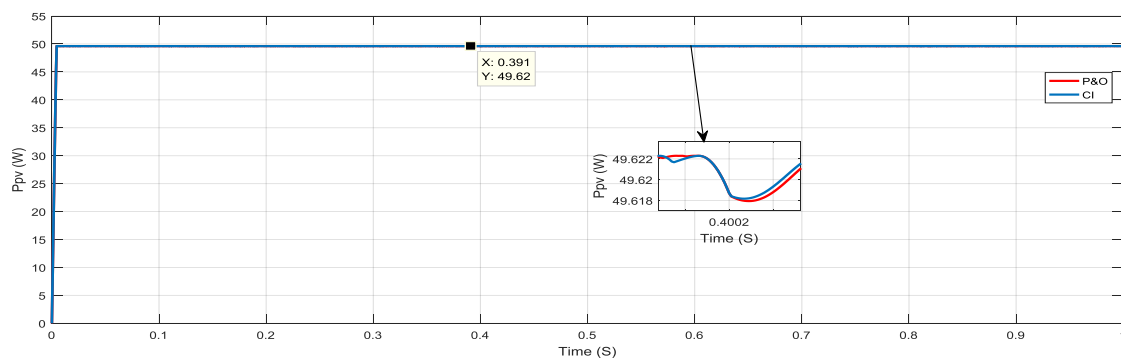


Figure II. 16: Puissance de sortie du GPV.

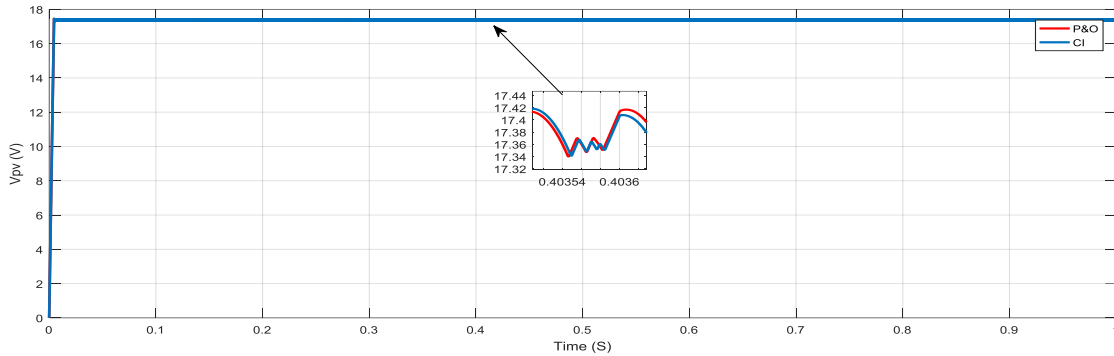


Figure II. 17: Tension de sortie du GPV.

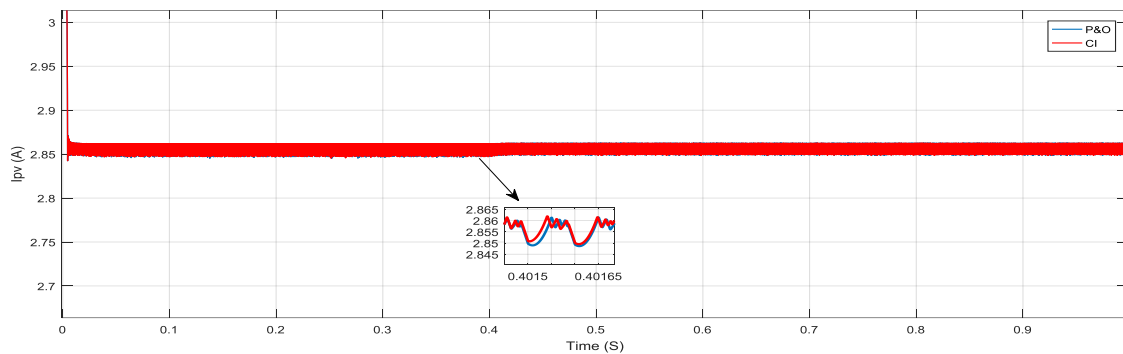


Figure II. 18: Courant de sortie du GPV.

▪ On voit que pour ce scénario les deux commandes sont capables de suivre le point de puissance maximum *MPP*, Cette figure montre que l'algorithme *P&O/CI* et le convertisseur Buck-Boost donnent un meilleur contrôle de la puissance dans la sortie du système, avec la présence de fluctuations de tension et de puissance et une grande bande d'oscillation dans le régime transitoire.

▪ La Figure II.16 illustre la variation de la puissance de sortie du panneau photovoltaïque (*PV*). On observe que la puissance maximale du panneau est atteinte ($P_{PVmax}=49,62$ W). Les résultats indiquent que, dans les mêmes conditions, ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W}/\text{m}^2$), la technique *CI* présente un temps de réponse légèrement plus rapide que la méthode *P&O* au démarrage. En régime permanent, à $t=0.4$ secondes (dans la zone agrandie), lors de la variation de la charge (*R*), on remarque que la méthode *P&O* oscille autour du point de puissance maximale (*PPM*) et montre une diminution de puissance par rapport à la technique *CI*.

Dans la partie qui suit, on va présenter la robustesse et les avantages de la technique (*CI*) et son impact sur l'énergie délivrée à la charge.

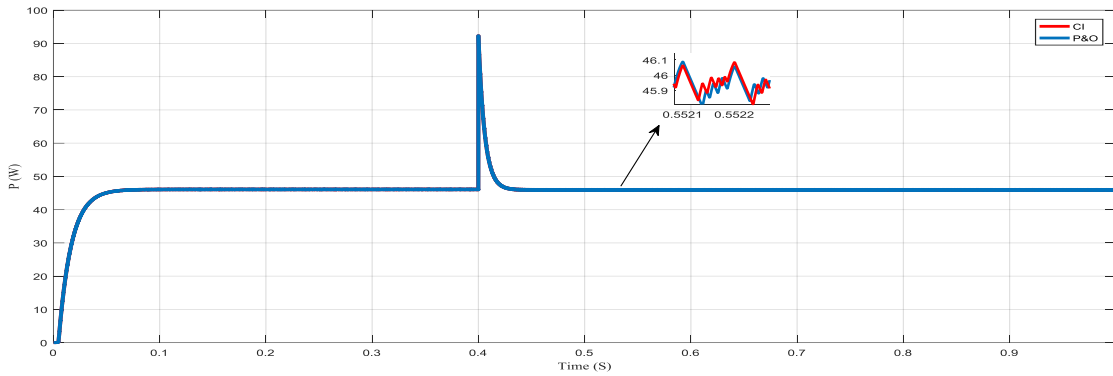


Figure II. 19: Puissance de la charge.

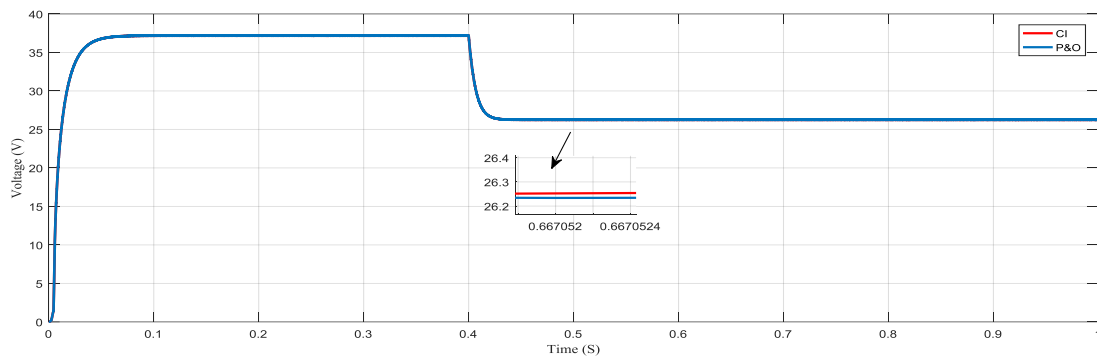


Figure II. 20: Tension de la charge.

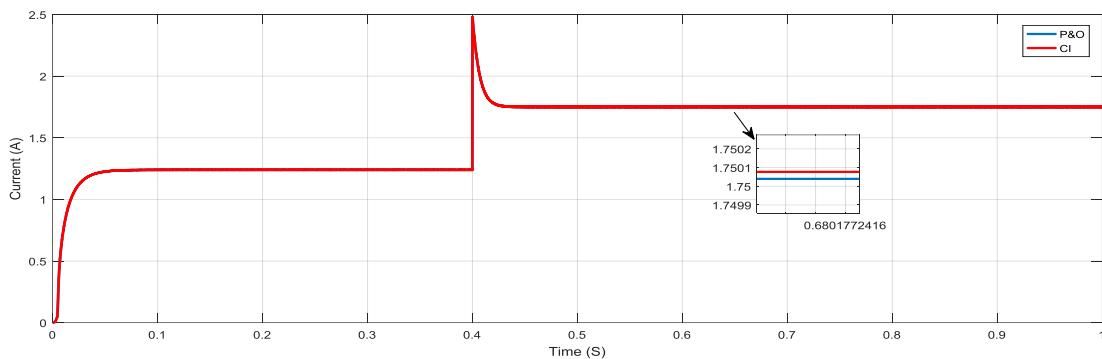


Figure II. 21: Courant de la charge.

