

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane Mira

Faculté de la Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et informatique industriel, Automatique et système

Thème

Techniques MPPT pour système photovoltaïque sous des conditions

Préparé par :

NASRI Mehdi

HAMMOUDI Kahina

Dirigé par :

A. BELKAID

Examiné par :

S. HADJI

F. YAHIAOUI

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

En premier lieu dieu merci pour la patience et le courage qui nous a attribué le long de ce travail.

Nous tenons à remercier monsieur le promoteur A. BELKAID pour sa disponibilité et de nous avoir fait découvrir ce domaine des énergies renouvelable.

On s'adresse nos remerciements au membre de jury d'avoir accepté de juger notre travail.

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.

Liste des abréviations

| | |
|-----------------|------------------------------------------|
| PV | Photovoltaïque |
| MPPT | Point de Poursuite de Puissance Maximale |
| GPV | Générateur Photovoltaïque |
| CPV | Cellule Photovoltaïque |
| I-V | Courant-Tension |
| P-V | Puissance-Tension |
| DC-DC | Continue /Continue |
| Pm | Puissance Maximale |
| PPM | Point de Puissance Maximale |
| PF | Point de Fonctionnement |
| I _{pv} | courant photovoltaïque |
| V _{pv} | Tension photovoltaïque |
| P _{pv} | Puissance photovoltaïque |
| P&O | Perturbation et Observation |
| INC | Incrémentation de la Conductance |
| PSO | Particle Swarm Optimization |

Sommaire

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction générale | 1 |
| CHAPITRE I :Généralités sur les systèmes photovoltaïque | 3 |
| Introduction..... | 4 |
| I.1. Energie solaire | 4 |
| I.2. Cellules photovoltaïque..... | 4 |
| I.3. Type des cellules..... | 5 |
| I.3.1. Cellule mono cristalline | 5 |
| I.3.2. Cellule Poly cristallin..... | 5 |
| I.3.3. Cellule amorphe | 5 |
| I.4. Effet photovoltaïque..... | 6 |
| I.5. Schéma équivalent et les caractéristiques de la cellule photovoltaïque | 6 |
| I.6. Effet de l’ensoleillement sur les caractéristiques I-V | 8 |
| I.7. Effet de la température sur les caractéristiques I-V et P-V de la CPV :..... | 8 |
| I.8. Module photovoltaïque | 9 |
| I.8.1 Association série des cellules photovoltaïque | 10 |
| I.8.2 Association parallèle des cellules photovoltaïque | 11 |
| I.8.3 Association hybride (en série et en parallèle)..... | 11 |
| I.8.4. Caractéristique d’un module | 11 |
| I.9. Panneau solaire | 12 |
| I.10. Systèmes photovoltaïque..... | 13 |
| I.10.1. Les systèmes autonomes..... | 14 |
| I.10.2. Les systèmes non autonomes..... | 14 |
| I.10.3. Les systèmes hybride..... | 15 |
| Conclusion | 16 |
| CHAPITRE II : Interface d’Electronique de Puissance et technique MPPT..... | 17 |
| Introduction..... | 18 |
| II.1 Fonctionnement d’un GPV a sa puissance maximale | 18 |
| II.2 Etage d’adaptation | 18 |
| II.3 Convertisseur DC-DC..... | 18 |
| II.3.1 Convertisseur Buck..... | 19 |
| II.3.2 Convertisseur Boost..... | 21 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| II.3.3 Convertisseur Buck-Boost | 22 |
| II.3.4 Convertisseur Cuk..... | 24 |
| II.3.5 Convertisseur Sepic | 25 |
| II.4 Commande MPPT | 27 |
| II.4.1 Algorithme Perturber et Observer (P&O) : | 27 |
| II.4.2 Algorithme incrémentation de la conductance (INC) :..... | 28 |
| II.4.3 Algorithme Hill-climbing : | 30 |
| II.4.4 Algorithme à base de la Logique floue..... | 31 |
| II.4.5 MPPT avec l'optimisation par essais des particules..... | 33 |
| Conclusion | 37 |
| CHAPITRE III : Interprétation des résultats de simulation | 37 |
| Introduction..... | 38 |
| III.1. Simulation des parties de système photovoltaïque :..... | 38 |
| III.1.1 Simulation de panneau PV :..... | 38 |
| III.1.1.3 Résultats de simulation :..... | 42 |
| III.1.2 Simulation de convertisseur :..... | 43 |
| III.2. Simulation de système photovoltaïque avec la commande MPPT | 46 |
| III.2.1. Simulation avec la méthode P&O :..... | 48 |
| III.2.2. Simulation avec la méthode INC :..... | 53 |
| Conclusion : | 56 |
| Conclusion générale | 58 |

Liste des Figures

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure I.1 : Distance terre-Soleil | 4 |
| Figure I.2 : Les types des cellules..... | 5 |
| Figure I.3 : Description d'une cellule photovoltaïque | 6 |
| Figure I.4 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque..... | 7 |
| Figure I.5 : Courbe courant-tension d'une cellule | 7 |
| Figure I.6 : Effet de l'éclairement sur les caractéristiques | 8 |
| Figure I.7 : Effet de la température sur les caractéristiques | 9 |
| Figure I.8 : Module photovoltaïque..... | 10 |
| Figure I.9 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques [5]..... | 10 |
| Figure I.10 : Caractéristiques résultant d'un groupement de n_p cellules en parallèle [5]. | 11 |
| Figure I.11 : branchement de panneaux en série..... | 13 |
| Figure I.12 : branchement de panneaux en parallèle..... | 13 |
| Figure I.13 : Système photovoltaïque..... | 13 |
| Figure I.14 : Système photovoltaïque autonome | 14 |
| Figure I.15 : Système photovoltaïque connectés au réseau..... | 15 |
| Figure I.16 : Système photovoltaïque hybride..... | 15 |
| Figure II.1 : connexion d'un GPV a une charge à travers un étage d'adaptation | 18 |
| Figure II.2 : Le principe de base d'un hacheur | 19 |
| Figure II.3 : Schéma de Convertisseur boost | 19 |
| Figure II.4 : Caractéristique de la tension et de courant du convertisseur Buck | 20 |
| Figure II.5 : Schéma de Convertisseur boost..... | 21 |
| Figure II.6 : Caractéristique de la tension et de courant du convertisseur Boost | 22 |
| Figure II.7 : Schéma de Convertisseur Buck-Boost..... | 22 |
| Figure II.8 : Caractéristique de la tension et de courant du Convertisseur Buck-Boost..... | 23 |
| Figure II.9 : Schéma de Convertisseur Cuk..... | 24 |
| Figure II.10 : Caractéristique de la tension et de courant du Convertisseur Cuk | 25 |
| Figure II.11 : Schéma de Convertisseur Spic..... | 26 |
| Figure II.12 : Caractéristique de la tension et de courant du Convertisseur Sepic | 26 |
| Figure II.13 : principe de méthode P&O | 27 |
| Figure II.14 : Organigramme de l'algorithme de P&O..... | 28 |
| Figure II.15 : Positionnement du point de fonctionnement..... | 29 |
| Figure II.16 : Algorithme basée sur la méthode Incrément de Conductance | 30 |
| Figure II.17 : Relation entre le P_{PV} et le rapport cyclique α | 31 |
| Figure II.18 : Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue | 31 |
| Figure.II.19 : Fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie..... | 32 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure II.20 : Principe de MPPT floue..... | 33 |
| Figure.II.21 : l'organigramme basé sur (Particle swarm optimization (PSO))..... | 35 |
| Figure III.1 : Blocs diagramme de la fonction I_{ph} | 40 |
| Figure III.2 : Blocs diagramme de la fonction I_{sh} | 40 |
| Figure III.3 : Blocs diagramme de la fonction I_{rs} | 40 |
| Figure III.4 : Blocs diagramme de la fonction I_s | 41 |
| Figure III.5 : Blocs diagramme de la fonction I | 41 |
| Figure III.6 : Schéma de simulation d'un panneau PV..... | 42 |
| Figure III.7 : Caractéristique I-V (a) et P-V (b) d'un panneau photovoltaïque à 25°C et 1000 W/m ² ...42 | |
| Figure III.8 : Caractéristique I-V (a) et P-V (b) d'un panneau photovoltaïque a 40°C et 1000 W/m ² ...43 | |
| Figure III.9: Caractéristique I-V (a) et P-V (b) d'un panneau photovoltaïque à 25°C et 1200 W/m ² ...43 | |
| Figure III.10 : schéma bloc de ce convertisseur sous Matlab/Simulink..... | 44 |
| Figure III.11 : le rapport cyclique fixée au convertisseur Boost..... | 44 |
| Figure III.12 : forme de tension d'entrée et de sortie pour $D = 0.4$ | 45 |
| Figure III.13 : le rapport cyclique fixée au convertisseur Boost..... | 45 |
| Figure III.14 : forme de tension d'entrée et de sortie pour $D = 0.6$ | 46 |
| Figure III.15 : les paramètres du panneau PV..... | 46 |
| Figure III.16 : Le bloc schématique de SIMULINK du SPV..... | 47 |
| Figure III.17 : le programme P&O sous script MATLAB..... | 48 |
| Figure III .18 : Evolution de courant du panneau PV avec l'application de PO..... | 49 |
| Figure III .19 : Evolution de tension du panneau PV avec l'application de PO..... | 49 |
| Figure III .20 : Evolution de la puissance du panneau PV avec application de PO..... | 50 |
| Figure III.21 : Evolution de rapport cyclique du panneau PV avec l'application PO..... | 50 |
| Figure III.22 : Evolution de la tension de sortie du panneau PV avec l'application PO..... | 51 |
| Figure III.23 : Evolution de courant de sortie du panneau PV avec l'application PO..... | 51 |
| Figure III.24 : Profile d'un éclairnement injecté dans le générateur photovoltaïque..... | 51 |
| Figure. III.25 : Courbe de tension du GPV aux changements d'irradiations..... | 52 |
| Figure. III.26 : Courbe de courant du GPV aux changements d'irradiations..... | 52 |
| Figure. III.27 : Courbe de puissance du GPV aux changements d'irradiations..... | 52 |
| Figure III.28 : le programme INC sous script MATLAB..... | 53 |
| Figure III .29 : Evolution de courant du panneau PV avec l'application de INC..... | 54 |
| Figure III .30 : Evolution de tension du panneau PV avec l'application de INC..... | 54 |
| Figure III .31 : Evolution de la puissance du panneau PV avec application de INC..... | 55 |
| Figure.III.32 : Courbe de tension du GPV aux changements d'irradiations..... | 55 |
| Figure.III.33 : Courbe de puissance du GPV aux changements d'irradiations..... | 56 |
| Figure.III.34 : Courbe du courant du GPV aux changements d'irradiations..... | 56 |

Introduction générale

Actuellement, la consommation de l'énergie est indispensable à la vie de tout le monde et sa demande ne cesse d'augmenter ces dernières années, cette énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles qui ont un effet négatif sur l'environnement tels que l'effet de pollution et le réchauffement climatique, le recours au développement des énergies non polluante et renouvelables est apparu comme l'ultime solutions face à ce problème.

A ce sujet, les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité satisfaisante aux exigences écologique. Malheureusement, cette issue rencontre des contraintes économiques (le cout élevé et le rendement bas) [1], mais elles apparaissent comme des énergies inépuisables et facilement exploitables comme le photovoltaïque (PV) qui fait partie de ces énergies.

Si l'on prend l'exemple du soleil, une surface de 145000 km² (4% de la surface des déserts arides) de panneaux photovoltaïque (PV) suffirait à couvrir la totalité des besoins énergétiques mondiaux [2].

Dans ce contexte générale, notre étude s'intéresse à l'énergie photovoltaïque qui est obtenue directement à partir du rayonnement solaire grâce à l'effet photovoltaïque qui transforme les photons en électrons à partir des panneaux photovoltaïques qui sont composés des cellules photovoltaïques.

Selon les caractéristiques électriques des cellules PV et leur association, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des méthodes dit techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) [3].

Concernant ce travail, nous sommes intéressés essentiellement à la procédure d'optimisation qui permet la poursuite de point de la puissance maximale (Maximum Power Point Tracking MPPT) d'un générateur (GPV), pour une bonne exploitation du générateur photovoltaïque quelques soient les conditions météorologiques (la température et l'éclairement), telle que la méthode de perturbation et observation (P&O).

Ce mémoire est divisé en trois chapitres comme suit :

Dans le premier chapitre, nous allons étudier d'une manière globale la conversion de l'énergie photovoltaïque en énergie électrique continue, nous allons aussi étudier la structure du GPV tel que les différents types de cellules PV ainsi leurs caractéristiques électriques avec l'effet de l'ensoleillement et la température sur ces derniers. Ensuite nous allons présenter les types de système PV avec leurs avantages et inconvénients.

Dans le deuxième chapitre nous présentons l'étage d'adaptation entre le GPV est la charge, aussi le principe de fonctionnement des différents types des convertisseurs DC-DC utilisé dans le système PV. Vers la fin nous présentons les différents techniques de poursuite de MPPT.

Dans le dernier chapitre on s'intéresse à la simulation des parties du système PV avec interprétation des résultats de chaque partie, et la fin de ce chapitre illustre les résultats de simulation du système photovoltaïque avec la commande MPPT de type P&O et INC.

Enfin nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale, dont nous rappelons quelques commentaires et que les perspectives qui pourront faire suite à notre travail.

CHAPITRE I :Généralités sur les systèmes photovoltaïque

Introduction

Les énergies renouvelables sont des énergies à ressources illimitées, regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. Parmi les types de sources d'énergies renouvelables on trouve l'énergie photovoltaïque qui proviennent directement du soleil, cette énergie elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable, Cette dernière peut produire de l'électricité dépendamment de l'effet photovoltaïque.

I.1. Energie solaire

Le soleil est une étoile de forme pseudo sphérique dont le diamètre atteint les 1 391 000KM, La distance de la terre au soleil est d'environ 150 millions de kilomètres, et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300 000 km/s les rayons de soleil mettent donc environ 8 min à nous parvenir [4].

