



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Projet de Fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Thème

Synthèse des méthodes de commande MPPT sous ombrage total et partiel

Préparé par :

DRIES Hania
LARBI Lylia
M'HAND SAID Zoubir

Dirigé par :

Dr. Slimane HADJI

Examiné par :

Dr. Souad IDJEDARENE
Pr. Ouahib GUENOUNOU

Dédicaces

Nous dédions ce travail à :

Nos parents, et le dévouement dont ils font preuve. A nos familles et chers amis(es), et à tous qui nous sont chers.

Hania, Lyliya, Zoubir

Remerciement

Avant tout, Nous rendons nos profondes gratitude à Dieu, le tout puissant de nous avoir donné la force et le courage de réalisé ce modeste travail.

Nous exprimons nos profondes gratitude à nos très chères parents pour leurs encouragements leurs soutiens et pour les sacrifices qu'ils ont enduré.

A la suite Nous tenons à remercier vivement Mr S. HADJI notre promoteur qui a fourni des efforts énormes, par ses informations leurs conseils et leur encouragement. Ainsi leur disponibilité et pour nous avoir leur qualités professionnelles qu'humaine.

Ainsi nous tenons à remercie les membres de jury d'avoir accepté de lire ce manuscrit et d'apporter les critiques nécessaires à la mise en forme de cet ouvrage.

Enfin, nos plus chaleureux remerciements pour tous nos ami(es), proches et à tous ceux qui nous ont aidés près ou de loin à la réalisation de ce projet fin d'études.

Sommaire

Dédicaces	2
Remerciement	3
Sommaire	1
Liste des abréviations	1
Liste de Figures	3
Liste des Tableaux.....	6
Introduction générale	7
CHAPITRE I : Généralités sur le photovoltaïque.....	10
I.1. Introduction.....	11
I.2. Energie solaire	11
I.2.1. Le soleil :	11
I.2.2. Rayonnement solaire.....	12
I.2.3. Potentiel solaire en Algérie.....	13
I.3. La cellule photovoltaïque.....	14
I.3.1. Description de la cellule photovoltaïque :	14
I.3.2. Technologie des cellules solaires :.....	16
I.3.3. Effet photovoltaïque	17
I.3.4. Rendement et facteur de forme d'une cellule PV	19
I.3.5. Association des cellules	20
I.4. Module photovoltaïque :	22
I.4.1. Caractéristiques d'un module photovoltaïque	22
I.4.2. Influence de la température et l'éclairement sur un module PV.....	23
I.5. Panneau photovoltaïque.....	25
I.5.1. Caractéristiques d'un panneau PV	25
I.5.2. Montage des panneaux photovoltaïque :	26

I.6. Système photovoltaïque :.....	27
I.6.1. Installations électriques photovoltaïques autonomes.....	27
I.6.2. Installations électriques photovoltaïques raccordées au réseau	28
I.7. Système de conversion.....	29
I.7.1. Convertisseur survolteur (Boost-converter) :	29
I.7.2. Convertisseur dévolteur (Buck-converter).....	30
I.7.3. Convertisseur dévolteur survolteur (Buck-Boost-converter).....	31
I.8. Ombrage des panneaux PV	32
I.8.1. Phénomène d’ombrage sur un module PV :	33
I.8.2. Influence de l’ombrage sur les performances des modules PV	35
I.8.3. Les effets d’ombrage sur la performance des panneaux solaires.....	36
I.8.4. Protection des modules PV en cas d’ombrage.....	37
I.9. Conclusion	39
CHAPITRE II : Poursuite du point de puissance maximale	40
II.1. INTRODUCTION	41
II.2. Commande MPPT	41
II.2.1. Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque	42
II.2.2. Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)	42
II.2.3. Techniques MPPT à algorithmes performants	43
II.3. Conclusion	60
CHAPITRE III : Simulation et résultats	61
III.1. Introduction	62
III.2. Simulation des parties du système photovoltaïque	62
III.2.1. Test sur un convertisseur DC/DC	62
III.2.2. Simulation du panneau photovoltaïque	63
III.3. Simulation du système PV avec la commande MPPT	66
III.3.1. Méthodes classiques.....	66

III.3.2. Méthodes évolués.....	73
III.4. Panneau photovoltaïque avec ombrage partiel.....	76
III.4.1. Choix du panneau et des conditions atmosphériques.....	76
III.4.2. Ombrage partiel du GPV avec la commande MPPT	78
III.4.3. Commande PO sous l'ombrage partiel	79
III.4.4. Ombrage partiel avec la commande INC	80
III.4.5. Ombrage partiel avec la commande PSO.....	82
III.5. Conclusion.....	85
Conclusion générale	86
Conclusion générale	87
Bibliographie.....	89

Liste des abréviations

AM1.5	Soleil à 48°, 833 w/m ²
AsGa	L'arséniure de gallium
C	La vitesse de la lumière
CS	Convertisseur statique
DC-DC	convertisseurs continu/continu
E	éclairage (W/m ²)
GPV	Générateur photovoltaïque, Générateur photovoltaïque
h	La constante de Planck (Joule. Seconde(J.S))
IC	L'incrémental de Conductance
I _{cc}	Courant court-circuit, Courant court-circuit
I _{mpp}	Courant optimal
I _{ph}	Photo courant
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking
N	Négatif
P	positif
P&O	Perturb&Observe
P _m	Puissance maximale mesurée dans les conditions STC (Standard Test Conditions),
P _{max}	puissance maximale
PSO	Particle Swarm Optimization
PV	Panneau photovoltaïque
PWM	pulse width modulation
R _s	Résistance série
R _{sh}	Résistance shunt
S	Stable
S	Surface active des panneaux (m ²)
Si	silicium
V _{co}	La tension de circuit ouvert
V _{mpp}	Tension optimale

Z Zéro

λ La longueur d'onde

Liste de Figures

Figure I.1. Spectre d'irradiante solaire	13
Figure I.2 : Potentiel solaire en Algérie	14
Figure I.3 : Description de la cellule photovoltaïque	15
Figure I.4: Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque	16
Figure I.5 : Schéma d'une cellule photovoltaïque	17
Figure I.6 : L'effet photovoltaïque.....	18
Figure I.7 : Caractéristique d'une cellule et une cellule en série.	21
Figure I.8: Caractéristique d'une cellule et une cellule en parallèle	21
Figure I.9 : Caractéristique d'un générateur et générateur idéale.	22
Figure I.10 : Courbe courant- tension (I-V) et puissance- tension (P-V).....	23
Figure I.11: Caractéristique I (V) d'un module pour différentes valeurs de température.	23
Figure I.12 : Caractéristique P(V) d'un module pour différentes valeurs de température.	24
Figure I.13 : Caractéristique I (V) d'un module pour différentes valeurs de l'éclairement.	24
Figure I.14 : Caractéristique P(V) d'un module pour différentes valeurs de l'éclairement.....	25
Figure I.15 : Branchement en série des panneaux.....	26
Figure I.16: Branchement en parallèle des panneaux.	27
Figure I.17: Schéma d'un système photovoltaïque	27
Figure I.18 : Système photovoltaïque autonome [3]	28
Figure I.19: Système photovoltaïque raccordé au réseau [3]	29
Figure I.20 : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost	30
Figure I.21: Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck	31
Figure I.22 : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck –boost [9].....	32
Figure I.23 : GPV dans des contritions partiellement ombragées causées par l'ombre d'un arbre.	33
Figure I.24 : Schéma Simulink de la cellule PV	34
Figure I.25 : Caractéristique I –V d'une cellule PV dans toute sa gamme de tension.....	35
Figure I.26 : Principe de construction de la caractéristique d'un module PV pour un courant donné.....	35
Figure I.27 : Utilisation de la diode by-pass	37

Figure I.28 : Caractéristique du panneau PV dans le cas de l’ombrage partiel	38
Figure I.29 : Rôle de la diode anti-retour	39
Figure II.1 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec CS contrôlé par une commande MPPT sur charge DC. [14].....	43
Figure II.2 : Principe de la méthode P&O.....	44
Figure II.3 : Algorithme d’une commande MPPT basée sur la méthode perturber et observer.....	45
Figure II.4 : Problème de la variation rapide de l'ensoleillement dans la méthode P&O .	46
Figure II.5 : Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de $dPPV/dVPV$ sur la caractéristique de puissance (a) et de la valeur de $\Delta IPV/\Delta VPV$ sur la caractéristique de courant (b).....	48
Figure II.6 : Algorithme d’une commande MPPT basée sur la méthode Incrément de Conductance.....	50
Figure II.7 : Fonctionnement d’une commande MPPT de type Inc-Cond illustré sur une chaîne élémentaire de conversion PV.	51
Figure II.8 : Structure de base d’un contrôleur MPPT flou	52
Figure II.9 : Représentation des fonctions d'appartenance ; (a) : l’erreur, (b) : variation de l’erreur, (c) : variation du rapport cyclique.....	54
Figure II.10 : règles d’inférence.....	55
Figure II.11 : Volée d'Anser en formation en V.....	56
Figure II.12 : Stratégie de déplacement d’une particule [23].....	57
Figure II.13 : Organigramme de la MPPT par PSO.....	59
Figure III.1 : Schéma d'un BOOST sous MATLAB/SIMULINK.	62
Figure III.2 : Courbes de la tension d'entrée et de sortie d'un BOOST.....	63
Figure III.3 : Schéma de simulation d'un panneau PV étudié.	64
Figure III.4 : Paramètre de cellule PV.	64
Figure III.5 : Caractéristiques du I-V et P-V du panneau utilisé.	65
Figure III.6 : Modélisation d’un SPV sous MATLAB\SIMULINK.....	66
Figure III.7 : Schéma de simulation d'un panneau PV avec la méthode PO.....	67
Figure III.8 : Courbe du courant du GPV	67
Figure III.9 : Courbe de tension aux bornes du GPV	68
Figure III.10 : Courbe de puissance du GPV	68
Figure III.11 : Signal de commande PWM	68
Figure III.12 : Courbe de tension de sortie	69

Figure III.13 : Schéma de simulation d'un panneau PV avec la méthode INC..... 70

Figure III.14 : Courbe de la tension, courant et puissance aux bornes du GPV 71

Figure III.15 : Courbe de tension de sortie et du signal PWM. 72

Figure III.16 : Schéma de simulation d'un panneau PV avec la méthode logique floue... 73

Figure III.17 : Courbe de puissance aux bornes du GPV 74

Figure III.18 : Schéma de simulation de la méthode PSO 75

Figure III.19 : Courbe du courant, tension et puissance et rapport cyclique aux bornes du GPV..... 76

Figure III.20 : Courbe du courant du panneau avec l'ombrage partiel..... 77

Figure III.21 : Courbe de la puissance du panneau avec l'ombrage partiel..... 77

Figure III.22 : Schéma de simulation d'un panneau PV avec l'ombrage partiel. 78

Figure III.23 : Schéma SIMULINK du système étudié 78

Figure III.24 : Schéma SIMULINK de l'algorithme PO sous ombrage partiel 79

Figure III.25 : Courbe de puissance d'entrée du panneau avec l'ombrage partiel. 79

Figure III.26 : Courbe de puissance de sortie du panneau avec l'ombrage partiel..... 80

Figure III.27 : Courbe de puissance de sortie du panneau avec l'ombrage partiel..... 81

Figure III.28 : Schéma SIMULINK de l'algorithme PSO sous ombrage partiel..... 82

Figure III.29 : Courbes de puissance de sortie du panneau avec l'ombrage partiel avec PSO (a,b,c,d,e) 85

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie [2] 14
Tableau II.1 : Méthode P&O [16] 44
Tableau II.2 : Matrice d'inférence 54

Introduction générale

L'exploitation directe de l'énergie solaire au moyen de capteurs relève de deux technologies bien distinctes : l'une produit des calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre produit de l'électricité, et c'est cette dernière, énergie solaire photovoltaïque, qui fait l'objet de ce mémoire.

La consommation énergétique mondiale est principalement couverte par les énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel et nucléaire), qui ont un effet négatif sur l'environnement.

La demande sur l'énergie électrique ne cesse d'augmenter ces dernières années ainsi les contraintes liées à sa production, tels que l'effet de pollution et de réchauffement climatique global, conduisent les recherches vers le développement des sources d'énergie renouvelable telle que les énergies photovoltaïques (PV), thermiques, hydraulique ...etc. Ces énergies propres et durables sont considérées comme une alternative à l'énergie fossile.

L'énergie solaire photovoltaïque est considéré parmi les énergies renouvelables qui possèdent le plus large potentiel de développement surtout en Algérie, cette source d'énergie a un grand avantage elle est inépuisable, propre et elle offre une grande sécurité d'utilisation. Cependant, le coût élevé de l'installation la faible efficacité dans la conversion d'énergie limitent l'utilisation des systèmes PV.

Les panneaux solaire, tant dis qu'ils soient de plus en plus performants, ont des taux de rendements qui restent aussi faible (en environ de 20%), c'est pour cela qu'il faut profiter du maximum de puissance qu'ils peuvent générer en réduisant au maximum les pertes d'énergies ;

Pour cela, l'optimisation et la réalisation des systèmes photovoltaïques sont des problèmes d'actualité puisqu'ils conduisent sûrement à une meilleure exploitation de l'énergie solaire. Pour une installation photovoltaïque, la variations de 50% de l'éclairement ou de la charge induit une dégradation de la puissance fournie par le générateur PV de l'ordre de 50% ; de plus le générateur PV ne fonctionne plus dans les conditions optimum.

L'utilisation de cette énergie renouvelable nécessite la combinaison des moyens de commande et de gestion de la puissance ou chaque panneau PV devrait fonctionner en un point maximale, surnommé le point de puissance maximale (PPM), défini par une tension et

un courant max données ; ce point se déplace en fonction des conditions météorologiques (ensoleillement, température, etc.)Ainsi que des variations de la charge.

Pour extraire le maximum de Puissance d'un ensembles de panneaux PV, un contrôleur électronique ou bien un étage d'adaptation est incorporé entre le générateur PV et la charge ,Dont le rôle principal est la surveillance en continu et a chaque instant du point de puissance maximale du générateur PV appelé communément MPPT(Maximum Power Point Tracking)et cela en général par action sur un dispositif de conversion DC-DC.

Les techniques de régulations et de contrôle assurent la fonction d'adaptation d'impédance, en transférant à la charge la puissance électrique maximale issue du panneau PV quelles que soient les conditions de températures et d'ensoleillement .

La comparaison des systèmes avec et sans dispositifs poursuivant le point de puissance maximale montre que les unités avec un MPPT produisent 80 à 90% de leur puissance maximale théorique, tend que les unités sans MPPT fonctionnent seulement à30% de leur rendement de puissance maximale.

Il est bien connu que la puissance électrique générée par un module photovoltaïque peut être fortement diminuée par rapport aux conditions optimales de productions (point maximum de puissance)

Pour des conditions météorologique données par de nombreux facteurs, tels qu'ombrage, mauvais fonctionnement du MPPT, déséquilibres, un module photovoltaïque PV consiste en association série ou parallèle de plusieurs cellules PV .ainsi ,si toutes les cellules sont identiques ,la courbe I-V résultante sera aisément déterminé en sommant les tensions de chaque cellule .

Sous des conditions réelles de fonctionnement, si les cellules PV sont légèrement différentes les unes des autres ou si elles ne sont pas uniformément éclairées, la courbe I-V résultante n'est pas facilement calculable et dépend alors d'une combinaison complexe du comportement individuel de chaque cellule. Plusieurs articles présentent des modèles mathématiques permettant de calculer l'effet de cellules non identiques ou non soumises aux mêmes conditions au sein d'un module.

Ombrager une partie d'un module PV a de dramatiques conséquences sur sa courbe puissance –tension (P- V) et ce, même si un très faible partie du module ou de la cellule est à l'ombre, une diminution importantes de puissance produite de la puissance produite en est alors la conséquence .cet ombrage partiel peut être du à des cheminées, à des arbres ou à d'autres parties de constructions.

Dans ce mémoire, l'étude de l'effet d'ombrage sur des modules PV connectés en plusieurs façon en utilisant les méthodes de MPPT tels que P&O, IC, FL, PSO seront détaillées. L'effet de ce phénomène sera et son affection sur le rendement des GPVs sera aussi mise en évidence par une simulation sous MATLAB/SIMULINK.

Le premier chapitre sera consacré les généralités de l'énergie photovoltaïque, avec une explication brève de différentes composantes d'un système photovoltaïque : modules photovoltaïque et cellules photovoltaïque ...etc.

Dans le deuxième chapitre nous présentons le principe de la commande MPPT et poursuite de point maximale, ainsi on explique les différentes méthodes d'MPPT.

Dans le troisième chapitre nous nous consacrons à l'implémentation de l'effet de l'ombrage dans l'environnement Simulink.

Nous terminons notre mémoire par une simulation des différentes méthodes de MPPT sous ombrage partiel et totale avec les résultats de simulations.

CHAPITRE I : Généralités sur le photovoltaïque

I.1. Introduction

La transformation de l'énergie solaire en énergie électrique est réalisée à travers les modules et les panneaux photovoltaïques composés de semi-conducteurs.

Ces modules sont une source d'énergie électrique non polluante et s'inscrit dans le principe de développement durable, les panneaux ont en parallèle une garantie de rendement qui assure une certaine production par rapport à leur rendement initiale, en générale, au bout de 25 ans, les garanties promettent une valeur de production autour de 80 %.

En ce premier chapitre on commence par définir le principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique reposant sur l'effet photovoltaïque des semi-conducteurs, puis notre étude portera sur la modélisation de différentes parties caractérisant un système photovoltaïque.

On débutera par les principaux éléments constituant un module et un panneau PV en définissant leur caractéristique courant- tension et puissance- tension pour des variations de températures ou d'ensoleillement d'un module et panneau PV. Ensuite, il sera suivi par une présentation des différents systèmes photovoltaïques en présentant le système de conversion (convertisseurs DC-DC).

I.2. Energie solaire

I.2.1. Le soleil :

Le Soleil est une étoile très ancienne, âgée de 4,6 milliards d'années est la principale source de lumière et de chaleur du système solaire. Cette énergie solaire est transmise par rayonnements et permet certaines conditions de vie permet donc la vie sur la Terre ! Mais cette source d'énergie est également responsable des climats et des phénomènes météorologiques. Les rayonnements ultraviolets solaires sont des ondes électromagnétiques (compris entre la lumière visible et celles des rayons X).

Un rayonnement ultraviolet est composé de plusieurs rayons. Certains peuvent être filtrés et/ou arrêtés soit par l'atmosphère terrestre soit par les nuages. Ceux qui nous parviennent sont appelés radiations solaires directes. Cependant, d'autres radiations sont réfléchies et restent en suspension dans l'atmosphère formant ainsi la radiation diffusée du ciel par beau ou mauvais temps. La distance de la terre au soleil est environ 150 million de

kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h, les rayons du soleil mettent donc environ 8minutes à nous parvenir.[1]

I.2.2. Rayonnement solaire

La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1360W/m². Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduit à 1000 W/ m² à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein à découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons.

L'énergie d'un photon étant donnée par la relation :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (I.1)$$

h : la constante de Planck, (Joule. Seconde(J.S))

C : la vitesse de la lumière, (m/S)

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande.

Une façon commode d'exprimer cette énergie est :

$$E = \frac{1.26}{\lambda} \quad (I.2)$$

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique Figure I.1 compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns (μm). L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

9% dans la bande des ultraviolets (<0,4 μm),

47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm),

44% dans la bande des infrarouges (>0,8 μm).

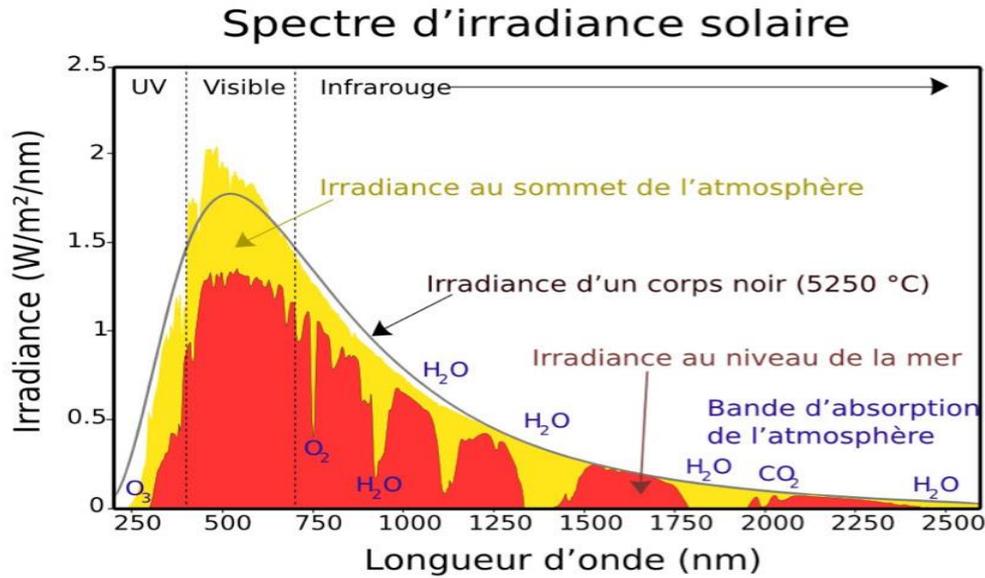


Figure I.1. Spectre d'irradiante solaire

I.2.3. Potentiel solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de $1m^2$ est de l'ordre de 5KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700KWh/m^2/an$ au nord et $2263kwh/m^2/an$ au sud du pays. Au Sahara, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable s'il est exploité de manière économique. Le tableau suivant indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie.[2]

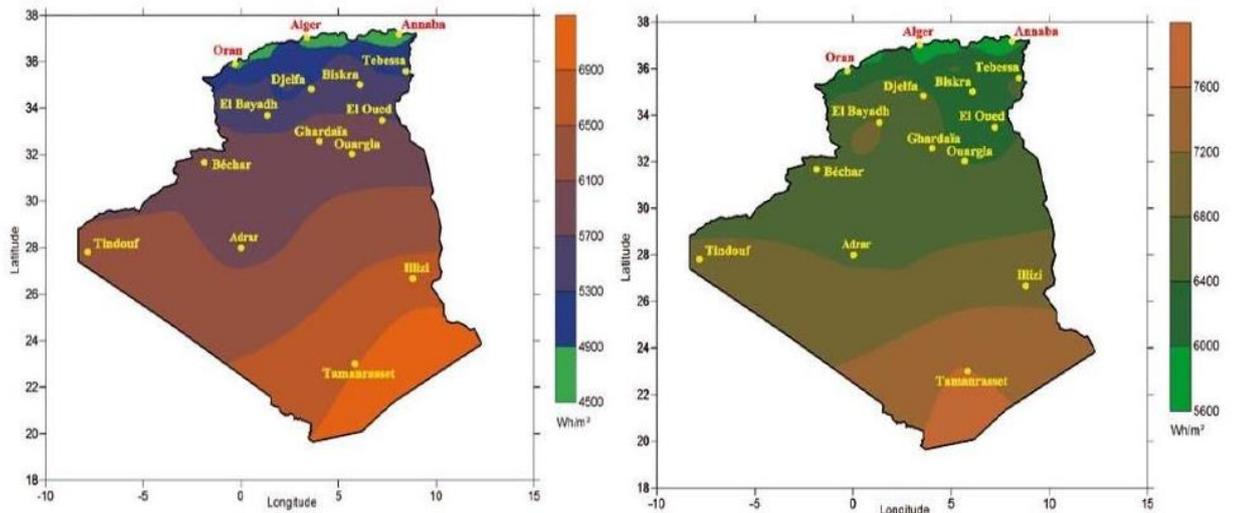


Figure I.2: Potentiel solaire en Algérie

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4 %	10 %	86 %
Durée moyenne d'ensoleillement (heures = an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kwh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau I.1 : Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie [2]

I.3. La cellule photovoltaïque

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés", c'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs.

I.3.1. Description de la cellule photovoltaïque :

En électronique, une cellule photoélectrique est un dispositif électrique qui convertit l'énergie incidente du rayonnement solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques sont les composants de base des modules photovoltaïques capables

de générer de l'énergie électrique à partir du rayonnement solaire, donc c'est l'élément de base essentiel pour ce type d'énergie solaire, la cellule solaire photovoltaïque la plus courante est une feuille de silicium cristallin d'une épaisseur d'environ 0,3 mm, lorsqu'elle est exposée à une lumière directe de 1 soleil, une cellule de 6 centimètres de diamètre peut produire un courant de 0,5 ampère à 0,5 volt. La Figure I.3 illustre le principe de fonctionnement d'une cellule.

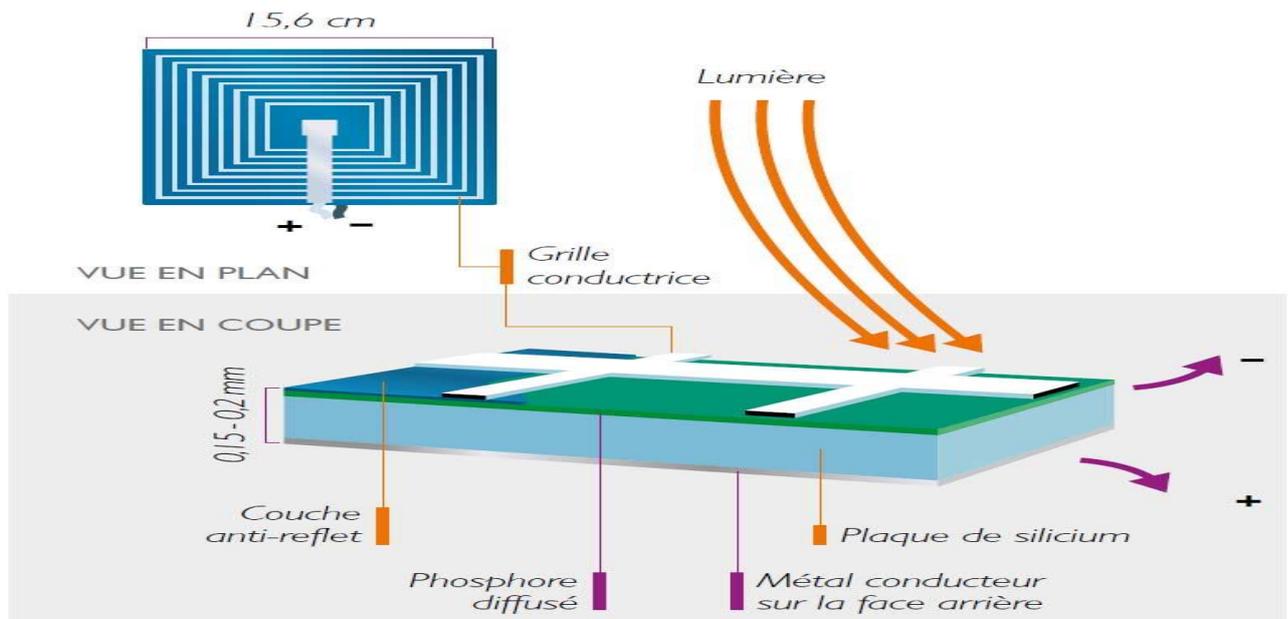


Figure I.3 : Description de la cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques ou les plaques solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », a été découverte par E. Becquerel en 1839.

Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

La taille de chaque cellule va de quelques centimètres carrés jusqu'à 100 cm² ou plus sa forme est circulaire, carrée ou dérivée des deux géométries.

Les cellules se branchent en série, ce qui permet aux électrons générés par une cellule d'être repris par la suivante. Le but est d'avoir une différence de potentiel normalement entre 6 et 24V. La Figure I.4 suivante représente le schéma électrique d'une cellule photovoltaïque :

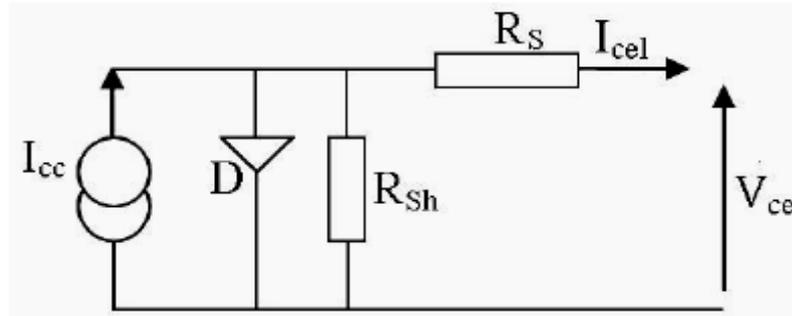


Figure I.4: Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

Les résistances R_s et R_{sh} permettent de tenir en compte des pertes liées aux défauts de fabrication. R_s représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que R_{sh} caractérise les courants de fuite dus à diode et aux effets de bord de la jonction.[1]

I.3.2. Technologie des cellules solaires :

On peut les classer comme suite :

- Les cellules mono-cristallines: caractérisées par :

La première génération de photopiles ;

Un taux de rendement excellent (12-16%) (23% en Laboratoire) ;

Une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère ;

Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur. ;

- Les cellules poly-cristallines : caractérisées par :

Coût de production moins élevé ;

Procédé nécessitant moins d'énergie ;

Rendement 11-13% (18% en Labo) ;

- Les cellules amorphes (cellules de calculatrices par exemple) : caractérisées par :

Coût de production bien plus bas ;

Rendement plus bas : 8-10% (13% en labo) ;

Durée de vie plus faible ;

C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les produits de consommation comme les calculatrices, les montres etc. Toutefois, ils réagissent mieux à des températures élevées ou à une lumière diffuse. De plus, les cellules mono et poly-cristallines sont les types de cellules les plus répandues sur le marché du photovoltaïque (environ 60% de la production).