Les résultats obtenus, présentés dans les Figures II.19, II.20 et II.21, illustrent respectivement la puissance, la tension et le courant de la charge. D'après la Figure II.19, la technique *P&O* montre des pertes de puissance avant et après la variation de la charge à $t=0.4$ secondes, comparée à la technique *CI*. De cette analyse, nous pouvons conclure que la technique *CI* est plus performante et mieux adaptée à notre convertisseur ainsi qu'à la charge *R*.

II.4 Cas d'ombrage

Ombrager une partie d'un module *PV* a de dramatiques conséquences sur sa courbe puissance/tension $P(V)$ et ce, même si une très faible partie du module ou de la cellule est à l'ombre, une diminution importante de la puissance produite en est alors la conséquence. Cet ombrage partiel peut être dû à des cheminées, à des

arbres ou à d'autres parties de construction. [17]. La figure II.24 montre qu'il y'a 2 *MPP* locaux ($MPP1=28.14W$; $MPP2=32.9W$).

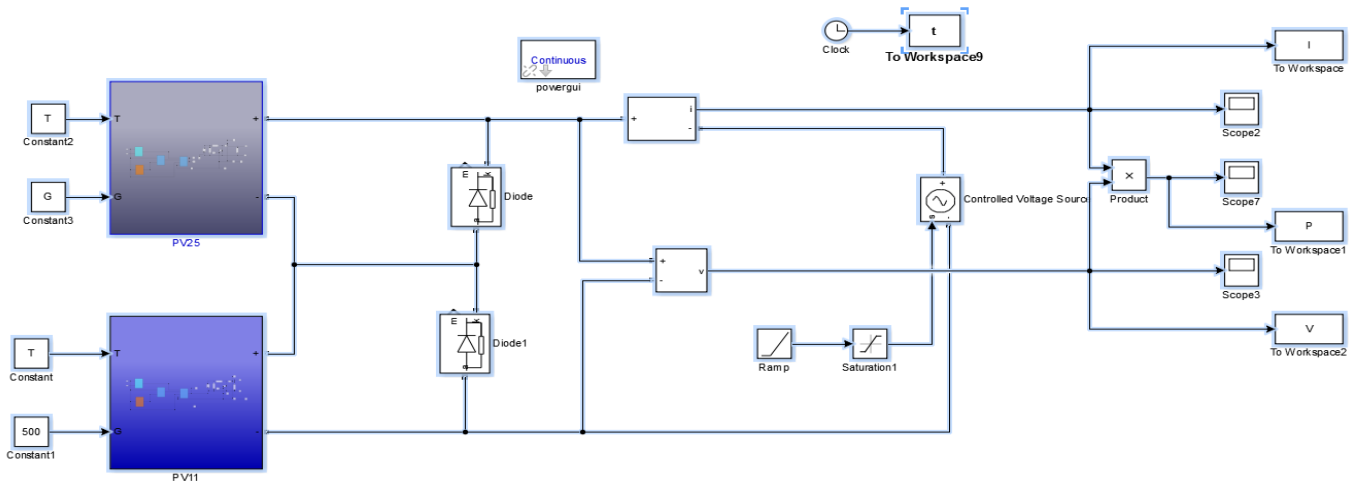


Figure II. 22: Schéma bloc de deux modules en série.

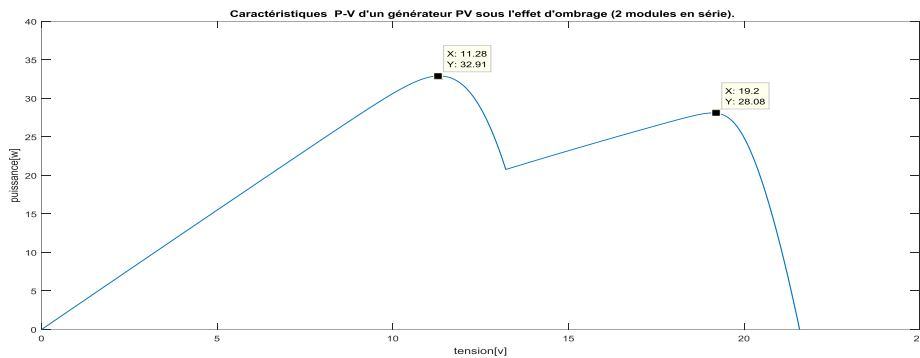


Figure II. 23: Effet de l'ombrage sur la courbe $P(V)$.

Pour ce test, la température est maintenue à une valeur constante égale à 25 C. Les figures suivantes montrent l'évolution de la courbe de puissance pour le cas d'ombrage.

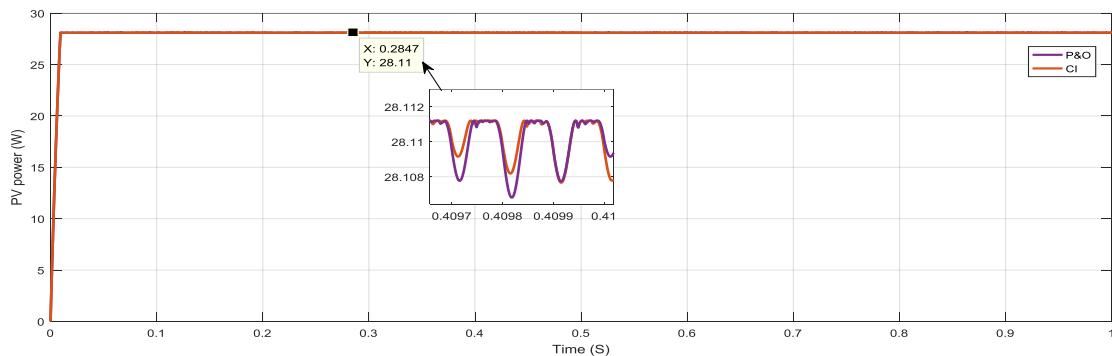


Figure II. 24: Puissance de sortie du PV.

- Si l'on compare ces résultats, on déduit que la commande *CI* est plus performante que la commande *P&O*. Cependant, ces techniques ne convergent pas vers le *PPM*. Elles convergent vers le premier *MPP* local à cause de l'effet de l'ombrage partiel.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé mathématiquement le panneau solaire et nous avons aussi présenté l'analyse du convertisseur statique *DC/DC* de type Buck Boost. Pour obtenir un modèle exploitable sur Simulink, les équations développées ont été réalisées dans des schémas blocs.

De plus, nous avons présenté les comportements de notre système et ses performances sous l'influence de différents paramètres météorologiques à savoir l'influence de l'ensoleillement et la température et visualiser les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du module photovoltaïque.

On présente également les résultats obtenus par deux méthodes classiques de commande de *MPPT* appliquées à un générateur *PV*. Le travail a été réalisé sous l'environnement *Matlab/Simpower*. Nous dénombrons deux cas de figures : conditions atmosphériques idéales (25° et 1000 w/m^2) et l'ombrage partiel. Les résultats obtenus avec les méthodes conventionnelles ont été satisfaisants. Lorsque le système était soumis à des augmentations lentes de puissance causées par des variations lentes et rapides de l'ensoleillement ou par une diminution de la température des cellules. Deux méthodes donnent d'assez bons résultats. Cependant, la méthode *CI* a démontré de bonnes performances lors d'une augmentation rapide de l'ensoleillement. Le chapitre suivant aborde l'étude d'un étage d'adaptation avec une commande *MPPT* avancée en se basant sur l'approche (*PSO*).

Chapitre III: Application de l'approche (*PSO*) pour la recherche du *MPPT* dans un système *PV* partiellement ombragé

III.1 Introduction

Les algorithmes inspirés de la nature comme l'algorithme de la chauve-souris (*BA*), l'optimisation par essaim de particules (*PSO*) et l'algorithme d'évolution différentielle (*DE*) ont suscité un intérêt particulier au sein de la communauté académique ces dernières années. Comme indiqué dans le chapitre précédent, de nombreux articles publiés dans des revues scientifiques ont mis en avant l'efficacité de ces algorithmes pour suivre le point de puissance maximale dans des conditions d'ombrage partiel, démontrant leur supériorité par rapport aux techniques classiques de suivi du point de puissance maximale. Ce chapitre décrit l'application d'une approche méta-heuristique bio-inspirée: l'algorithme (*PSO*), pour le suivi du point de puissance maximale global en conditions d'ombrage partiel. Le chapitre commence par une brève présentation de cet algorithme. Ensuite, la caractéristique principale de l'algorithme est décrite. De plus, la formulation du suivi du point de puissance maximale comme problème d'optimisation est présentée, ainsi que l'application de l'algorithme pour le suivi du point de puissance maximale selon deux stratégies différentes.