Cette sphère formée de gaz extrêmement chaud constitué par la masse de 75% d'hydrogène, 23% d'hélium et d'autres 2%.

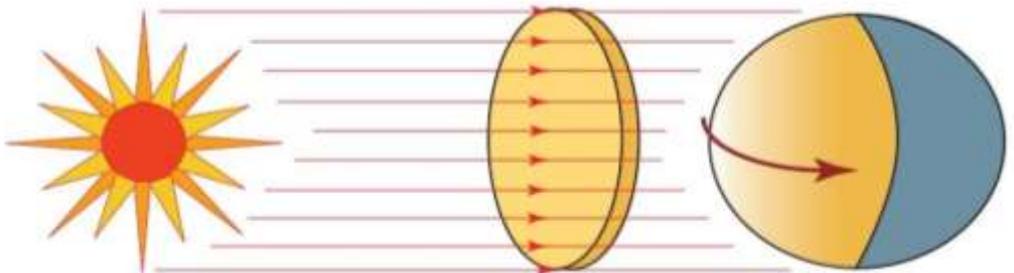


Figure I.1. Distance terre-Soleil

L'énergie solaire est transmise par le soleil sous la forme de chaleur et de lumière, cette dernière se convertit en électricité grâce à l'effet photovoltaïque.

Le mot « **photovoltaïque** » désigne le processus qui consiste à transformer la lumière solaire en électricité sans aucune pièce mobile de machinerie, sans bruit, sans pollution et sans combustible, est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire grâce à des panneaux ou des centrales solaires photovoltaïques.

I.2. Cellules photovoltaïque

La cellule solaire est un convertisseur qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, est réalisée à l'aide d'un matériau s'appeler semi-conducteur de type P-N.

I.3. Type des cellules

Parmi les cellules solaires dites photovoltaïques, le matériau le plus utilisé jusqu'à présent est le silicium en raison essentiellement de sa disponibilité et de son faible coût, il existe trois grands types de silicium : mono cristallin, poly cristallin et amorphe.

I.3.1. Cellule mono cristalline

Cette cellule photovoltaïque est l'une des plus répandues, elle est obtenue à partir de silicium mono cristallin (Figure I.2.a), elle est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches, ce type de cellule solaire a l'avantage d'un rendement excellent de 15% à 24% et l'inconvénient d'un coût élevé à l'achat aussi son rendement est très faible lorsqu'il n'y a pas assez de soleil [5].

I.3.2. Cellule Poly cristallin

Ce type de cellule est élaborée à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples (Figure I.2.b), avec un rendement de 11% à 15% et le coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines, l'avantage de ces cellules, elles produisent peu de déchets de coupe et elles nécessitent deux à trois fois moins d'énergie pour leur fabrication [6].

I.3.3. Cellule amorphe

La cellule au silicium amorphe est constituée d'un silicium ayant une structure atomique désordonnée non cristalline (Figure I.2.c), ce matériau absorbe beaucoup plus la lumière qu'un silicium cristallin, cette cellule a comme avantages, un coût de production bien plus bas, elle capte les rayons solaires même avec un éclairage faible. Son principal inconvénient, elle offre un faible rendement environ 7% au maximum [6].

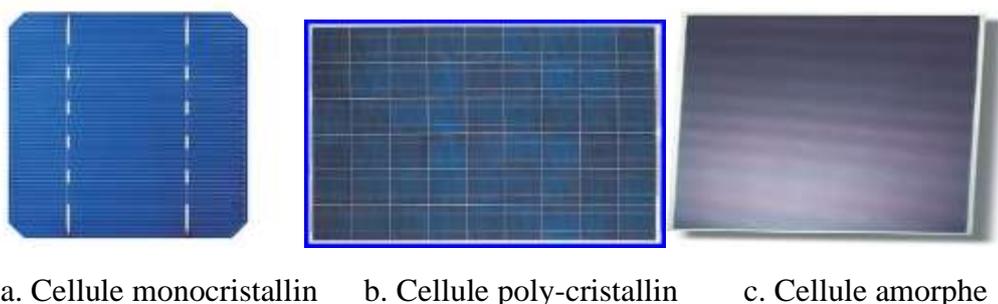


Figure I.2 : Les types des cellules

I.5. Effet photovoltaïque

Est un phénomène physique basée sur la transformation de l'énergie émise par le soleil sous forme de photons en énergie électrique, cela en fonction des semi-conducteurs dont la conductibilité électrique peut varier en fonction des conditions dans lesquelles il se trouve, ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électron et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mises en contact avec la seconde les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériaux P. La zone initialement dopée N devient chargé positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction P-N a été formée. Les électrons supplémentaires auront tendance à quitter la zone N par l'extérieure avec contact électrique car le champ électrique est très fort au niveau de la jonction. Il apparait alors un courant dans le circuit extérieur. Par définition dans le sens inverse de celui des électrons.

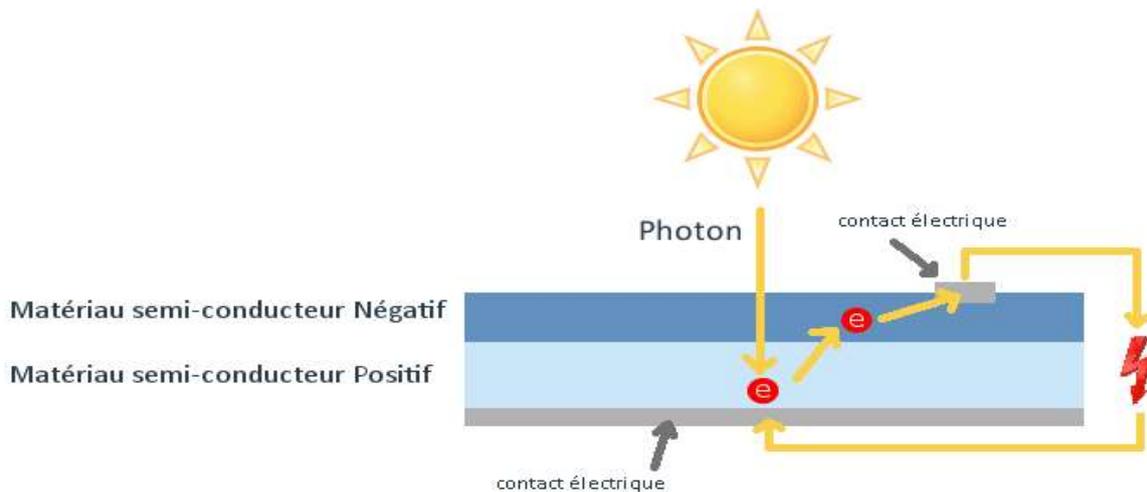


Figure I.3 : Description d'une cellule photovoltaïque

I.4. Schéma équivalent et les caractéristiques de la cellule photovoltaïque

Les cellules sont souvent réunies dans un module solaire photovoltaïque ou un panneau solaire, ce dernier est considéré comme une source de puissance en s'aperçoit alors l'existence d'un point P_m où la puissance se trouve être maximale. Les caractéristiques courant-tension de la cellule solaire exprime comment la cellule photovoltaïque réagit à toutes les charges possibles sous des conditions particulière d'ensoleillement et de température.

Une cellule photovoltaïque peut être modélisée par le circuit équivalent suivant :

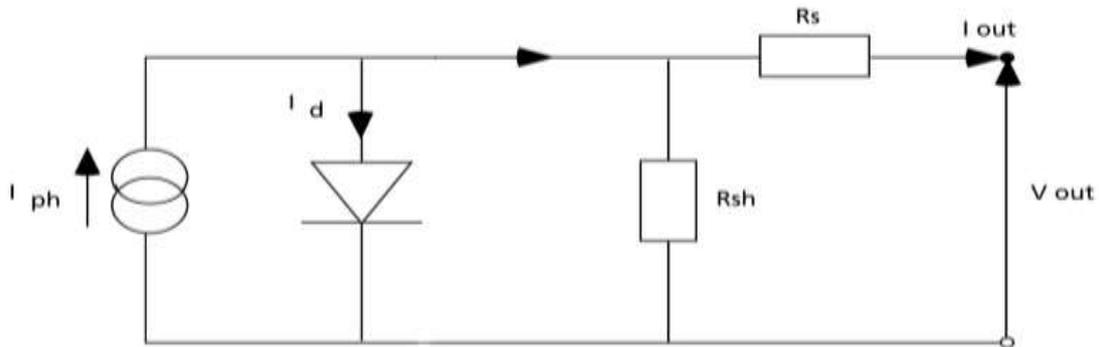


Figure I.4 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le courant I_{ph} généré par l'éclairement, Les deux résistances permettent de tenir en compte des pertes liées aux défauts de fabrication. R_s représente les diverses résistances de contact et de connections tandis que R_{sh} caractérise les courants de fuite dus à la diode et aux effets de bord de la jonction.

Le comportement d'une cellule peut être synthétisé dans un graphe qu'on appelle caractéristique courant-tension.

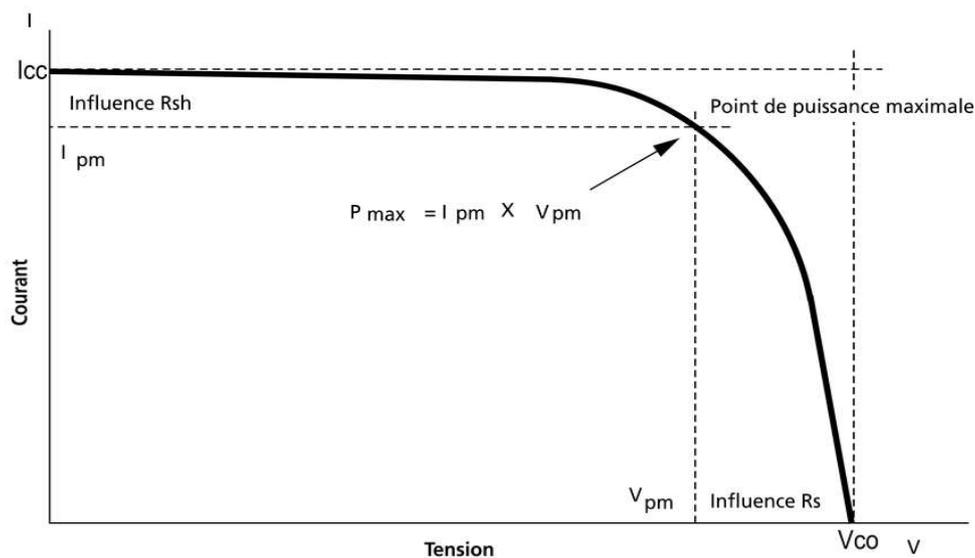


Figure I.5 : Courbe courant-tension d'une cellule

En observant les caractéristiques, on peut voir qu'il y'a trois point important :

- I_{pm} correspondant à un courant maximum que peut fournir la cellule solaire à la tension zéros (courant de court-circuit).

- V_{pm} correspondant à la tension maximale de la cellule solaire sans charge (circuit ouvert).
- P_{max} correspondant à la puissance maximale que peut délivrer la cellule solaire.

I.6. Effet de l'ensoleillement sur les caractéristiques I-V

Le rayonnement lumineux a un effet proportionnel sur le courant électrique ainsi que la puissance. La Figure I.6 représente les caractéristiques I-V et I-P d'une CPV pour différents ensoleillements à la température fixe.

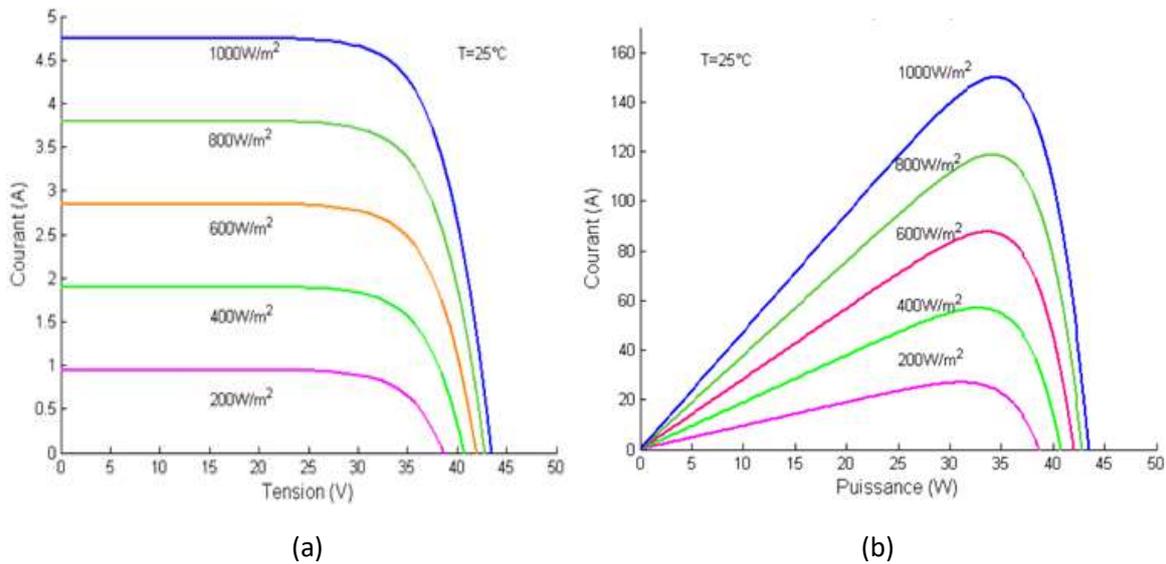


Figure I.6 : Effet de l'éclairement sur les caractéristiques I-V (a) et les caractéristiques I-P (b) d'une CPV

Figure I.6 (a) montre que l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important de celui de la tension à circuit ouvert, étant donné que le courant de court-circuit est une fonction linéaire, alors que celle de la tension à circuit ouvert est logarithmique. Et en observant dans la Figure I.6 (b) que le courant et la puissance maximale augmentent proportionnellement avec l'éclairement.