- Les cellules nanocristallines : caractérisées par :

Une des dernières générations de photopiles ;

Fonctionnent selon un principe qui différencie les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques ;

Rendement global de 10,4 %, confirmé par des mesures au laboratoire ;

Procédé et coût de production encore plus bas.[1]

I.3.3. Effet photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule. La Figure I.5 illustre une cellule PV typique où sa constitution est détaillée. Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12% avec du silicium poly cristallin et enfin 7 à 8 % pour le silicium amorphe en films minces. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque.[1]

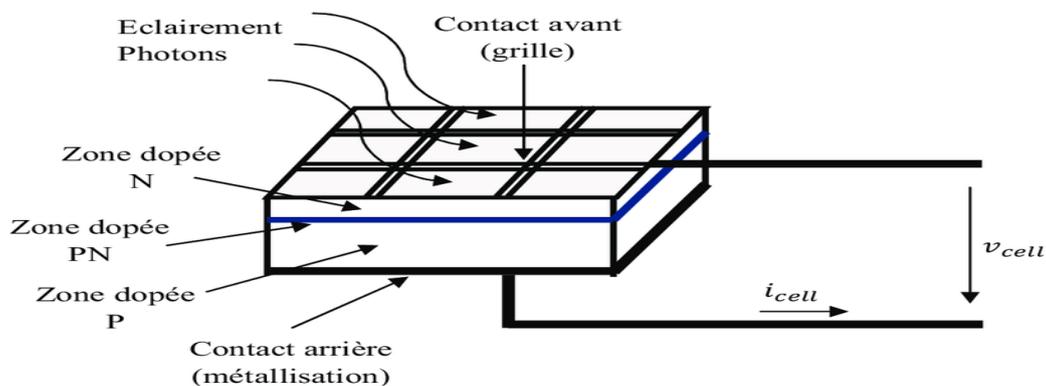


Figure I.5 : Schéma d'une cellule photovoltaïque

La clé pour produire un courant électrique utile est d'arriver à extraire les électrons libérés, un procédé pour faire cela est d'introduire dans le matériau semi-conducteur le silicium des éléments chimiques qui contribuent à produire un excès d'électrons et de trous. Ces éléments, qui altèrent notablement les propriétés intrinsèques du semi-conducteur, s'appellent les dopants et le matériau est dit dopé lorsque le processus d'incorporation au semi-conducteur est achevé, le dopant approprié pour le silicium est le bore et la structure créée s'appelle un semi-conducteur de type P (positif). Et un autre dopant possible pour le silicium est le phosphore, et le semi-conducteur créé est de type N (négatif). Le fait d'avoir associé ces deux types de matériaux pour créer une jonction permet de pouvoir récupérer les charges avant que ces dernières ne se soient recombinées dans le matériau qui redevient alors neutre. Cette présence de la jonction PN au centre de l'effet d'un champ électromagnétique permet ainsi de maintenir une circulation de courant lors l'exposition au rayons solaire, les photons de la lumière incidente communiquent de l'énergie aux électrons du semi-conducteur, quelques électrons peuvent traverser la barrière de potentiel, en étant expulsés hors du semi-conducteur dans un circuit extérieur, électrons, après avoir parcouru ce circuit, retournent dans le semi-conducteur par la face opposée. Ceci génère un courant électrique.[3]

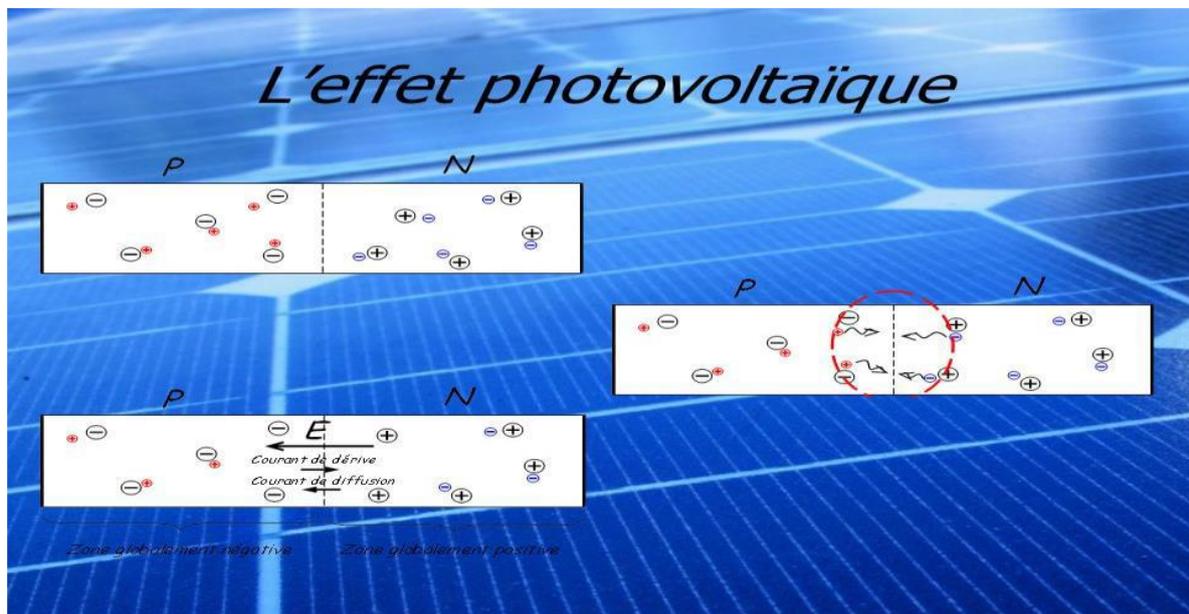


Figure I.6 : L'effet photovoltaïque

I.3.4. Rendement et facteur de forme d'une cellule PV

On définit le rendement énergétique d'une cellule par le rapport entre la puissance maximum et la puissance incidente :

$$\eta = \frac{P_m}{E.S} \quad (I.3)$$

Avec : E : éclairement (W/m²)

S : surface active des panneaux (m²)

P_m est la puissance maximum mesurée dans les conditions STC (Standard Test Conditions), c'est-à-dire sous un spectre AM1.5, une température de 25°C, et un éclairement de 1000 W/m².

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est dans le cas général assez faible, de l'ordre de 10 à 20%. Des rendements plus importants ont été obtenus à l'aide de nouveaux matériaux (en laboratoire, l'arséniure de gallium AsGa donne des rendements supérieurs à 25%) ou de techniques expérimentales (technologies multicouches), souvent difficiles et coûteuses à mettre en œuvre.

Cependant, le matériau photovoltaïque le plus utilisé est le silicium, qui représente une solution économique. Pour de telles cellules, le rendement énergétique ne dépasse pas les 15%.

D'après les caractéristiques courant-tension et puissance-tension, on peut déduire d'autres paramètres :

- Le courant de court-circuit I_{cc}, soit le courant débité par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle. En pratique ce courant est très proche de la photo courant I_{ph}.
- La tension de circuit ouvert V_{co}, soit la tension qui apparaît aux bornes de la cellule quand le courant débité est nul.
- Entre ces deux extrêmes, il existe un optimum donnant la plus grande puissance P_{max} ou MPP (Maximum Power Point).
- Le facteur de forme qui indique le degré d'idéalité de la caractéristique, soit le rapport :

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (I.4)$$

Il représente la mesure de la qualité de la cellule solaire. Sa valeur pour une cellule solaire est entre 0.7 et 0.8.

I.3.5. Association des cellules

Dans les conditions standardisées de test, la puissance maximale pour une cellule Si (silicium) de 100 cm² (10 sur 10) tourne aux alentours de 1,25 Watt. Cette cellule constitue donc un générateur de très faible puissance, insuffisant pour les applications électriques courantes. Les modules sont donc réalisés par association, en série et/ou en parallèle, de cellules élémentaires. La connexion en série augmente la tension pour un même courant alors que la connexion en parallèle augmente le courant pour une tension identique. Pour que l'électricité générée soit utilisable pour nos applications électriques, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules.

Les modules (généralement présentés sous forme de panneaux) sont constitués d'un certain nombre de cellules élémentaires placées en série afin de rendre la tension à la sortie utilisable.

Ces modules sont ensuite associés en réseau (série-parallèle) de façon à obtenir les tensions/courants désirés.

I.3.5.1. Association en série

Par association en série (appelée "String"), les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules.

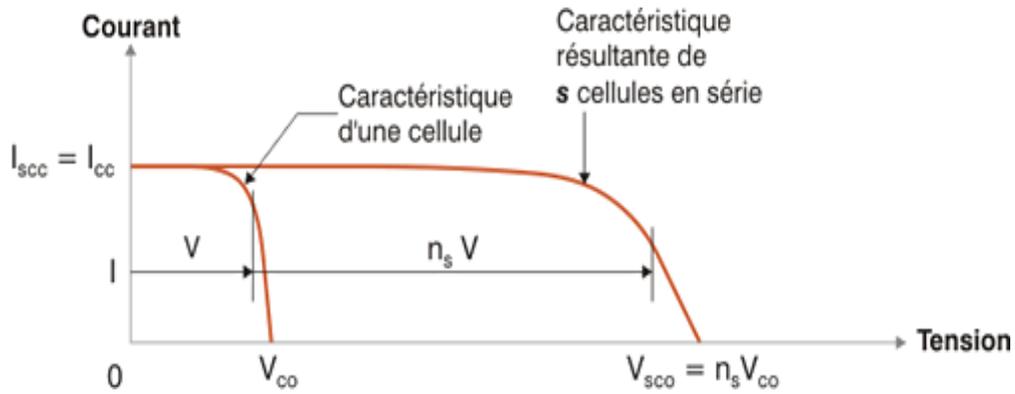


Figure I.7 : Caractéristique d'une cellule et une cellule en série.

I.3.5.2. Association en parallèle

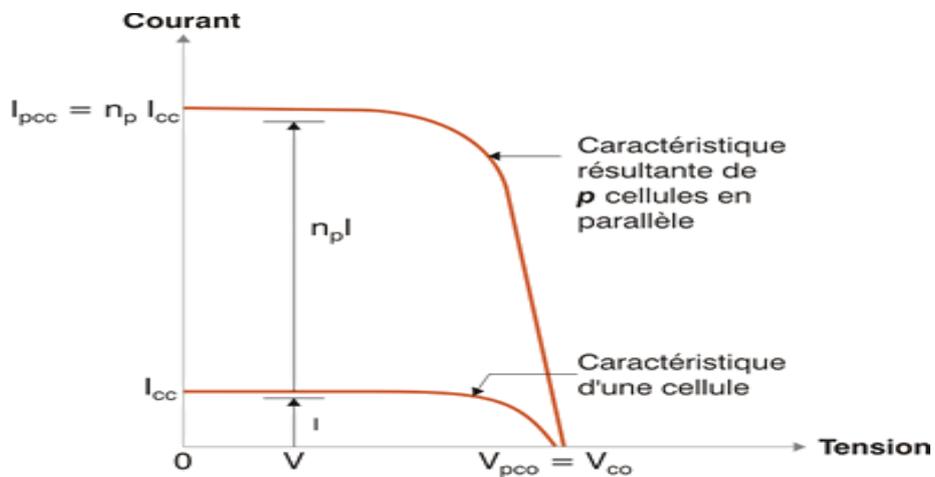


Figure I.8: Caractéristique d'une cellule et une cellule en parallèle

Par association en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules. Les caractéristiques globales d'une installation se déduisent donc d'une combinaison des caractéristiques des constituants des $n_s \cdot n_p$. [4]

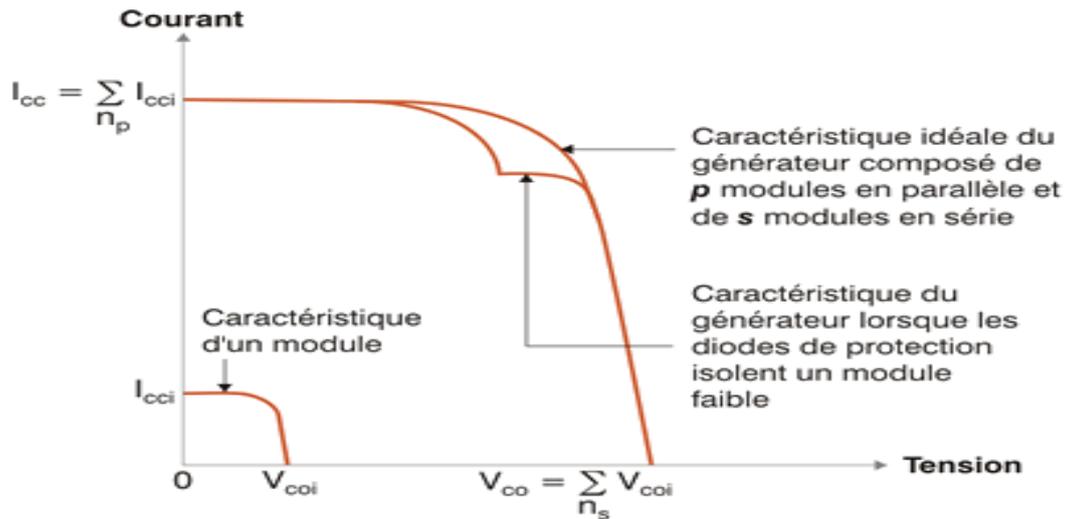


Figure I.9 : Caractéristique d'un générateur et générateur idéale.

I.4. Module photovoltaïque :

Les modules sont composés de plusieurs cellules photovoltaïques connectées en série ou en parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire. Les cellules connectées en série augmentent la tension et les cellules connectées en parallèles augmentent le courant. Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module photovoltaïque.

I.4.1. Caractéristiques d'un module photovoltaïque

Sous un éclairement donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) et puissance- tension (P-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe:

- Sa tension à vide : V_{co} . Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Son courant court-circuit: I_{cc} . Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Son point de puissance maximal: MPP (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimaux : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{mpp} , I_{mpp}).

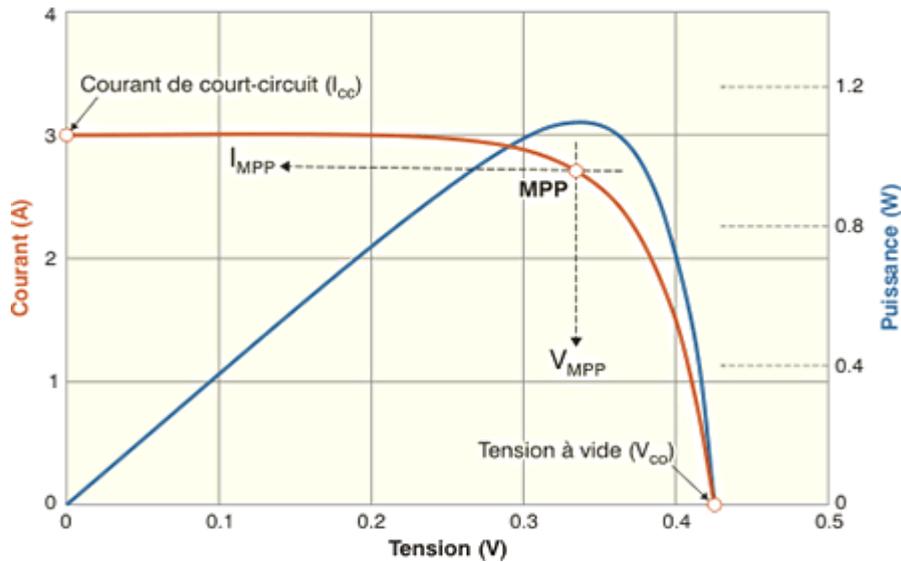


Figure I.10 : Courbe courant- tension (I-V) et puissance- tension (P-V).

I.4.2. Influence de la température et l'éclairement sur un module PV

➤ Influence de la température :

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules PV. Les figures ci-dessous décrivent le comportement du module sous un éclairement fixe de $1\text{W}/\text{m}^2$, et à des températures comprises entre 0°C et 75°C . Nous remarquons que le courant augmente avec la température; par contre la tension de circuit ouvert diminue. Ceci entraîne une diminution de la puissance maximale disponible.

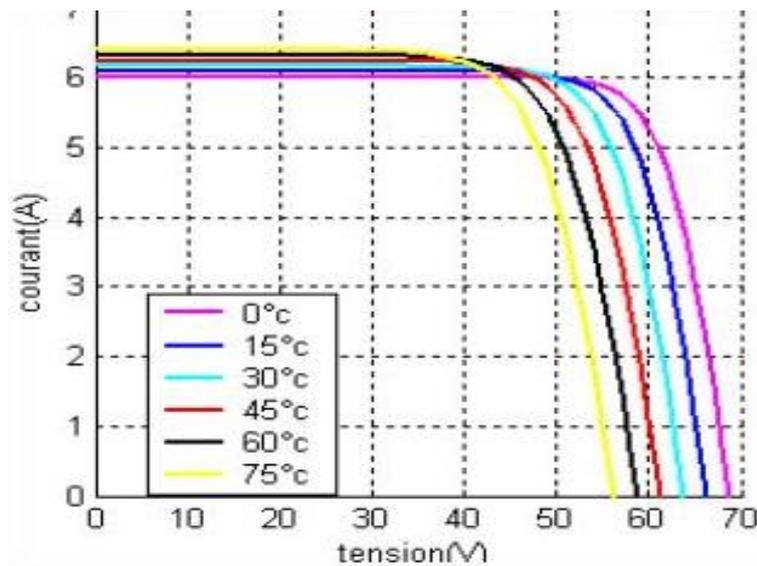


Figure I.11: Caractéristique I (V) d'un module pour différentes valeurs de température.

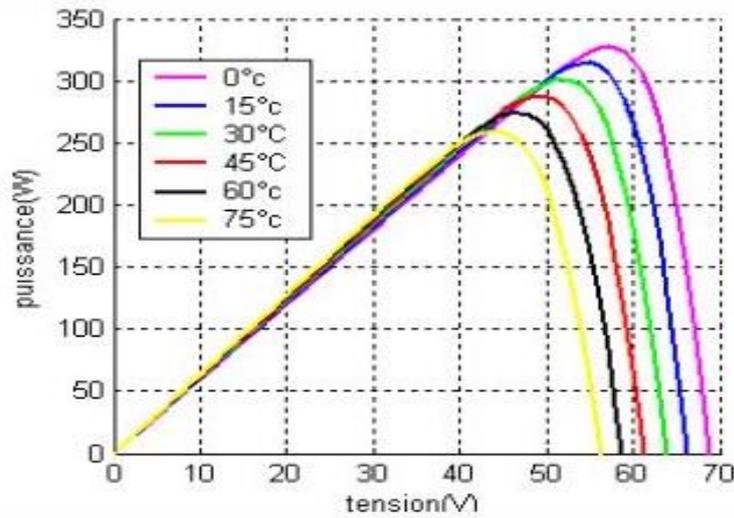


Figure I.12 : Caractéristique P(V) d'un module pour différentes valeurs de température.

➤ Influence de l'éclairement :

Dans la Figure I.13 et la Figure I.14, nous représentons les résultats concernant les caractéristiques I(V) et P(V) du panneau à 25° obtenus pour diverses valeurs de l'éclairement

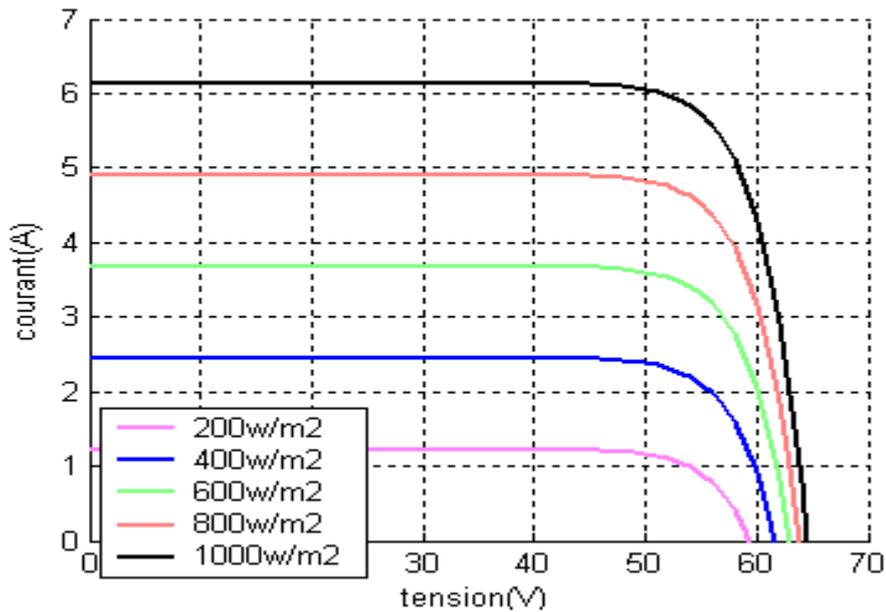


Figure I.13 :Caractéristique I (V) d'un module pour différentes valeurs de l'éclairement.

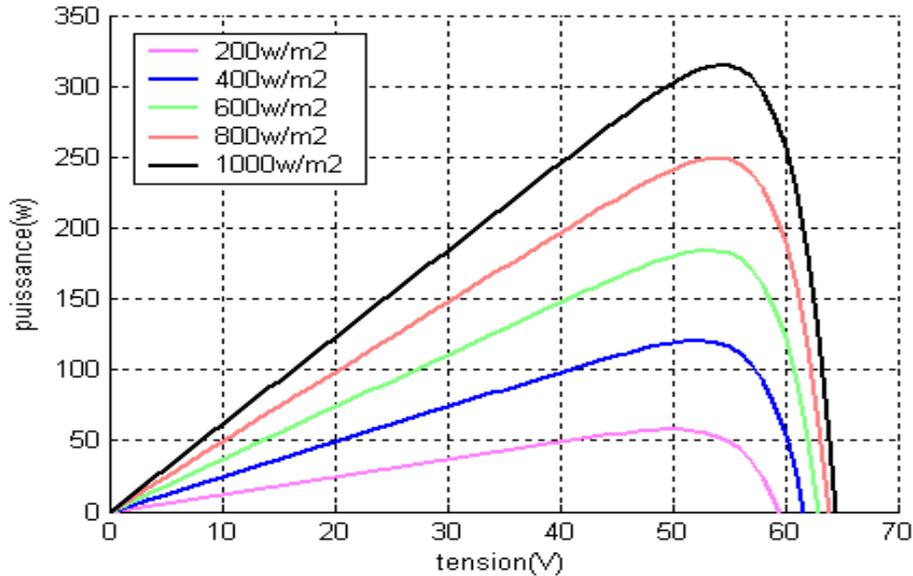


Figure I.14: Caractéristique P(V) d'un module pour différentes valeurs de l'éclairement

Pour chacune de différentes caractéristiques, correspond une puissance que pourrait fournir le panneau. Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert suite à la diminution du flux lumineux. Aussi nous remarquons que le courant est directement proportionnel à l'irradiation à ces niveaux d'éclairement.[4]

I.5. Panneau photovoltaïque

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce qui fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui les regroupe, Alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie.

I.5.1. Caractéristiques d'un panneau PV

La principale caractéristique technique d'un panneau solaire photovoltaïque est sa puissance de production, exprimée en kilowatts-crête (kWc). La puissance d'un **panneau photovoltaïque** (en kW, kilowatts) mesure sa capacité de production d'électricité. C'est une caractéristique technique qui ne dépend que du panneau en lui-même, et pas de l'endroit où il est posé. La puissance est donc déterminée par le matériau qui constitue le **panneau solaire** et par sa surface. Les installations les plus courantes font donc de 1,5 à 3 kW, c'est-à-dire de 15 à 30 m² de panneaux.[5].

I.5.2. Montage des panneaux photovoltaïque :

I.5.2.1. Montage de panneaux photovoltaïques en série :

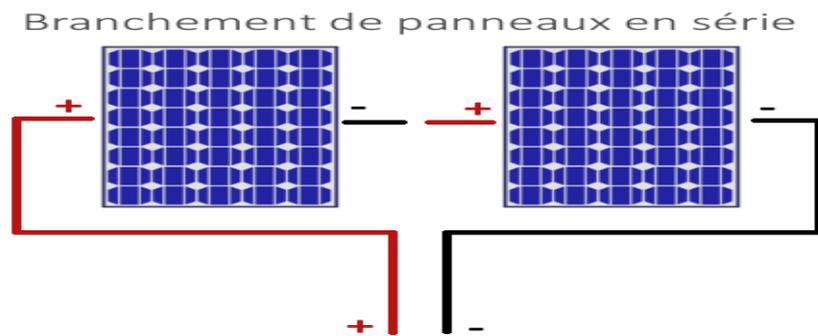


Figure I.15 : Branchement en série des panneaux.

Pour une installation sur mesure on opte pour un raccordement des panneaux en série ou en parallèle, voire une combinaison des deux. Le montage de panneaux photovoltaïques en série est l'option à retenir lorsque l'on souhaite additionner les voltages de chaque panneau en préservant un ampérage identique. On relie les pôles positifs d'un panneau aux pôles négatifs d'un autre panneau. Ce type de branchement s'effectue avec des panneaux de même ampérage. En effet si l'on relie deux panneaux d'ampérage différent, l'ensemble s'aligne sur l'ampérage le plus faible.

I.5.2.2. Montage de panneaux photovoltaïques en parallèle

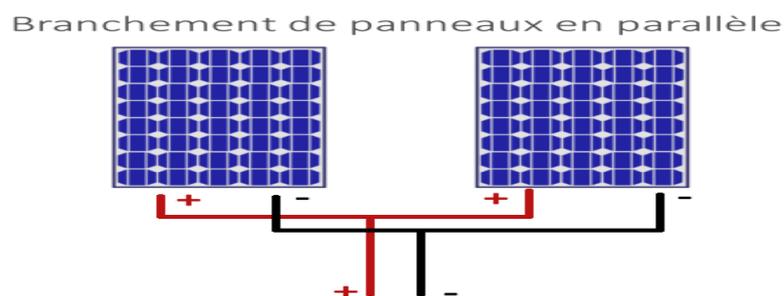


Figure I.16: Branchement en parallèle des panneaux.

Le montage des panneaux photovoltaïques en parallèle additionne les intensités tandis que la tension reste identique. Ce type de raccordement influe donc sur l'ampérage et non sur le voltage. Les bornes positives de chaque panneau sont reliées entre elles, de même que les bornes négatives. On choisit ce type de branchement lorsque l'on souhaite une forte intensité. Afin d'éviter les risques de surtension et de court-circuit, on relie entre eux des panneaux de même voltage. On peut par contre utiliser des panneaux d'intensité différente afin d'atteindre l'ampérage désiré.

Nous vous présentons ces deux types de raccordement à titre informatif mais lors d'une installation ce sont bien-sûr les techniciens qui arbitrent sur la solution à mettre en œuvre. S'il y a une chose à en retenir c'est que chaque installation peut répondre à des besoins électriques totalement sur mesure.[6]

I.6. Système photovoltaïque :

Il existe une grande variété d'application de l'énergie solaire photovoltaïque. Tout d'abord, il faut distinguer les applications dans le système isolés et des applications photovoltaïques raccordées au réseau électrique, voici la figure suivante qui représente un système photovoltaïque.[3]

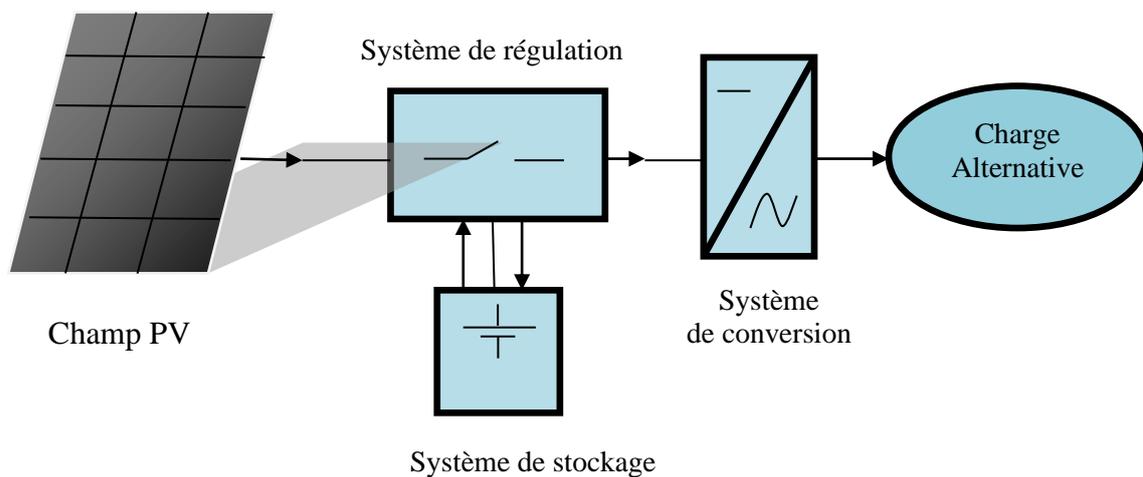


Figure I.17: Schéma d'un système photovoltaïque

I.6.1. Installations électriques photovoltaïques autonomes

Les installations photovoltaïques autonomes sont les installations isolées du réseau électrique. Toute l'énergie électrique générée par les panneaux solaires est consommée directement.

Ces installations sont utilisées principalement dans les endroits où il n'y a pas d'accès au réseau électrique et il est moins coûteux d'installer un système photovoltaïque que de tracer une ligne entre le réseau et le point de consommation. L'électricité produite est utilisée pour l'autoconsommation.

En plus des éléments communs des installations solaires photovoltaïques, il existe un certain nombre d'éléments qui sont complètement nécessaires au fonctionnement de ce type d'installations:

- Les accumulateurs d'énergie électrique.
- Les régulateurs de charge.
- Onduleurs DC à courant alternatif.[7]

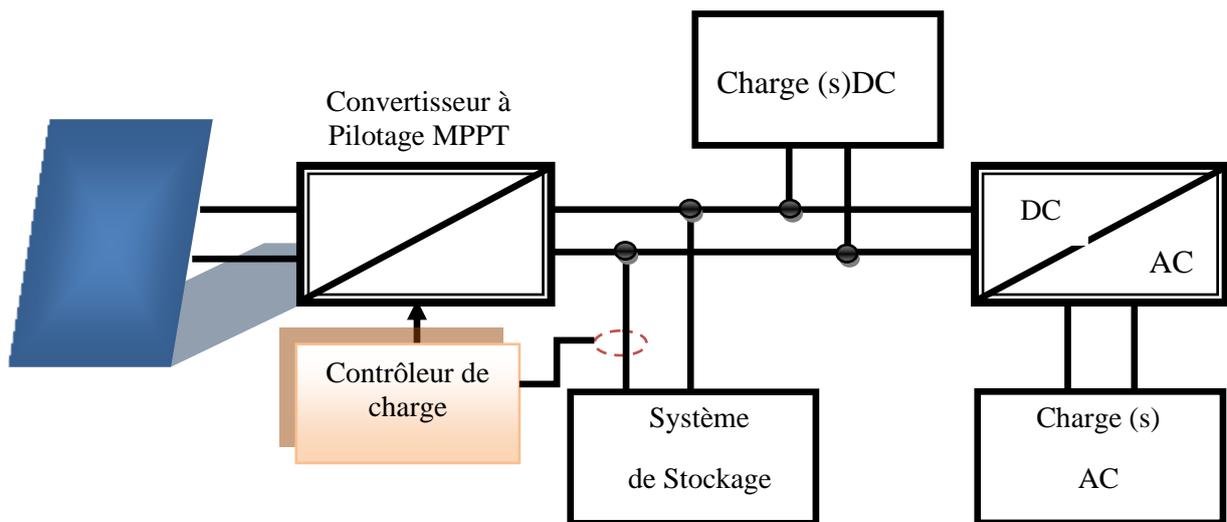


Figure I.18 : Système photovoltaïque autonome[3]

I.6.2. Installations électriques photovoltaïques raccordées au réseau

Les installations solaires photovoltaïques connectées au réseau électrique sont des installations dans lesquelles l'énergie générée est versée directement dans le réseau électrique. Ce type d'installation solaire fonctionne comme s'il s'agissait d'une centrale électrique. La consommation d'électricité est indépendante de l'énergie générée par les panneaux solaires. Dans ces cas, l'utilisateur continue d'acheter l'énergie électrique qu'il

consomme auprès de la société de distribution au prix établi et possède également une installation de production d'énergie électrique.