III.2 Une vue d'ensemble générale sur les algorithmes méta-heuristiques

L'optimisation est primordiale dans de nombreuses applications telles que l'ingénierie, les activités commerciales et les conceptions industrielles. De toute évidence, l'objectif de l'optimisation est la recherche de la solution optimale, que ce soit en minimisant la consommation d'énergie et les coûts, ou en maximisant les performances et l'efficacité. De nombreux problèmes d'optimisation réels sont difficiles à résoudre avec des méthodes d'optimisation exactes ou déterministes, en raison de propriétés telles que la haute dimensionnalité, la multi-modalité et la non-différentiable. Par conséquent, les algorithmes approximatifs ou stochastiques constituent une approche alternative pour ces problèmes. Les algorithmes stochastiques peuvent être décomposés en heuristiques et en méta-heuristiques. L'heuristique fait référence à des techniques basées sur l'expérience pour la résolution de problèmes et l'apprentissage. Ces algorithmes produisent, par essais et erreurs, des solutions acceptables à un problème complexe dans un laps de temps computationnel raisonnable.

Étant donné que le suivi du point de puissance maximale dans un système de cellules solaires peut être représenté comme un problème d'optimisation dynamique multimodal, il est envisagé que les méta-heuristiques inspirées de la nature seront très efficaces pour traiter la courbe de caractéristiques *P-V* sous des conditions d'ombrage partiel. Parmi ces méta-heuristiques, les algorithmes de la chauve-souris, d'optimisation par essaim de particules et d'évolution différentielle sont considérés comme très efficaces en raison de leur haute efficacité avec un faible nombre de paramètres de contrôle, ainsi que de leur performance robuste et de leur structure simple.

Le reste de ce chapitre traite des principales caractéristiques de *PSO* et décrit l'application de la technique proposée au *MPPT*.

III.3 Optimisation des essaims de particules (PSO)

III.3.1 Présentation générale de l'algorithme PSO[22]

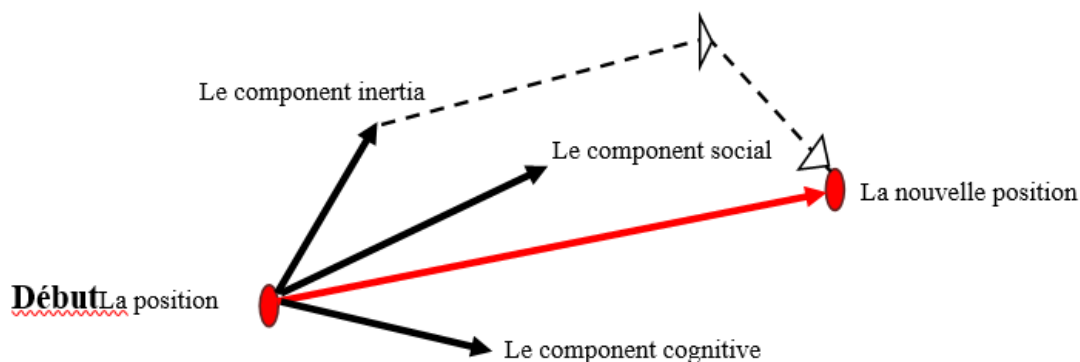


Figure III. 1: Mouvement de particule.

L'optimisation par essaim de particules est une méta-heuristique basée sur la population inventée par Russel Eberhart (ingénieur électricien) et James Kennedy (socio-psychologue) en 1995. Cet algorithme utilise une population de solutions candidates pour développer une solution optimale au problème en question. Il s'est inspiré à l'origine de la vie artificielle et plus spécifiquement du comportement social des animaux en essaim, tels que les bancs de poissons et les vols d'oiseaux. En effet, on peut observer chez ces animaux des dynamiques de déplacement relativement complexes, où individuellement chaque individu a une "intelligence" limitée et une connaissance locale de sa situation dans l'essaim. Les informations locales et la mémoire de chaque individu sont utilisées pour décider de son mouvement.

L'essaim de particules correspond à une population d'agents, appelés particules. Chaque particule est considérée comme une solution du problème et lui est attribué une position (le vecteur solution) et une vitesse. De plus, chaque particule possède une mémoire qui lui permet de se souvenir de sa meilleure performance (en termes de position et de valeur) et de la meilleure performance atteinte par les particules voisines: chaque particule a un groupe d'informateurs, historiquement appelé son voisinage. Un essaim de particules, qui sont des solutions potentielles au problème d'optimisation, "vole" dans l'espace de recherche à la recherche de l'optimum global. La vitesse d'une particule est alors influencée par trois composantes: une composante d'inertie, une composante cognitive et une composante sociale. La première décrit la tendance de la particule à suivre sa direction actuelle de déplacement. La deuxième représente la tendance de la particule à se déplacer vers la meilleure position par laquelle elle est déjà passée. La composante sociale caractérise la tendance de la particule qui prend appui sur l'expérience de ses congénères et, ainsi, à se déplacer vers le meilleur site déjà atteint par l'essaim. La stratégie de déplacement d'une particule est illustrée dans la figure III.1.

III.3.2 Formalisation

Dans un espace de recherche de dimension D , nous définissons un essaim de particules de taille N (taille de la population). La particule i de l'essaim est modélisée par son vecteur de position $x_i=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ et par sa vitesse $v_i=(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$. La qualité de sa position est déterminée par la valeur de la fonction objective de ce point. Cette particule conserve en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, que nous notons $P_{besti}=(P_{besti1}, P_{besti2}, \dots, P_{bestiD})$. La meilleure position atteinte par l'essaim est notée $G_{best}=(G_{best1}, G_{best2}, \dots, G_{bestD})$. Dans notre cas, nous nous intéressons uniquement à l'essaim entièrement connecté, c'est-à-dire que toutes les particules partagent l'information ; chaque particule connaît la meilleure position déjà visitée par n'importe quelle particule de l'essaim. Cette version de l'algorithme est appelée version globale de l'optimisation par essaim de particules (G_{best}), où toutes les particules de l'essaim sont considérées comme proches de la particule i .

Au début de l'algorithme, les particules de l'essaim sont initialisées de manière aléatoire ou uniforme dans l'espace de recherche du problème. Ensuite, à chaque itération, chaque particule se déplace en combinant linéairement les trois composantes mentionnées précédemment. En effet, à l'itération $t+1$, 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.

$$v_{ij}^{t+1} = wv_{ij}^t + c_1r_{1ij}^t (Pbest_{ij}^t - x_{ij}^t) + c_2r_{2ij}^t (Gbest_j^t - x_{ij}^t) \quad (III.1)$$

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1} \quad (III.2)$$

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 $[0, 1]$, à chaque itération t et pour chaque dimension j .

Les facteurs stochastiques permettent aux particules de se déplacer de manière aléatoire dans l'espace du problème. Cette propriété permet une exploration étendue de l'espace de recherche et augmente la probabilité de trouver la meilleure solution avec une grande efficacité. Les trois composantes mentionnées précédemment (c'est-à-dire l'inertie, cognitive et sociale) sont représentées dans l'équation (III.1) par les termes suivants :

wv_{ij}^t correspond à la composante d'inertie du déplacement, où le paramètre w contrôle l'influence de la direction sur le déplacement futur; $c_1r_{1ij}^t (Pbest_{ij}^t - x_{ij}^t)$ correspond à la composante cognitive du déplacement, où le paramètre c_1 contrôle le comportement cognitif de la particule; $c_2r_{2ij}^t (Gbest_j^t - x_{ij}^t)$ correspond à la composante sociale du déplacement, où le paramètre c_2 contrôle l'aptitude sociale de la particule.

Ainsi, l'algorithme *PSO* se résume dans les étapes suivantes :

- ✓ Initialisation de chaque particule de la population en sélectionnant aléatoirement des valeurs pour son vecteur de position x_i et sa vitesse v_i
- ✓ Répétition
- ✓ Calcul de la valeur du fitness de chaque particule i ;
- ✓ Mise à jour des meilleures positions locales pour chaque particule i ;
- ✓ Mise à jour de la meilleure position globale de l'essaim ;
- ✓ Calcul de la vitesse et mettez à jour la position de chaque particule selon les équations (III.1) et (III.2). jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint.

III.3.2.1 Application du *PSO* pour *MPPT*

La méthode *PSO* est utilisée pour réaliser l'algorithme de suivi du point de puissance maximale (*MPPT*) pour un système photovoltaïque fonctionnant dans des conditions d'ombrage partiel, où la courbe *P-V* présente plusieurs points de puissance maximale. Le diagramme de flux de la technique *MPPT* basée sur le *PSO* proposée est présenté dans la Figure III.2. Les principes de fonctionnement de la technique proposée peuvent être décrits comme suit :

Étape1: initialisation du *PSO*

Pour démarrer l'optimisation, le rapport cyclique du signal *PWM* est choisi comme variable d'optimisation. Ainsi, il est ajusté directement par le contrôleur *MPPT*. Initialement, un vecteur de solutions de rapport cyclique avec N particules est défini. Le nombre de particules dans la population doit être choisi avec soin. Un plus grand nombre de particules permet un suivi plus précis du *MPP* même sous des motifs d'ombrage compliqués, mais la vitesse de suivi diminue. À mesure que le nombre de particules augmente, le temps de calcul augmente également.