I.7. Effet de la température sur les caractéristiques I-V et P-V de la CPV :

La température a un effet léger sur le courant, par contre a une grande influence sur la tension ainsi que la puissance. Figure I.7 représente l'influence de la température sur les caractéristiques I-V et P-V d'une CPV à un ensoleillement fixe.

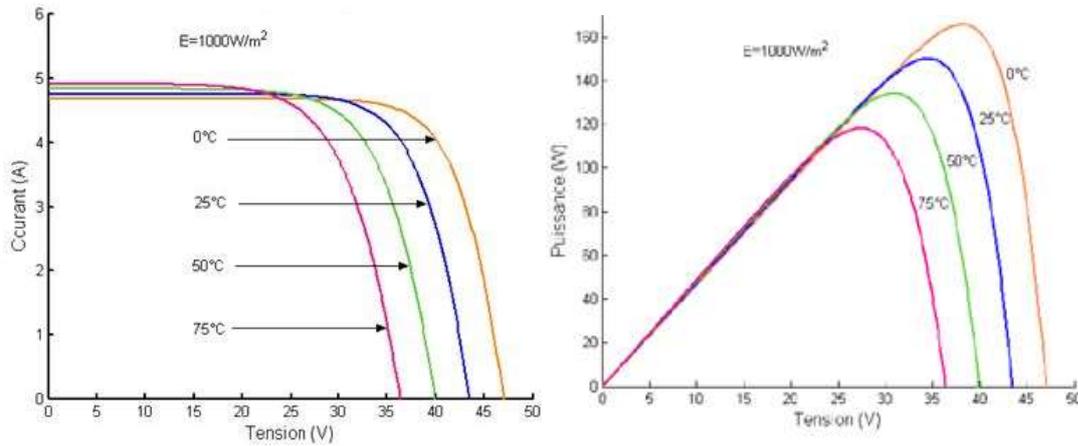


Figure I.7 : Effet de la température sur les caractéristiques I-V (a) et les caractéristiques P-V (b) d'une CPV

Dans la Figure I.7 (a), Quand la température augmente, elle cause une diminution apparente sur la tension de circuit-ouvert. Comme en observant aussi dans la Figure I.7 (b), une diminution de la puissance.

I.8. Module photovoltaïque

Le module photovoltaïque est un ensemble des cellules solaires associées en parallèle et en série, ces cellules sont protégées d'humidité par encapsulation dans un apollinaire IVA (éthylène - vinyll - acétate) et la surface avant est protégée par un verre trempé à haute transition.

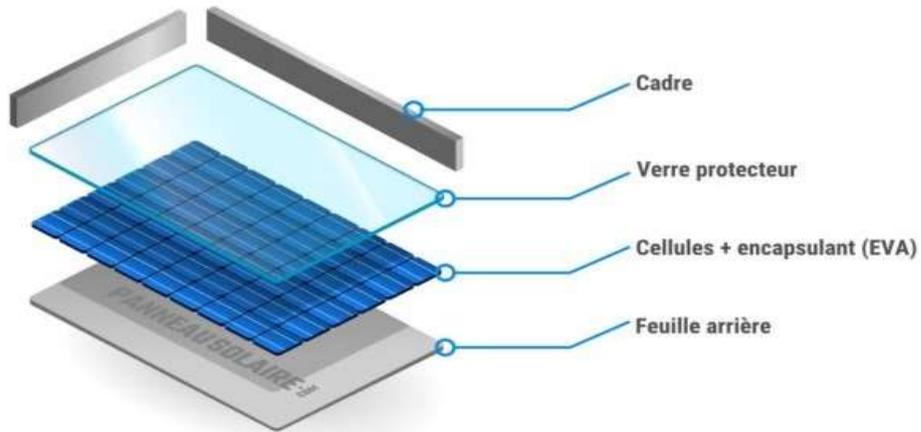


Figure I.8 : Module photovoltaïque

Ce module est entouré d'un cadre rigide en aluminium anodisé avec des trous de fixation, à l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonctions contenant deux diodes antiparallèles, ces dernières permettent d'éviter la décharge dans l'ombre.

I.8.1 Association série des cellules photovoltaïques

Les cellules en série sont traversées par le même courant et leur caractéristique est obtenue par l'addition des tensions élémentaires de chaque cellule qui peuvent générer des tensions différentes.

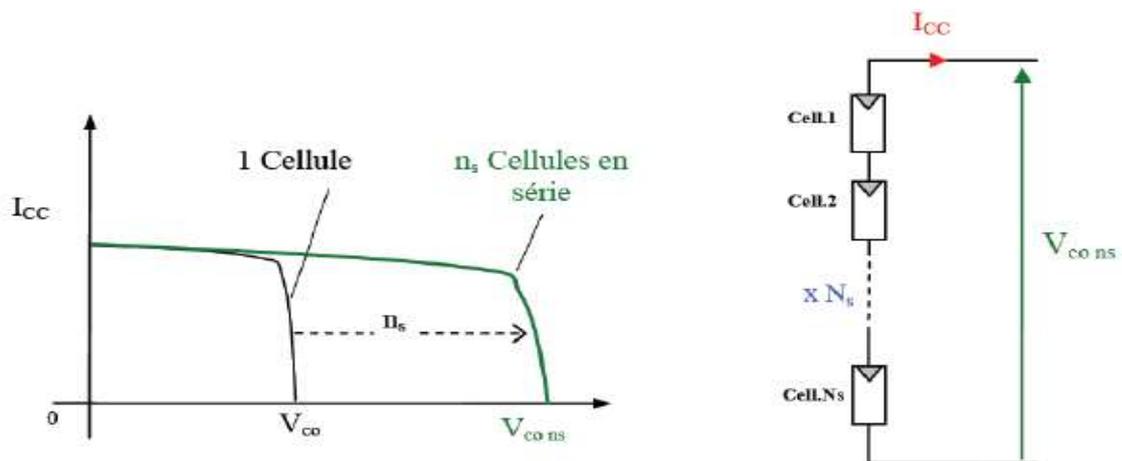


Figure I.9 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques [7].

$$V = n_s \times V_{co}$$

- $V(v)$: Tension aux bornes de l'assemblage.
- $V_{co}(v)$: Tension aux bornes d'une cellule.

I.8.2 Association parallèle des cellules photovoltaïques

Les cellules en parallèle sont soumises à la même tension et son caractéristique est obtenue par l'addition des courants générés par chacune des cellules.

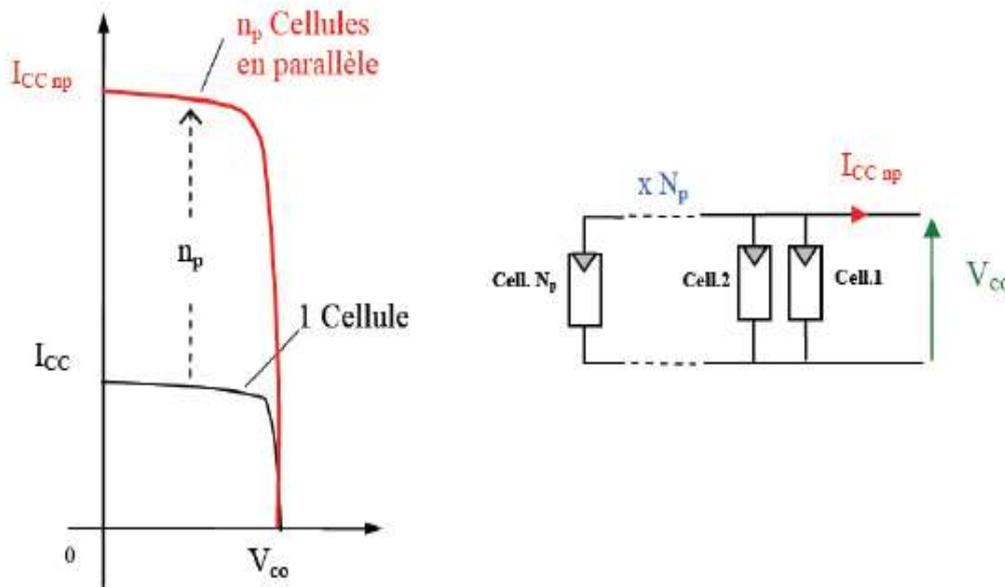


Figure I.10 : Caractéristiques résultant d'un groupement de n_p cellules en parallèle [7].

$$I = n_p \times I_{cc}$$

- $I(v)$: courant aux bornes de l'assemblage.
- $I_{cc}(v)$: courant circulant dans chaque cellule.

I.8.3 Association hybride (en série et en parallèle)

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de tension à vide totale sont données par les deux relations suivantes :

$$I^t = n_p \times I_{cc}$$

$$V^t = n_s \times V_{co}$$

I.8.4. Caractéristique d'un module

- La puissance de crête P_c : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m²).

- La caractéristique I-V : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- Tension à vide V_{OC} : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement "plein soleil".
- Courant court-circuit, I_{SC} : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement "plein soleil".
- Point de fonctionnement optimum, (V_m, I_m) : Lorsque la Puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = V_m \times I_m$.
- Rendement : Rapport entre la puissance électrique optimale a la puissance de radiation incidente.
- Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{oc} \times I_{sc}$ [6].

I.9. Panneau solaire

Est un générateur du courant continue, comporte d'un ensemble de modules photovoltaïque interconnectés en série et/ou parallèle afin de produire la puissance requise.

L'association des modules en série, sont traversé par le même courant et le voltage s'additionne, dans ce cas du branchement en série, chaque pôles positives d'un module se relie au pôle négatif d'un autre module voire la Figure I.11.

L'association des modules en parallèle, les intensités s'additionnent tandis que la tension reste identique ce qui permet d'avoir une grande densité. Lors d'un branchement en parallèles les bornes positives relie entre elles. Il en est de même pour les bornes négatives voire la Figure I.12.

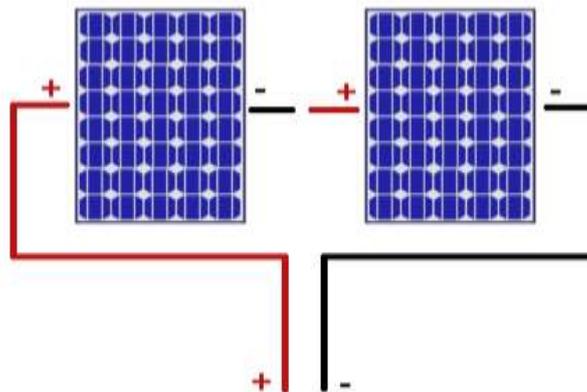


Figure I.11 : branchement de panneaux en série

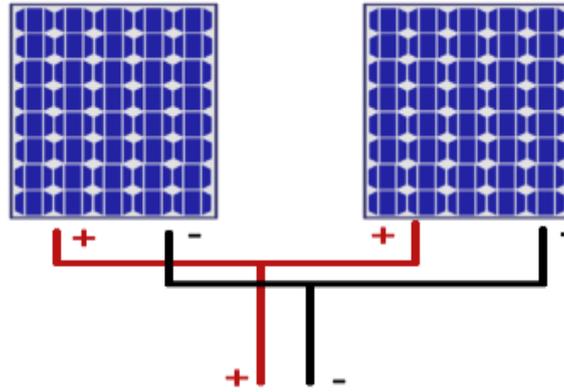


Figure I.12 : branchement de panneaux en parallèle

I.10. Systèmes photovoltaïque

Un système photovoltaïque est un ensemble d'éléments conçu pour la production d'électricité à partir de l'énergie solaire. Ce système se compose de trois parties :

- Une partie de production d'énergie
- Une partie de contrôle de cette énergie.
- Une partie d'utilisation de l'énergie produite.

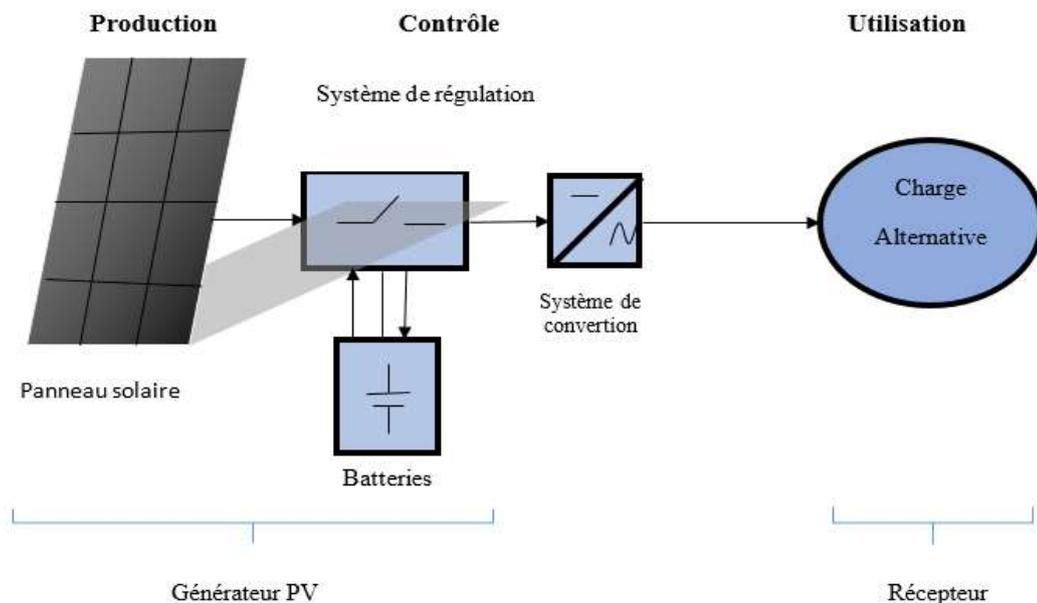


Figure I.13 : Système photovoltaïque

Un Système photovoltaïque peut se composer des éléments suivant :

Panneau solaire : C'est l'élément central, Grâce à sa composition, il représente l'outil de conversion de l'énergie contenue dans la lumière de soleil en énergie électrique.

Système de convertisseur (Onduleur) : servant à transformer le courant continue fourni par les panneaux ou les batteries par l'adapter à des récepteurs fonctionnant en courant alternative.