Une installation solaire photovoltaïque connectée au réseau comprend les éléments de base suivants :

- Un groupe de panneaux solaires photovoltaïques pour transformer le rayonnement solaire en énergie électrique.
- Un onduleur électrique. L'onduleur permet de transformer l'énergie en courant continu généré par les panneaux en courant alternatif.
- Un coffret d'interconnexion avec les métiers du réseau électrique.
- Un compteur électrique.[7]

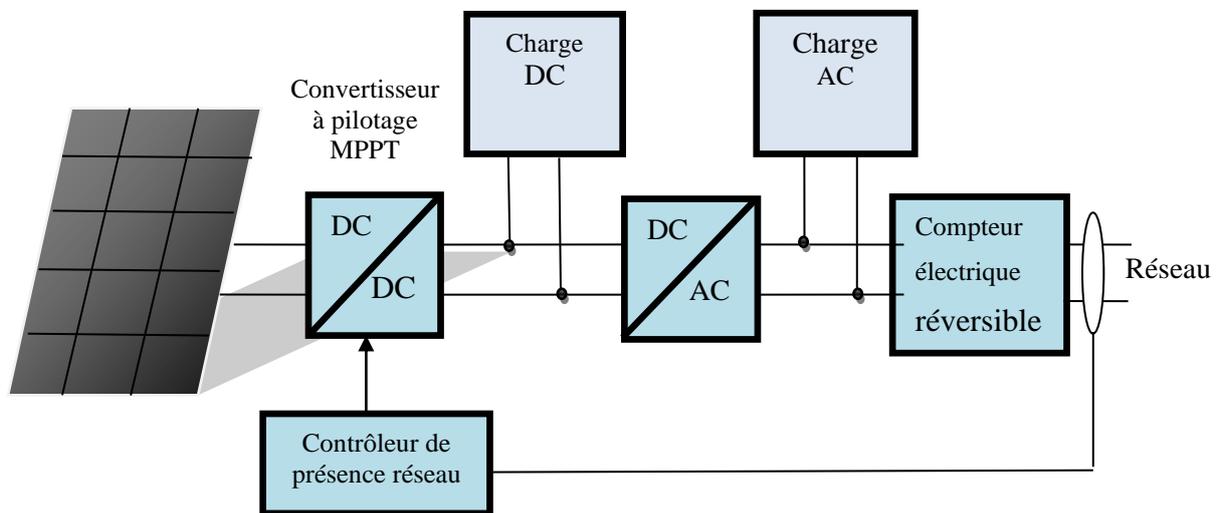


Figure I.19: Système photovoltaïque raccordé au réseau[3]

I.7. Système de conversion

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ photovoltaïque et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu-continu), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif). [8]

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable qui est le générateur PV dans le but de la faire fonctionner à sa puissance maximale.

I.7.1. Convertisseur survolteur (Boost-converter) :

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle (hacheur élévateur), est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge. C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive).

La structure de base et la topologie de commande du convertisseur survolteur est représentée sur la figure ci-dessous L'équation d'état décrivant le convertisseur élévateur de tension continu/continu est donnée par :

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di}{dt} = -(1 - u).V + E \quad (I.5) \\ C \frac{dV}{dt} = (1 - u).i + \frac{V}{R} \quad (I.6) \end{array} \right.$$

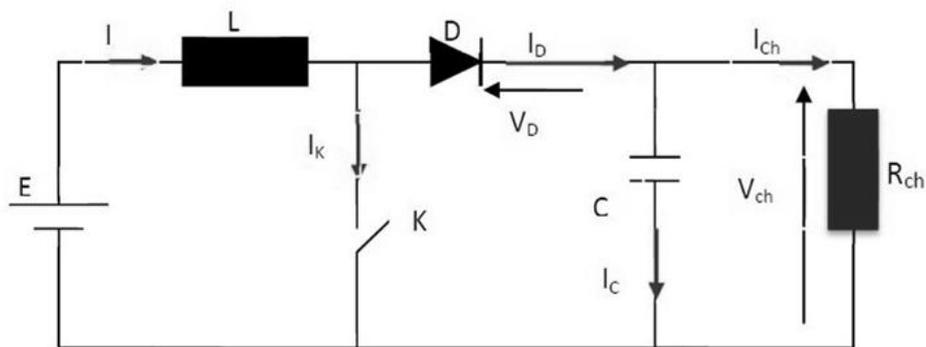


Figure I.20: Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost

I.7.2. Convertisseur dévolteur (Buck-converter)

Un convertisseur Buck, ou hacheur série (Le convertisseur abaisseur), est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge.

La structure de base et la topologie de commande du convertisseur abaisseur est représentée sur la Figure I.21 L'équation d'état décrivant le convertisseur abaisseur de tension continu-continu est donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di}{dt} = -V + uE \quad (I.7) \\ C \frac{dV}{dt} = i - \frac{V}{R} \quad (I.8) \end{array} \right.$$

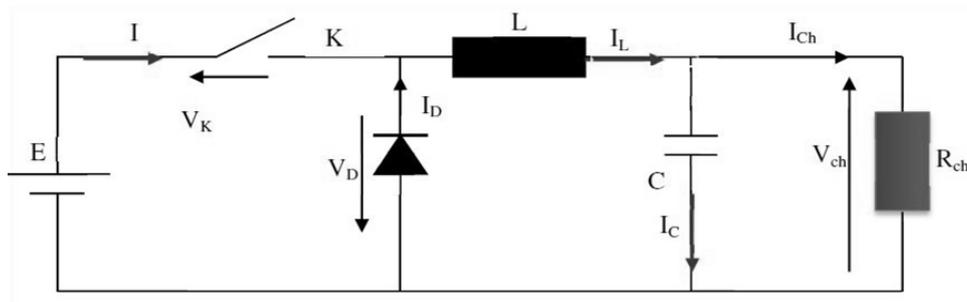


Figure I.21: Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck

I.7.3. Convertisseur dévolteur survolteur (Buck-Boost-converter)

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible (Buck) ou plus grande valeur (Boost) mais de polarité inverse. Un inconvénient de ce convertisseur est que son interrupteur ne possède pas de borne reliée au zéro, compliquant ainsi sa commande

La structure de base et la topologie de commande du convertisseur élévateur abaisseur sont représentées sur la Figure I.22. L'équation d'état décrivant le convertisseur élévateur abaisseur de tension continu-continu est donné par :

- Hacheur buck – Boost inverse :

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di}{dt} = (1 - u).V + uE \\ C \frac{dV}{dt} = -(1 - u).i + \frac{V}{R} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{(I.9)} \\ \text{(I.10)} \end{array}$$

- Hacheur buck – Boost non inverse :

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di}{dt} = -(1 - u).V + uE \\ C \frac{dV}{dt} = (1 - u).i - \frac{V}{R} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{(I.11)} \\ \text{(I.12)} \end{array}$$

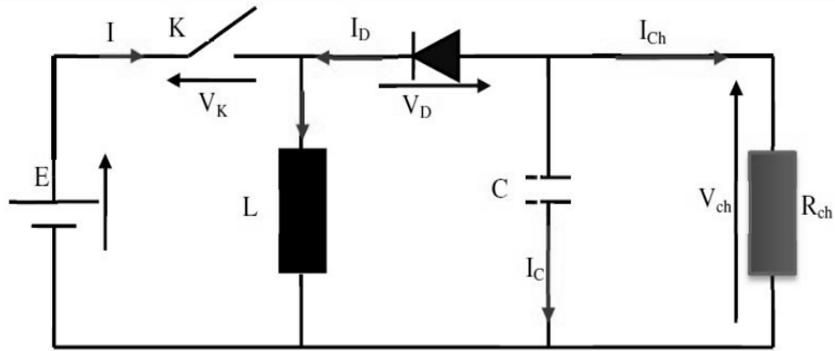


Figure I.22 : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck –boost[9]

I.8. Ombrage des panneaux PV

Il se peut qu'un obstacle, de quelques natures qu'il soit (bâtiments, arbres, etc.) fasse de l'ombre aux panneaux solaires.

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

On peut distinguer deux types d'ombrages : ombrage partiel et l'ombrage total. On appelle ombrage total ou complet se qui vient couvrir le panneau (couverture, branche cassée, saleté de toute nature, etc.). L'ombrage partiel laisse passer en partie les rayons du soleil.



Figure I.23 : GPV dans des contritions partiellement ombragées causées par l'ombre d'un arbre.

I.8.1. Phénomène d'ombrage sur un module PV :

Additionner les tensions dans le cas d'un assemblage série de cellules PV est aisé si toutes les cellules sont identiques et qu'elles travaillent sous les mêmes conditions d'ensoleillement et de température. Mais, comme nous l'avons précisé précédemment, dans les conditions réelles de fonctionnement, si les cellules sont légèrement différentes ou ne sont pas uniformément éclairées, le comportement électrique n'est pas facilement prévisible et dépend des caractéristiques de chaque cellule et des conditions d'éclairement. Plusieurs études ont présenté des modèles mathématiques afin de calculer les effets de cellules non-identiques dans un module.

La figure ci-dessous montre la caractéristique $I-V$ d'une cellule PV dans toute sa gamme de tension. On constate que si, pour un éclairement solaire et une température ambiante donnés, le courant traversant une cellule est supérieur à son courant de court-circuit, alors la cellule fonctionnera en mode inversé (reverse-bias conditions) avec une tension négative. Dans ce cas, la puissance excessive sera dissipée dans la cellule ombragée et la cellule ou l'encapsulation de la cellule en plastic peuvent être irrémédiablement endommagées et peuvent conduire à un court-circuit dans la cellule. Cet effet est appelé 'hot spot'.

Dans le domaine en sens direct (mode normal de fonctionnement), la tension de circuit ouvert de la cellule est de l'ordre de 0,6 V pour les cellules cristallines alors que dans le sens inversé (polarisation inversée), les tensions peuvent atteindre plus de -20 V.

Dans un assemblage série, le courant est le même dans toutes les cellules. Si le courant de la rangée est plus grand que la photo courant de la cellule ombragée (courant de court-circuit), ce qui se produit dans la plupart des cas, cette cellule ombragée se met à fonctionner en mode inversé et dissipe de la puissance. Une telle situation est illustrée sur la Figure I.27 dans le cas de trois cellules connectées en série.[10]

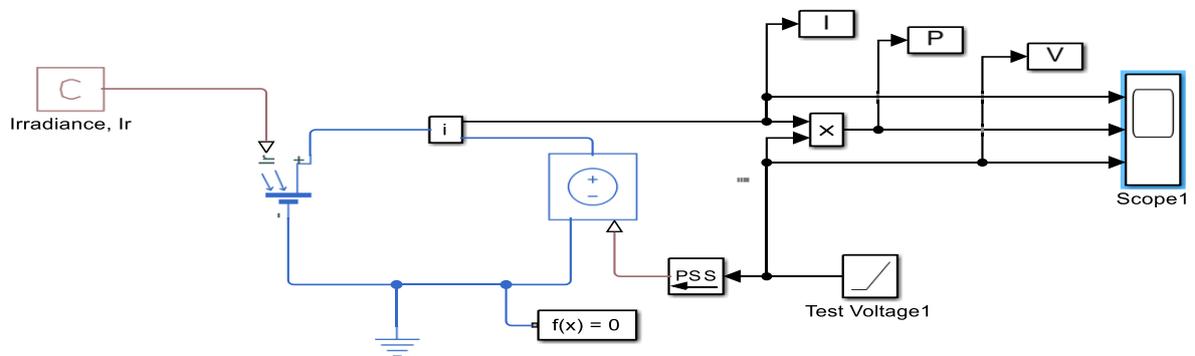


Figure I.24 : Schéma Simulink de la cellule PV

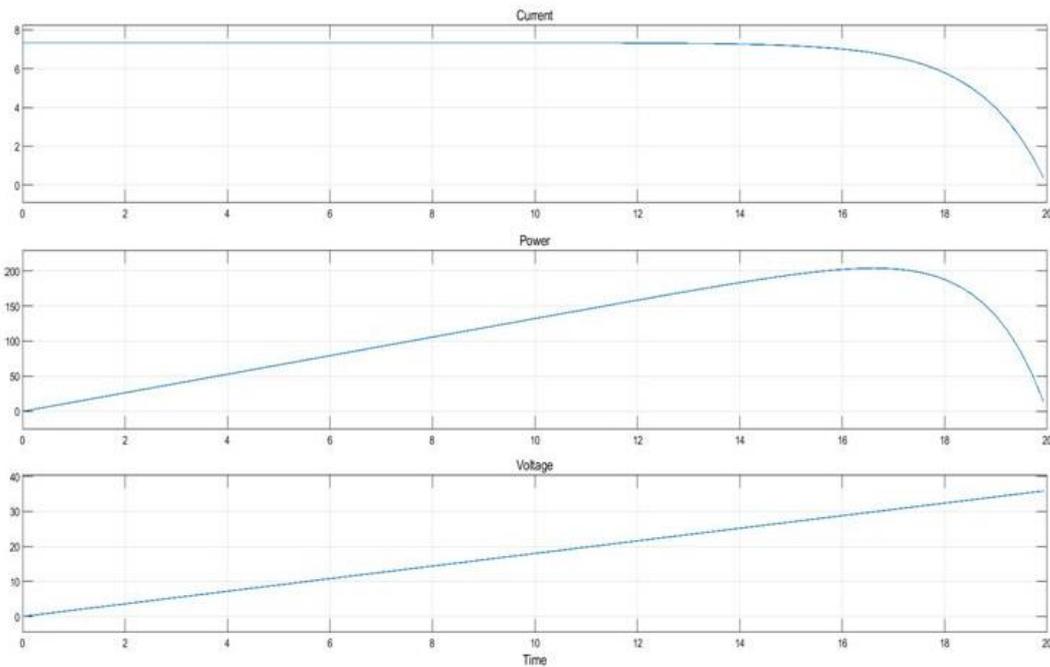


Figure I.25 : Caractéristique I-V d'une cellule PV dans toute sa gamme de tension

Si la rangée de cellules travaille à un point de fonctionnement correspondant à un courant I_m au-delà du courant de court-circuit de la cellule ombragée (cellule 2), le point de fonctionnement de la cellule ombragée se situe dans la région aux tensions négatives et cette tension négative de la cellule 2 peut être supérieure à la contribution positive de toutes les autres cellules.[10]

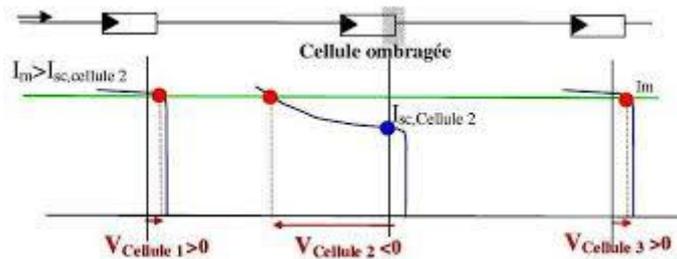


Figure I.26 : Principe de construction de la caractéristique d'un module PV pour un courant donné

I.8.2. Influence de l'ombrage sur les performances des modules PV

Malgré l'intérêt croissant pour améliorer les performances de systèmes PV, il n'y a que peu de travaux effectués sur le diagnostic des pannes. L'ombrage fait partie des causes de pannes des modules PV. La cellule peut devenir polarisée en inverse, fonctionnant comme une charge au lieu d'un générateur. Cela induit par conséquent une déformation globale de la caractéristique I-V, la réduction de la puissance de sortie du module et des risques d'échauffement puis de dégradations qui sont à redouter (hots spots). Les cellules PV des modules doivent par conséquent être protégées par des diodes by-pass. Il peut s'avérer qu'au niveau des diodes by-pass utilisées pour ces défauts d'ombrage, des problèmes de surchauffe ou de sous-dimensionnement des cellules peuvent apparaître.

Les installations PV dans un milieu urbain sont soumises à des phénomènes d'ombrage partiel ou temporaire, tels que ceux liés à une feuille d'arbre, à des déjections d'oiseaux, à la salissure (polluant émis par des activités humaines et atmosphériques), à la présence de cheminées, ou bien même à une partie de construction, qui peuvent conduire à une réduction de l'ensoleillement. Cela a pour conséquence de causer une perte de puissance des modules.

Plusieurs études ont été réalisées sur l'effet d'ombrage sur les performances des modules

PV. La première étude sur l'impact de la poussière sur les systèmes solaires réalisée entre le 9 mai et le 1er juillet 1940 dans une zone industrielle aux Etats-Unis a montré une dégradation maximale des performances de 4,7%, avec une perte moyenne de rayonnement solaire incident inférieure à 1%. Une autre étude a montré que plusieurs mois de fonctionnement d'un module PV sans nettoyage induit une perte de puissance de 40% à Chicago et 12% à New York causée par l'effet de la salissure. La perte moyenne annuelle de puissance d'un module PV varie de 1% à 4%. Dans les zones où les pluies sont fréquentes, il a été montré que la pluie pouvait nettoyer les modules PV à un point de restauration de la performance à 1% de perte sur la pleine puissance.

Malheureusement, les régions sahariennes, qui sont les plus adaptées à la production d'électricité PV en raison de la disponibilité abondante du rayonnement solaire tout au long, sont caractérisées par des vents de sable qui provoquent l'accumulation de particules de sable sur la surface des modules, ce qui engendre une réduction des performances électriques et des projections provoquant l'abrasion du verre.

Il y a plusieurs études qui ont été faites sur l'effet du sable sur les performances des modules. Par exemple une étude réalisée à Dubaï sur le dépôt de la poussière de sable a montré que la puissance du module PV est réduite de 39% pendant un mois et de 85,32 % après une année sans nettoyage. Cela montre que lorsque l'accumulation de poussière augmente d'environ 35%, la puissance maximum diminue d'environ 75%. Cependant, le nettoyage simple avec de l'eau apporte une augmentation de la puissance de 3,2%. Pour un utilisateur d'un système PV, il serait intéressant de savoir la fréquence de nettoyage des modules et l'endroit le plus avantageux de leur implantation.

I.8.3. Les effets d'ombrage sur la performance des panneaux solaires

Les panneaux solaires photovoltaïques sont très sensibles à l'ombre. Les conditions d'ombrage totales ou partielles ont un impact important sur la capacité de production d'énergie et peuvent entraîner des pertes. Les cellules d'un panneau solaire sont généralement connectées en série pour obtenir plus de puissance, et donc une production convenable d'électricité. Mais lorsqu'un ombrage se produit, cette structure présente certaines limites.

L'énergie produite par une chaîne de cellules est déterminée par celle qui produit le moins. Lorsqu'une cellule est ombragée, l'ensemble de la série est impacté. Pour éviter les

perdes d'énergie, l'installation comprend généralement des diodes de dérivation câblées en parallèle aux cellules solaires. Lorsqu'une cellule solaire est ombragée, la diode de dérivation permet de « contourner » une partie des cellules et les autres cellules peuvent ainsi générer de l'énergie à tension réduite.[11]

I.8.4. Protection des modules PV en cas d'ombrage

Pour la protection des modules on intègre des diodes dites : diodes by-pass et diodes anti-retour.

➤ Diodes by-pass :

Il arrive fréquemment que les cellules élémentaires qui composent le module ne présentent pas toutes la même courbe caractéristique au même moment. Les raisons peuvent être multiples : variété inévitable de fabrication, défaillance, différence d'éclairement ou de température (dus par exemple à un ombrage non uniforme du module, un encrassement,...). Sous certaines conditions, la cellule la plus faible peut alors se comporter comme une cellule réceptrice, dissipant la puissance générée par la cellule la plus forte. Celle-ci peut même être détruite si la contrainte ou la température devient trop importante.

Pour éviter ce phénomène, on place des diodes de by-pass (empêchant tout courant ou tension inverses). Celles-ci sont placées en série lorsque les cellules sont connectées en parallèle et en parallèle lorsque les cellules sont connectées en série.

Les modules aujourd'hui commercialisés comprennent généralement des diodes de protection situées en parallèle des différents strings qui le composent.

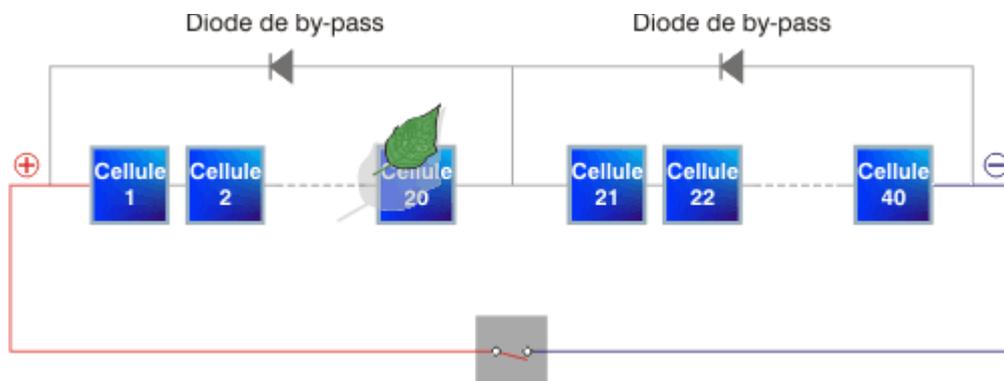


Figure I.27 : Utilisation de la diode by-pass

L'utilisation de ces by-pass induit néanmoins des perturbations de la courbe caractéristique, modifiant le point de puissance maximal du module :

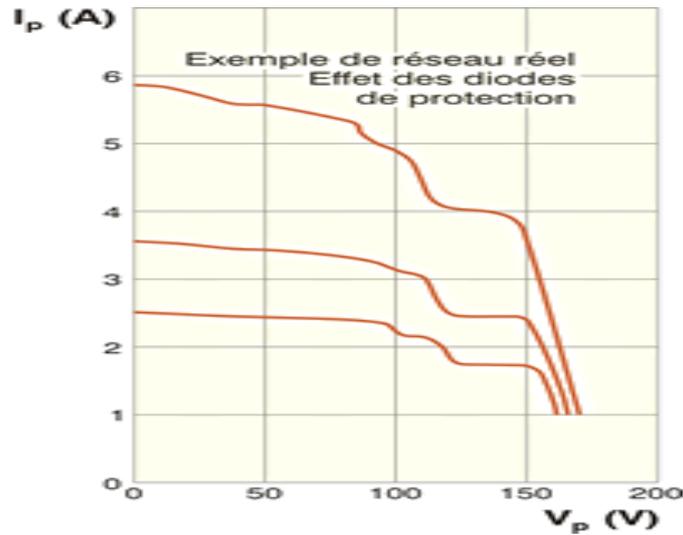


Figure I.28 : Caractéristique du panneau PV dans le cas de l'ombrage partiel

Pour ne pas induire inutilement ces pertes, il est donc très important que ces diodes de by-pass soient utilisées et placées en cohérence avec les ombres générées par l'environnement du module.[4]

➤ Diodes anti-retour :

La diode anti-retour évite qu'un panneau devienne un récepteur de puissance, ce phénomène est possible lorsque l'on branche les panneaux entre eux en parallèle (pour éviter que l'un débite sur l'autre), ou qu'une batterie débite sur le panneau (par exemple pendant la nuit).[12]

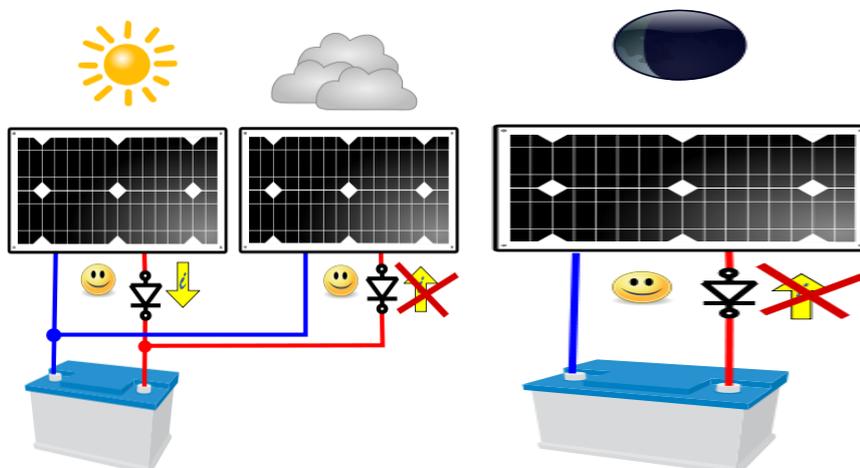


Figure I.29 : Rôle de la diode anti-retour

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre, notre étude portera sur la modélisation de la différente partie constituant un système PV. On débutera par les principaux éléments constituant un module et champ PV en définissant leur caractéristique courant-tension et puissance-tension pour des variations de température et ensoleillement d'un module et panneau PV.

Ensuite, il sera procédé à une présentation des différents convertisseurs (DC-DC), de leur principe de fonctionnement.

CHAPITRE II : Poursuite du point de puissance maximale

II.1. INTRODUCTION

L'énergie photovoltaïque issue de la conversion de l'énergie solaire souffre d'un problème d'optimisation, dû aux caractéristiques électriques non linéaires (courant - tension) des cellules photovoltaïques. Ces caractéristiques dépendent essentiellement des conditions climatiques de rayonnement et de température. L'extraction de la puissance maximale d'un ensemble de ces cellules dite 'Stratégie MPPT' (Maximum Power Point Tracking) permet d'une manière efficace de résoudre ce problème d'optimisation. Parmi les stratégies MPPT les plus utilisées, on cite par exemple :

- Les méthodes classique : la méthode de la conductance incrémentale (INC) et celle de la perturbation et observation (P&O) traditionnelle.
- Les méthodes évoluées : la méthode de la logique floue (F.L) et celle de l'optimisation par essais des particules (P.S.O)

II.2. Commande MPPT

La commande MPPT, 'Maximum Power Point Tracking, est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique d en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV.

L'optimisation consiste à réaliser ce point en permanence en agissant de façon automatique sur la charge vue par le générateur cette adaptation de charge dans le principe s'effectue en générale à l'aide d'un convertisseur statique dans les pertes doivent être aussi faibles que possible et qui peut, par ailleurs, assurer une fonction de mise en forme d'un générateur de sortie, différentes attitudes peuvent être envisagées quant à la commande de l'adaptateur.

Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC est choisie. Comme nous pouvons le voir sur cette chaîne, dans le cas de la conversion solaire

L'adaptateur peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV corresponde à la puissance maximale (P_{max}) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge.

Dans la littérature, nous pouvons trouver quelques techniques de poursuite du point de puissance maximale en détaillant les plus simples à savoir :

- Conductance incrémentale (INC).
- Perturbation & observation (P&O) [13]

II.2.1. Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque

La puissance électrique produite par un panneau photovoltaïque dépend fortement de l'ensoleillement et à un degré moins important de la température des cellules. Ces deux variables influençant le comportement du système présentent des fluctuations quotidiennes et saisonnières. Pour ces raisons, le panneau photovoltaïque ne peut fournir une puissance maximale que pour une tension particulière et un courant bien déterminé ; ce fonctionnement à puissance maximale dépend de la charge reliée à ses bornes. À cet effet et en fonction du type de cette charge, un dispositif de contrôle devra être intégré dans le circuit de commande du convertisseur (hacheur ou onduleur). Ce dernier doit être capable de faire fonctionner le panneau photovoltaïque à sa puissance maximale.

La méthode de suivi de la puissance maximale connue sous le nom MPPT (Maximum Power Point Tracking) est basée sur l'utilisation d'un algorithme de recherche où le maximum

de la courbe de puissance est estimé sans interrompre le fonctionnement normal du panneau photovoltaïque. Contrairement au contrôle à tension fixe, le MPPT n'est pas basé sur une valeur de référence prédéterminée mais il s'agit d'une recherche de la valeur de référence pour atteindre le maximum de la puissance sur la caractéristique courant-tension. À noter que le MPPT joue un rôle très important parce qu'il maximise le rendement et il réduit au minimum le coût. [8]

II.2.2. Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)

La chaîne de puissance d'un GPV où une charge DC est alimentée par un générateur à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT peut être représentée comme indiquée sur la Figure II.1. La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du CS de telle sorte que la puissance fournie par le GPV soit le P_{MAX} disponible à ses bornes. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le PPM, mais en général il est basé

sur la variation du rapport cyclique du CS jusqu'à se placer sur le PPM en fonction des évolutions des paramètres d'entrée du CS.[14]

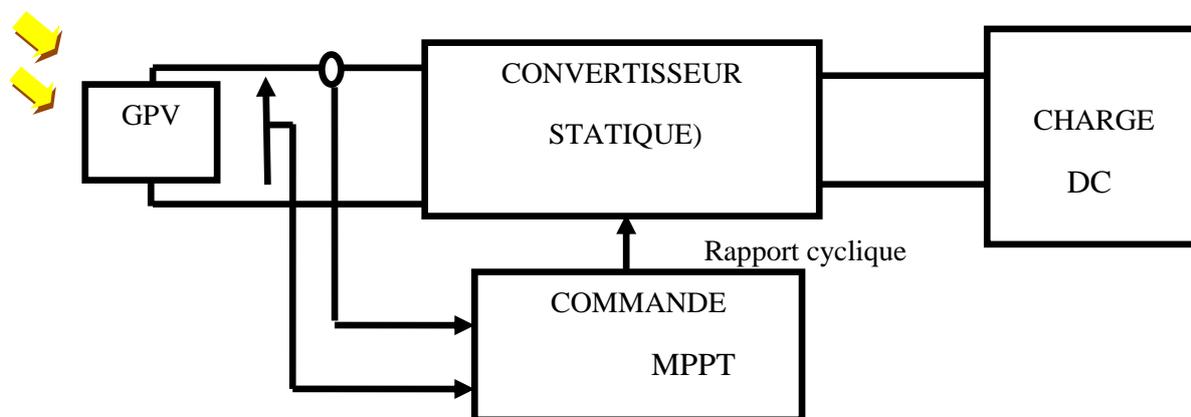


Figure II.1 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec CS contrôlé par une commande MPPT sur charge DC.[14]

II.2.3. Techniques MPPT à algorithmes performants

Il y a plusieurs types de commande MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base. Les méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement Perturb&Observe (P&O), l'incrément de Conductance (Inc- Cond) et par intelligence artificielle (logique floue, L'optimisation des essais de particules.[14]

II.2.3.1. Algorithmes classiques

II.2.3.1.1. La méthode perturbation et observation (P&O)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en perturbant le système et observant l'impact sur la puissance à la sortie du GPV. Sur la Figure II.2, on voit que si la tension de fonctionnement est perturbée dans une direction donnée et que la puissance augmente ($dP/dV > 0$), alors il est clair que la perturbation a déplacé le point de fonctionnement vers le MPP. L'algorithme P&O continuera à perturber la tension dans la même direction. Par contre, si la puissance diminue ($dP/dV < 0$), alors la perturbation a éloigné le point de fonctionnement du MPP [15]. Cet algorithme est résumé dans leTableau II.1 et l'organigramme de la Figure II.3.