Les particules *PSO* sont généralement initialisées de manière aléatoire dans l'espace de recherche. Pour l'algorithme *MPPT* proposé, les particules sont initialisées à des points fixes, en utilisant la méthode de l'impédance réfléchissante.

Le but du processus d'optimisation est la maximisation de la puissance extraite du panneau photovoltaïque, qui est définie comme étant la fonction objectif (P). La fonction d'évaluation de la valeur de condition physique est définie comme suit:

$$P(d_i^k) > P(d_{pbesti}) \quad (III.3)$$

Où d_{pbesti} est la meilleure position personnelle de la particule i .

Étape 2: Mettre à jour le meilleur rapport cyclique individuel et global

Pour chaque rapport cyclique (d_i), la puissance de sortie *PV* correspondante $P(d_i^k)$ est calculée en multipliant la tension (V_{PV_i}) et le courant (I_{PV_i}) mesurés. Ensuite, l'algorithme vérifie si cette valeur de cycle de service entraînera une meilleure valeur d'aptitude individuelle (par rapport à l'ancien P_{besti}). Dans ce cas, la meilleure position personnelle (d_{pbesti}), ainsi que sa meilleure valeur de condition physique individuelle

correspondante P_{besti} , sont mises à jour; sinon, P_{besti} conserve sa valeur actuelle. Le meilleur cycle de service global, d_{besti} , est déterminé en comparant les valeurs de fitness de la population réelle avec la meilleure puissance photovoltaïque mondiale obtenue, P_{best} .

Étape 3: Mettre à jour la vitesse et la position de chaque particule

Après le processus d'évaluation, la vitesse et la position de chaque particule dans l'essaim sont mises à jour. Les nouveaux cycles de service sont ensuite calculés pour chaque itération par les équations:

$$v_i^{k+1} = w v_i^k + c_1 r_1 (d_{besti} - d_i^k) + c_2 r_2 (d_{best} - d_i^k) \quad (III.4)$$

$$d_i^{k+1} = d_i^k + v_i^{k+1} \quad (III.5)$$

Étape 4: Détermination de la convergence

L'algorithme poursuit le processus d'optimisation jusqu'à ce que la contrainte de convergence soit satisfaite. Une fois le critère de convergence satisfait, le convertisseur *DC-DC* fonctionne au cycle de service optimal correspondant au *GMPP*.

III.3.2.1 Les méthodes du *PSO*

Trois méthodes principales de perturbation *PSO* ont été proposées et utilisées. Celles-ci sont:

1. **Perturbation de tension de référence** [18]: Dans cette méthode, la référence de sortie du générateur photovoltaïque est utilisée comme paramètre de contrôle en conjonction avec un contrôleur (généralement un contrôleur de type *PI/PID*) pour ajuster le rapport cyclique du convertisseur de puissance *MPPT* en passant un étage à *MLI*.
2. **Perturbation du courant de référence** [19]: L'approche de perturbation du courant de référence utilise la référence du courant de sortie du générateur photovoltaïque comme paramètre de contrôle. En raison de sa réponse transitoire lente aux changements d'irradiation et de sa forte susceptibilité au bruit et à l'oscillation du contrôleur proportionnel-intégral (*PI*), le contrôle du courant de référence n'est pas largement utilisé.
3. **Perturbation directe du rapport cyclique** [20] – La perturbation directe du rapport cyclique utilise le rapport cyclique du convertisseur *MPPT* directement comme paramètre de contrôle.

III.4 Le contrôleur (*PID*)

Le contrôleur proportionnel-intégral-dérivé (*PID*) est l'algorithme de contrôle le plus couramment utilisé dans l'industrie et a été universellement accepté dans le contrôle industriel. La popularité des contrôleurs *PID* peut être attribuée en partie à leurs performances robustes dans un large éventail de conditions de fonctionnement et en partie à leur simplicité fonctionnelle, qui permet aux ingénieurs de les faire fonctionner de manière simple et directe.

Le schéma fonctionnel du contrôleur *PID* est présenté dans **Figure III.3**.

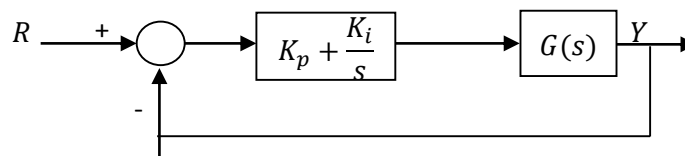


Figure III.3. Le schéma fonctionnel du contrôleur

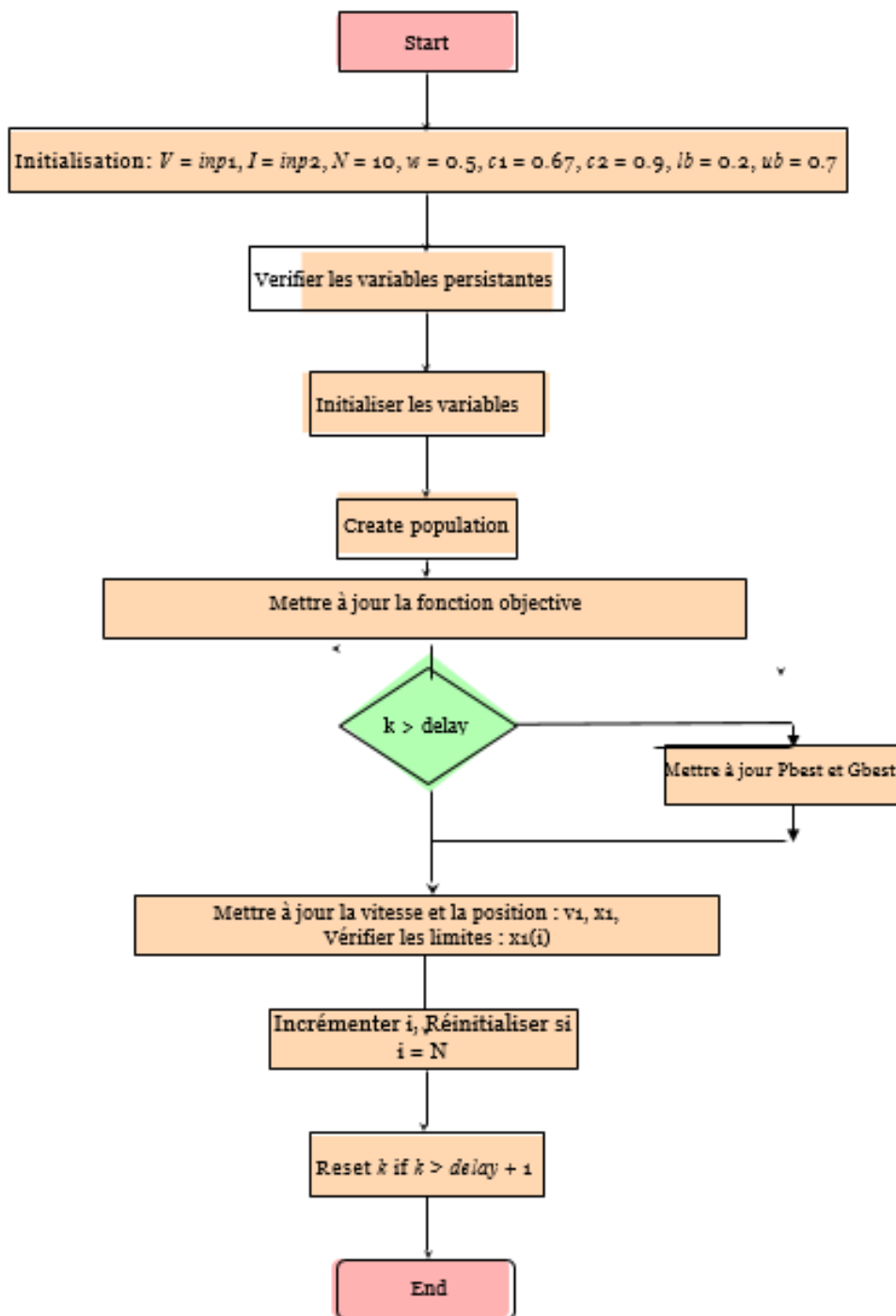


Figure.III.2. Organigramme de *PSO*

Dans l'algorithme *PSO* à pas fixes, la quantité de perturbation est conçue en fonction de la précision en régime permanent et du temps de réponse du *MPPT*. Ainsi, le compromis entre le temps de réponse et la précision en régime permanent doit être pris en compte par la conception correspondante. Pour résoudre ce dilemme, une méthode *PSO* variable est généralement utilisée.

Dans cette méthode, l'étape de perturbation est généralement ajustée en utilisant la dérivée de la puissance par rapport à la tension (dP/dV) ou au courant (dP/dI) d'un panneau photovoltaïque. Cette approche est entièrement adaptative car elle fonctionne sur la base des caractéristiques $P - V$ ou $P - I$, ce qui entraîne toujours un facteur dP/dV ou dP/dI proche de zéro au *MPP*. Par conséquent, la taille du pas peut être rendue relativement petite à mesurer que dP/dV se rapproche de zéro et que le panneau fonctionne à proximité de *MPP*. Ainsi, le *PSO* adaptatif a une excellente vitesse de suivi ainsi qu'une excellente précision en régime permanent [21].