Régulateur : à l'utilisation des batteries il est nécessaire d'utiliser ce régulateur pour régler la charge de la batterie par l'électricité produite des panneaux photovoltaïque

Batterie : la batterie est un composant qui sert à stocker chimiquement de l'énergie électrique elle permet de satisfaire les besoins malgré le caractère aléatoire de l'énergie solaire reçu (nuit mauvais temps)

Le récepteur : c'est un élément qui utilise l'électricité produite (exemple : éclairage, pompage, télévision, ...etc.)

I.10.1. Les systèmes autonomes

On dit qu'un système PV est autonome s'il est complètement indépendant d'autres sources d'énergie, il alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique (Figure I.14).

Ces installations sont utilisées principalement dans les endroits isolés où il n'y a pas d'accès au réseau électrique. De tels installation la majorité des cas exigera des batteries pour le stockage d'énergie, et de l'utiliser durant les périodes de la non disponibilité de l'énergie solaire.

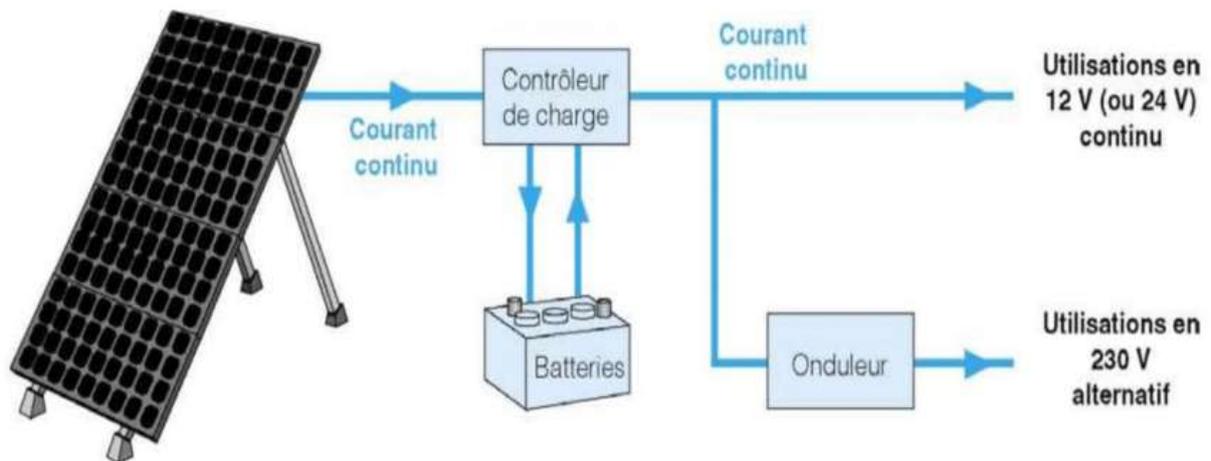


Figure I.14 : Système photovoltaïque autonome

I.10.2. Les systèmes non autonomes

Ce sont les systèmes raccordés au réseau permettent de réduire la consommation d'électricité provenant de service public, les accumulateurs ne sont pas nécessaires sauf pour le

cas de besoin, ce système est utilisé dans les immeubles, les domiciles ou les chalets reliés déjà au réseaux électrique (Figure I.15).

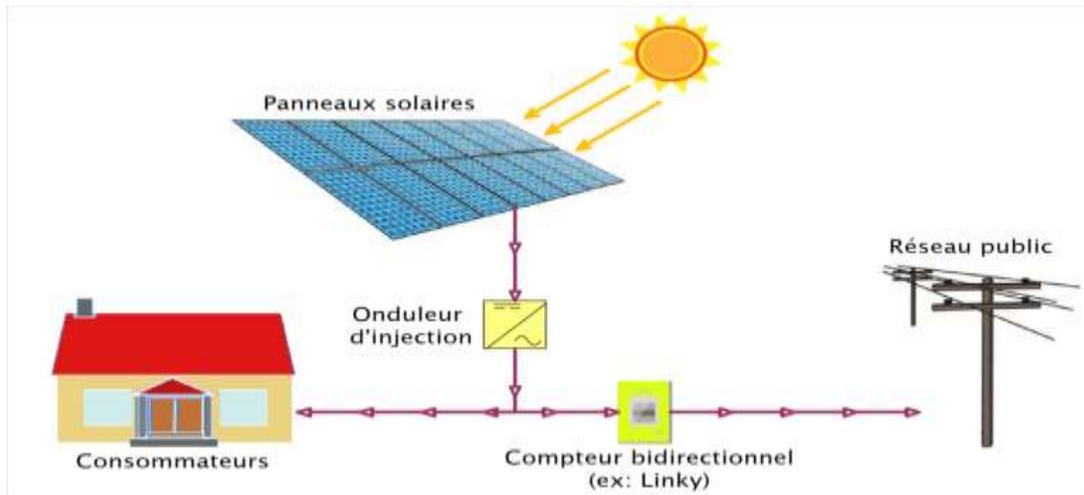


Figure I.15 : Système photovoltaïque connectés au réseau

I.10.3. Les systèmes hybride

Sont les systèmes qui reçoivent l'énergie à partir d'une ou plusieurs sources de la nature (éolienne, générateur diesel, ou une centrale cogénération), ce type d'utilisation convient mieux lorsque le GPV ne couvre pas toute l'énergie requise.

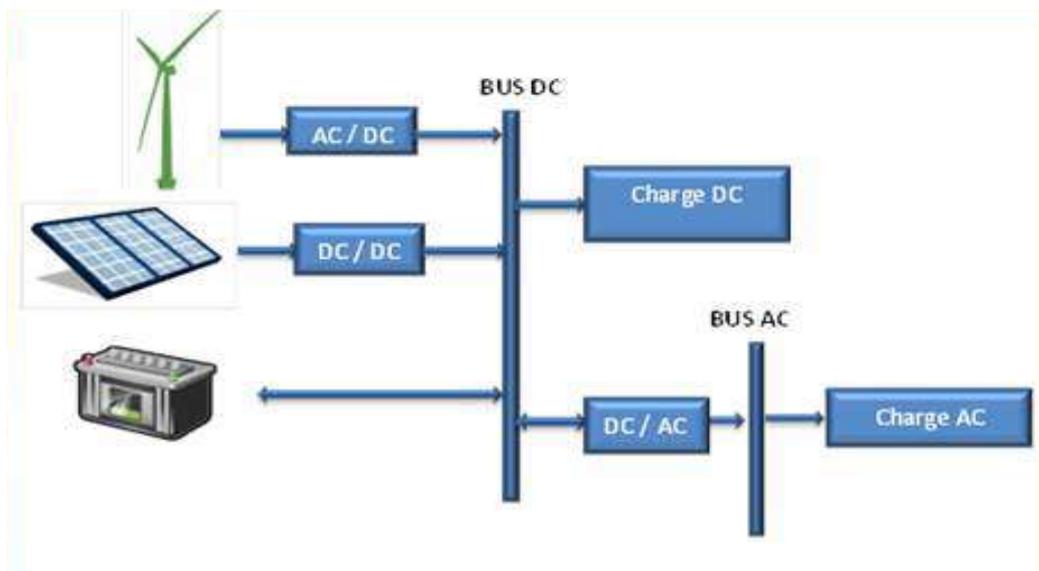


Figure I.16: Système photovoltaïque hybride

Avantage est inconvénient de la technologie photovoltaïque

Les avantages présentés par la technologie photovoltaïque sont :

- Leurs faible Cout de maintenance, peu d'entretien, ils ne nécessitent ni combustible ni transport ni personnel hautement spécialisé.
- Des systèmes simples et rapides à installer.
- Non polluant, silencieux.
- Disponibilité de Leur énergie première est renouvelable.
- Favorable pour les sites isolés.

Les inconvénients sont :

- Le cout d'installation est très élevé.
- Production moins d'électricité dans les mauvais temps et en hiver entraînent une diminution de la puissance.
- L'utilisation des batteries lors d'une installation autonome.
- Baisse de rendement de la production.

Conclusion

Nous avons présenté Dans ce chapitre, les déférentes technologie utilisé par les GPV, ensuite nous avons expliqué leur principe de fonctionnement ainsi leurs caractéristiques avec l'influence des différents paramètres climatiques sur ces derniers.

Vers la fin, on a cité les différents systèmes PV utilisée avec leurs avantages et inconvénients.

CHAPITRE II : Interface d'Electronique de Puissance et technique MPPT

Introduction

Les variations climatique d'un générateur photovoltaïque entraîne une fluctuation sur ses caractéristiques courant-tension ainsi sur sa puissance maximale, pour que ce générateur photovoltaïque travaille au maximum de puissance tout le temps, un convertisseur DC-DC nécessaire doit améliorer la tension de sortie en tension de haute qualité, et des défèrent contrôleurs de poursuite le point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking, MPPT) conçu à commander le régulateur.

II.1 Fonctionnement d'un GPV a sa puissance maximale

Le relevé de la caractéristique courant- tension optimal d'un GPV est une opération nécessaire, qui dépend totalement des conditions de l'éclairement et la température, noté (I_{opt} - V_{opt}) ce point alors dite MPP de ce GPV considérée comme optimal en ce point, afin d'avoir une adaptation de son impédance et celle de la charge.

II.2 Etage d'adaptation

Cette étage joue un rôle d'interface entre le GPV et la charge (Figure II.1), en assurant le transfert du maximum de puissance, ces adaptateurs d'impédance sont des convertisseurs DC-DC avec les défèrent topologie.



Figure II.1 : connexion d'un GPV a une charge à travers un étage d'adaptation

II.3 Convertisseur DC-DC

Un hacheur est un convertisseur continue-continue qui permet de générer une source de tension continue variable à partir d'une autre source de tension continue, il consomme moins de puissance c'est pour cette raison que les hacheurs ont de très bon rendement.

Parmi ses conceptions on trouve un interrupteur transistor K, une diode D, une inductance L et un condensateur C, leur principe de base est d'avoir une tension de sortie en

fonction de α telle que ce dernier est le rapport cyclique, il représente la fraction de la période T pendant laquelle l'interrupteur k conduit, ce rapport est compris entre 0 et 1.

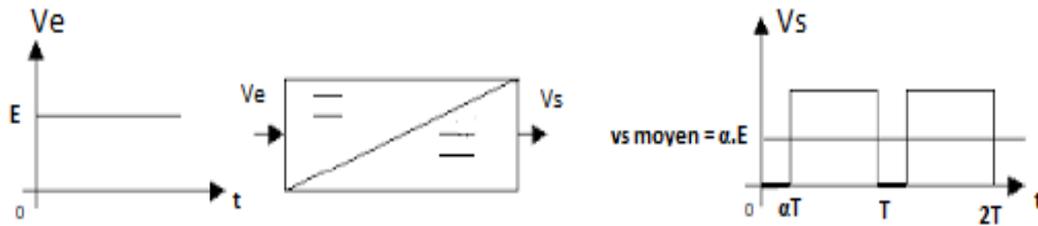


Figure.II.2 : Le principe de base d'un hacheur

Selon la position du commutateur et d'hacheur, différents types de convertisseurs de tension peuvent être réalisés.

II.3.1 Convertisseur Buck

Convertisseur Buck ou un hacheur dévolteur il permet de convertir une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur (abaisseur de tension), il possède un fort rendement et offre la possibilité de réguler la tension de sortie.

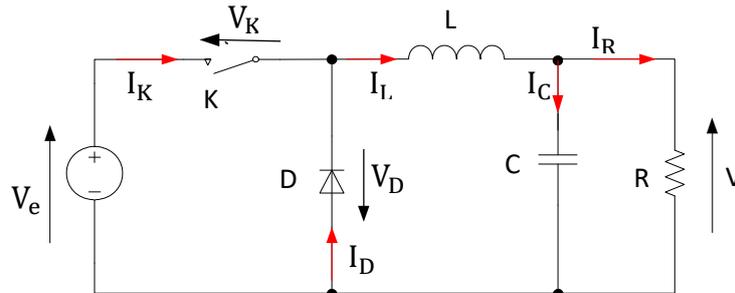


Figure II.3 : Schéma de Convertisseur boost

Analyse de circuit :

L'interrupteur K est placée en série entre la tension continue d'entrée V_e et l'inductance L , dans ce cas D fonctionne en alternance avec l'interrupteur.

Sur l'intervalle $[0 ; \alpha T]$, k fermée et D bloquée, le courant I_L augmente linéairement et une énergie E stockée dans L donnée comme suit.

$$E = \frac{1}{2} L \times I_L^2 \quad (\text{II-1})$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{U_L}{L} = \frac{V_e - V}{L} \quad (\text{II-2})$$

Sur l'intervalle $[\alpha T ; T]$, k ouvert et D devient passante, dans ce cas l'inductance se recharge linéairement dans le condensateur C et la charge R à travers la diode avec une diminution du courant. Cette recharge n'est possible que si $V < V_e$.

Dans ce cas l'équation de U_L qui régitte cette phase est :

$$U_L = -V \quad (II-3)$$

La tension moyenne aux bornes de l'inductance en régime permanent est nul :

$$\langle U_L \rangle_T = \frac{1}{T} \int_0^T U_L dt = 0 \quad (II-4)$$

$$\frac{1}{T} \left[\int_0^{\alpha T} (V_e - V) dt + \int_{\alpha T}^T (-V) dt \right] = \frac{1}{T} [(V_e - V)(\alpha T - 0) + (-V)(T - \alpha T)] = 0 \quad (II-5)$$

$$\langle U_L \rangle_T = V_e \alpha - V = 0 \quad (II-6)$$

Le rapport cyclique $M(\alpha)$ déduit de l'équation (II-6) est :

$$M(\alpha) = \frac{V}{V_e} = \alpha \quad (II-7)$$

Comme nous avons obtenu dans cette dernière équation une tension d'entrée est toujours supérieure à celle de sortie.

Les formes d'onde des caractéristiques courants-tension représentant le fonctionnement d'hacheur dévolteur sont donnée par la Figure II.4.