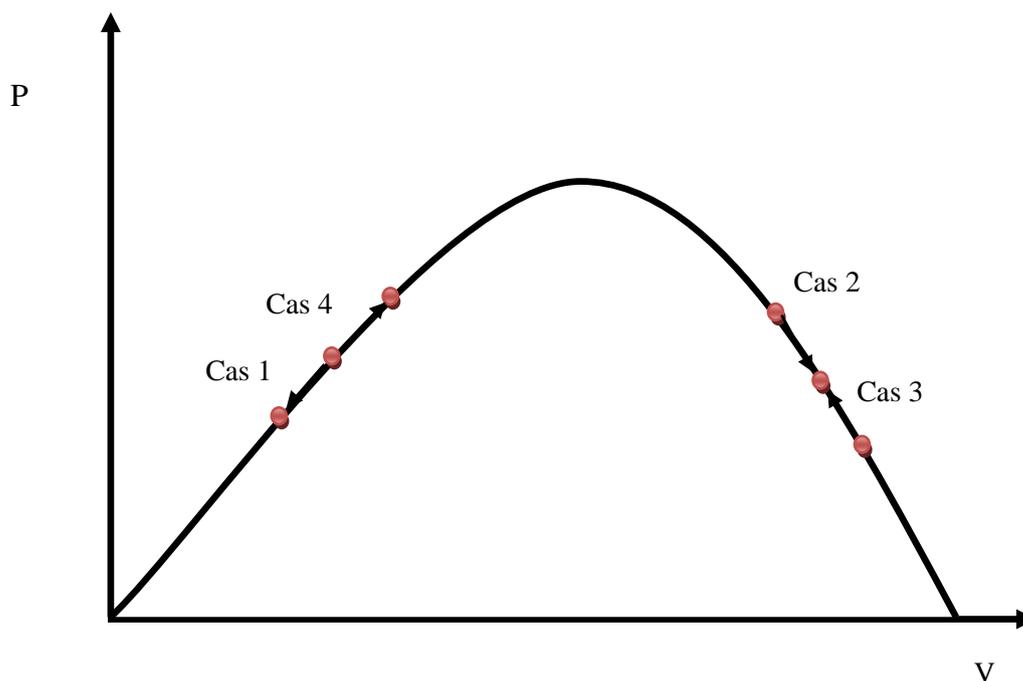


Figure II.2 : Principe de la méthode P&O

Cas	Dp	dV	Action
1	<0	<0	+
2	<0	>0	-
3	>0	<0	-
4	>0	>0	+

Tableau II.1 : Méthode P&O [16]

Le processus est répété périodiquement jusqu'à ce que le MPP soit atteint. Le système oscille alors autour du MPP, ce qui provoque des pertes de puissance. L'oscillation peut être minimisée en diminuant la taille de la perturbation. Cependant, une taille de perturbation trop petite ralentit considérablement la poursuite du MPP. Il existe alors un compromis entre précision et rapidité. [17]

Il est important de noter qu'avec l'algorithme P&O, la variable à contrôler peut être soit la tension soit le courant du GPV. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. Sur la Figure II.4, on voit bien que la

variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV.[13]

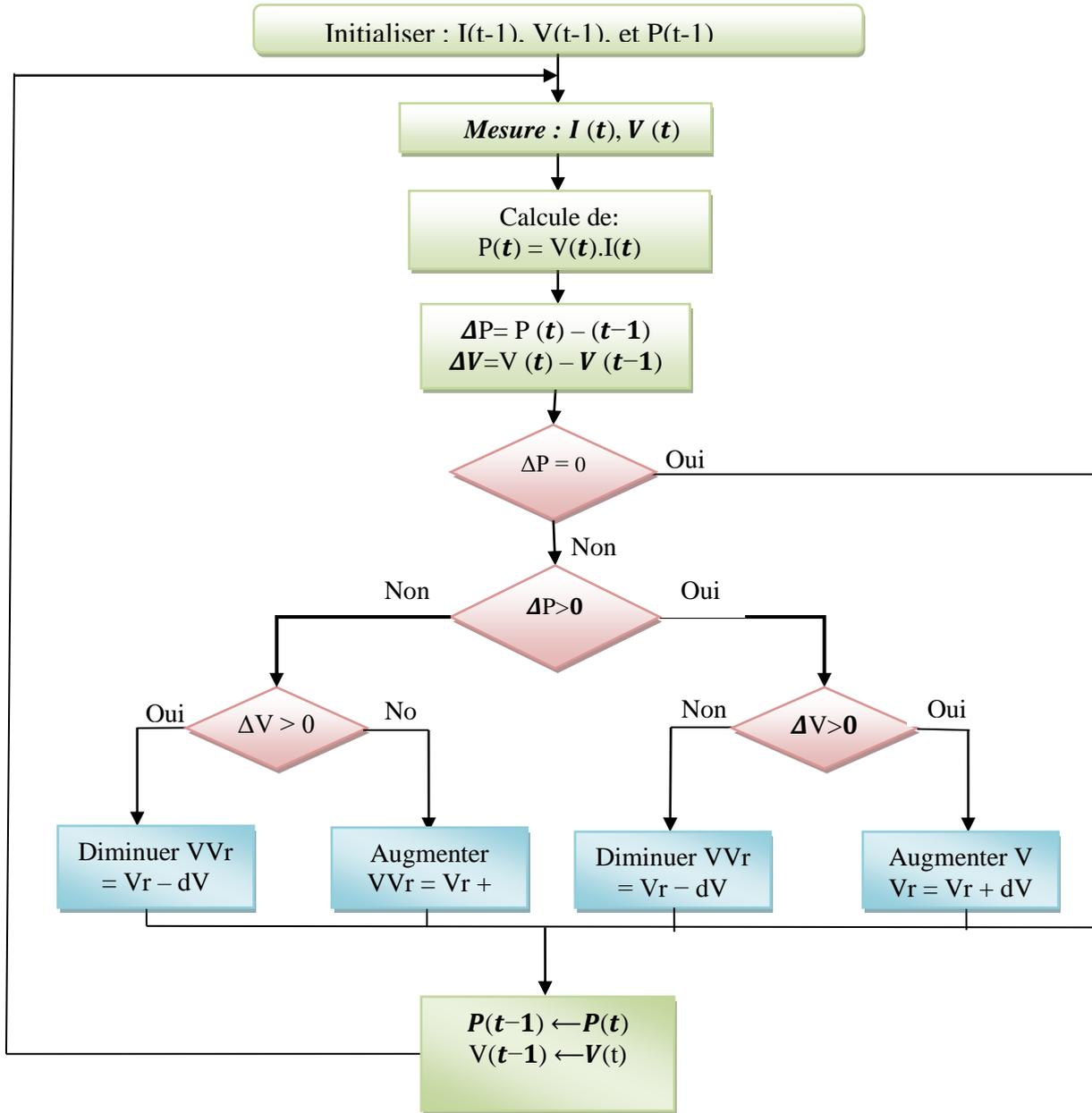


Figure II.3 : Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode perturber et observer

Un inconvénient est présenté par cette méthode lors d'un changement des conditions atmosphériques (lumière), dans ce cas la puissance du point de recherche sera perturbée par l'ensoleillement et non pas par la perturbation de l'algorithme.[12][18]

Commençant par un point de fonctionnement A, si les conditions climatiques restent constantes, une perturbation ΔV dans la tension V amènera le point de fonctionnement au point B, et le sens de la perturbation sera inversé à cause de la diminution de la puissance. Par contre, si l'éclairement augmente et déplace la courbe de puissance de P1 à P2, sur un cycle du MPPT, le point de fonctionnement sera déplacé de A vers C. Cela représente une augmentation de la puissance, pour l'algorithme ceci est le résultat de sa propre action et le sens de la perturbation restera le même. Par conséquent, le point de fonctionnement s'éloigne du MPP et continuera à s'éloigner si l'éclairement augmente (ou diminue) progressivement. Pour pallier à ce problème, on pourra ajouter le poids d'un troisième point et le comparer aux deux autres avant de prendre une décision sur le sens de la perturbation.[18]

Une autre solution serait de diminuer le cycle du MPPT.[17]

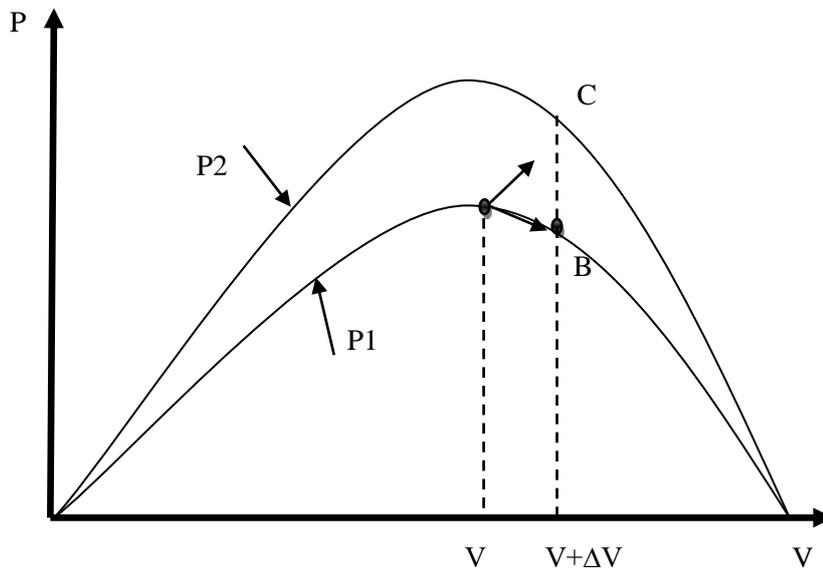


Figure II.4 : Problème de la variation rapide de l'ensoleillement dans la méthode P&O

Le problème dans ce cas est qu'on surveille la variation de la puissance dans la courbe P-V pour savoir si l'on est à gauche ou à droite du PPM, ce problème est réglé avec la méthode la Conductance Incrémentale « Incremental Conductance » (IC) et ceci par la surveillance de la pente de cette courbe (prendre en compte la variation du courant) ce qui donne réellement la position du point de recherche par rapport au PPM. On remarque que même avec un changement brusque de lumière la pente de la courbe reste du même signe ce qui garde la recherche dans la même direction, cette méthode sera détaillée au paragraphe suivant.[12]

II.2.3.1.2. Algorithme incrémentation de la conductance

La méthode d'incrémentation de la conductance a été proposée pour éviter les Inconvénients de la méthode P&O de recherche du MPPT, et indépendante des caractéristiques des différents composants utilisés. Les tensions et courants du panneau sont monitors, de telle manière que le contrôleur peut calculer la conductance et la conductance incrémentale, et décider de son comportement.

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

$$G = \frac{I}{V} \quad (\text{II.1})$$

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

$$DG = \frac{dI}{dV} \quad (\text{II.2})$$

Elle est basée sur le fait que la dérivée de la puissance de sortie P par rapport à la tension de panneau V est égale à zéro au point maximum de puissance. [13]

Sachant que

$$P = I \times V \quad (\text{II.3})$$

la dérivée du produit par rapport à la tension V donne la relation suivante :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V.I)}{dV} = I \times \frac{dV}{dV} + V \times \frac{dI}{dV} = I + V \times \frac{dI}{dV} \quad (\text{II.4})$$

$$\frac{1}{V} \frac{dI}{dV} = \frac{1}{V} + \frac{dI}{dV} \quad (\text{II.5})$$

Les changements par accroissement nécessaires dV et dI sont obtenus en comparant les valeurs mesurées les plus récentes pour V et I à ceux mesurées durant le cycle précédent :

$$dV(k) \approx V(k) - V(k-1) \quad (\text{II.6})$$

$$dI(k) \approx I(k) - I(k-1) \quad (\text{II.7})$$

Pour rechercher les PPM, cette autre technique se base sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM [19]. Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous :

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (II.8)$$

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

$$dg = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (II.9)$$

D'autre part, l'évolution de la puissance du module (PPV) par rapport à la tension (VPV) donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Lorsque la dérivée de puissance est nulle, cela signifie que l'on est sur le PPM, si elle est positive le point d'opération se trouve à gauche du maximum, lorsqu'elle est négative, on se situe à droite. La Figure II.5 permet d'écrire les conditions suivantes :

- Si $\frac{dPPV}{dV_{pv}} > 0$, le point de fonctionnement est à gauche du PPM,
- Si $\frac{dPPV}{dV_{pv}} = 0$, le point de fonctionnement est sur le PPM,
- Si $\frac{dPPV}{dV_{pv}} < 0$, le point de fonctionnement est sur la droite du PPM.

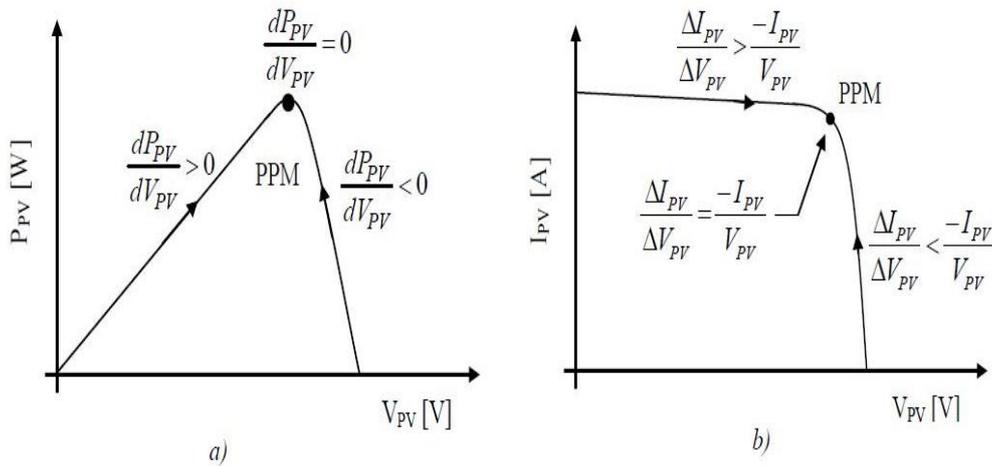


Figure II.5 : Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de $dPPV/dV_{PV}$ sur la caractéristique de puissance (a) et de la valeur de $\Delta I_{PV}/\Delta V_{PV}$ sur la caractéristique de courant (b).

Le lien entre la conductance donnée par l'équation (2.3) et la dérivée de la puissance $\frac{dPPV}{dV_{pv}}$ peut être décrit par l'équation suivante :

$$\frac{dPPV}{dV_{pv}} = \frac{d(I_{pv} \cdot V_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (II.10)$$

D'où, on peut alors écrire de nouvelles conditions sur la variation de conductance comme celles données par (2.4) sur la dérivée de puissance :

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

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance (I_{PV}/V_{PV}) avec celle de l'incrément de conductance ($\Delta I_{PV}/\Delta V_{PV}$), comme l'illustre l'algorithme de la Figure II.7. V_r correspond à la tension de référence et force le GPV à fonctionner à cette valeur. Si on est au PPM, alors la tension V_r correspond bien à la tension optimale V_{OPT} . Une fois le PPM atteint, le point de fonctionnement peut être maintenu sur cette position jusqu'à la détection d'une variation de ΔI_{PV} . Cela indique alors un changement de conditions climatiques, donc un nouveau PPM à rechercher. Pour cela, l'algorithme incrémente ou décrémente la valeur de V_r jusqu'à atteindre le PPM. Le schéma de principe de cette méthode est illustré sur la figure suivante.[20]

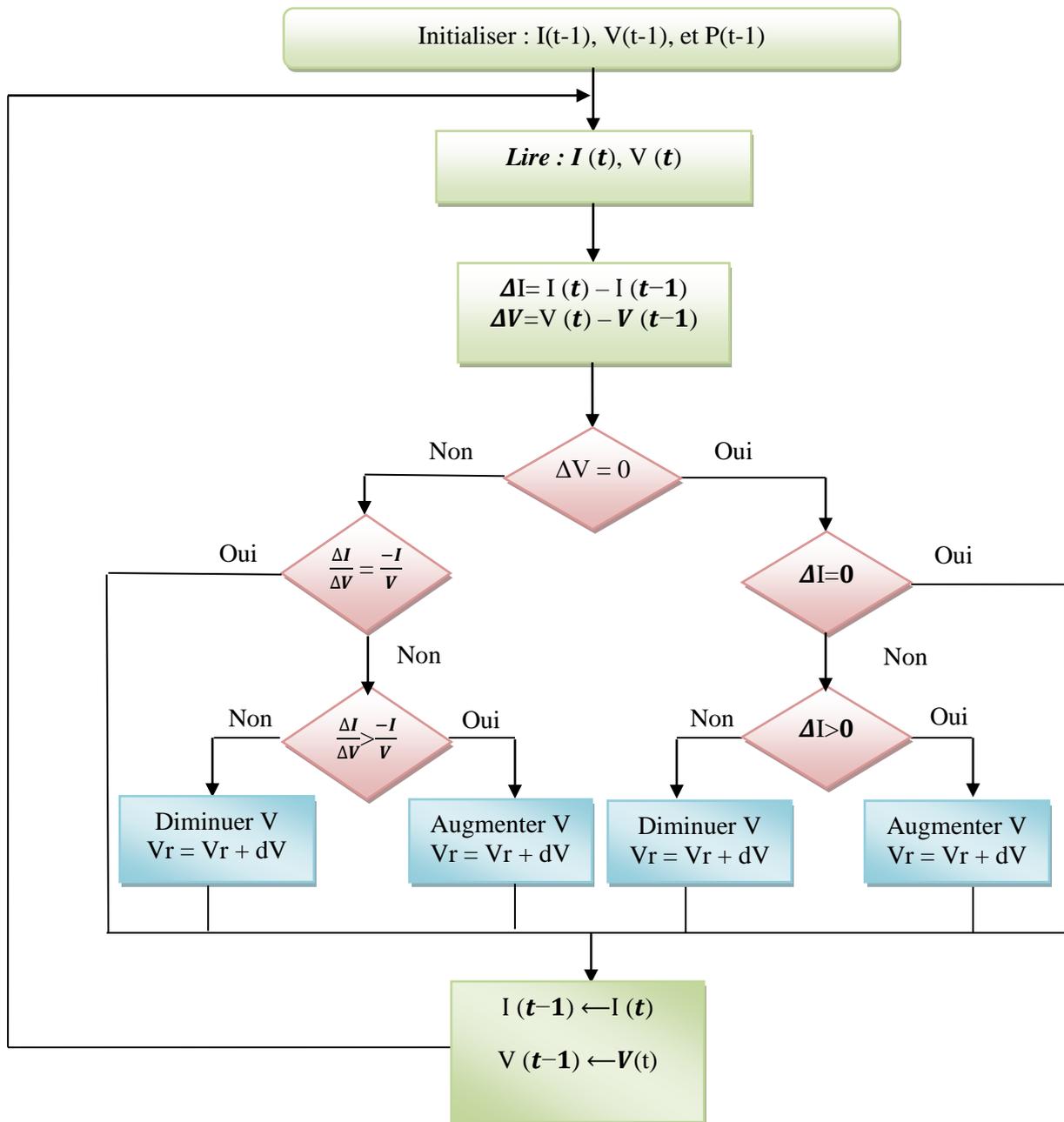


Figure II.6 : Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode Incrément de Conductance

Cette méthode continue de poursuivre le PPM dans le bon sens même sous une variation rapide de l'ensoleillement mais le problème est toujours l'oscillation de la puissance autour du PPM, en plus cette méthode peut converger vers un optimum local ($\frac{dP}{dV} = 0$) dans le cas d'un ombrage partiel.

Des nouvelles méthodes ont été évoluées pour remédier à ce problème dont on détaillera en ce qui suit.

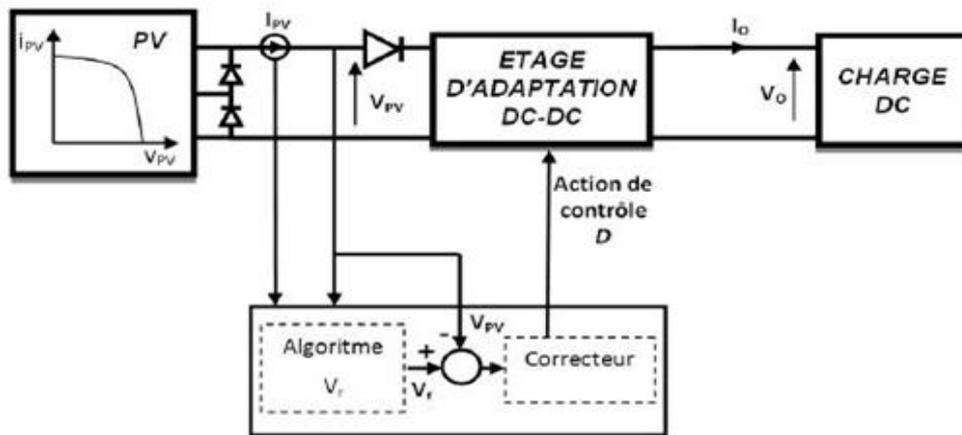


Figure II.7 : Fonctionnement d'une commande MPPT de type Inc-Cond illustré sur une chaîne élémentaire de conversion PV.

II.2.3.2. Algorithmes évolués

II.2.3.2.1. MPPT À Base De Logique Floue

La logique floue a fait son apparition en 1965 avec les travaux de L. Zadeh. La commande floue a les mêmes objectifs de régulation et de poursuite qu'une commande réalisée en automatique classique. Cependant, il est possible de se passer d'un modèle explicite du procédé à commander. C'est le plus souvent, le savoir-faire d'un expert ou d'opérateurs qualifiés manipulant le procédé qui est pris en compte pour l'élaboration de la loi de commande. La poursuite du point PPM par la logique floue est divisée en deux phases, la première sera la recherche rapide, avec un pas important, la seconde sera une phase fine avec un pas très petit, ce qui assure une stabilité du système en diminuant les oscillations autour du point PPM.[21]

La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes, qui sont : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification.

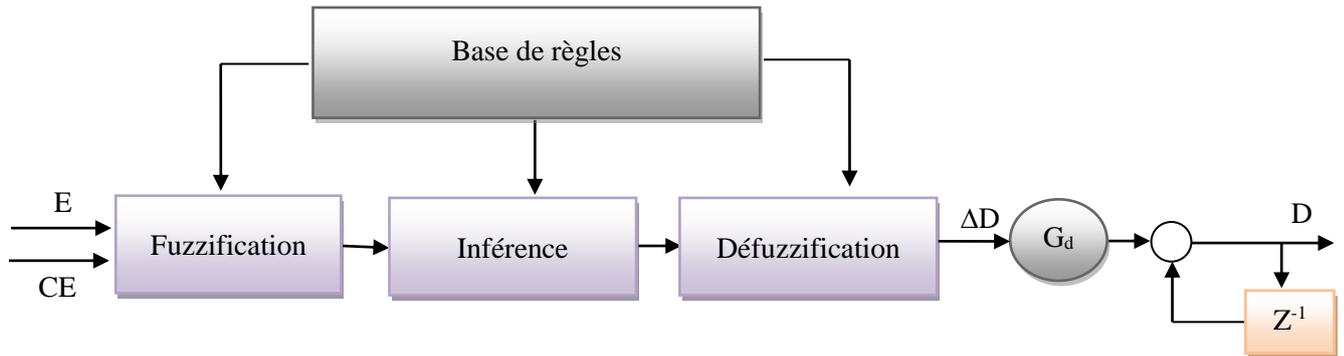


Figure II.8 : Structure de base d'un contrôleur MPPT flou

➤ Fuzzification :

La fuzzification permet de rendre flou les variables d'entrée. Une étape préliminaire consiste à définir un intervalle de variation maximale autorisée pour les variables d'entrées. Le but de la fuzzification est de transformer les variables d'entrée en variables linguistiques ou variables floues. Dans notre cas, on a deux variables d'entrées qui sont l'erreur $E(k)$ et la variation d'erreur $\Delta E(k)$ à l'instant k qui sont définis comme suit :

$$E(k) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)} = \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (II.11)$$

$$\Delta E(k) = E_{pv}(k) - E_{pv}(k-1) \quad (II.12)$$

Où $P_{pv}(k)$ et $V_{pv}(k)$ sont respectivement : la puissance et la tension du générateur photovoltaïque.

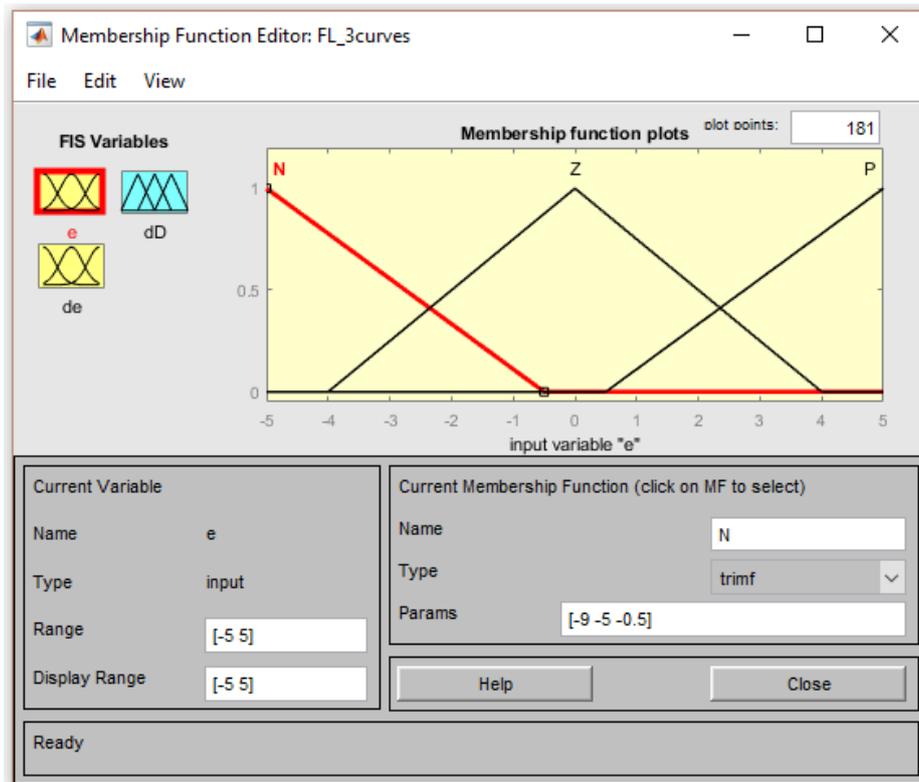
Ainsi ses variables seront qualifiés : Négatif, Zéro, Positif.

$$E(k) \in \{N, Z, P\}$$

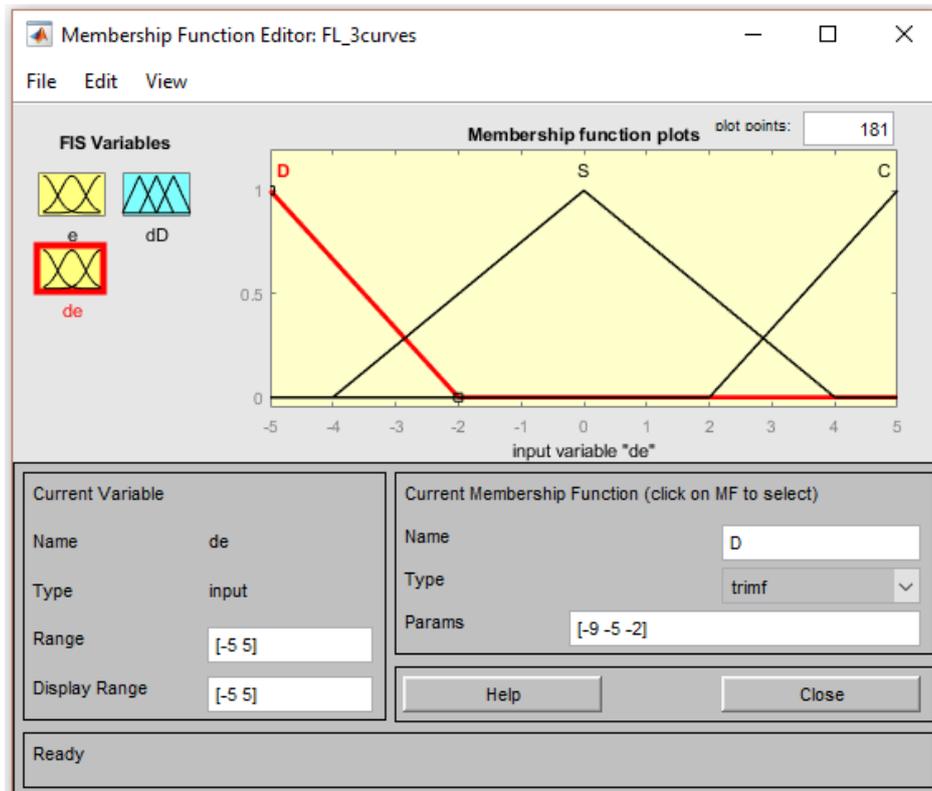
$$\Delta E(k) \in \{D, S, C\}$$

Ainsi la sortie peut être dressée.