III.5 Résultats de simulation

Le but de ces essais est de vérifier le fonctionnement de chaque technique et comparer les performances de chaque méthode.

III.5.1 Environnement stable

Nous avons procédé à la simulation du système ci-dessous, sous les conditions standard (température 25°C et un éclairement $1000 /\text{m}^2$). Notre choix a été de prendre I_{pv} et V_{pv} du *PV* comme entrées du bloc de la commande et le rapport cyclique D comme sortie. La figure (III.4) montre le schéma bloc Simulink du *GPV* connecté à une charge résistive par un convertisseur Buck-Boost. Les paramètres du Hacheur Buck-Boost sont donnés dans l'Annexe A.

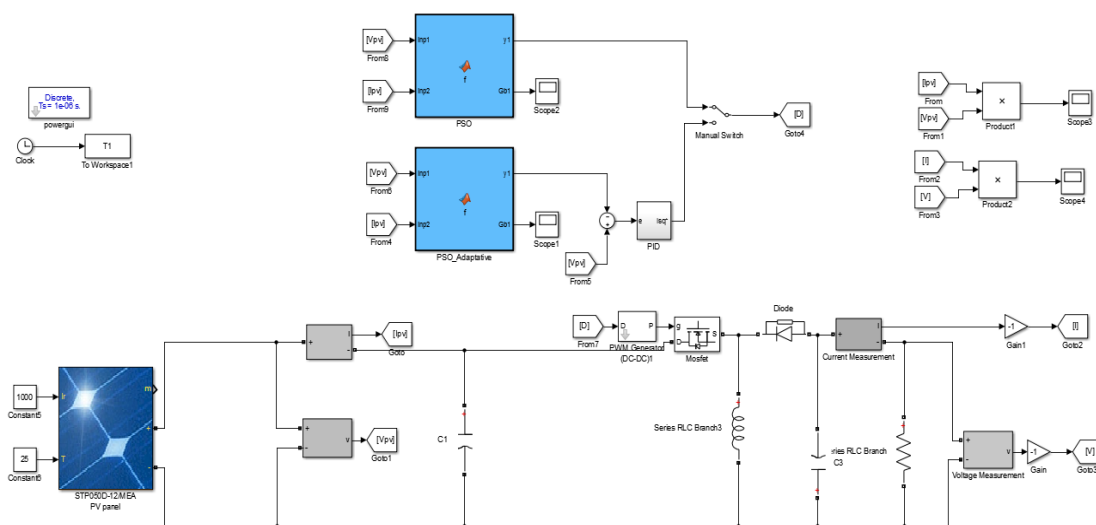


Figure III. 2 : Schéma bloc Simulink.

Les résultats de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque muni de la comparaison entre commande *MPPTPSO* et *PSO* adaptative sont représentés par les figures suivantes.

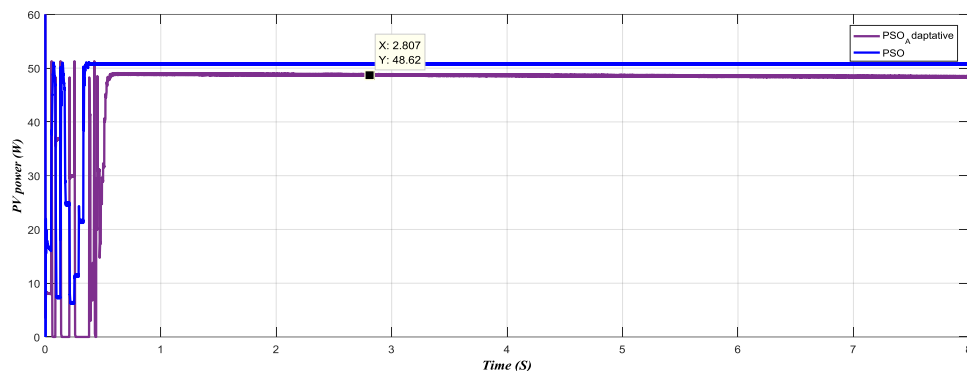


Figure III. 3: Puissance de sortie du GPV.

Le comportement du contrôleur *MPPT* basé sur *PSO* directe et adaptative pendant le cas standard est illustré sur la Figure III. 5. Comme le montre cette figure, la puissance photovoltaïque générée est d'environ 48.22 W, ce qui est proche de la puissance maximale réalisable. Donc pour les deux scénarios la commande *PSO* suit parfaitement le *MPP*.

III.5.2 Cas d'ombrage

Pour montrer la gravité des conditions d'ombrage partiel, deux modèles d'ombrage différents ayant deux et trois pics dans la courbe P-V sont pris en compte.

a) Deux modèles en série

La Figure III.7 montre l'évolution de la courbe de puissance. Il est clair que dans ce cas, il existe deux *MPP* locaux. Le premier max est $MP P1=57.58 W$, tandis que le second max est $MP P2 = 79,58W$.

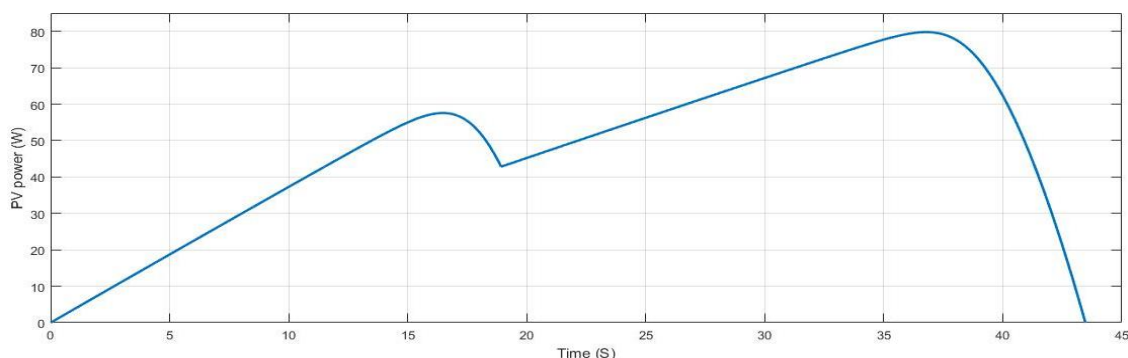


Figure III. 4: L'évolution de la courbe de puissance pour le cas d'ombrage.

Les résultats de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque muni de la comparaison entre la commande *MPPT PSO* et *PSO Adaptative* sont représentés par les figures suivantes.

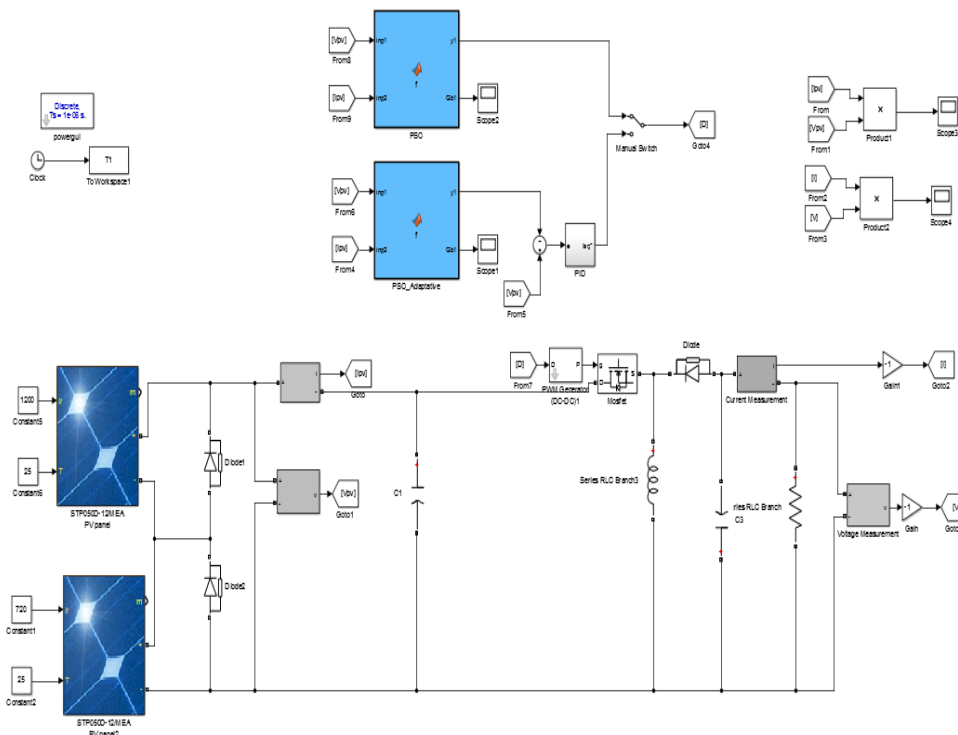


Figure III. 5 : Schéma de commande de deux modèles en série.