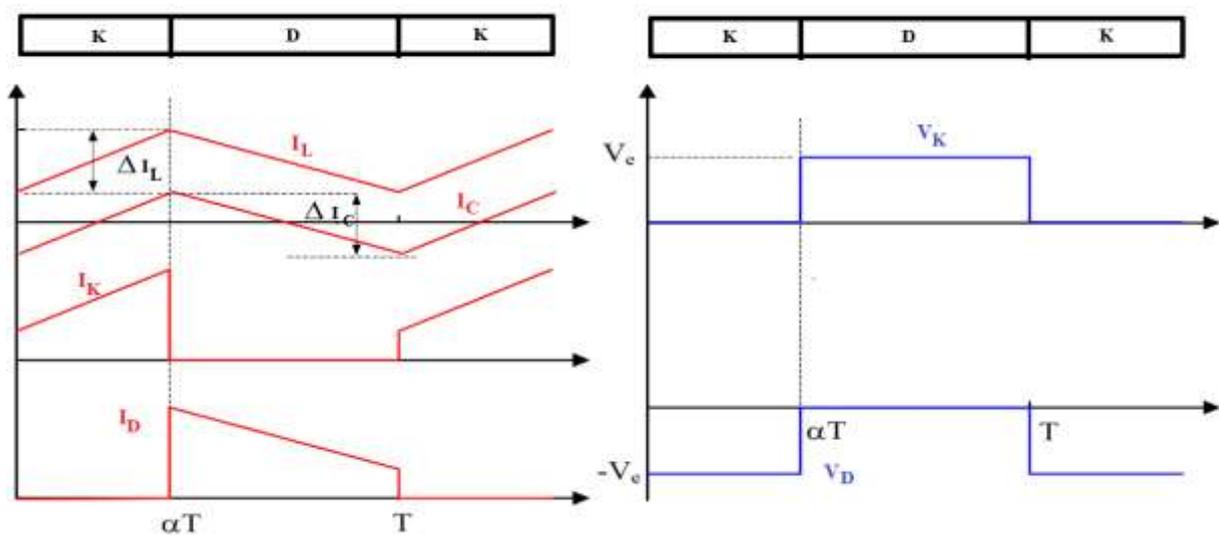


Figure II.4 : Caractéristique de la tension et de courant du convertisseur Buck

II.3.2 Convertisseur Boost

Convertisseur Boost est un convertisseur conçu pour convertir une tension DC d'entrée en une tension DC de sortie avec un niveau beaucoup plus élevé est notamment appelée hacheur survolteur Figure II.5.

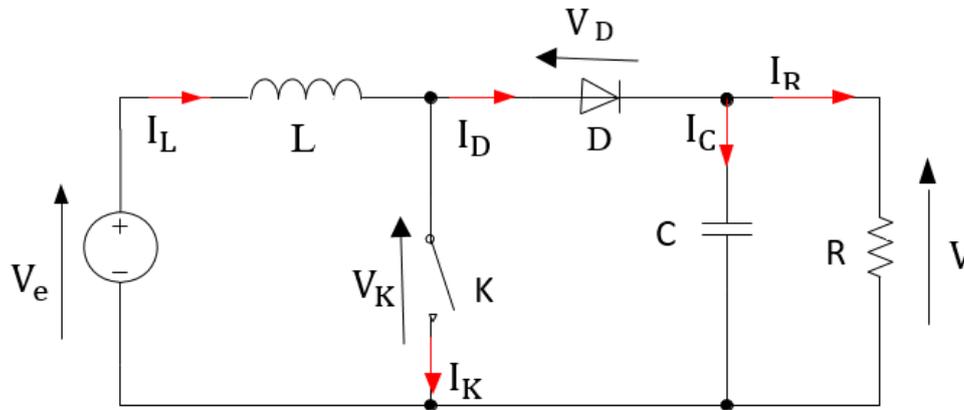


Figure II.5 : Schéma de Convertisseur boost

Analyse de circuit :

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur k.

La phase $[0 ; \alpha T]$, l'état passante ou k conduit D sera bloquée, et la charge alors est déconnectée de l'alimentation cela entraîne l'augmentation de courant dans l'inductance L donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique.

L'équation de courant de l'inductance est donnée comme suite :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{U_L}{L} = \frac{V_e}{L} \quad (\text{II-8})$$

Dans la phase $[\alpha T ; T]$, état bloquée ou k ouvert D passante, dans ce cas l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.e.m s'additionne à celle du générateur, Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité.

Nous étudierons, ici le mode conduction continu pour déduire le rapport entre l'entrée et la sortie en fonction du rapport cyclique :

$$\langle U_L \rangle_T = \frac{1}{T} \int_0^T U_L dt = 0 \quad (\text{II-9})$$

$$\frac{1}{T} \left[\int_0^{\alpha T} V_e dt + \int_{\alpha T}^T (V_e - V) dt \right] = \frac{1}{T} [(V_e)(\alpha T - 0) + (V_e - V)(T - \alpha T)] = 0 \quad (II-10)$$

$$V_e - V(1 - \alpha) = 0 \quad (II-11)$$

Le rapport cyclique est alors de cette forme :

$$M(\alpha) = \frac{V}{V_e} = \frac{1}{(1-\alpha)} \quad (II-12)$$

Grâce à cette dernière expression, on peut voir que la tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée. C'est pour cela que l'on parle de survolteur .

Les formes d'onde des caractéristiques d'hacheur dévolteur :

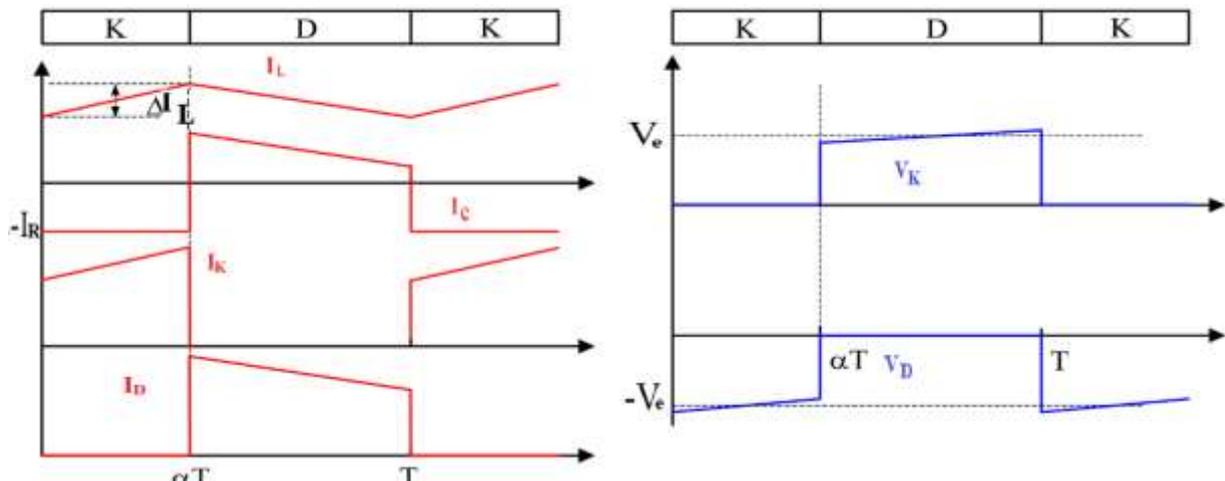


Figure II.6 : Caractéristique de la tension et de courant du convertisseur Boost

II.3.3 Convertisseur Buck-Boost

Est un convertisseur qui combine les propriétés des convertisseurs Buck et Boost il est donc Abaisseur/Élévateur de tension, de plus c'est un montage inverseur de tension, son schéma de principe est montrée dans la Figure.II.7.

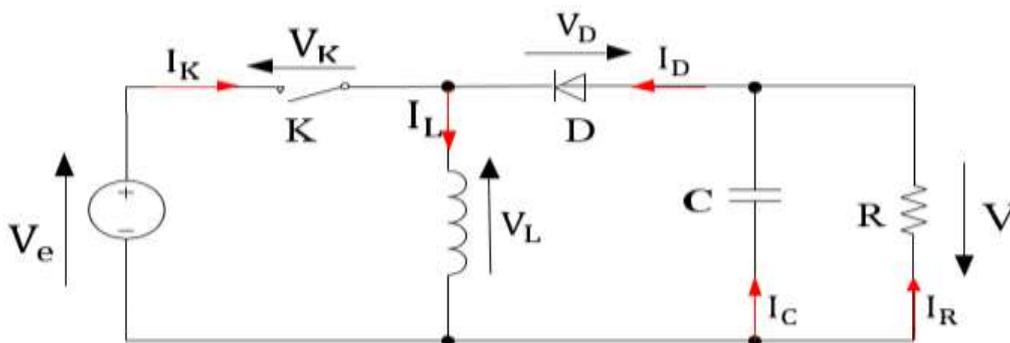


Figure.II.7 : Schéma de Convertisseur Buck-Boost

À la fin de l'état passant, le courant I_L a augmenté de :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_e}{L} \quad (\text{II-13})$$

Pendant l'état bloqué, on a :

$$U_L = -V \quad (\text{II-14})$$

En régime permanent la valeur moyennes de la bobine L est nul :

$$\langle U_L \rangle_T = \frac{1}{T} \int_0^T U_L dt = \frac{1}{T} \left[\int_0^{\alpha T} V_e dt + \int_{\alpha T}^T (-V) dt \right] = 0 \quad (\text{II-15})$$

$$\frac{1}{T} [(V_e)(\alpha T - 0) + (-V)(T - \alpha T)] = V_e \alpha - V(1 - \alpha) = 0 \quad (\text{II-16})$$

Ou le rapporte cyclique $M(\alpha)$ obtenue est :

$$M(\alpha) = \frac{V}{V_e} = \frac{\alpha}{(1-\alpha)} \quad (\text{II-17})$$

Les principales différences aux convertisseurs buck et boost sont :

La tension de sortie est de polarité inverse de celle d'entrée.

La tension de sortie peut varier de 0 a $-\infty$.

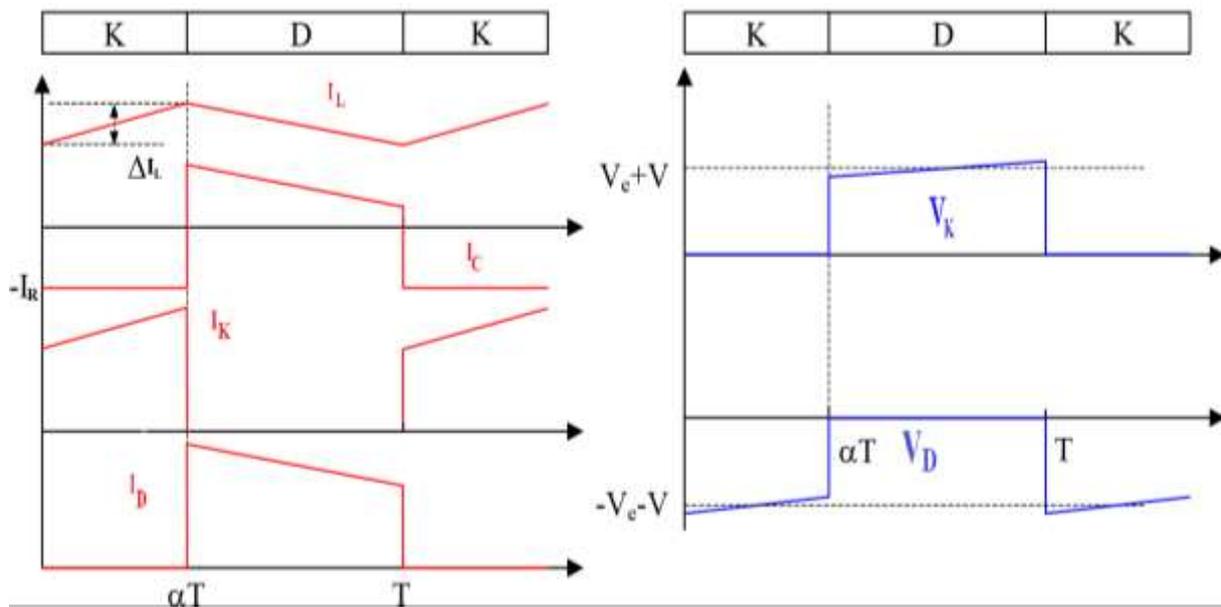


Figure.II.8 : Caractéristique de la tension et de courant du Convertisseur Buck-Boost

II.3.4 Convertisseur Cuk

Ce type de convertisseur est un montage abaisseur-élevateur et inverseur de tension. Il est considéré une liaison entre deux sources de courant continu par l'intermédiaire d'une source de tension continue qui doit accumuler puis restituer au récepteur l'énergie délivrée par le générateur, suivant le schéma de principe ci-dessous Figure.II.9.