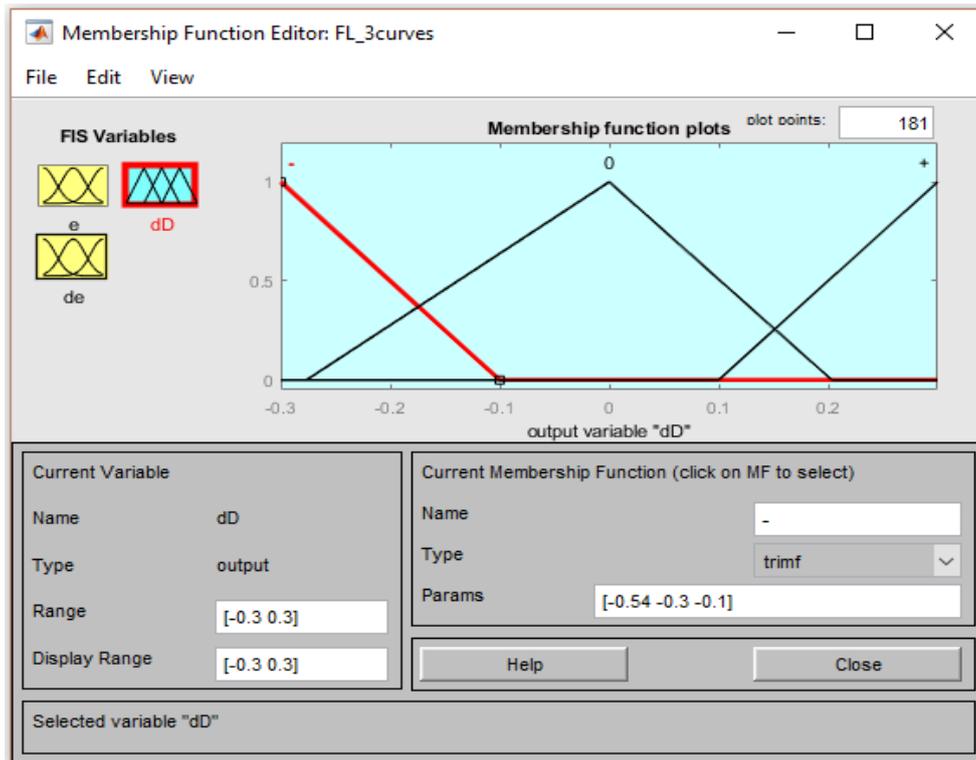
Les fonctions d'appartenance sont représentées p la Figure suivante. Afin de simplifier notre exemple, on prend des fonctions d'appartenance triangulaires et trapézoïdales.



(a)



(b)



(c)

Figure II.9 : Représentation des fonctions d'appartenance ; (a) : l'erreur, (b) : variation de l'erreur, (c) : variation du rapport cyclique

➤ Raisonnement flou ou bien Inférence :

L'inférence est une étape qui consiste à définir un rapport logique entre les entrées et la sortie. En effet, des règles d'appartenance vont être définies pour la sortie comme ça était fait pour les entrées, grâce à ces règles un tableau d'inférence peut être dressé. En effet, les systèmes utilisant la logique floue utilisent des règles du type : SI ... ALORS ...

Lorsque on utilise des règles du type : SI ... ET ... ALORS... (Comme dans notre cas) ces dernières peuvent s'écrire sous forme d'une matrice que l'on nomme "matrice d'inférence", lorsque le nombre d'entrées et de sorties est petit ce tableau permet une lecture plus facile des règles, le tableau suivant représente la matrice d'inférence :

ΔV		Δe		
		D	S	C
e	N	-	-	0
	Z	-	0	+
	P	0	+	+

Tableau II.2 : Matrice d'inférence

Dans notre cas, les règles sont comme les montre la Figure suivante :

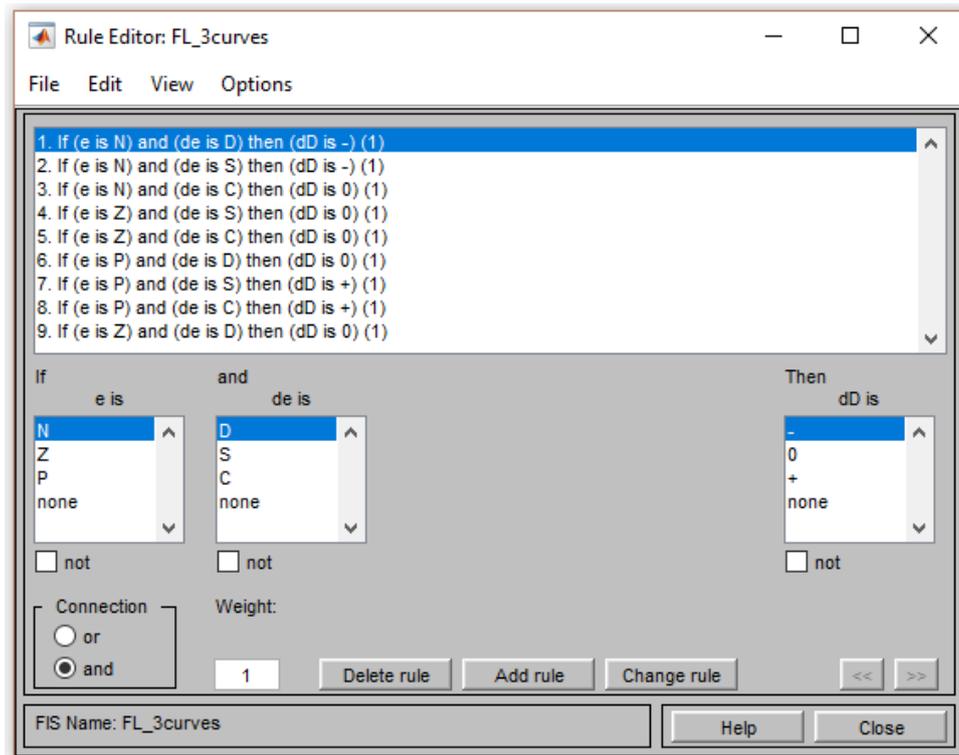


Figure II.10 : règles d'inférence

Il est évident qu'une bonne connaissance du système est requise pour le développement d'un tel régulateur. En effet, en règle générale, une valeur d'entrée est définie par deux fonctions floues avec des degrés différents, ainsi la sortie sera elle aussi définie par plusieurs fonctions, la question étant de savoir avec quels degrés d'appartenance. Plusieurs méthodes peuvent répondre à cette question. De notre part, nous avons utilisé la méthode MAX-MIN, la méthode de Mamdani (l'une des plus répandues) qui consiste à utiliser un "min" ("et") pour l'évaluation des prémisses des règles et à utiliser un "max" ("ou") pour l'agrégation des règles.

➤ Défuzzification :

Enfin, il nous faut réaliser l'opération inverse de la fuzzification, ici nous devons calculer une valeur numérique compréhensible par l'environnement extérieur à partir d'une définition floue est c'est le but de la défuzzification.[22]

II.2.3.2.2. MPPT avec l'optimisation par essaims des particules

➤ Principe :

L'Optimisation par Essaim de Particules (**OEP**), connu sous le nom anglophone de Particle Swarm Optimization (**PSO**), est un algorithme inscrit dans la famille des algorithmes évolutionnaires. Il a été proposé par Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy (socio psychologue) en 1995.

Cette méthode trouve sa source dans les observations faites lors des simulations informatiques de vols groupés d'oiseaux et de bancs de poissons de Reynold, Heppner & Grenander. Autrement-dit, elle s'inspire fortement de l'observation des relations grégaires d'oiseaux migrateurs, qui pour parcourir de « longues distances » (migration, quête de nourriture, parades aériennes, etc.), doivent optimiser leurs déplacements en termes d'énergie dépensée, de temps, (etc.), comme par exemple la formation en forme de **V** présentée dans la Figure suivante :



Figure II.11 : Volée d'Anser en formation en V

La population dans l'algorithme PSO est nommée essaim, chaque individu du groupe est dit particule. Le déplacement de toute particule (comme indiqué ci-dessus) est régi par des règles et conditions bien spécifiques, influencé par le mouvement des autres particules du voisinage.

Dans un tel contexte ce déplacement à une signification et doit parallèlement répondre à une logique, fondement même du PSO. Il consiste à chercher un optimum dans un voisinage donné, ce déplacement est influé par les trois composantes suivantes :

- Une composante d'inertie : la particule s'efforce de suivre instinctivement son cap de déplacement.
- Une composante cognitive : la particule fait tout pour se diriger vers la meilleure position rencontrée jusqu'à présent.
- Une composante sociale : la particule s'inspire également de l'expérience, du parcours des autres particules, pour se diriger vers la meilleure position rencontrée par ses voisins.[23]

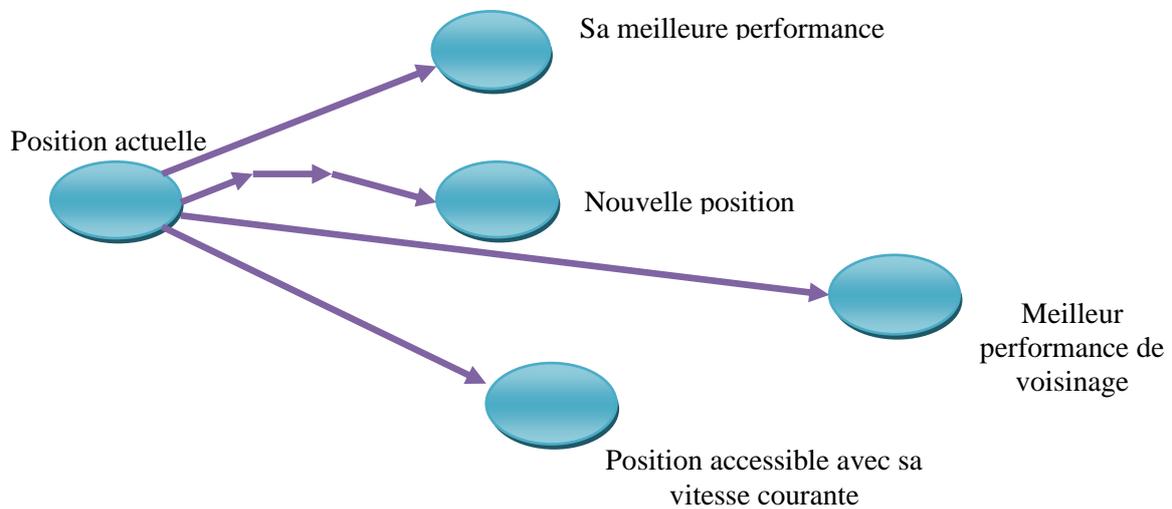


Figure II.12 : Stratégie de déplacement d'une particule [23]

➤ Utilisation de la PSO pour le MPPT :

Dans la recherche du point de puissance maximale on peut prendre le rapport cyclique D (qui définit le signal de commande du convertisseur DC/DC) à la place de la position de la particule x , la variation du rapport cyclique ΔD comme étant la vitesse du déplacement v , et la fonction fitness étant la puissance correspondante à chaque rapport cyclique, en résumé :

Les équations d'évaluation sont :

$$D_i(t + 1) = D_i(t) + \Delta D_i(t + 1) \quad , i \in \{1, \dots, n_p\} \quad (\text{II.13})$$

$$\Delta D_i(t + 1) = w \Delta D_i(t) + c_1 r_1 (D_{op_i} - D_i(t)) + c_2 r_2 (D_{op_g} - D_i(t)) \quad (\text{II.14})$$

Où,

$D_i(t+1)$: Le rapport cyclique de la particule i à l'instant $(t+1)$;

$D_i(t)$: Le rapport cyclique de la particule i à l'instant t ;

$\Delta D_i(t+1)$: La variation du rapport cyclique de la particule i à l'instant $(t+1)$;

$\Delta D_i(t)$: La variation du rapport cyclique de la particule i à l'instant t ;

Dop_i : Le meilleur rapport cyclique de la particule i ;

Dop_g : Le meilleur rapport cyclique global (de toutes les particules de l'essaim).

A chaque itération on détermine la puissance correspondante à la position de chaque particule de l'essaim, on définit alors la fonction Objectif «Fitness » qui donne le poids chaque rapport cyclique (position d'une particule), la position est meilleure si la puissance correspondante est supérieure, on peut donc écrire :

$$\text{Si } P(D_i(t + 1)) > P(Dop_i) \Rightarrow Dop_i = D_i(t + 1)$$

$$\text{Si } P(D_i(t + 1)) > P(Dop_g) \Rightarrow Dop_g = D_i(t + 1)$$

Le logigramme de la Figure II.13 donne les étapes de la poursuite du MPP avec PSO.

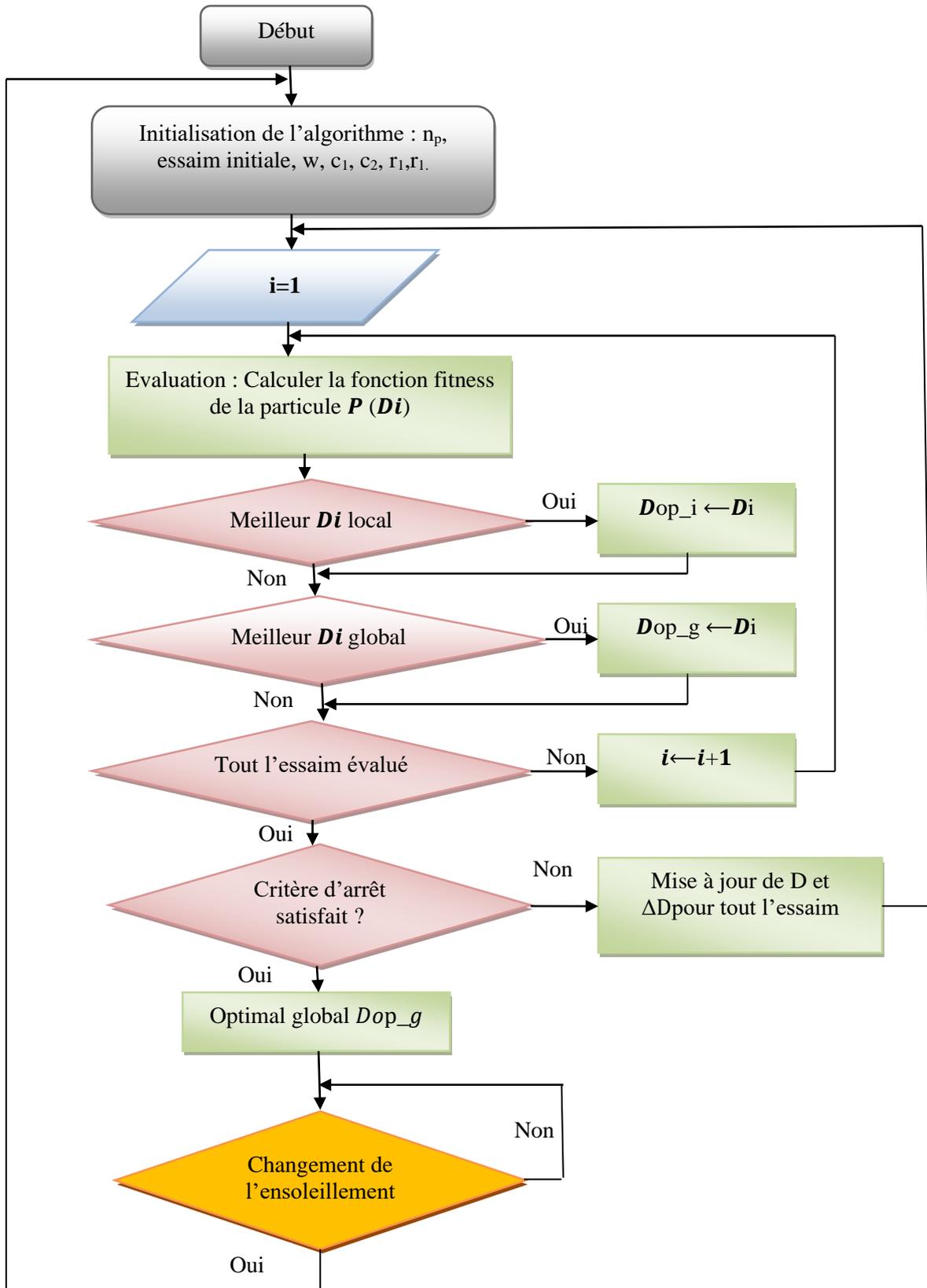


Figure II.13 : Organigramme de la MPPT par PSO

II.3. Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié la partie la plus importante d'optimisation d'un système photovoltaïque la poursuite du point maximum de puissance, nous avons commencé par la présentation du concept d'une commande MPPT et le principe de la recherche du point de puissance maximale, on a vu que l'adaptation optimale se produit pour un seul point de fonctionnement particulier, nommé Point de Puissance Maximal (PPM).

Puis afin d'améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques, différents algorithmes de commandes intelligentes ont été étudiées pour la poursuite du point de puissance maximale. Dans ce travail nous avons détaillé la méthode dite 'perturbation et observation' puis nous avons cité et expliqué l'algorithme 'd'incrément de la conductance puis la méthode basée sur la logique floue.

La conception d'un algorithme MPPT à base de logique floue n'est pas compliquée si elle est méthodiquement réalisée, elle doit absolument être faite de façon itérative et exige une certaine expérience. C'est pourquoi, le développement d'un algorithme MPPT à base de logique floue requiert du savoir et du savoir-faire dans le domaine photovoltaïque.

En résumé, l'utilisation d'un type de commande MPPT par rapport à une connexion directe doit apporter un gain énergétique et économique quantifiable. Il est important de préciser qu'il n'existe pas de standard international qui définit comment il faut mesurer les performances d'une commande MPPT.[3]

CHAPITRE III : Simulation et résultats

III.1. Introduction

Dans le but de pouvoir visualiser les caractéristiques de sortie des méthodes MPPT sous l'effet d'ensoleillement total et partiel il faudra faire la schématisation électrique de ce phénomène pour cela l'environnement MATLAB/SIMULINK est convenable à faire cette simulation.

Le logiciel MATLAB et son extension graphique associée SIMULINK font partie d'un ensemble d'outils intégrés au traitement du signal, présentent la possibilité de simuler des systèmes à leurs états continus et discrets, il est donc bien adapté pour tester les commandes MPPT numériques. Ce chapitre est consacré à la simulation et l'étude comparative entre les méthodes de commande à fin d'obtenir de meilleurs résultats.

III.2. Simulation des parties du système photovoltaïque

III.2.1. Test sur un convertisseur DC/DC

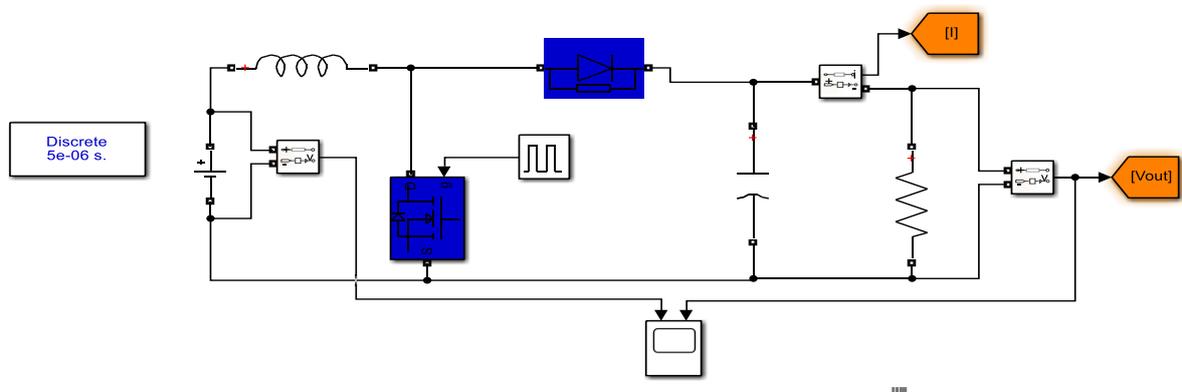


Figure III.1 : Schéma d'un BOOST sous MATLAB/SIMULINK.

Les résultats de simulation pour une fréquence $f=10e-3\text{Hz}$, sont illustrés sur les figures ci-dessus.

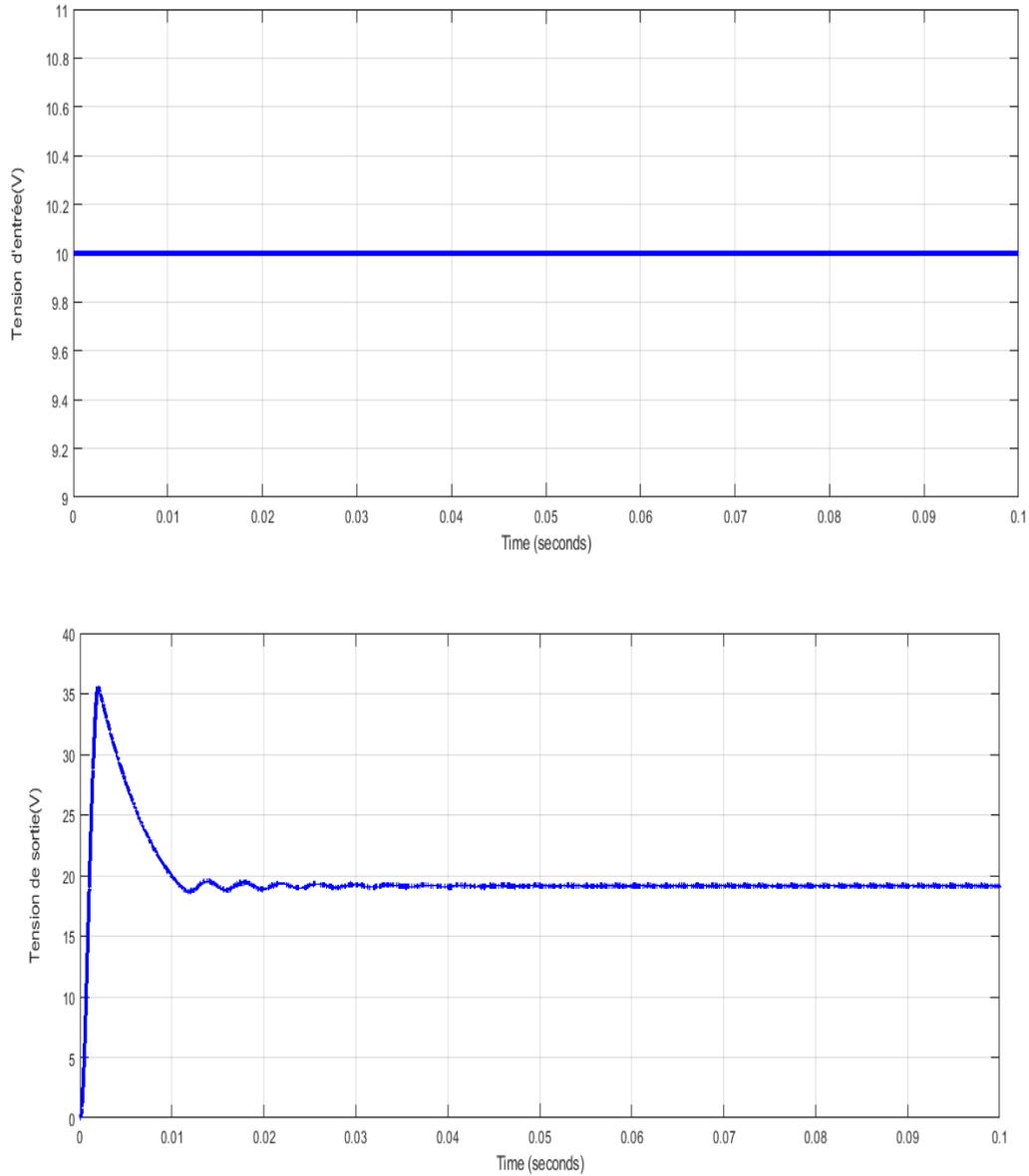


Figure III.2 : Courbes de la tension d'entrée et de sortie d'un BOOST.

Pour une tension d'entrée $V_e = 10V$ la tension de sortie est presque égale à $20V$, avec les chutes de tension au niveau du BOOST tel que $V_s \cong 38V$ se qui vérifie l'équation dont

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} V_e.$$

III.2.2. Simulation du panneau photovoltaïque

La figure suivante représente le modèle du panneau photovoltaïque étudié.

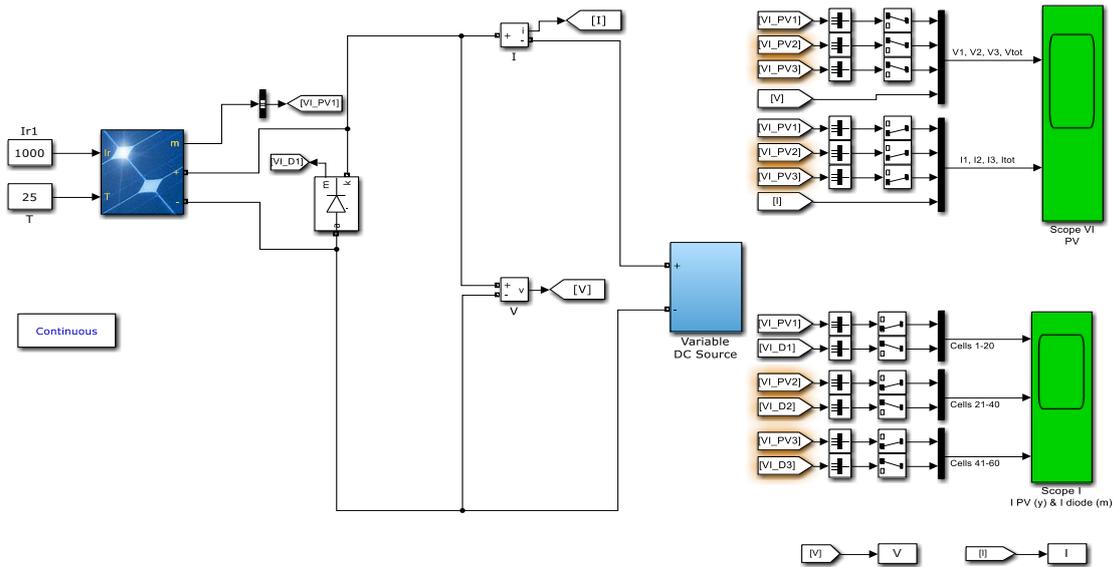


Figure III.3 : Schéma de simulation d'un panneau PV étudié.

La figure suivante représente les paramètres du panneau photovoltaïque de type ARRAY :

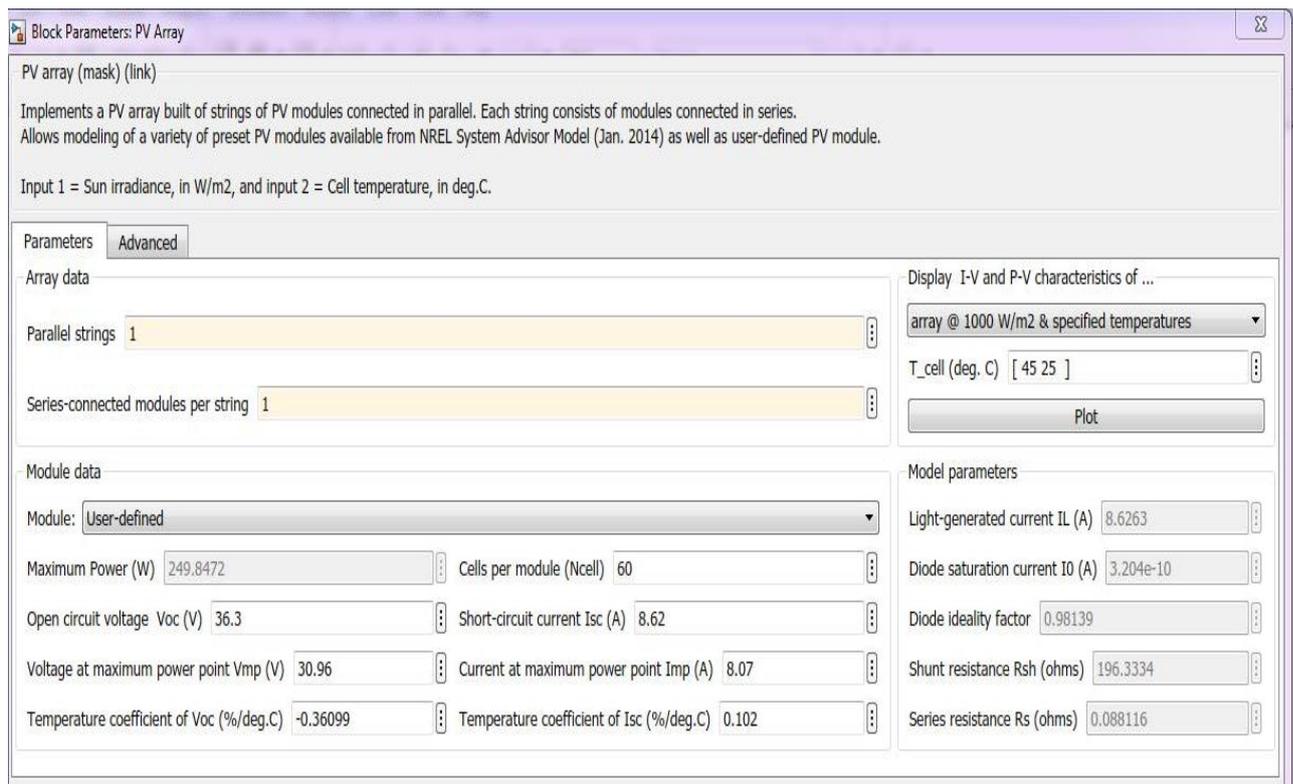


Figure III.4 : Paramètre de cellule PV.

Une série de simulation a été faite pour analyser le fonctionnement du panneau PV choisi, les résultats obtenus sont présentés sur les figures ci-dessous :

- La première courbe présente la caractéristique Courant-Tension du panneau

PV pour l'éclairement $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ et de température $T = 25^\circ\text{C}$.

- La deuxième courbe présente la caractéristique Puissance-Tension du panneau

PV pour l'éclairement $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ et de température $T = 25^\circ\text{C}$.