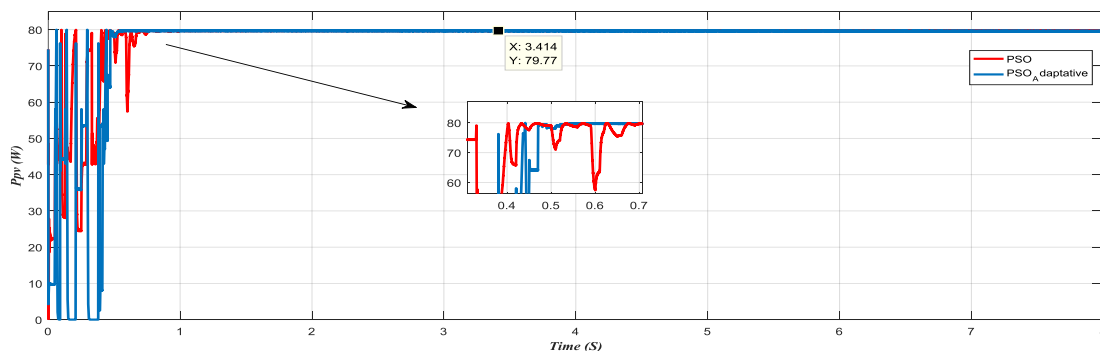


Figure III. 6 : Puissance de sortie du GPV de deux modèles en série.

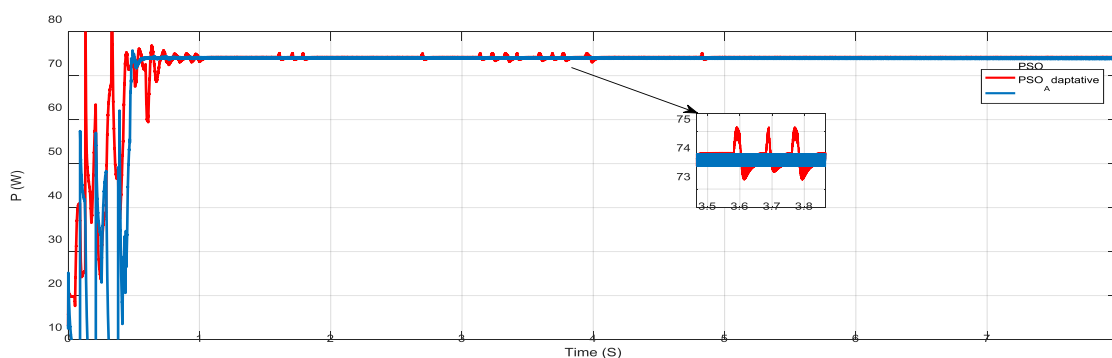


Figure III. 7: Puissance de sortie d'hacheur de deux modèles en série.

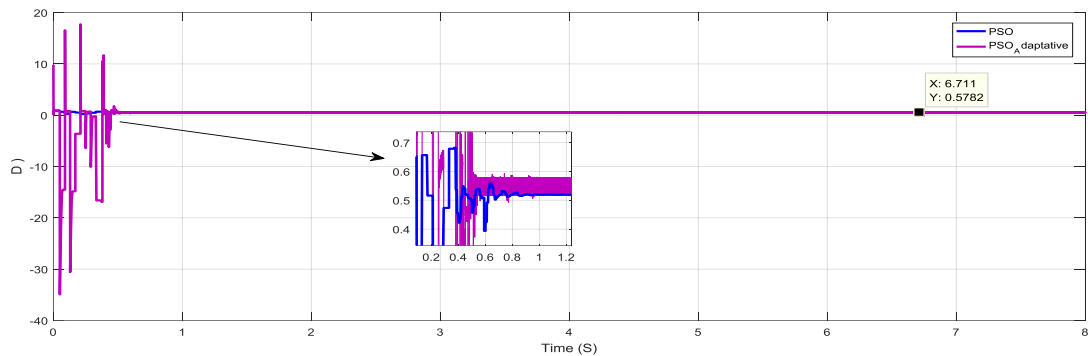


Figure III. 8: Le rapport cyclique.

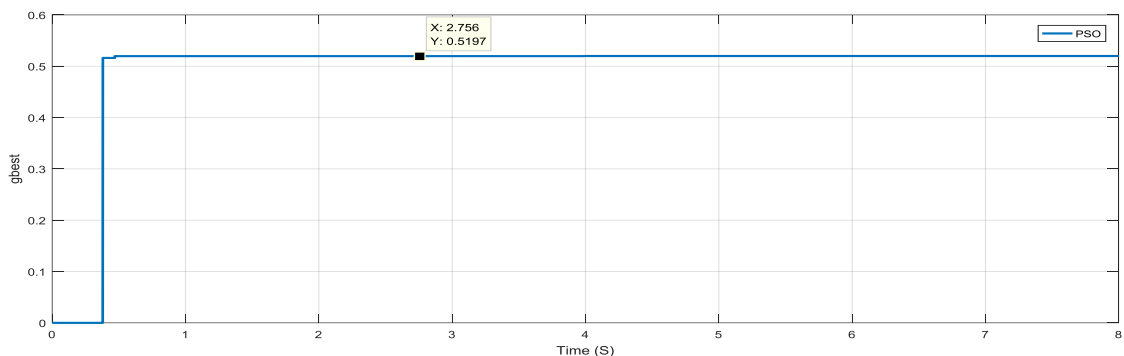


Figure III. 9: L'évolution de G_{best} dans le cas de *PSO* direct.

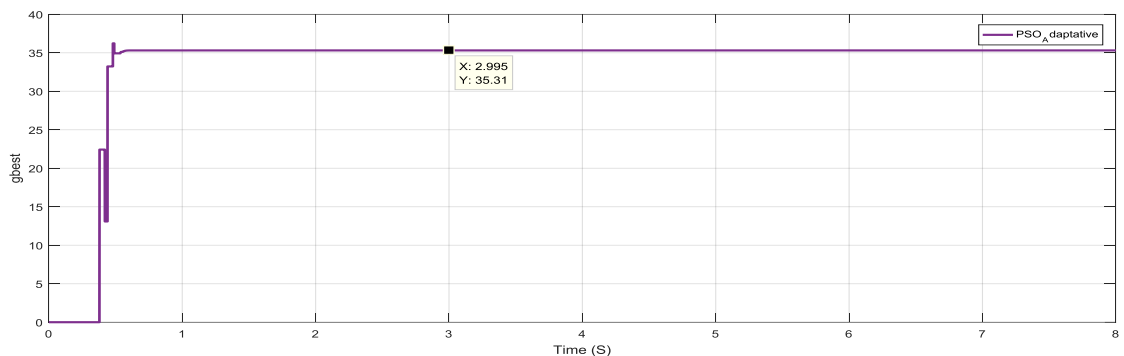


Figure III. 10 : L'évolution de G_{best} dans le cas de *PSO* adaptative.

Dans ce modèle, la courbe caractéristique *PV* pour une situation donnée présente deux pics distincts. Bien que plusieurs pics soient présents, la technique *PSO* a permis de fonder le *GMPP* en un seconde. Il visiblement remarquable que l'approche basée sur le *PSO* adaptatif a une excellente vitesse de suivi ainsi qu'une excellente précision en régime permanent.

b) Trois modèles en série

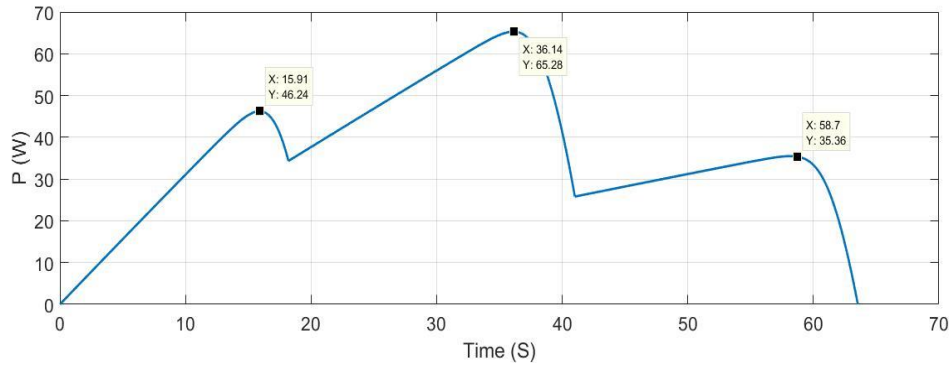


Figure III. 11: Effet de l'ombrage sur la courbe P(V).

La Figure III.15 montre l'évolution de la courbe de puissance. Dans ce test de simulation, trois pics de puissances ont été introduit, i.e. trois max locaux sont observables (MP P1 = 46.24W, MP P2=65.28W, MP P3 = 35.36W).