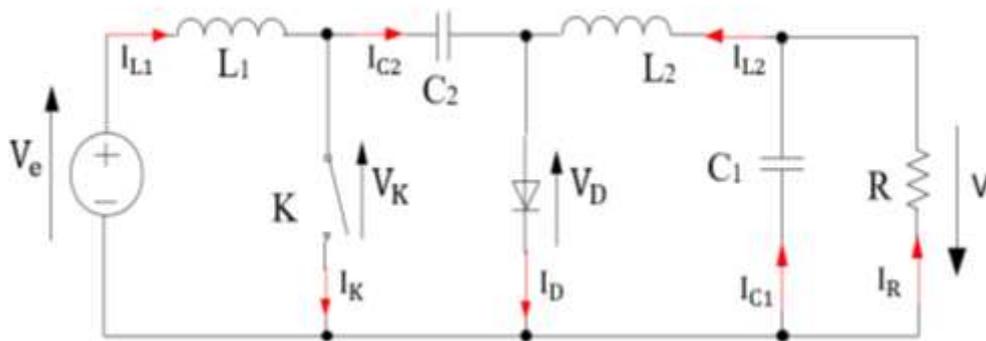


Figure.II.9 : Schéma de Convertisseur Cuk

Les équations obtenues durant l'état passante $[0 ; \alpha T]$

$$U_{L1} = V_e \quad (\text{II.18})$$

$$U_{L2} = -U_{C1} - V \quad (\text{II.19})$$

Les équations obtenues pendant l'état bloquée $[\alpha T ; T]$

$$U_{L1} = V_e - U_{C1} \quad (\text{II.20})$$

$$U_{L2} = -V \quad (\text{II.21})$$

Les valeurs moyenne de U_{L1} et U_{L2} sont :

$$\langle U_{L1} \rangle_T = \frac{1}{T} \int_0^T U_{L1} dt = \frac{1}{T} \left[\int_0^{\alpha T} V_e dt + \int_{\alpha T}^T (V_e - U_{C1}) dt \right] = 0 \quad (\text{II.22})$$

$$V_e - U_{C1}(1 - \alpha) = 0 \quad (\text{II.23})$$

$$\langle U_{L2} \rangle_T = \frac{1}{T} \int_0^T U_{L2} dt = \frac{1}{T} \left[\int_0^{\alpha T} (-U_{C1} - V) dt + \int_{\alpha T}^T (-V) dt \right] = 0 \quad (\text{II.24})$$

$$-U_{C1}\alpha - V = 0 \quad (\text{II.25})$$

A partir de l'équation (II.25) peut déduire l'équation de U_{C1} :

$$U_{C1} = \frac{-V}{\alpha} \quad (II.26)$$

On remplace U_{C1} par son expression dans $\langle U_{L1} \rangle_T$ pour obtenir l'expression du rapport cyclique :

$$V_e + \frac{V}{\alpha}(1 - \alpha) = 0 \quad (II.27)$$

$$\frac{V}{V_e} = -\frac{\alpha}{(1-\alpha)} = M(\alpha) \quad (II.28)$$

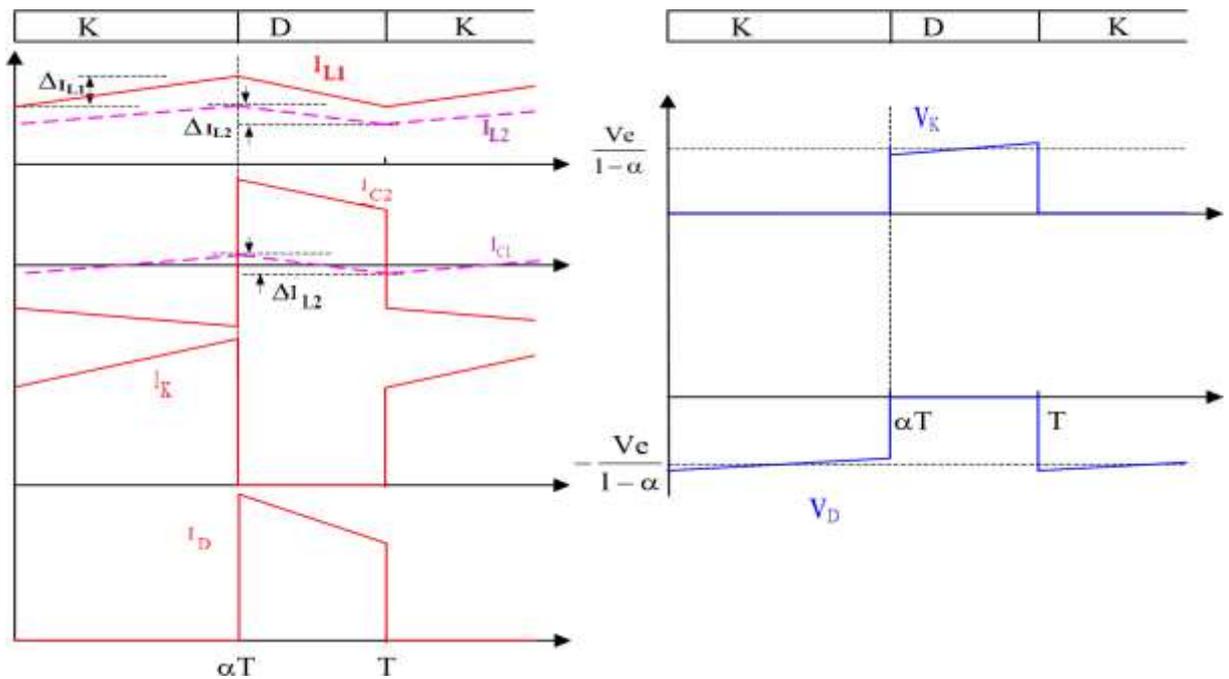


Figure.II.10 : Caractéristique de la tension et de courant du Convertisseur Cuk

II.3.5 Convertisseur Sepic

Le convertisseurs Sepic Figure.II.10 présente des caractéristiques similaires à celles du convertisseur Cuk, sauf qu'il n'est plus inverseur de tension.

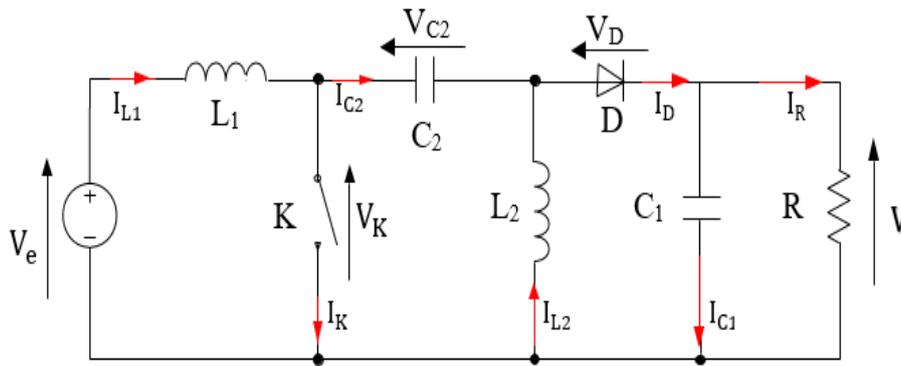


Figure.II.11 : Schéma de Convertisseur Sepic

Sa tension de sortie a pour valeur :

$$V = V_e \frac{\alpha}{(1-\alpha)} \quad (\text{II.29})$$

Le rapport cyclique est donc :

$$M(\alpha) = \frac{V}{V_e} = \frac{\alpha}{(1-\alpha)} \quad (\text{II.30})$$

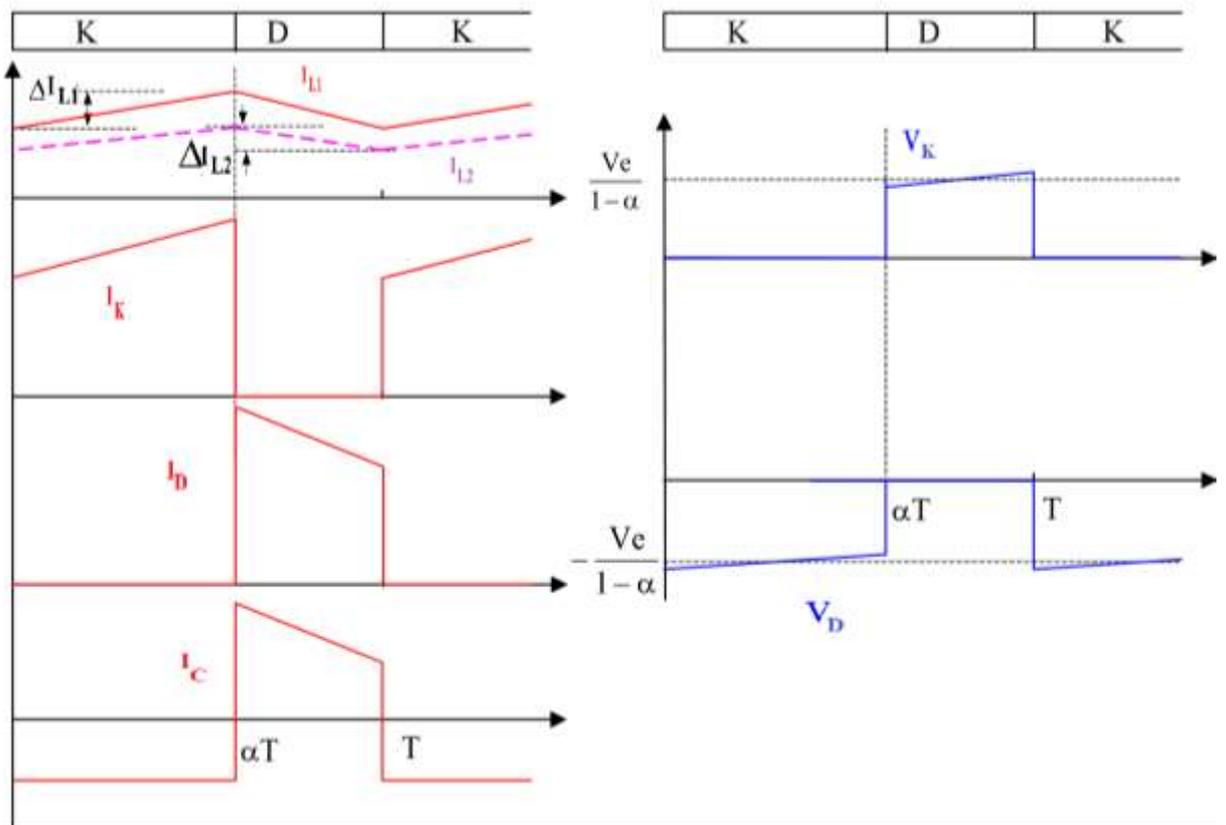


Figure.II.12 : Caractéristique de la tension et de courant du Convertisseur Sepic

II.4 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 α en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV. Pour cette raison, on va présenter et étudier par la suite les algorithmes de commande les plus populaires.

II.4.1 Algorithme Perturber et Observer (P&O) :

Ce processus est caractérisé par la perturbation du système tout en agissant sur le rapport cyclique α pour le but de la recherche de MPP, ce processus entraîne une augmentation ou une diminution de la tension, suite à cette perturbation on observe à chaque instant k les variations de puissance et de tension puis on les compare aux précédentes de l'instant $k-1$.

Si la puissance augmente, on s'approche au point de puissance maximum, donc on continue à perturber la tension dans le même sens, et si la puissance diminue, on s'éloigne donc du MPP. Dans ce dernier cas on doit inverser le sens de perturbation de tension comme il est représenté dans la Figure.II.13, Ce processus répète périodiquement jusqu'à ce que le MPP soit atteint selon l'organigramme de la Figure.II.14.

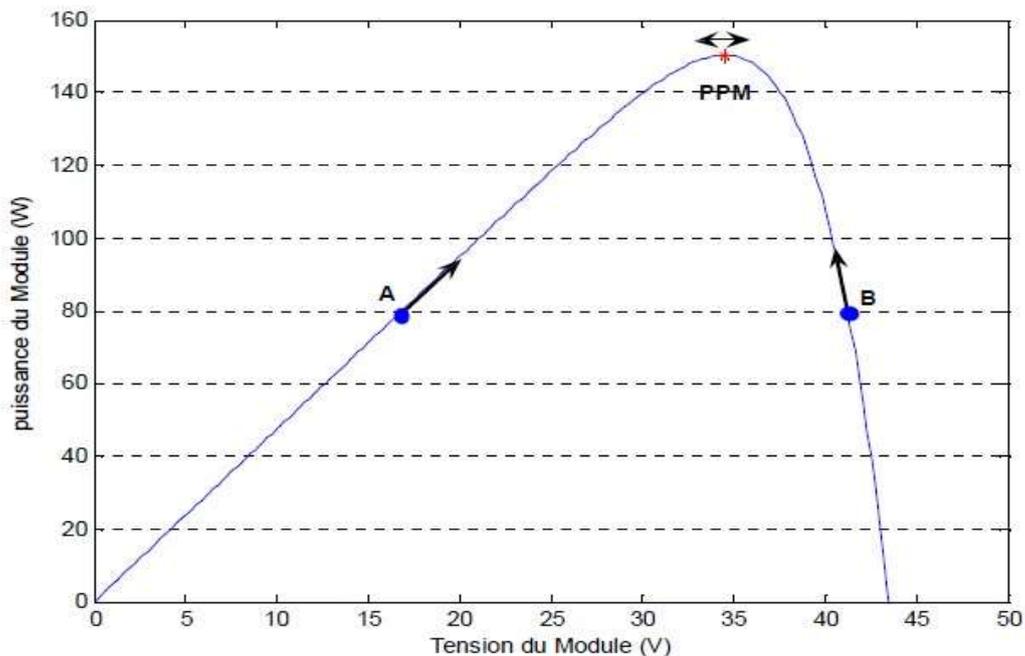


Figure.II.13 : principe de méthode P&O

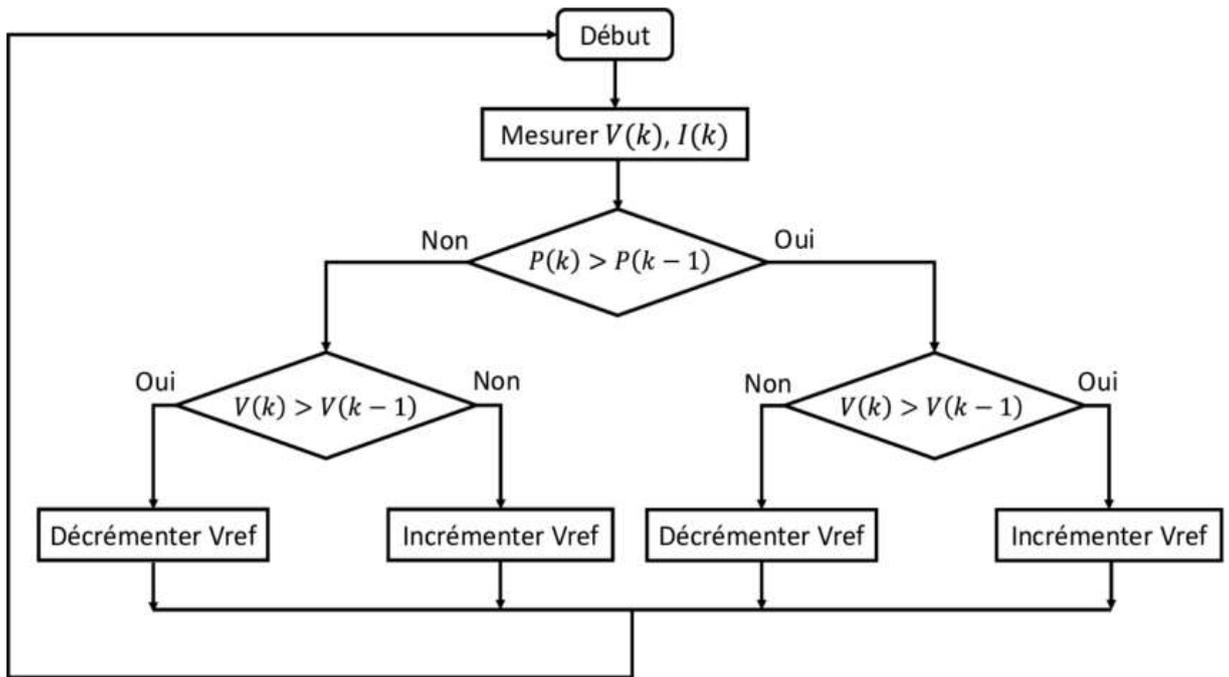


Figure.II.14 : Organigramme de l'algorithme de P&O

L'inconvénient de cette méthode lors d'un changement des conditions atmosphériques (lumière) la puissance du point de recherche sera perturbée par l'ensoleillement et non pas par la perturbation de l'algorithme [8][9], ce réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, Par conséquent, le point de fonctionnement s'éloigne du MPP et continuera à s'éloigner si l'éclairement augmente (ou diminue) progressivement, une version améliorée de cet algorithme est proposée, où on introduit une nouvelle condition dans la branche « Oui » de condition $\Delta P(k) > 0$ dans la structure de l'organigramme de l'algorithme de P&O.