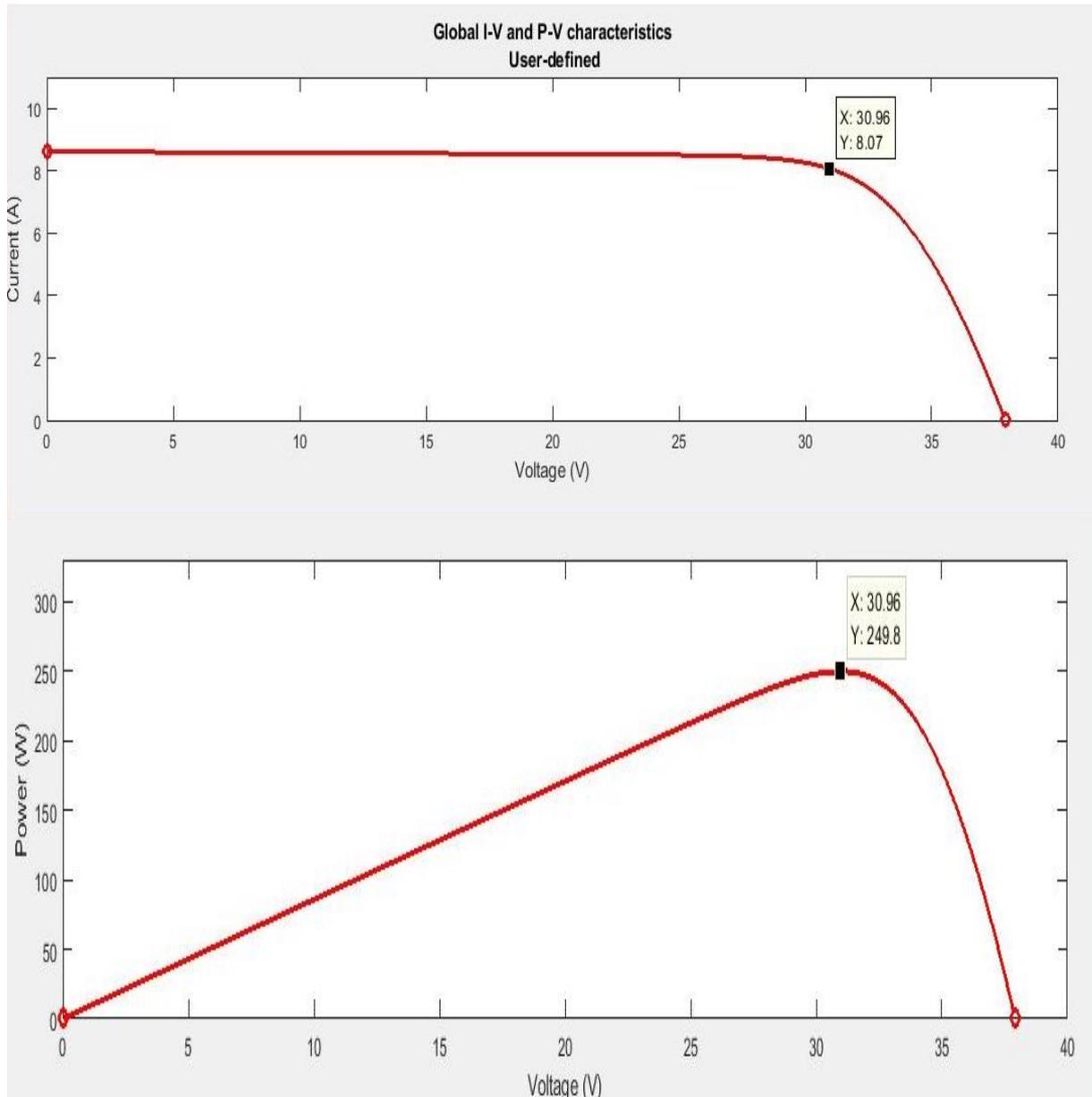


Figure III.5 : Caractéristiques du I-V et P-V du panneau utilisé.

Alors pour le bon fonctionnement du panneau PV le point maximum doit atteindre une puissance de $P_{\max} \approx 250\text{W}$, et $I \approx 8\text{A}$.

III.3. Simulation du système PV avec la commande MPPT

Pour effectuer des tests de fonctionnements sur les algorithmes modélisés précédemment on introduit le bloc de commande MPPT pour le système photovoltaïque ; les entrées sont le courant et la tension du panneau, la sortie représente le pas du rapport cyclique qui génère le signal de modulation PWM.

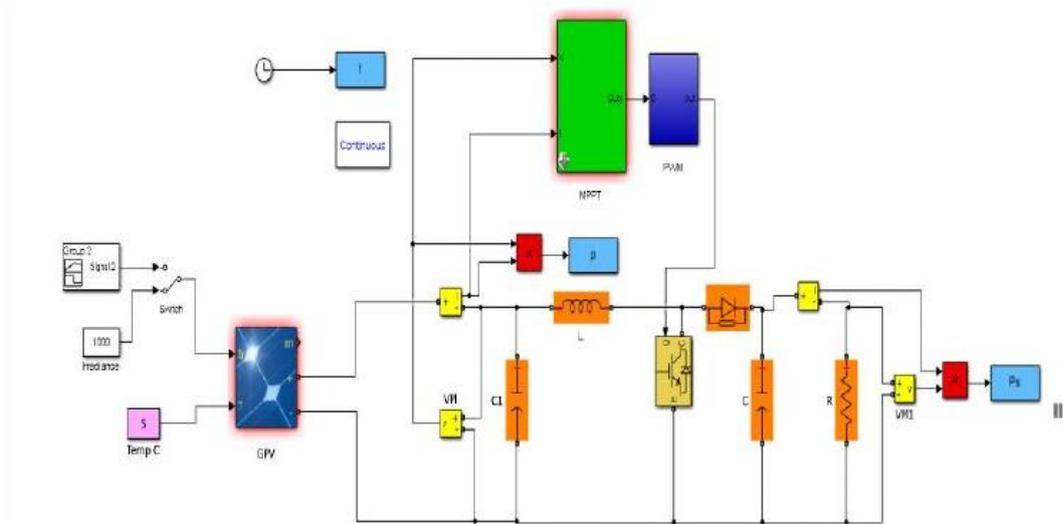


Figure III.6 : Modélisation d'un SPV sous MATLAB\SIMULINK

III.3.1. Méthodes classiques

III.3.1.1. Simulation de la Méthode P&O

Pour bénéficier de la puissance maximale et avoir une meilleure connexion entre le GPV et la charge, on présente l'une des méthodes de la commande MPPT qui est la méthode PO.

Le principe de la méthode est de calculer ΔP et ΔV afin de se rapprocher du PPM. On analyse la conception et la simulation d'une commande MPPT « perturbation et observation » qu'on a appliquée au GPV avec le convertisseur statique débitant sur une charge.

Nous avons simulé le fonctionnement d'un ensemble (GPV-BOOST-MPPT et une charge) sous des conditions atmosphériques fixes (un éclairement $1000W/m^2$ et une température de $25^\circ C$) et cela pour l'évolution des performances du système photovoltaïque de la commande MPPT du type PO.

Le montage suivant représente la simulation MATLAB/SIMULINK de la méthode PO :

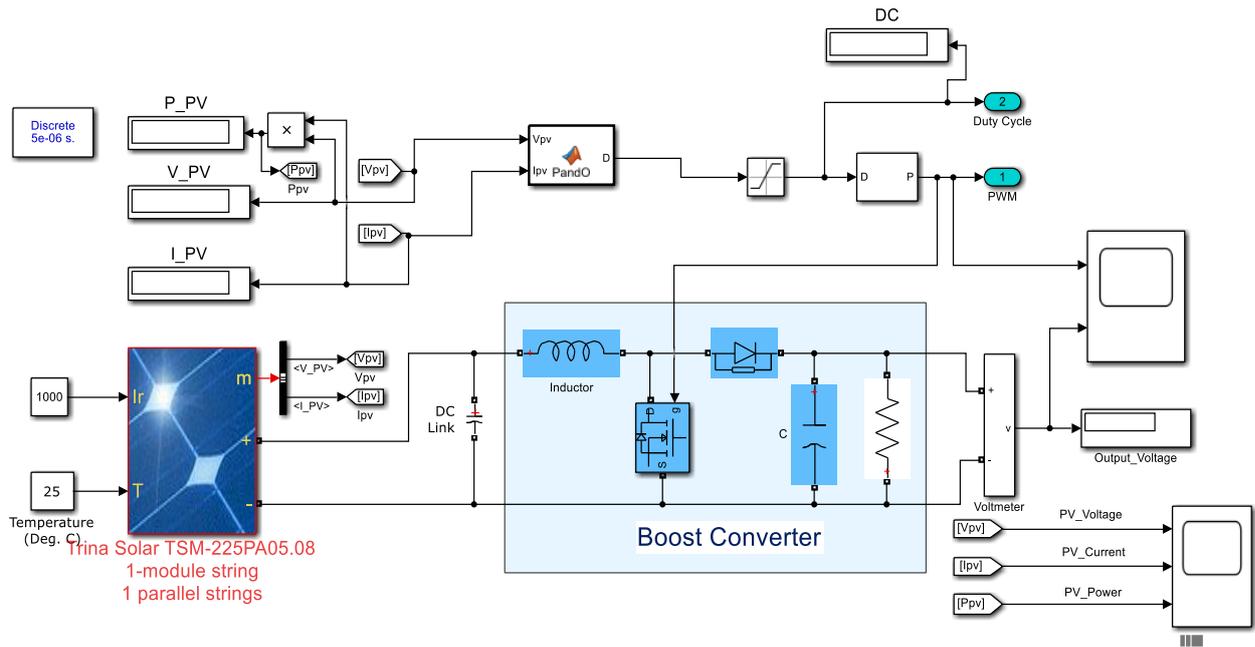


Figure III.7 : Schéma de simulation d'un panneau PV avec la méthode PO.

Les résultats de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque muni de la commande MPPT « perturbation et observation » sont représentés par la figure ci-dessous ce qui montre le comportement de l'algorithme PO par rapport la variation de ΔD aux conditions climatiques constantes : $E = 1000\text{W/m}^2$ et $T = 25\text{C}^\circ$.

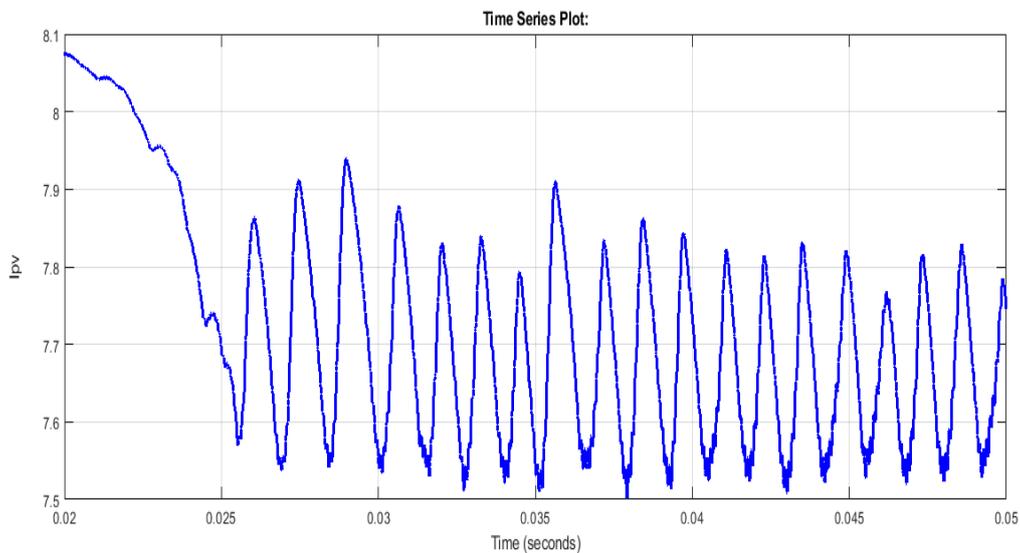


Figure III.8 : Courbe du courant du GPV

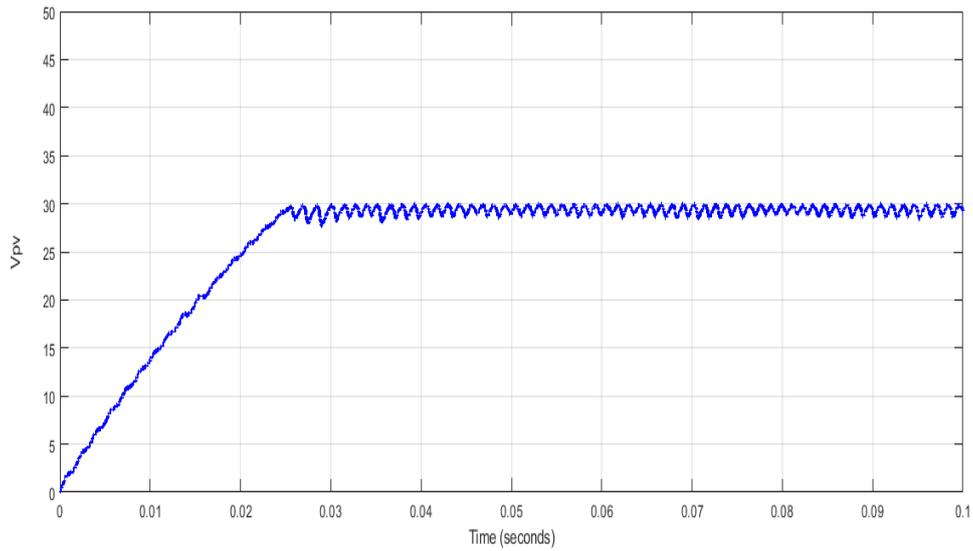


Figure III.9 : Courbe de tension aux bornes du GPV

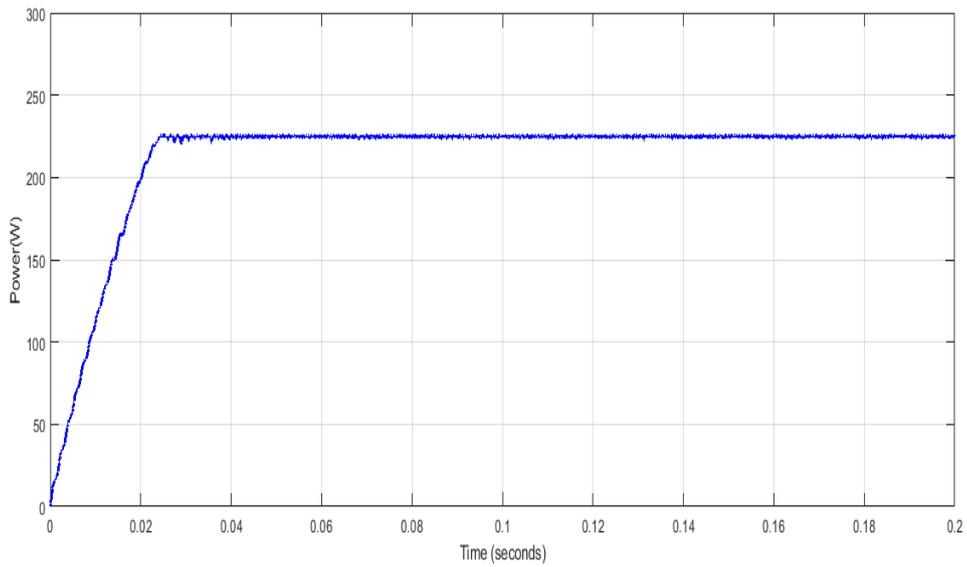


Figure III.10 : Courbe de puissance du GPV

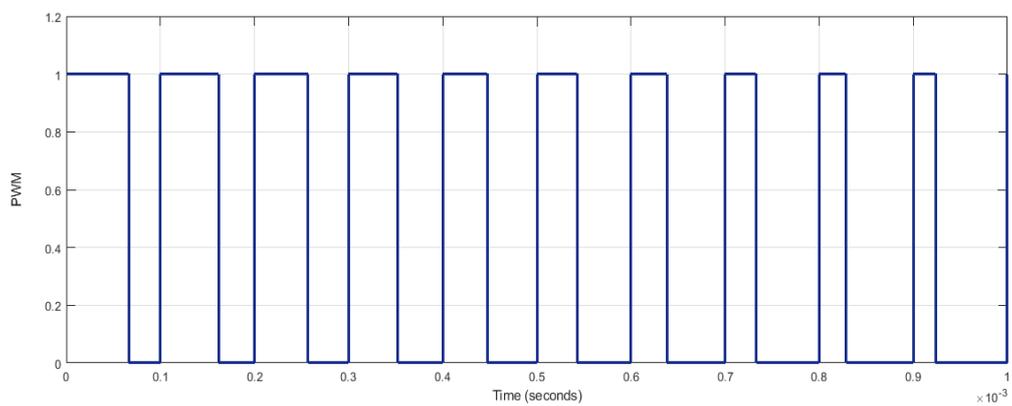


Figure III.11 : Signal de commande PWM

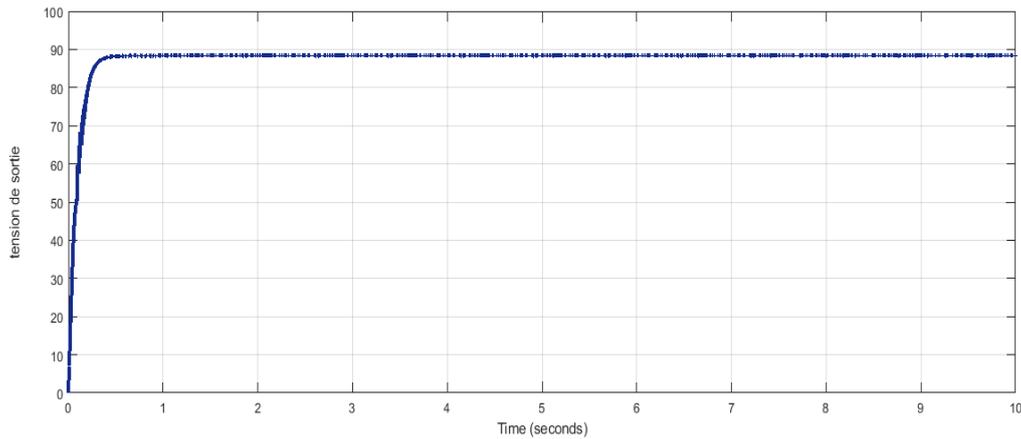


Figure III.12 : Courbe de tension de sortie

On remarque d'après la Figure III.10 que la puissance a atteint sa valeur maximale (225W), on voit aussi que la variation du pas d'incrémentation ΔD influe sur les oscillations autour du point de puissance maximale (PPM).

III.3.1.2. Simulation de la méthode INC

Cette méthode est basée sur l'évolution de la conductance et la variation de la conductance du générateur PV. Pour atteindre le PPM, il faut comparer à chaque fois la valeur de la conductance avec celle de l'incrément de conductance (dI/dV), s'il l'incrément de conductance est supérieur à l'opposé de la conductance on diminue le rapport cyclique.

Nous avons simulé le fonctionnement d'un ensemble (GPV-BOOST-MPPT et une charge) sous des conditions atmosphériques fixes (un éclairement $1000W/m^2$ et une température de $25^\circ C$) et cela pour une évaluation des performances du système photovoltaïque de la commande MPPT du type INC.

La structure du schéma de simulation d'un système PV associé à une commande MPPT du type INC est représentée par les Figures suivantes :

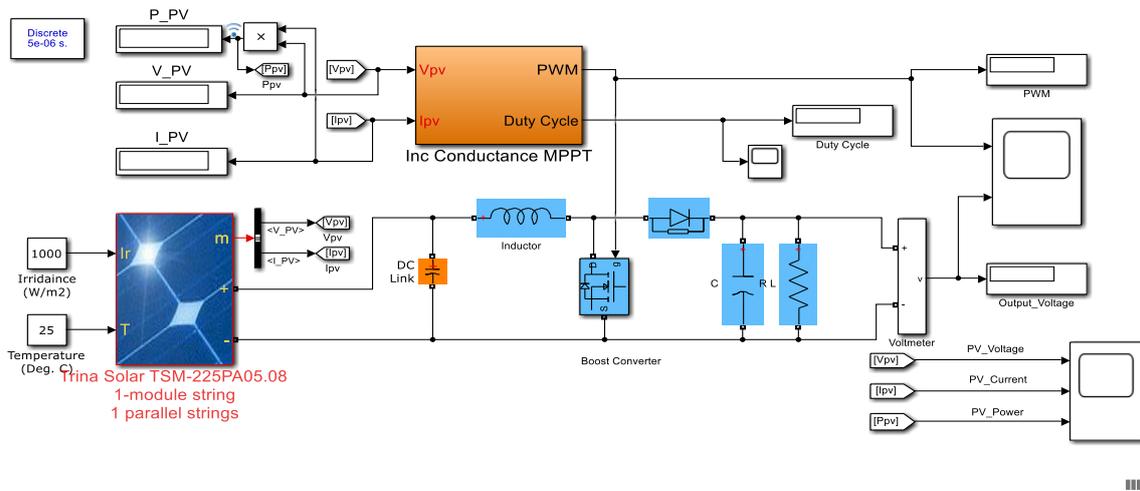
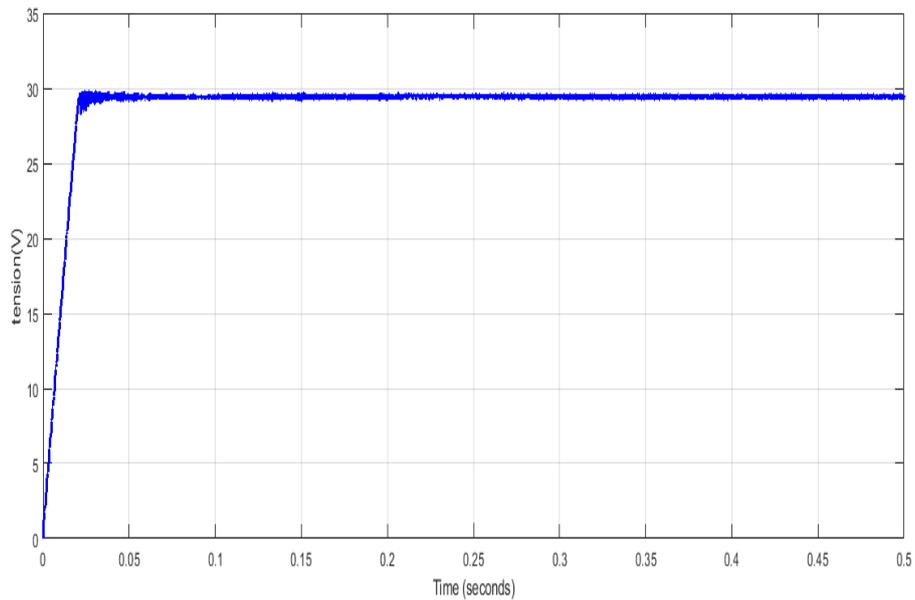


Figure III.13 : Schéma de simulation d'un panneau PV avec la méthode INC.

La figure ci-dessous montre le comportement de l'algorithme INC par rapport la variation de ΔD aux conditions climatiques constantes : $E = 1000\text{W/m}^2$ et $T = 25\text{ C}^\circ$ et ainsi que de leur variation.



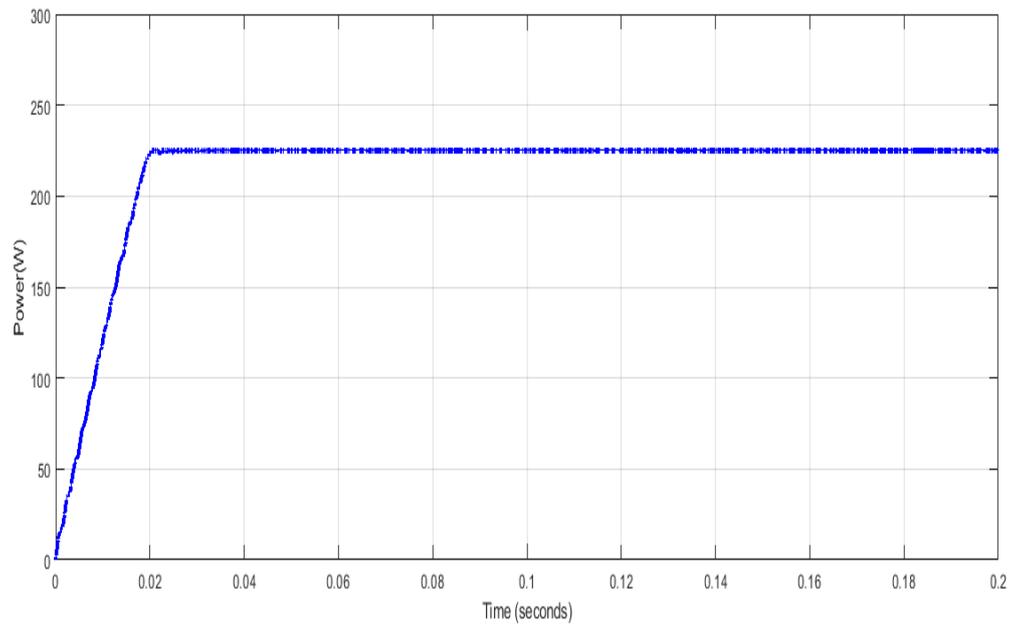
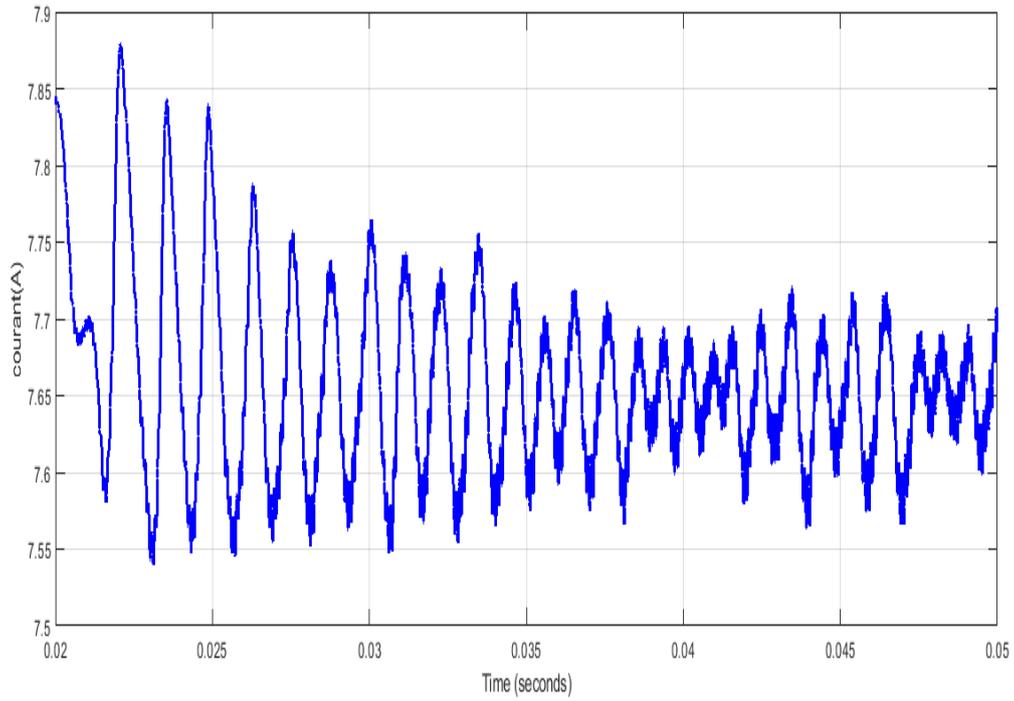


Figure III.14 : Courbe de latension, courant etpuissance aux bornes du GPV

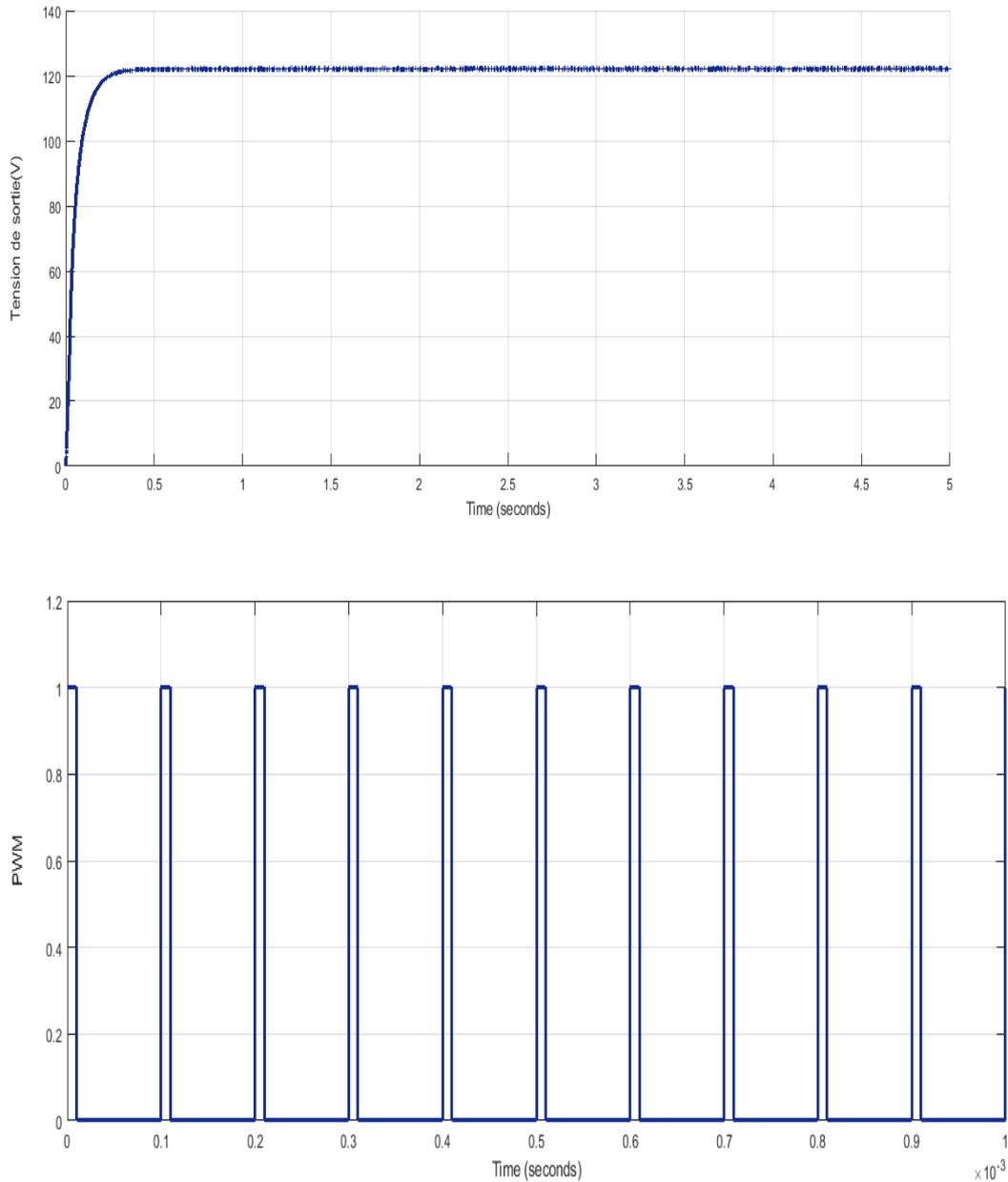


Figure III.15 : Courbe de tension de sortie et du signal PWM.

D'après les figures précédentes on voit que la puissance atteint 225W, on remarque aussi que la variation du pas d'incrément ΔD influe sur les oscillations autour du point de puissance maximale (PPM), et aussi que le système avec la commande INC, donne les mêmes résultats que la méthode PO dont on a utilisé presque les mêmes paramètres de la commande PO. On note aussi avec la diminution du pas du rapport cyclique, les oscillations autour du point de puissance maximale diminuent ce qui rend le système plus stable.

Les résultats obtenus montrent l'efficacité de la commande dans la poursuite du point de puissance maximale. Parlant de la stabilité du système, on note que si le pas du rapport cyclique est grand l'algorithme MPPT répondra rapidement au changement des conditions de fonctionnement du système, mais les pertes seront accrues dans la stabilité.