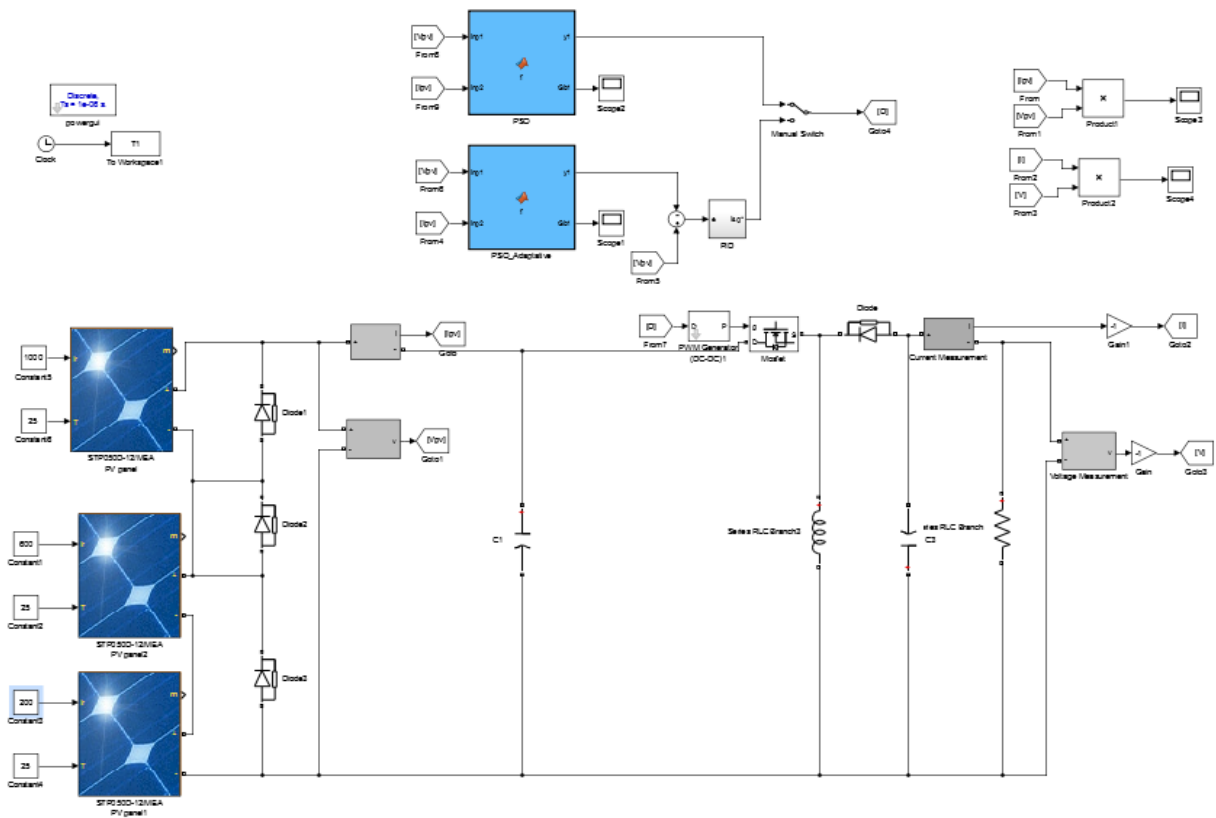


Figure III. 12: Schéma de commande de trois modelés en série.

Les résultats de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque muni de la commande MPPT PSO sont représentés par les figures suivantes.

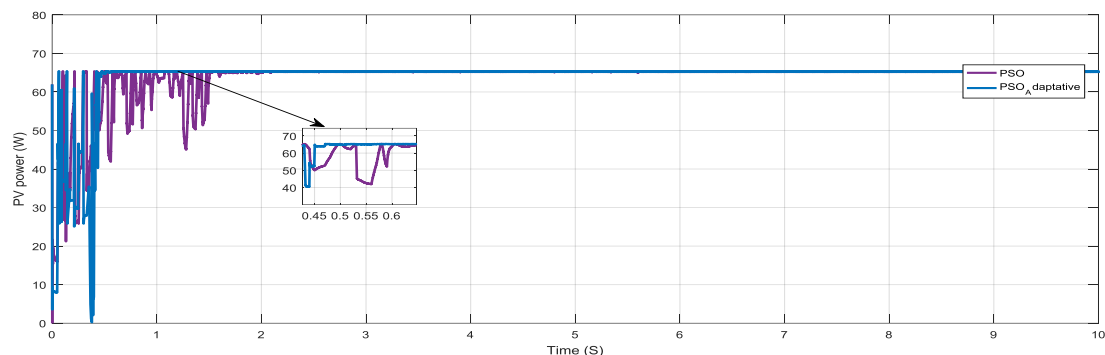


Figure III. 13: Schéma de commande de trois modelés en série.

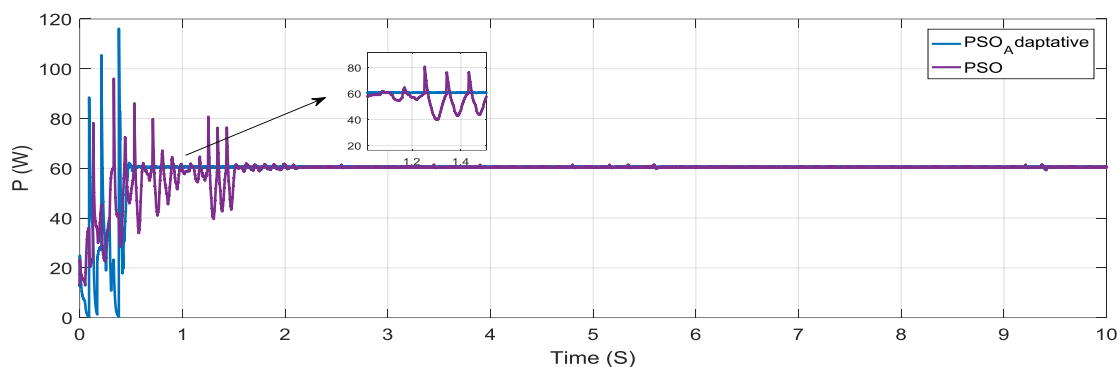


Figure III. 14: Puissance de sortie d'hacheur.

Les résultats de la simulation témoignent de la capacité de différencier le pic local du pic global. Il est tout à fait clair que la méthode *PSO* converge vers le pic global.

Le mode de contrôle *PID-PSO* s'avère être plus réactif et plus rapide que le *PSO MPPT*, en ce qui concerne les changements brusques de l'irradiation d'entrée.

Notons qu'en pratique, on n'a pas un système idéal. Ainsi, la puissance obtenue dans la sortie du hacheur ne correspond pas à la puissance maximale du module, à cause de plusieurs paramètres. Ajoutons aussi les difficultés qu'on a rencontrés tels que les pertes liées à la qualité des composants (en prenant en considération les résistance interne de *Mosfet* (0.1Ω) et de la diode (0.001Ω)).

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les résultats obtenus par deux méthodes différentes de commande de *MPPT/PSO* appliqué à un générateur *PV*. Nous dénombrons deux cas de figures: conditions atmosphériques idéales (25°C et 1000 w/m^2) avec et sans ombrage partiel. Nous avons effectué une étude comparative entre deux méthodes *MPPT*. La première approche est la méthode *PSO* directe, la deuxième approche, quant à elle, est basée sur l'introduction du contrôleur *PI* suivi d'un étage *MLI*. Les deux méthodes donnent de très bons résultats. Cependant, à partir des résultats obtenus, en ombrage partiel, la commande par *PSO* adaptative présente de meilleures performances et une réponse plus rapide par rapport la méthode ou l'algorithme *PSO* fourni directement le rapport cyclique.

Conclusion Générale

L'objectif principal de cette étude est d'améliorer l'efficacité énergétique des panneaux solaires en ajustant la stratégie de commande *MPPT* afin de maximiser la production d'électricité, même dans des conditions où des portions des panneaux *PV* sont ombragées.

Dans un premier temps, des notions sur le système *PV* et beaucoup de généralités portant sur l'effet photovoltaïque, cellule et générateur *PV* sont présentés et commentés. Par la suite, une présentation globale sur les méthodes d'optimisation *MPPT* est effectuée, à savoir, les techniques classiques et intelligentes qui sont largement utilisés dans la littérature. La présentation s'est concentrée sur plusieurs facteurs, dont les plus importants sont la performance de chaque technique. La première partie du présent manuscrit est finalisée par une comparaison analytique sur les approches *MPPT* dont le lecteur le trouvera résumé dans un tableau

Par ailleurs, un modèle pour effectuer une simulation sous *Matlab/Simulink* est dégagé. La représentation mathématique englobe un modèle du *GPV* permettant le traçage des caractéristiques du générateur *PV*. Une description théorique et l'analyse du fonctionnement du convertisseur *Buck-Boost* sont également données.

Après avoir fait la modélisation d'un générateur *PV*, le comportement du système photovoltaïque (caractéristique puissance-tension et caractéristique courant-tension) par rapport aux variations climatiques est étudié. Les résultats de la simulation ont montré que la caractéristique du panneau photovoltaïque est directement liée essentiellement à ses conditions climatiques (l'ensoleillement et la température). Selon les résultats de simulation, les deux approches (*P&O*, *IC*) donnent de bons résultats. Cependant, la méthode *IC* a démontré de bonnes performances lors d'une augmentation rapide de l'ensoleillement.