II.4.2 Algorithme incrémentation de la conductance (INC) :

Cette technique est basée sur la connaissance de la variation de la conductance du GPV et des connaissances sur la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximum, tel que la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiquée dans l'équation suivante

$$G = \frac{i}{v} \quad (\text{II.31})$$

La position de point de fonctionnement par rapport au PPM est donnée par l'évolution de la puissance du module (P_{pv}) par rapport à la tension V_{pv} , la Figure.II.15 permet d'écrire les conditions suivantes :

Si $\frac{dP}{dV} > 0$, le point de fonctionnement est à gauche de MPPT.

Si $\frac{dP}{dV} = 0$, le point de fonctionnement est sur le MPPT .

Si $\frac{dP}{dV} < 0$, le point de fonctionnement est à droite de MPPT.

Le lien entre la conductance et la dérivée de la puissance $\frac{dp}{dv}$ peut être décrit par l'équation suivante :

$$\frac{dp}{dv} = \frac{d(v*i)}{dv} \quad (II.32)$$

Cette équation selon la règle du produit peut être réécrite :

$$\frac{dp}{dv} = i \frac{dv}{dv} + v \frac{di}{dv} = i + v \frac{di}{dv} = 0 \quad (II.33)$$

$$\frac{di}{dv} = -\frac{i}{v} \quad (II.34)$$

Donc les nouvelles variations de la conductance sont comme suite :

Si $\frac{di}{dv} > -\frac{i}{v}$, le PF est à gauche de MPPT.

Si $\frac{di}{dv} = -\frac{i}{v}$, le PF est sur le MPPT .

Si $\frac{di}{dv} < -\frac{i}{v}$, le PF est à droite de MPPT.

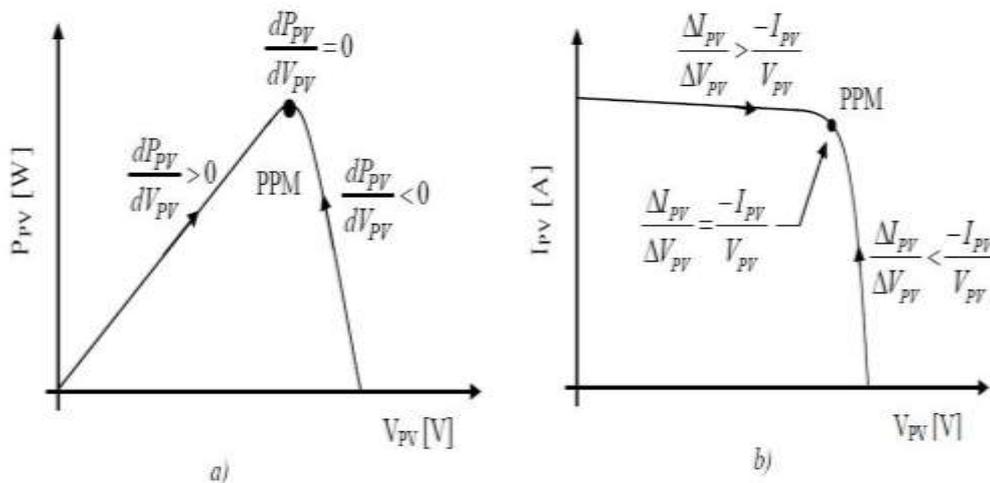


Figure.II.15 : Positionnement du point de fonctionnement

Si l'incrément de conductance dG est supérieur à l'opposé de la conductance on diminue le rapport cyclique cela produit une augmentation de la tension, par contre si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de cette dernière on augmente le rapport cyclique, ce processus est répété jusqu'à atteindre le PPM.

Le schéma de principe de cette méthode est illustré sur la figure suivante.

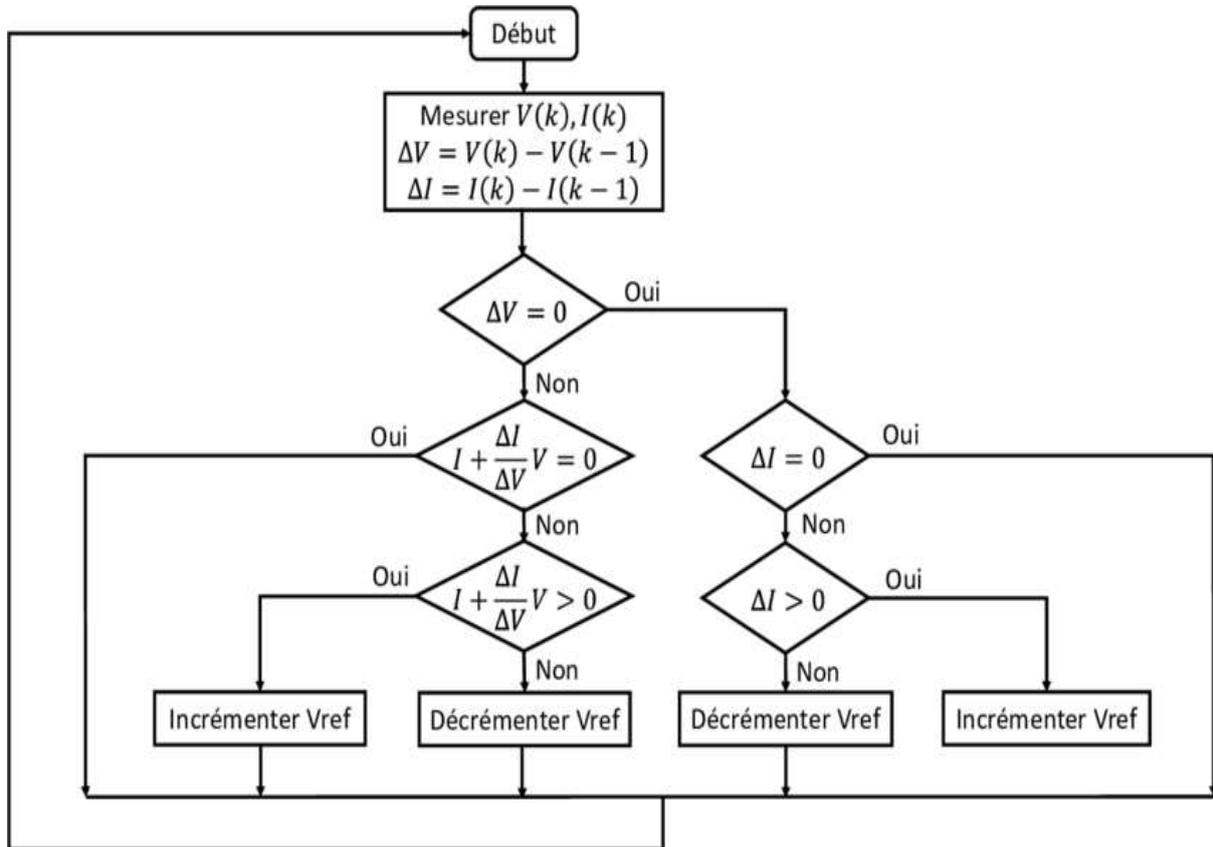


Figure.II.16 : Algorithme basée sur la méthode Incrément de Conductance

II.4.3 Algorithme Hill-climbing :

L'algorithme Hill-climbing ou méthode d'escalade est une méthode mathématique elle consiste simplement à évaluer les solutions du point de fonctionnement afin d'atteindre le point maximal de la fonction puissance du GPV.

Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du panneau et la valeur de rapport cyclique α appliqué au convertisseur statique, son algorithme a comme avantage un seule bloc de régulation qui varier le rapport cyclique α en l'incrémentation ou décrémentation jusqu'à l'arrivée au PPM $\frac{dp}{d\alpha} = 0$ comme le montre la Figure II.17

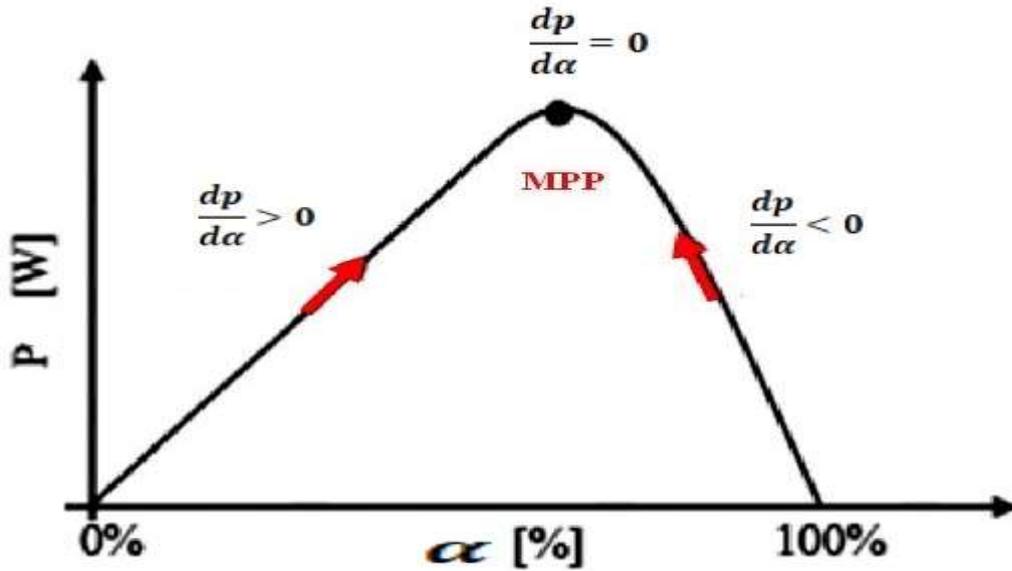


Figure II.17 : Relation entre le P_{PV} et le rapport cyclique α

II.4.4 Algorithme à base de la Logique floue

Cette commande est classée parmi les plus utiliser grâce à l'évolution des microcontrôleurs, l'avantage de cette technique est qu'elle peut fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précise, l'approche de FL est issue à la décomposition d'une plage de variation d'une variable réelle sous formes de variables linguistiques et l'attribution de la fonction d'appartenance pour chaque variable, Cette théorie est adaptée au problème d'optimisation atteindre le MPP, elle repose sur l'observation en temps réel de deux critères d'entrée sont l'écart E par rapport à la valeur recherchée $E = 0$ et la variation de l'erreur CE qui représente le sens et la vitesse de convergence, et une variation de sortie $\Delta\alpha$ qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le MPP.

Les deux entrées de contrôleur sont définies par les équations suivante :

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (II.35)$$

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k-1) \quad (II.36)$$

Le fonctionnement de cet algorithme se fait en trois bloc : la fuzzification, l'inférence et la Defuzzification comme le montre sur la figure suivante.

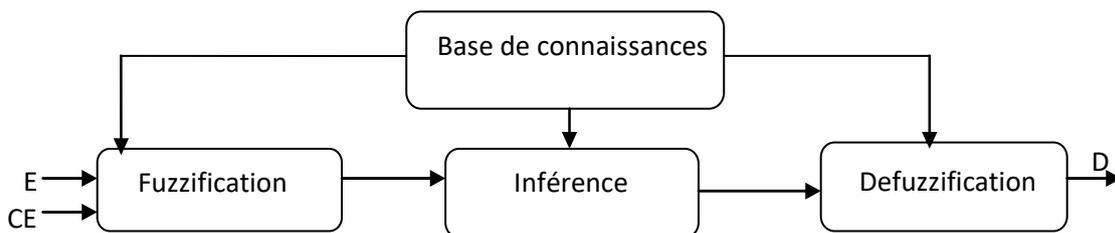


Figure II.18 : Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue

La fuzzification : Cette unité porte sur la conversion de variables réelles a des variables floue pouvant prendre cinq valeurs suivantes :

NB : Negative Big

NS : Negative Small

ZE : Zero

PS : Positive Small

PB : Positive Big

L'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, dans ce cas L'inférence floue est effectuée à l'aide de la méthode de Mamdani, utilise des règles de type IF... AND... THEN.

La Defuzzification : Utilise la méthode centroïde pour calculer le $\Delta\alpha$ de sortie qui est considéré comme le barycentre.