Nous constatons aussi que la technique INC présente des oscillations autour de PPM avec une amplitude plus grande que celle de la Méthode PO, car il est difficile de remplir la condition $dp/dv=0$.

III.3.2. Méthodes évolués

III.3.2.1. Simulation de la Méthode logique floue

Précédemment nous avons optimisé les deux commandes PO et INC, le critère adonné des réponses satisfaisantes avec beaucoup de similarités en régime permanent, néanmoins pour certaines réponses le régime transitoire été moins performant. Depuis l'évolution des microcontrôleurs et des capacités des calculs, la commande par logique floue est la plus populaire.

La technique à commande numérique de MPPT floue a été simulée en utilisant un convertisseur DC-DC sous un environnement MATLAB/SIMULINK, la figure suivante montre le schéma équivalent

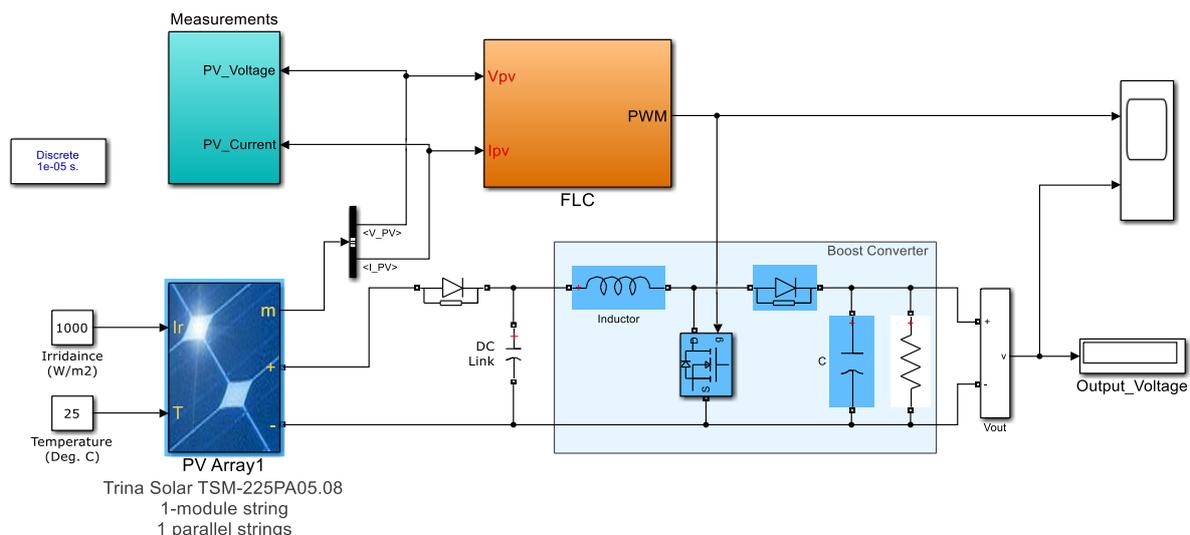


Figure III.16 : Schéma de simulation d'un panneau PV avec la méthode logique floue

Sous les conditions atmosphériques fixes (un éclairement 1000W/m^2 et une température de 25°C) le système photovoltaïque avec la commande de la logique floue a été simulé avec l'ensemble (GPV-BOOST-MPPT et une charge) pour l'évolution de ses performances. Les résultats de la simulation sont illustrés sur la courbe suivante :

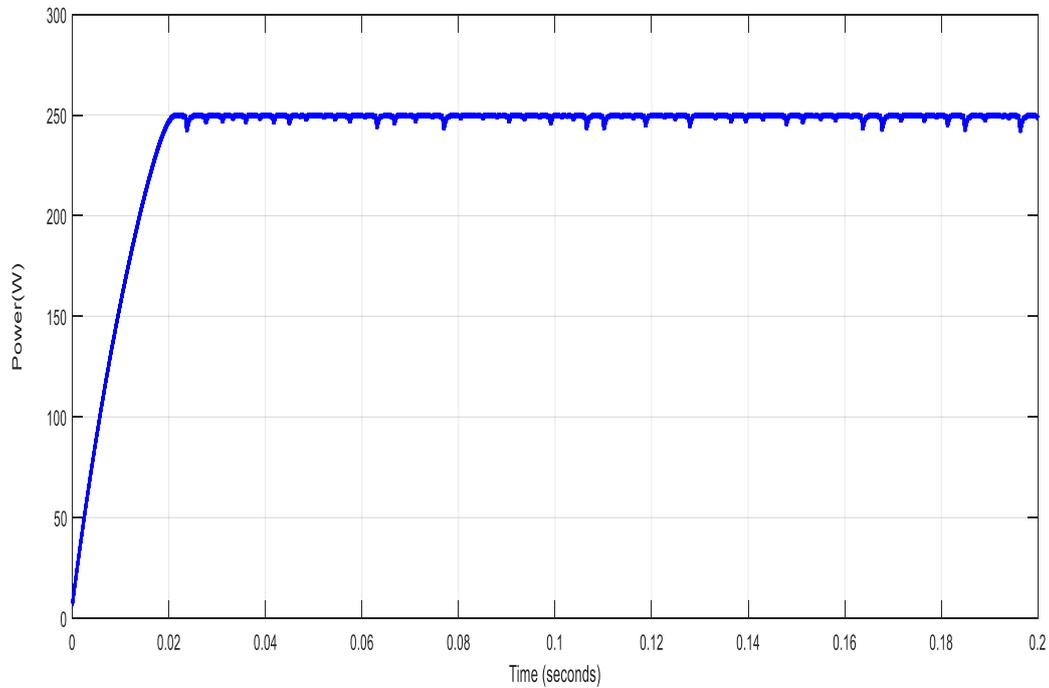


Figure III.17 : Courbe de puissance aux bornes du GPV

On voit bien à partir de la courbe obtenus que le contrôle à base de la logique floue répond correctement aux caractéristiques du panneau. La puissance électrique générée par le panneau solaire est toujours maintenue à sa puissance maximale

III.3.2.2. Simulation de la Méthode PSO

Les difficultés rencontrées dans la conception des contrôleurs flous nous a guidé à nous orienter vers leur optimisation. Nous allons essayer dans la suite de ce travail de trouver les fonctions d'appartenances optimales en utilisant la méthode dite *partical swarm optimization* (PSO).

Le schéma suivant représente la simulation de la méthode PSO :

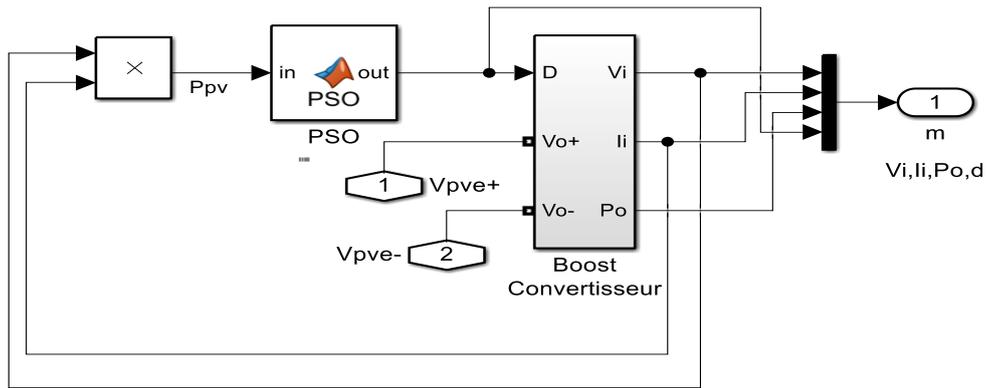
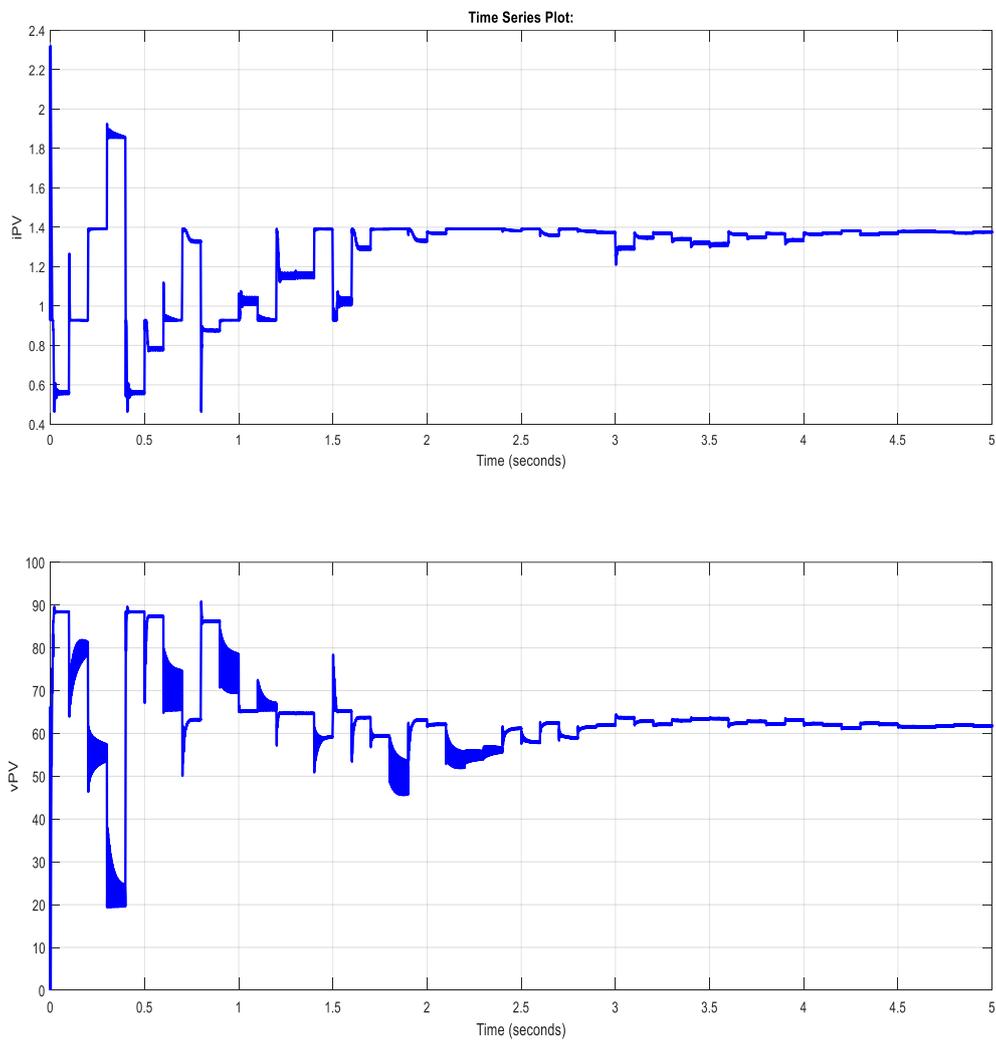


Figure III.18 : Schéma de simulation de la méthode PSO



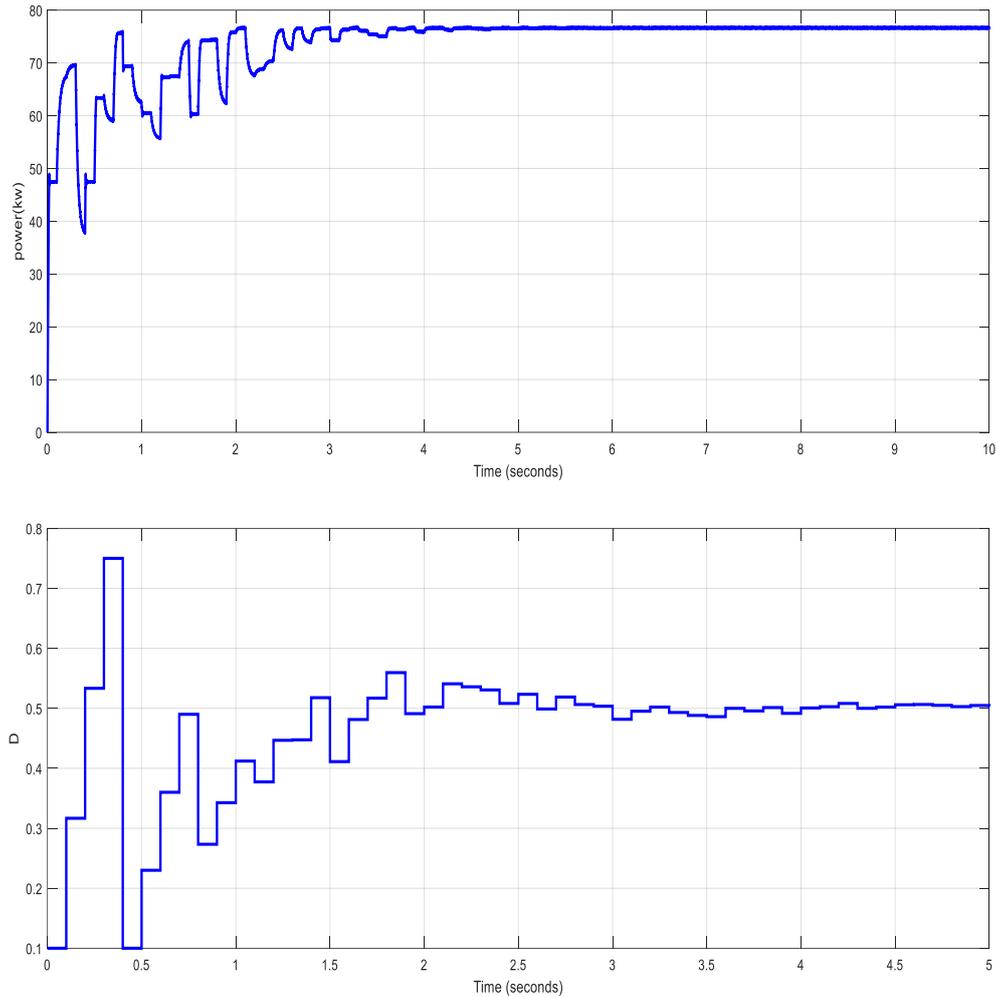


Figure III.19 : Courbe du courant, tension et puissance et rapport cyclique aux bornes duGPV

III.4. Panneau photovoltaïque avec ombrage partiel

III.4.1. Choix du panneau et des conditions atmosphériques

Nous présentons dans les figures suivantes les caractéristiques P-V et I-V des conditions variables, dans le cas d'ombrage partiel.

La première courbe () de la présente les caractéristiques Courant-Tension du panneau PV. Le premier panneau étant soumis à un éclairement de $G = 1000\text{W/m}^2$, le deuxième panneau soumis à un éclairement de $G = 300\text{W/m}^2$ et le dernier est soumis à un éclairement de 600W/m^2 . La température est fixée à $T = 25^\circ\text{C}$.

La deuxième courbe présente les caractéristiques Puissance-Tension du PV sous les mêmes conditions décrites en haut.

En analysant les caractéristiques P-V on constate qu'il existe deux maximum locaux et un seul global, et donc les conditions atmosphériques choisies rendent le problème de la commande MPPT multimodal et devient plus complexe

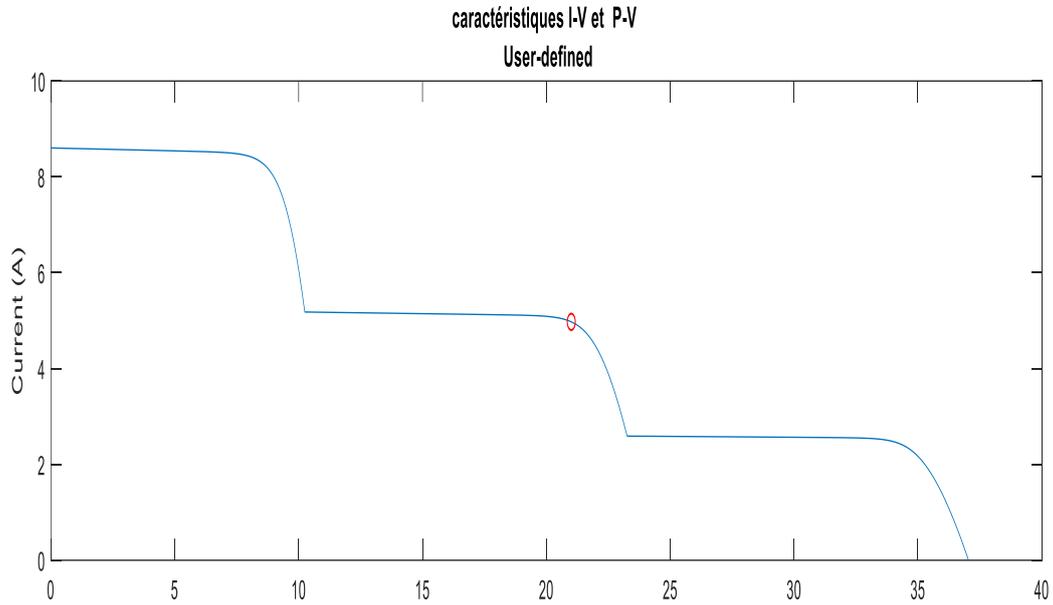


Figure III.20 : Courbe du courant du panneau avec l'ombrage partiel.

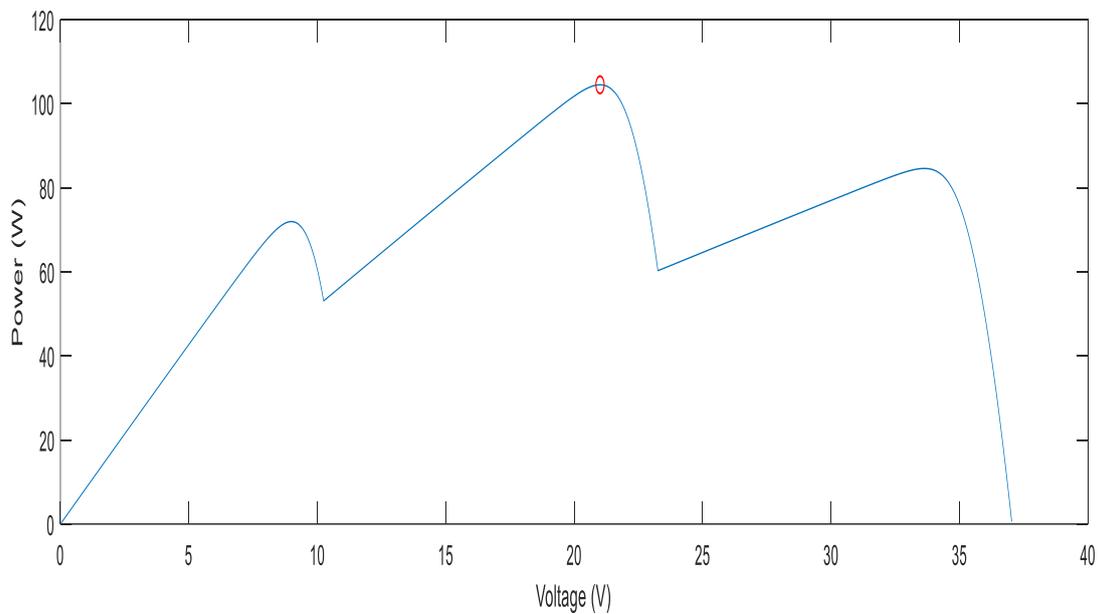


Figure III.21 : Courbe de la puissance du panneau avec l'ombrage partiel.

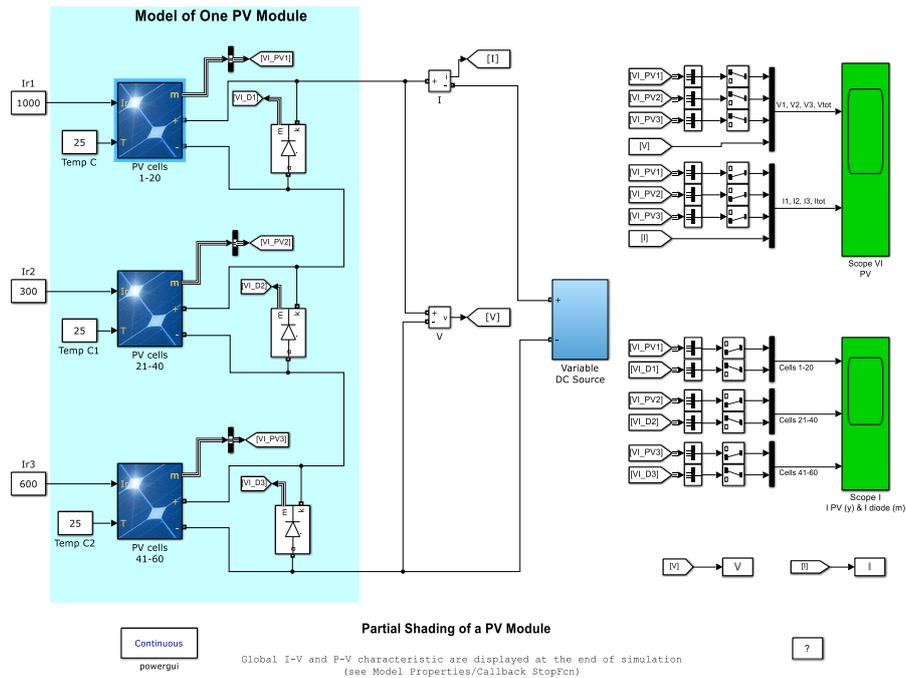


Figure III.22 : Schéma de simulation d'un panneau PV avec l'ombrage partiel.

III.4.2. Ombrage partiel du GPV avec la commande MPPT

Sur la Figure III.23 on présente le schéma des trois panneaux décrits en haut, connectés en parallèle en utilisant des diodes de protection.

On effectue plusieurs simulations pour les différentes méthodes utilisées dans ce mémoire, voir PO, INC et logique floue, cela pour connaître l'influence de l'ombrage partiel.

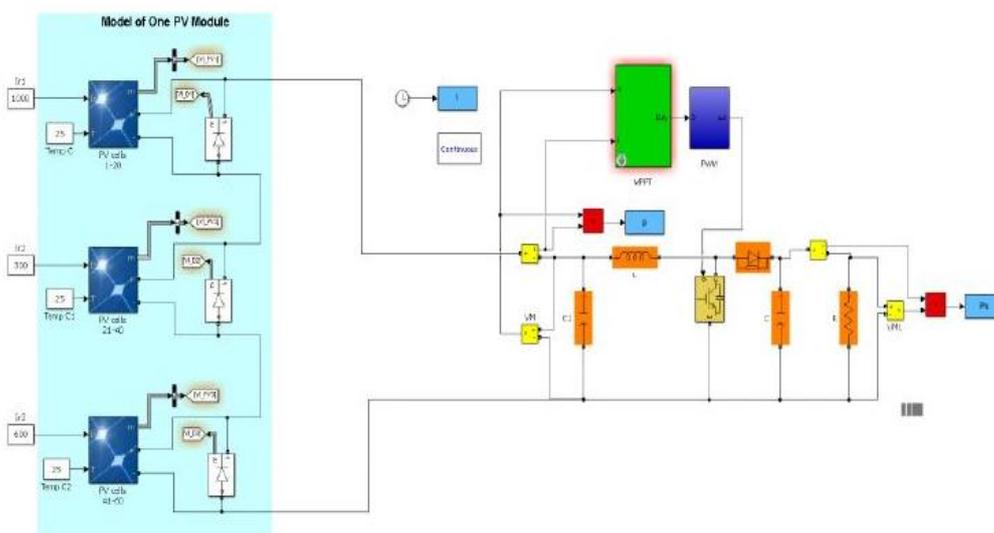


Figure III.23 : Schéma SIMULINK du système étudié

III.4.3. Commande PO sous l'ombrage partiel

Nous avons simulé l'ensemble du modèle du panneau solaire pour des conditions d'éclairagements variables pour tester la performance de l'algorithme PO.

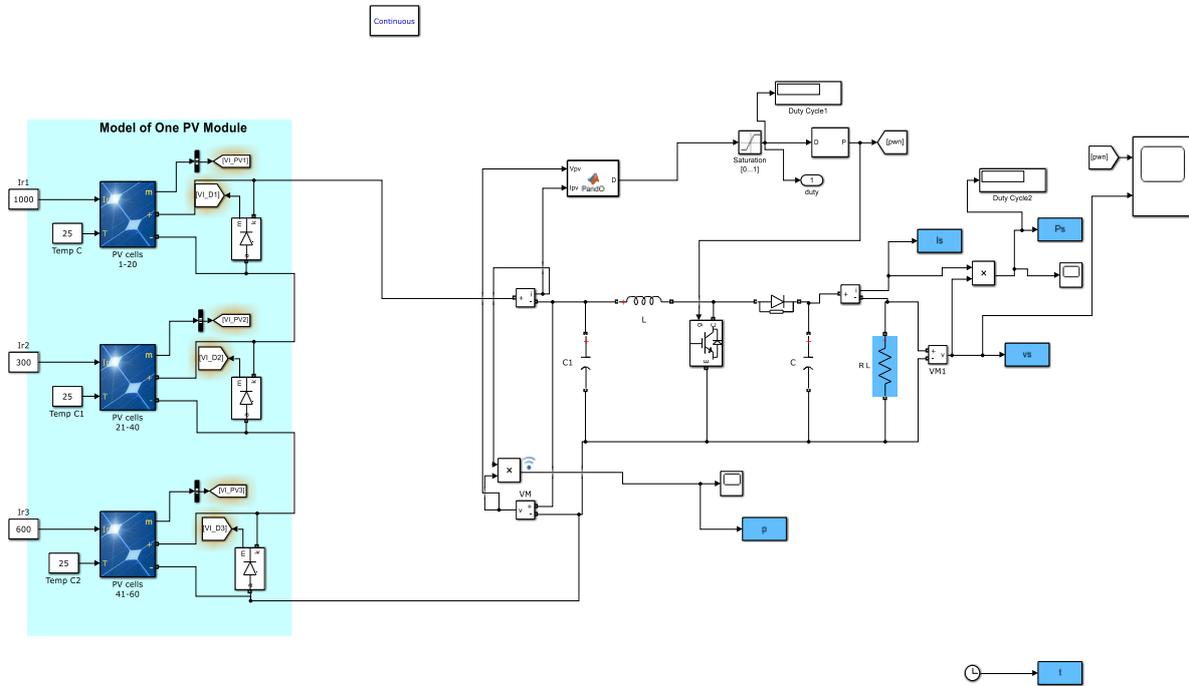


Figure III.24 : Schéma SIMULINK de l'algorithme PO sous ombrage partiel

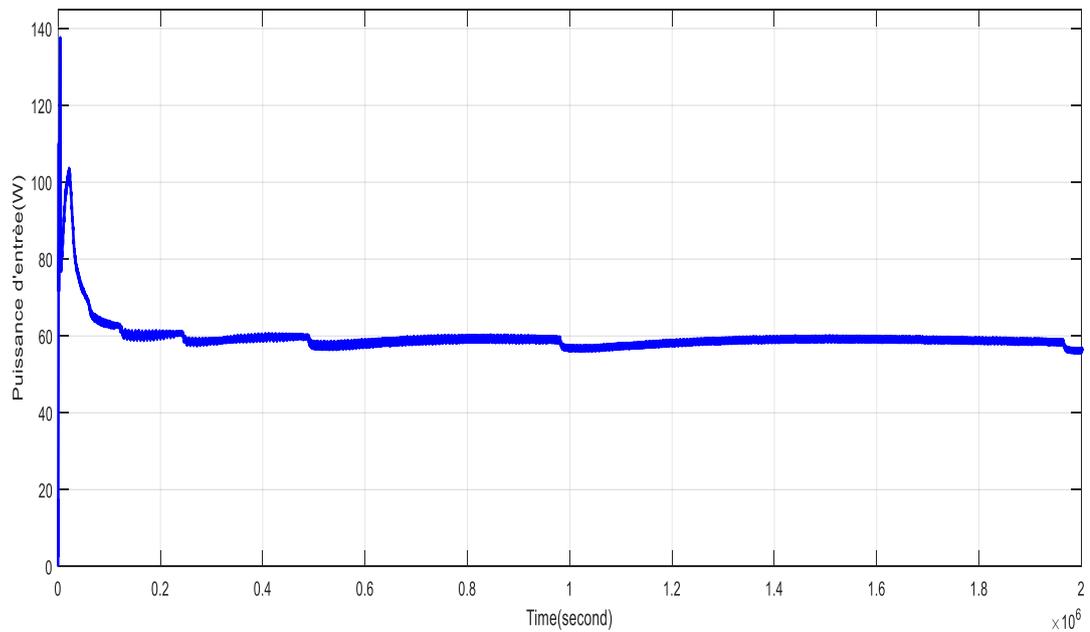


Figure III.25 : Courbe de puissance d'entrée du panneau avec l'ombrage partiel.

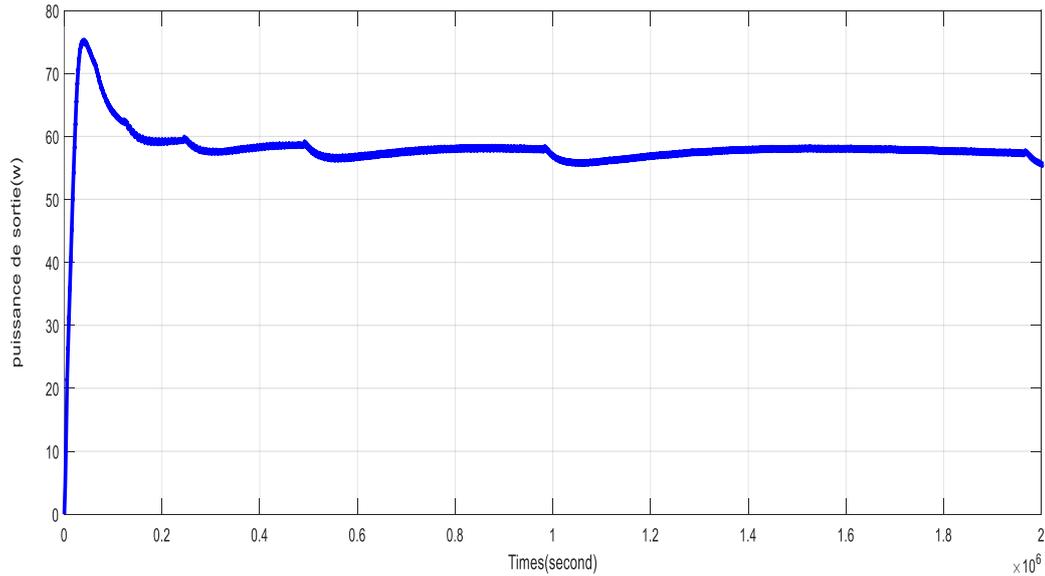


Figure III.26: Courbe de puissance de sortie du panneau avec l'ombrage partiel.