Dans la partie importante de la présente étude, on a présenté, d'une manière détaillée, l'approche intelligente *PSO*. En effet, deux structures sont étudiées et commentées. Une approche est basée sur un algorithme qui fournit directement le rapport cyclique. Par contre, la deuxième structure quant à elle, fournit la tension de référence qui correspond au maximum global du panneau. Par la suite un contrôleur classique *PI* s'en charge de ramener la tension à la sortie du panneau à suivre efficacement la tension de référence imposée par l'algorithme *PSO* en ajoutant bien entendu l'étage *MLI*. Les résultats de simulation obtenus sont discutés et commentés. Nous avons effectué une étude comparative entre ces deux méthodes *MPPT*. (*PSO* directe, *PSO* adaptative). Dans les conditions standard les deux approches offrent de bons résultats. Cependant, à partir des résultats obtenus, en présence d'ombrage partiel, la commande par *PSO* adaptative présente de meilleures performances et une réponse plus rapide par rapport *PSO* direct.

En conclusion, on peut affirmer que les résultats montrent que toutes les méthodes testées sous les conditions atmosphériques standards atteignent le point *MPP* avec succès. Cependant, nous avons constaté que les deux méthodes "*P&O*" et "*CI*" présentent des oscillations autour du *MPP* tandis que le *PSO* donne la meilleure réponse en termes de précision, d'efficacité, de stabilité et rapidité après avoir convergée vers le maximum global lorsque le phénomène d'ombrage partiel se présente.

ANNEXES

Annexe A :

Hacheur Buck Boost utilisé

Nous avons utilisé les paramètres du hacheur Buck Boost suivantes dans le modèle Simulink :

Paramètres	Valeurs
Fréquence de commutation f	1 KHz
Capacité à l'entrée du Hacheur C_1	7.9e-4 F
Capacité C	7.9e-4 F
Inductance L	2.34e-4 H
Résistance R	3 0 Ω

Annexe B :

Programme script de PV :

```
%paramètres pour le modèle de PV
```

```
Np=1;
```

```
Ns=36;
```

```
Ki=0.0014;
```

```
K=1.3805e-23;
```

```
Iscn=3.13;
```

```
Gref=1000;
```

```
A=0.94923;
```

```
q=1.6002e-19;
```

```
Voc=21.8;
```

```
Tref=298.15;
```

```
Rs=0.62003;
```

```
Rsh=338.7593;
```

```
T=25+273.15;
```

```
G=1000;
```

```
dEgdT=2.668e-4;
```

```
EgRef=1.12;
```

```
Eg = EgRef * (1 + (T - Tref) * dEgdT)
```

Références bibliographiques

[En ligne]. Available: http://www.energiesrenouvelables.org/solaire_photovoltaique.asp.

[1] toute l'information sur le photovoltaïque,

<http://WWW.photovoltaique.info/-les-application-du-photovoltaique>

- [2] B.Khalil et T.Ayyoub. "Modélisation et simulation d'un système PV adapté par une commande MPPT basée sur un mode glissant" Université 8Mai 1945 – Guelma2020_2021
- [3] Z. FATIMA."Etude et d'un générateur photovoltaïque connecté au réseau électrique et doté d'un FAP"Mémoire demaster Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi2017
- [4] D.Turcotte,M.Ross and F.Sheriff. « Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools» PV Horizon, Canada, 2001.ARTICLE PDF.
- [5] L. ATIK."Implémentation d'outil d'intelligence artificielle pour l'amélioration des performance de l'étage de conversion photovoltaïque" Mémoire de doctorat Université Oran
- [6] K. Fatima Zohra."Commande MPPT pour les panneaux photovoltaïques en ombrage" Mémoire demaster UniversitéAhmed Draïa-Adrar2020_2021
- [7] H. K. A. M. A.Hanen, "Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque", Tunisie: Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER'13), 2013.
- [8] C.CABAL, «Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque.», Thèse Doctorat, UNIVERSITE DE TOULOUSE, 2008.
- [9] S. Zainal, A. Jubaer and B.S. Merugu, "The Application of Soft Computing Methods for MPPT of PV System", A Technological and Status Review. Appl Energy, PP. 107-135, 2013.
- [10]A. Mellit and S.A. Kalogirou, "Artificial Intelligence Techniques for Photovoltaic Applications: A Review", In Prog. Energy Combust Sci. Vol. 34, PP. 574-632, 2008.
- [11]S.A Kalogirou, "Artificial Intelligence for the Modeling and Control of Combustion Processes: A Review", In Prog Energy Combust Sci. Vol. 29, PP. 515-566, 2003
- [12]R. Ramaprabha and B.L Mathur, "Genetic Algorithm Based Maximum Power Point Tracking for Partially Shaded Solar Photovoltaic Array", International Journal of Research and Reviews in Information Sciences (IJRRIS), Vol. 2, PP. 161-163, 2012.
- [13]D. Rafik,B. Nacer ."Modélisation et simulation d'une commande MPPT d'un système photovoltaïque" Mémoire demaster UniversitéAbderrahmane Mira de Bejaia2020/2021
- [14]S. Satpathy, "PHOTOVOLTAIC POWER CONTROL USING MPPT AND BOOST CONVERTER," May, 2012 2012.
- [15]M.Abdelhafid,M. Abdellah. "Contribution à la commande *MPPT* d'un système photovoltaïque" Mémoire demaster Université Tiaret2020-2021
- [16]B. Djamel et B. El-Abbes. Commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques en utilisant l'optimisation par essaim de particules. Mémoire de master, Université SAAD DAHLAB de BLIDA, Blida, 2013.
- [17]Wasynczuk, O., "Dynamic behaviour of a class of photovoltaic power systems", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-102, no. 9

- [18]W. T. Chee, T. C. Green, and A. H.-A. Carlos, “Analysis of perturb and observe maximum power point tracking algorithm for photovoltaic applications,” presented at the 2008 IEEE 2nd Int. Power and Energy Conf. (PECon 2008), Johor Bahru, Malaysia, 2008.
- [19]Femia, N., G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, “A technique for improving P&O MPPT performances of double-stage grid-connected photovoltaic systems”, IEEE Transactions on Industrial Electron., Vol. 56, No. 11, 2009, pp. 4473-4482, ISSN: 0278-0046, INSPEC Accession Number: 10916340, DOI: 10.1109/TIE.2009.2029589
- [20]Ishaque, K., & Salam, Z. (2013). A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 19, 475-488.
- [21]Karim KACED. Study of MPPT techniques for photovoltaic systems under partial shading conditions. PhD Thesis in Electronic. ENP 2018.

Résumé

ملخص: يركز البحث على تحسين التحكم الاقصى في نقطة الطاقة (*MPPT*) المطبق على الألواح الشمسية مع ايلاء اهتمام لادارة الظلال الجزئية. الهدف الرئيس من هذه الدراسة هو تحسين كفاءة الطاقة في الألواح الشمسية عن طريق تعديل استراتيجية التحكم *MPPT* لتعظيم انتاج الكهرباء، حتى في ظل الظروف التي تكون فيها اجزاء من اللوحة مظلمة. يساهم هذا العمل أيضا في زيادة وثوقية واداء الانظمة الكهروضوئية، من خلال السماح بالتكيف بشكل اكثر فعالية مع التغيرات في ضوء الشمس وضمانا للاستغلال الامثل للألواح الشمسية على الرغم من وجود التظليل الجزئي. سيتم اثبات صحة النهج النظري من خلال عمليات المحاكاة التي يتم اجراؤها باستخدام *Matlab/Simulink*.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الكهروضوئية، الألواح الشمسية، خوارزميات *MPPT/PSO*، التظليل الجزئي.

Abstract: The research focuses on the optimization of maximum power point (*MPPT*) control applied to solar panels, with particular attention given to the management of partial shading. The main objective of this study is to improve the energy efficiency of solar panels by adjusting the *MPPT* control strategy to maximize electricity production, even under conditions where portions of the panel are shaded. This work contributes to increasing the reliability and performance of photovoltaic system, by allowing more effective adaptation to variations in sunlight and by ensuring optimal exploitation of solar panels despite the presence of partial shading. The validity of the theoretical approach will be demonstrated through simulations carried out using the *Matlab/Simulink* tool.

Keywords: Photovoltaic energy, solar panels (*PV*), *MPPT/PSO* algorithms, partial shading.

Résumé: Dans le présent manuscrit, l'étude se penche sur l'optimisation du contrôle du Point de Puissance Maximale *MPPT* appliquée aux panneaux solaires, avec une attention particulière accordée à la gestion d'ombrage partiel. L'objectif principal de cette étude est d'améliorer l'efficacité énergétique des panneaux solaires en ajustant la stratégie de commande *MPPT* par *PSO* afin de maximiser la production d'électricité, même dans des conditions où des portions du panneau sont ombragées. Ce travail contribue à accroître la fiabilité et la performance des systèmes photovoltaïques, en permettant une adaptation plus efficace aux variations d'ensoleillement et en assurant une exploitation optimale des panneaux solaires malgré la présence d'ombrage partiel. La validité de l'approche théorique est démontrée par le biais de simulations réalisées à l'aide de l'outil *Matlab/Simulink*.

Mot clés: Energie photovoltaïque, Panneau solaire (*PV*), Algorithmes *PSO/MPPT*, ombrage partiel.