A partir des résultats obtenus par la Figure III.25 et Figure III.26, on constate que la puissance d'entrée suit la puissance de sortie ce qui explique le bon fonctionnement de la commande. On remarque que le panneau reste bloqué à une tension de $P \approx 59$ v donc qui converge vers l'optimum local. On constate alors que l'algorithme PO ne converge pas vers le PPM.

III.4.4. Ombrage partiel avec la commande INC

Nous avons simulé l'ensemble du modèle du panneau solaire pour des conditions d'éclairiments variables pour tester la performance de l'algorithme INC.

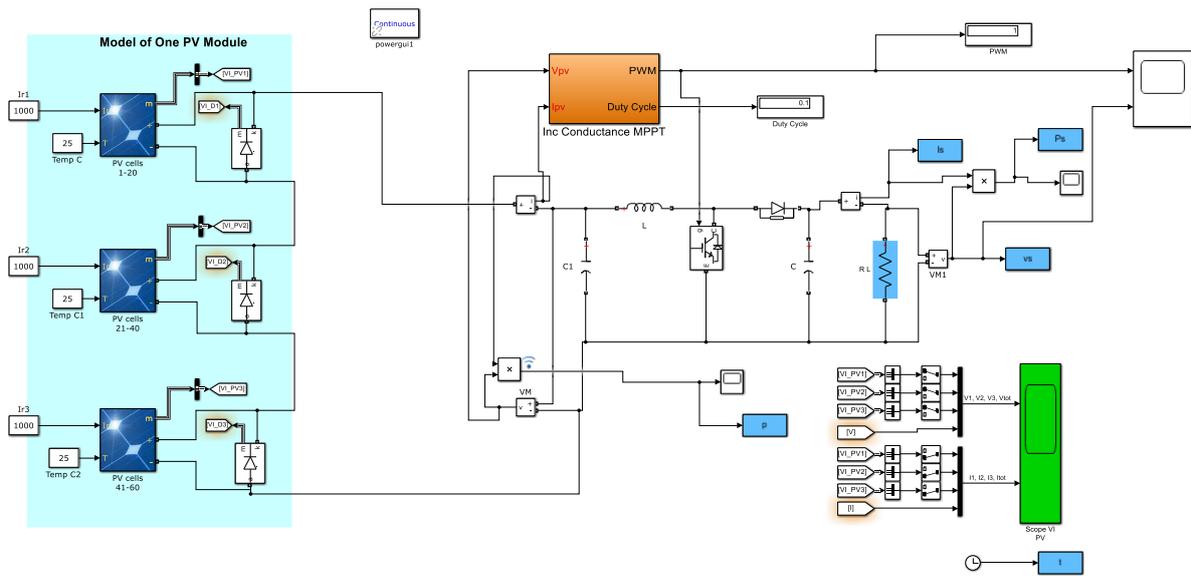


Figure III.24 : Schéma SIMULINK de l’algorithme INC sous ombrage partiel

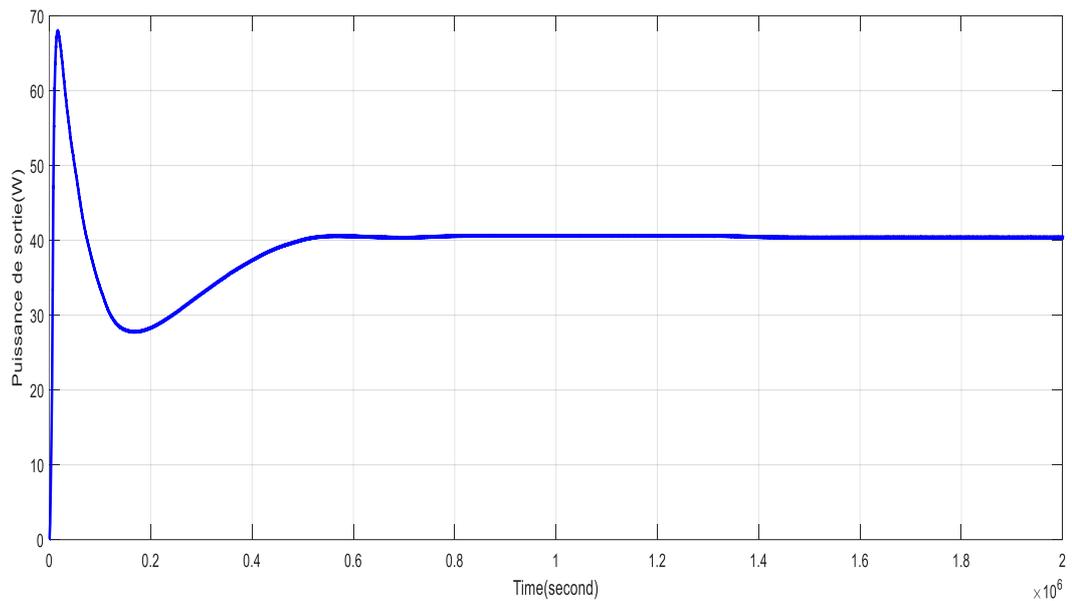


Figure III.27 : Courbe de puissance de sortie du panneau avec l’ombrage partiel

La Figure III.27 représente la puissance du panneau avec la technique INC. A partir des résultats de la courbe, on remarque que la méthode utilisée donne une puissance insuffisante. La puissance obtenue n’atteint pas le point PPM dont elle converge vers l’optimum locale. Si l’on compare ce résultat avec la technique PO, on remarque que les deux commandes donnent presque les mêmes résultats.

III.4.5. Ombrage partiel avec la commande PSO

La méthode d'optimisation PSO se base sur la collaboration des individus entre eux, ainsi grâce à des règles de déplacement très simple, les particules peuvent converger progressivement vers un maximum global.

Au départ de l'algorithme chaque particule est donc positionnée (aléatoirement ou non) dans l'espace de recherche du problème. Chaque itération fait bouger les particules en fonction de 3 composantes :

1. Sa vitesse actuelle V_k
2. Sa meilleure solution P_i
3. La meilleure solution obtenue dans son voisinage P_g

Dans cette section, nous allons présenter la commande PSO pour des conditions d'éclairements pour tester la performance de l'algorithme, les figures suivantes montrent les résultats obtenus.

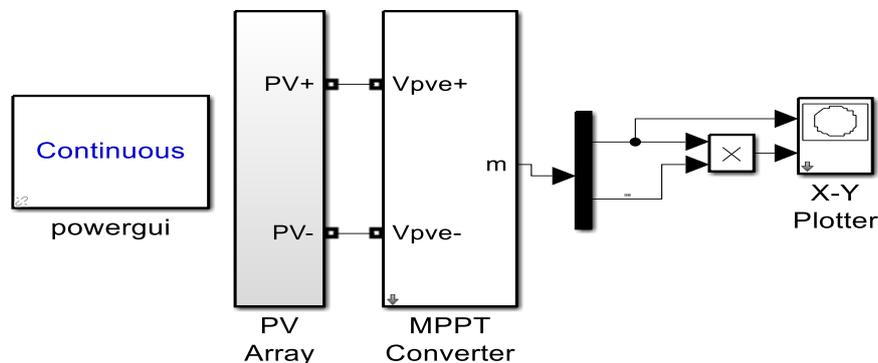
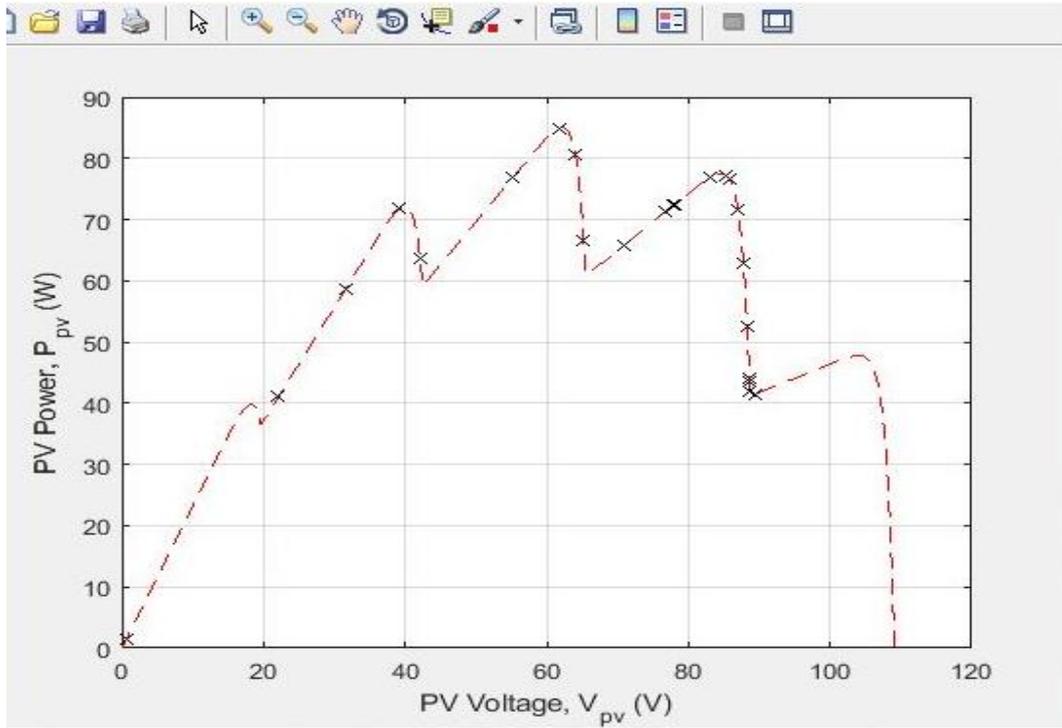
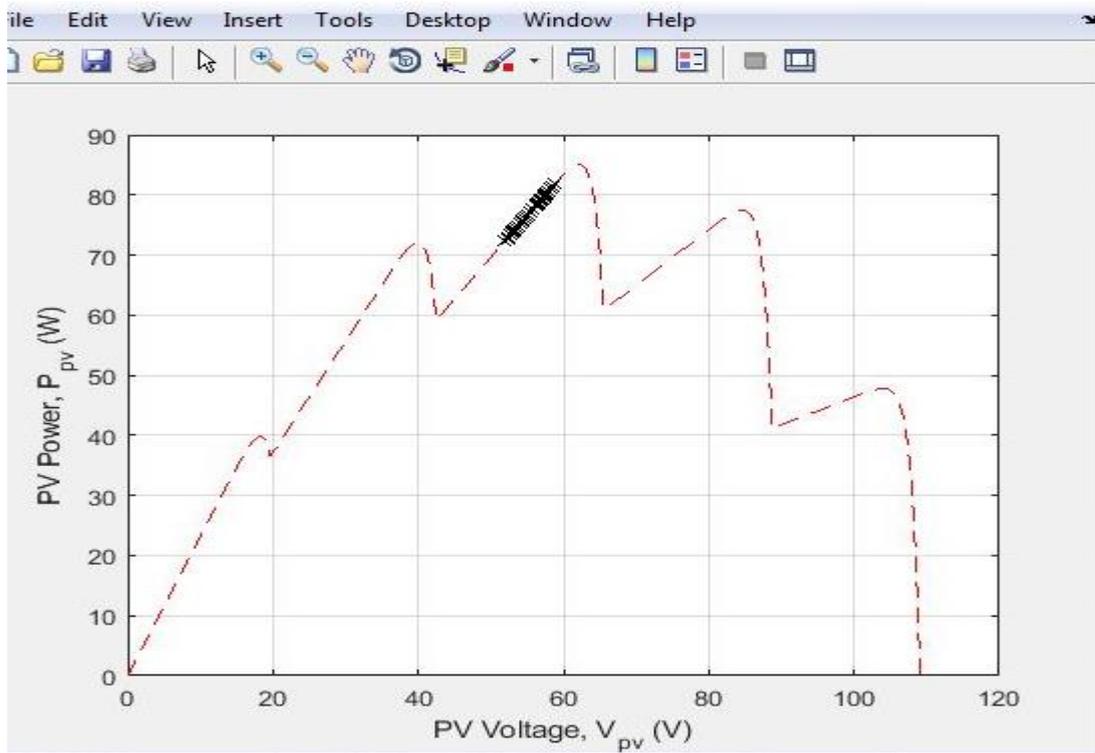


Figure III.28 : Schéma SIMULINK de l'algorithme PSO sous ombrage partiel

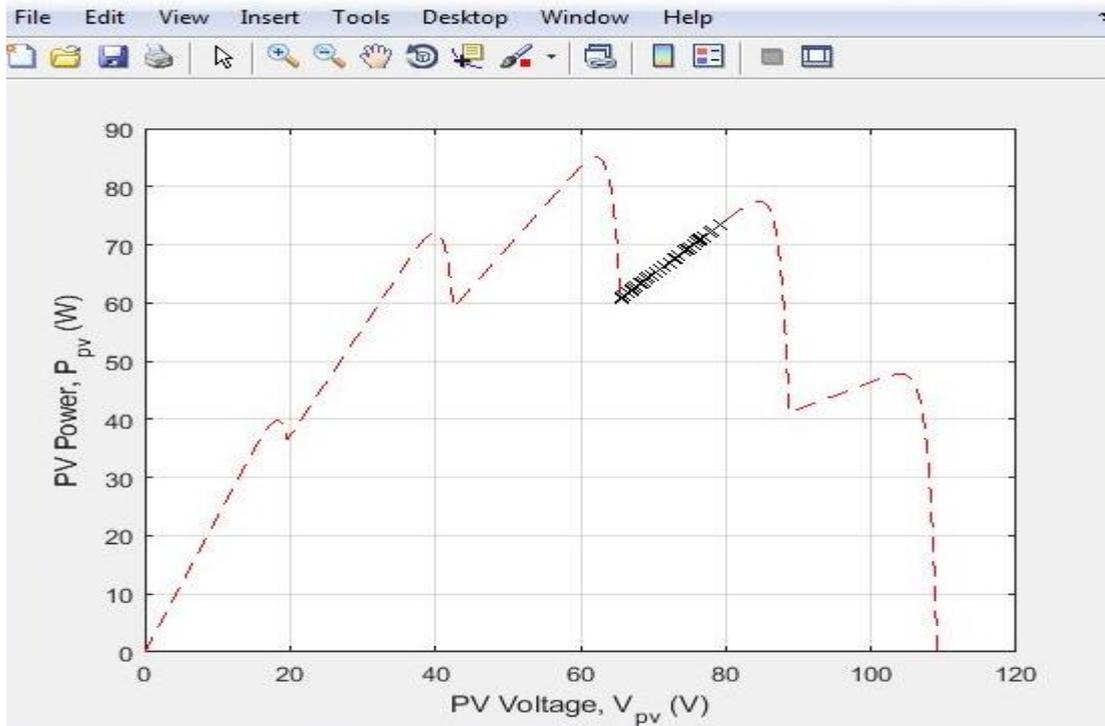
Les figures suivantes montrent les différentes étapes de simulation de l'algorithme PSO dont on voit très bien qu'à la fin converge vers le maximum global.



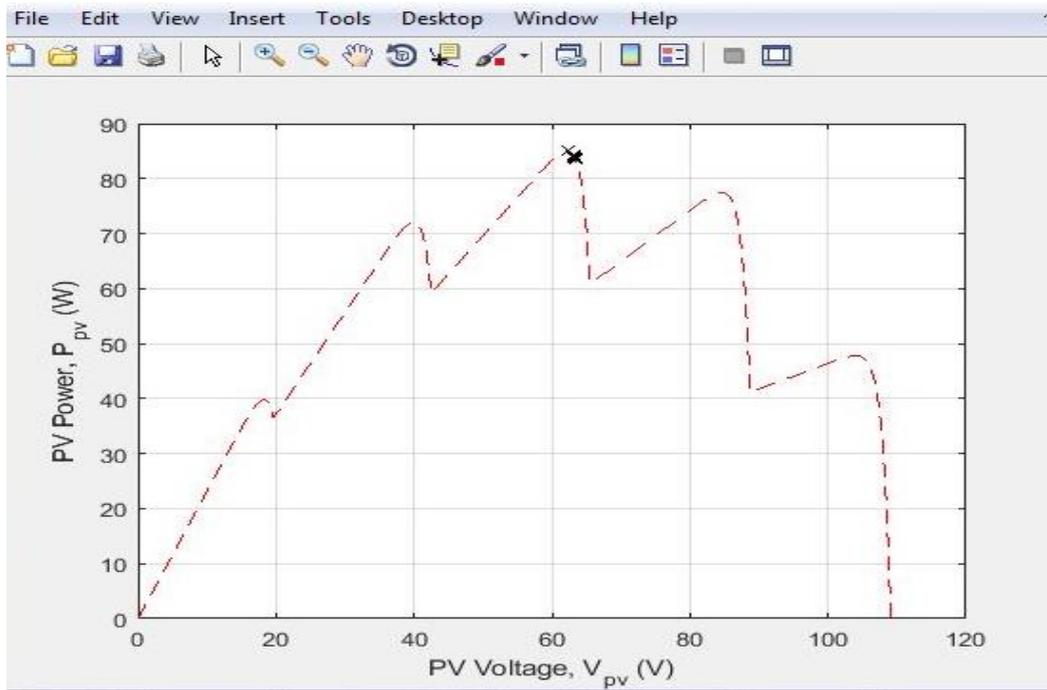
(a)



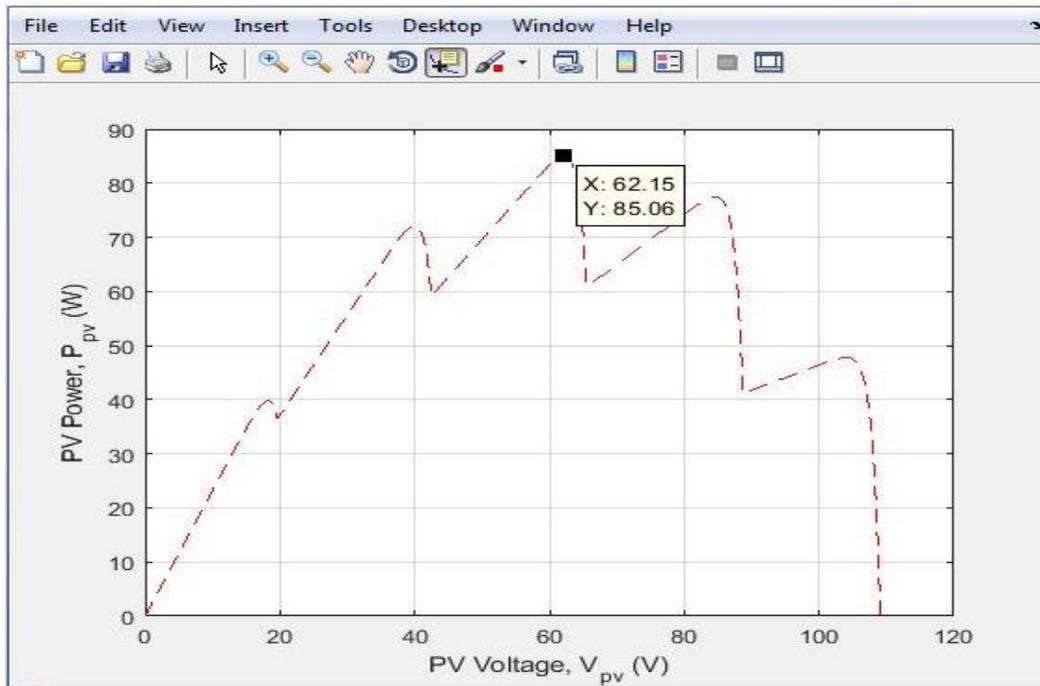
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure III.29 : Courbes de puissance de sortie du panneau avec l'ombrage partiel avec PSO (a,b,c,d,e)

La courbe de Figure III.29.(e) donne le résultat final de la simulation de l'algorithme PSO. La commande avec la PSO a convergé vers un maximum global dont $P=62.15\text{w}$ et $V=85.06\text{v}$ ainsi permettant au GPV de travailler sous sa puissance maximale.

III.5. Conclusion

Quatre méthodes de commande de MPPT appliquées à un générateur PV leurs résultats réalisés sous l'environnement MATLAB/SIMULINK sont présentés dans ce chapitre. Nous avons effectué une étude comparative entre quatre méthodes MPPT, le premier est la méthode PO, le deuxième est la méthode INC, la troisième est la commande floue puis la commande PSO.

A partir des résultats obtenus, nous constatons aussi que la technique INC présente des oscillations autour de PPM avec une amplitude plus grande que celle de la méthode PO, car il est difficile de remplir la condition $dp/dv=0$. La commande par logique floue présente des résultats très compétitifs par rapport aux deux autres méthodes. Puis nous avons opté pour l'optimisation par le PSO. Les résultats alors obtenus par l'utilisation du PSO et de la logique floue sont beaucoup plus prometteurs et donnent un rendement meilleur avec convergence au PPM.

Conclusion générale

Conclusion générale

Afin de répondre à la demande d'énergie, la révolution énergétique mondiale consomme beaucoup d'énergie, et la recherche a conduit à l'utilisation de l'énergie solaire (photovoltaïque) comme une source importante d'énergie électrique, qui peut être complétée et répondre à la demande d'énergie.

Nos recherches portent sur les performances et l'efficacité des systèmes photovoltaïques, et nous avons étudié différents algorithmes de contrôle MPPT pour trouver le meilleur point de puissance. Dans ce but, ce travail a contribué à la compréhension et à la mise en œuvre du contrôle MPPT, qui permet de suivre la puissance maximale dans différentes conditions atmosphériques à tout moment, n'importe où.

Pour atteindre cet objectif, après avoir introduit le système PV, on part de la modélisation mathématique du panneau Photovoltaïque. Le modèle obtenu formalise une série de cellules ou Selon les caractéristiques de l'équipe de recherche en parallèle

Dans le premier chapitre, nous avons d'abord introduit quelques concepts sur le rayonnement solaire, l'énergie solaire et l'énergie photovoltaïque. Dans un premier temps, nous avons annoncé le concept de systèmes photovoltaïques, décrit le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques en silicium, puis défini son efficacité et les différents types de cellules existantes. Nous avons également vu les mécanismes du système photovoltaïque (modules, panneaux), et différents types Système photovoltaïque existant.

Dans le chapitre 2, nous avons étudié la partie la plus importante de l'optimisation des systèmes photovoltaïques, c'est-à-dire la poursuite du point de puissance maximale. Tout d'abord, nous avons introduit le concept de contrôle MPPT et le principe de recherche de points. Nous avons vu que pour une puissance maximale, la meilleure adaptation se produit en un seul point de fonctionnement spécifique, le point de puissance maximale (PPM).

Par conséquent, l'impact de l'ombrage sur les panneaux solaires a un impact très important sur l'énergie liée à la zone d'ombrage. Ces problèmes caractéristiques liés à l'énergie photovoltaïque nous ont conduits à envisager les nouvelles technologies suivantes: Protection en cas d'éclairage irrégulier sur la batterie Et des améliorations, les problèmes liés à l'apparition de la protection ont été expliqués, et les solutions incluent l'ajout de diodes anti-recyclage et de dérivation.

Quant à la partie liée à l'amélioration de la commande MPPT (c'est l'objet de cette recherche), le principe de recherche du point de puissance maximale est présenté en détail au chapitre 2, et les différentes classifications de commandes sont données, qui sont présentées en détail. Pour MPPT, nous avons détaillé les quatre méthodes différentes les plus couramment rencontrées dans la littérature : (PO), (INC), (logique floue) et (PSO).

- Les commandes MPPT peuvent être classiques (P&O, INC) ou logiques floues évoluées ou PSO Permet la connexion optimale entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge, et l'oblige à toujours fonctionner au point de puissance maximum.
- L'existence de plusieurs types de commandes MPPT indique que ce domaine de recherche est en constante évolution, et qu'il est difficile de trouver une ou plusieurs solutions générales.

Le chapitre précédent était consacré à la simulation, présentait les résultats obtenus, discutés et comparés.

L'ombrage a montré un bon effet sur le fonctionnement de GPV. La technologie MPPT est utilisée pour comprendre le comportement du système, et il a été noté que pour le contrôle PO et INC, le système ne peut pas fonctionner à sa vraie PPM, de sorte que le système converge vers la puissance optimale locale.

Pour cette raison, on peut dire que les technologies classiques telles que PO et INC ne sont plus disponibles dans les ombres partielles, et il faut basculer vers des technologies avancées telles que FLC et PSO (nous l'avons détaillé en théorie). Recherchez le but du PPM réel.

Grâce à ce travail, nous espérons avoir une compréhension des technologies telles que l'optimisation de la puissance photovoltaïque sous ombres partielles et P&O qui poursuivent des points de puissance maximale.

D'un certain point de vue, il faut d'abord améliorer la structure physique du panneau photovoltaïque, afin que plusieurs couches dopées avec de meilleurs matériaux actifs deviennent intéressantes. Deuxièmement, la nouvelle technologie MPPT est utilisée dans la recherche mondiale PPM pour éviter la convergence vers un maximum local, optimisant ainsi la capacité de fonctionnement du GPV.

Bibliographie

- [1] D. F. BENSEDDIK Othmane, Etude et simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque, OUREGLA, 27 JUIN 2012.
- [2] B. FAIZA, Etude Et Simulation D'une Commande MPPT pour système PV, 2015/2016.
- [3] H. Djamel et B. Djohra, la poursuite du point de puissance maximale (MPPT)d'un système photovoltaïque sous ombrage total et partiel, 2017/2018.
- [4] C. électrique, «<https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaiques/>,» [En ligne].
- [5] e. d'energie, «<https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/panneaux-solaires-photovoltaiques/technique/>,» [En ligne].
- [6] e. solaire, «<https://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/schema-panneau-photovoltaique.html>,» [En ligne].
- [7] TOTORACC, «<https://lenergie-solaire.net/energie-solaire-photovoltaique/installations-photovoltaiques-isolees/>,» [En ligne].
- [8] B. Mustafa, Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome, 10 SEPTEMBRE 2015.
- [9] Z. Layachi, Etude et Commande Adaptative par les Techniques intelligentes des systèmes non linéaire, Application aux systèmes photovoltaïques, 27 NOVEMBRE 2017.
- [10] I. C. I. C. e. S. C. G. Notton, «Influence d'un ombrage partiel sur la production électrique d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin,» *Revue des Energies Renouvelables*, 29 MARS 2010.
- [11] EFFETS, «<https://www.trace-software.com/fr/les-effets-dombrage-sur-la-performance-des-panneaux-solaires/>,» [En ligne].
- [12] H. Slimane, Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie

- photovoltaïque, 10 Octobre 2018.
- [13] B. Meryem, Etude de la commande MPPT à incrémentation de la conductance appliqué aux panneaux solaire, 2015/2016.
- [14] B. Nassim et B. Smail, Commande directe par la méthode incremental conductance (Inc-cond) d'un panneaux photovoltaïque, 17 Septembre 2018.
- [15] L. Vechiu, Modélisation et Analyse de l'Intégration des Énergies Renouvelables dans un Réseau Autonome, 2005.
- [16] N. Pongratananukul, Analysis and Simulation Tools for Solar Array Power Systems, 2005.
- [17] S. M. I. a. P. L. C. S. M. I. Trishan Efram, Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques",, 2006.
- [18] B. Farid, Etude comparative entre quelques méthodes de poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques, 2012/2013.
- [19] H. B. B. H. C. J. H. Lee, Advanced incremental conductance MPPT algorithm with a variable step size", Power Electronics and Motion Control Conference,, Aug 2006.
- [20] C. Cédric, Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque, 15 Décembre 2008.
- [21] M. A. K. M. GUELLAL Amar, «La Commande MPPT Basée sur les Algorithmes Intelligents Destinée aux Applications Photovoltaïques,» *La Commande MPPT Basée sur les Algorithmes Intelligents Destinée aux Applications Photovoltaïques : Etude comparative et implémentation sur FPGA*, 25 octobre 2016.
- [22] A. B. H. S. B. B. H. M. A. B. Z. Ayache, «Commande MPPT et Contrôle d'un Système Photovoltaïque par la Logique Floue». *Commande MPPT et Contrôle d'un Systèmen Photovoltaïque par la Logique Floue*.
- [23] B. a. Anes, Gestion de spectre dans un réseau de radio cognitive en utilisant l'algorithmed'optimisation par essaim des particules, 23 JUIN 2015.
- [24] <https://images.app.goo.gl/3B3P79sqFVsJLmXD7>. [En ligne].

- [25] E. RENOVLANLES,
«<http://www.em.ucv.ro/eLEE/EN/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereSolaire/PanneauxPhotovoltaiques/Cellule/Parametres.htm>,» [En ligne].
- [26] [En ligne].
- [27] ombrage, «<http://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/ombrage.html>,» [En ligne].
- [28] K. A. BENBLIDIA Houssam, etude de l'effet de l'ombrage sur un système photovoltaïque, 2014/2015.

Résumé

Ce travail étudie les effets de l'ombrage complet et partiel sur les systèmes photovoltaïques. Nous utilisons différentes méthodes MPPT telles que les méthodes classiques telles que PO et INC, tandis que les méthodes avancées telles que PSO et FL est son impact sur les différents caractéristiques du GPV.

Nous nous intéressons à la recherche et à la simulation de l'effet d'ombre du GPV sous MATLAB / SIMULINK.

L'effet de ce phénomène sur les caractéristiques du panneau conduit à des changements significatifs du facteur de forme, affectant ainsi l'efficacité du GPV.

Mots clés: MATLAB/SIMULINK, ombrage, GPV, MPPT, PSO, FL, PO, INC.

Abstract

This work studies the effects of full and partial shading on photovoltaic systems. We use different MPPT methods such as classical methods such as PO and INC, while advanced methods such as PSO and FL is its impact on different characteristics of GPV.

We are interested in the research and simulation of the GPV shadow effect under MATLAB / SIMULINK.

The effect of this phenomenon on the characteristics of the panel leads to significant changes in the form factor, thus affecting the efficiency of the GPV.

Keywords: MATLAB / SIMULINK, shading, GPV, MPPT, PSO, FL, PO, INC.

ملخص

يدرس هذا العمل آثار التظليل الكامل والجزئي على الأنظمة الكهروضوئية. نحن نستخدم طرق MPPT المختلفة مثل الطرق الكلاسيكية مثل PO و INC، بينما الطرق المتقدمة مثل PSO و FL هي تأثيرها على الخصائص المختلفة لـ GPV.

نحن مهتمون بالبحث والمحاكاة لتأثير ظل GPV تحت MATLAB / سيمولينك.

ويؤدي تأثير هذه الظاهرة على خصائص اللوحة إلى تغييرات كبيرة في عامل الشكل، مما يؤثر على كفاءة GPV.

الكلمات الرئيسية: MATLAB / SIMULINK، التظليل، PO، INC، FL، PSO، MPPT، GPV.