Parmi les différentes formes des fonctions d'appartenance on 'a trapèze, gaussien et triangulaire, mais la forme triangulaire est considérée comme la plus appropriée pour sa simplicité. La structure de base de la commande logique floue est illustrée dans la Figure II.19

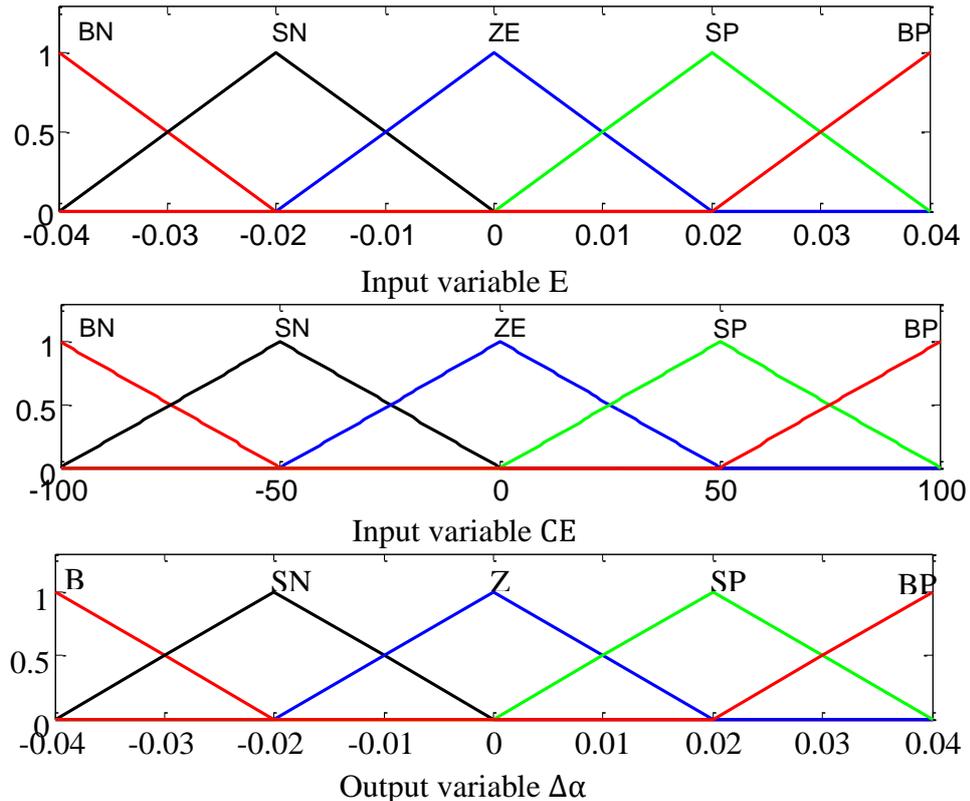


Figure.II.19 : Fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie

La variable de sortie est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramétré d'entrée. Comme le montre le tableau II.1

| E \ CE | BN | SN | ZE | SP | BP |
|--------|----|----|----|----|----|
| BN | ZE | ZE | BP | BP | BP |
| SN | ZE | ZE | SP | SP | SP |
| ZE | SP | ZE | ZE | ZE | SN |
| SP | SN | SN | SN | ZE | ZE |
| BP | BN | BN | BN | ZE | ZE |

Tableau II.1 : Table des contrôle FUZZY

"Si E est BP et CE est ZE Alors $\Delta\alpha$ est BN". Ce qui veut dire que : "Si le point de fonctionnement est loin du point de puissance maximale (PPM) vers le côté gauche, et le changement de la pente de la courbe $P = f(V)$ est environ Zéro. Alors il faut diminuer le rapport cyclique $\Delta\alpha$ largement".

La figure suivante montre le principe de MPPT avec la logique floue :

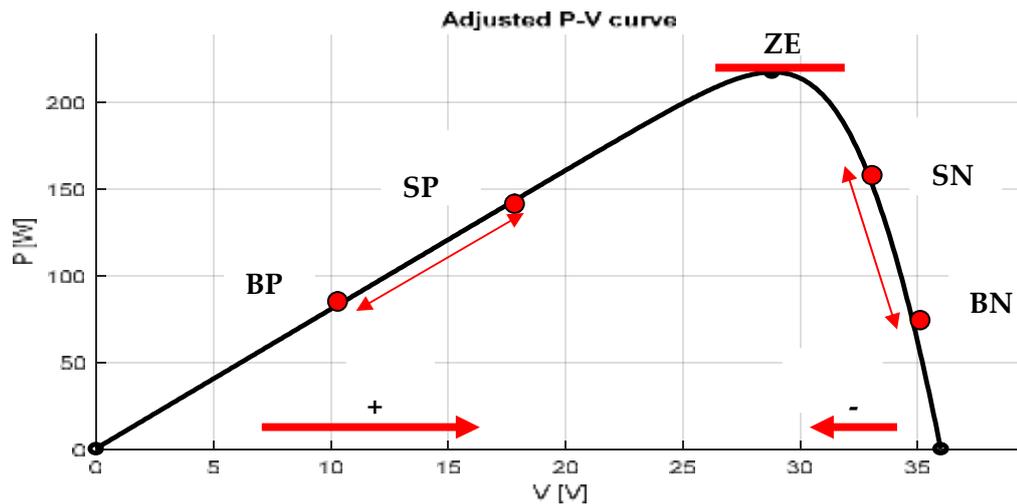


Figure II.20 : Principe de MPPT floue

II.4.5 MPPT avec l'optimisation par essais des particules

L'algorithme d'optimisation d'essaim de particules (Particle swarm optimization (PSO)) est un algorithme inscrit dans la famille des algorithmes évolutionnaires, ces derniers sont des algorithmes d'optimisation qui s'appuient sur l'évolution naturelle, leurs problème d'optimisation est défini comme la recherche du minimum ou maximum d'une fonction donnée.

L'algorithme PSO est développée par le Dr. EBERHART et le Dr. KENNEDY en 1995, est une technique d'optimisation stochastique inspirée par le comportement d'un essaim d'individus de oiseaux, ils sont régis par des règles de déplacement dans l'espace des solutions, permettant à ces particules de se déplacer progressivement de leur positions aléatoires pour atteindre une position locale optimale (exemple une source de nourriture) [10].

Utilisation de la PSO pour le MPPT :

Dans ce cas notre problème d'optimisation consiste à maximiser une fonction mathématique modélisé à partir d'un problème réel qui est la recherche du point de puissance maximum. Le PSO fait varier la vitesse V_i et la position x_i de chaque individu i à l'itération k par les formules suivantes :

$$V_i(k + 1) = w * (V_i(k) + C_1 \cdot R_1 (x_{pbest} - x_i(k)) + C_2 \cdot R_2 (x_{gbest} - x_i(k))) \quad (\text{II.37})$$

$$x_i(k + 1) = x_i(k) + V_i(k + 1) \quad \text{avec } i = 1, 2, \dots, N \quad (\text{II.38})$$

w : Est le poids de chaque individu.

x_{pbest} : Désigne le meilleur individu qu'elle a connu dans l'entourage de la particule i (personnel best).

x_{gbest} : Désigne la position du meilleur individu de tout l'essaim (global best).

N Représente nombre de particules et k nombre d'itérations.

C_1 et C_2 : sont des coefficients d'accélération, R_1 et R_2 des vecteurs aléatoires, de même dimension que les particules, générés dans l'intervalle $[0, 1]^D$ ou D est la dimension du problème qu'on veut résoudre.

L'organigramme de la figure suivante donne les étapes de la poursuite du MPP avec PSO.

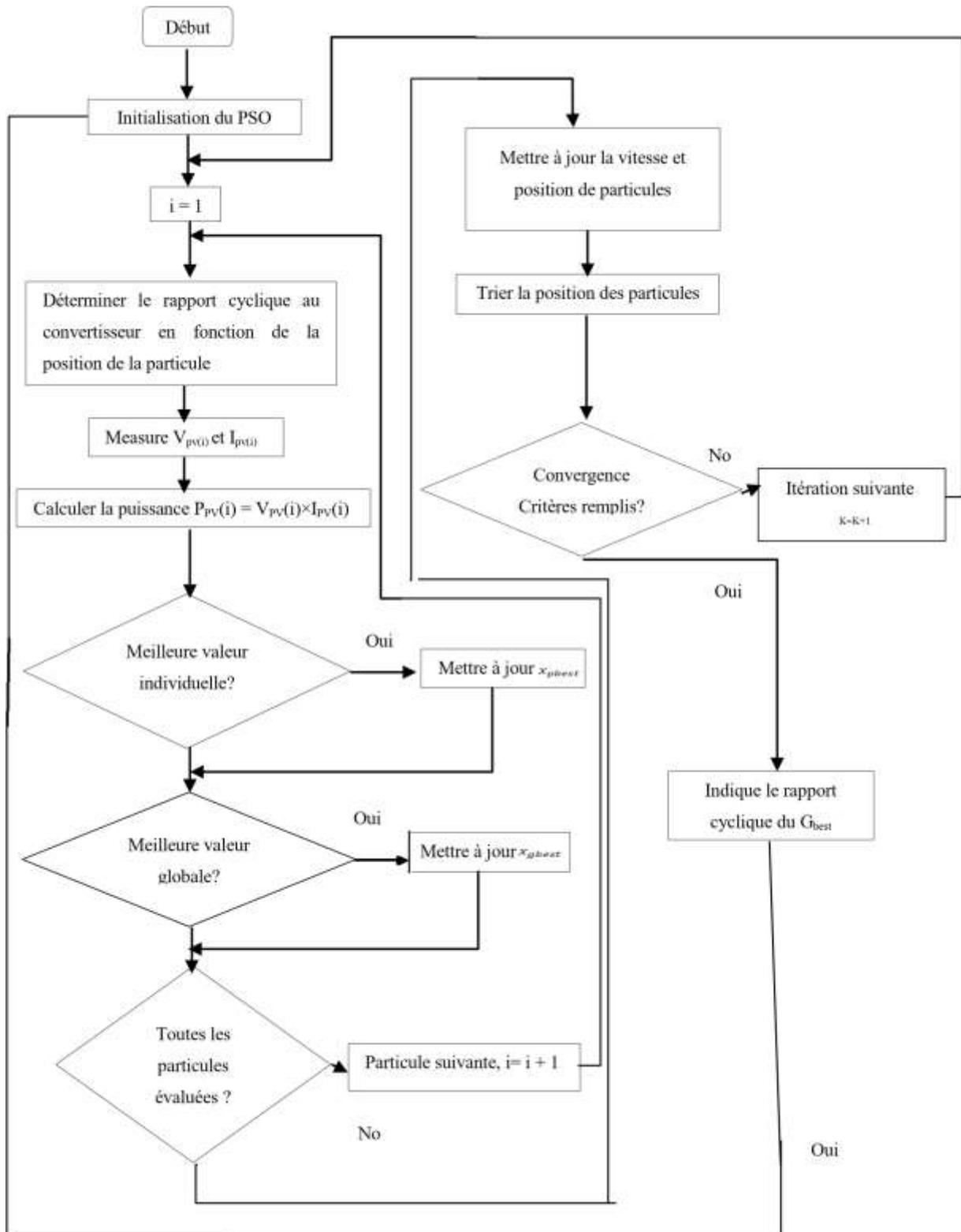


Figure.II.21 : l'organigramme basé sur (Particle swarm optimization (PSO))

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié un étage d'adaptation (une interface d'électronique de puissance) entre le système PV et la charge, on a étudié les différents convertisseurs DC-DC avec leurs influences sur la tension de panneau PV, nous avons ensuite présenté cinq techniques les plus populaires pour la poursuite de point de fonctionnement à puissance maximale. Nous avons commencé par l'explication des méthodes classiques les plus utilisées **P&O** et **INC** et leurs organigrammes. Par la suite on a expliqué brièvement la méthode de **Hill-climbing**.

Ver la fin on a étudié la méthode basée sur l'intelligence artificielle **FL** et l'approche métaheuristique **P&O** avec les étapes d'optimisation de ce dernier.

CHAPITRE III : Interprétation des résultats de simulation

Introduction

Dans notre partie pratique l'utilisation de logiciel MATLAB/Simulink est très utile pour l'évolution des performance théorique d'un système PV, ce logiciel il fournit une interface graphique permettant de construire des modèles sous forme de diagrammes blocs qui offrent la possibilité de voir le système à différents niveaux.

Ce chapitre est consacré à des simulations d'un générateur photovoltaïque suivi par un convertisseur DC/DC et tester une commande MPPT numérique. Ceci nous permet de modifier les paramètres du système facilement et de visualiser l'apport de la commande sur le générateur photovoltaïque à fin d'obtenir de meilleurs résultats.

III.1. Simulation des parties de système photovoltaïque :

III.1.1 Simulation de panneau PV :

III.1.1.1 Modélisation mathématique du panneau PV :

Le modèle que nous avons utilisé pour simuler le comportement du panneau PV est basé sur le modèle électrique équivalent simplifier représenter sur la figure de chapitre 2 dont l'expression du courant délivré est donnée par l'équation suivante [10].

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

Tel que les équations qui contrôlent les caractéristiques photovoltaïques sont :

Le photon courant I_{ph}

$$I_{ph} = [I_{cc} + Ki(Top - Tref)] \frac{G}{G0} \quad (\text{III.2})$$

Le courant de la diode I_d

$$I_d = I_s (e^{\frac{V_d}{V_{th}}} - 1) \quad (\text{III.3})$$

Avec la tension thermique V_{th} est :

$$V_{th} = \frac{AK.Top}{q} \quad (\text{III.4})$$

Et la tension au borne de diode V_d est :

$$V_d = V + I.R_s \quad (\text{III.5})$$

Le courant de saturation I_s

$$I_s = I_{rs} \left(\frac{Top}{Tref} \right)^3 e^{\frac{q.Eg}{A.K} \left(\frac{1}{Tref} - \frac{1}{Top} \right)} \quad (III.6)$$

Le courant de saturation de la diode I_{rs}

$$I_{rs} = \frac{I_{cc}}{e^{\frac{q \cdot V_{oc}}{A \cdot N_s \cdot K \cdot Top} - 1}} \quad (III.7)$$

Le courant shunt I_{sh}

$$I_{sh} = \frac{V_d + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (III.8)$$

Donc l'expression du courant délivré peut s'écrire comme suite :

$$I = I_{ph} - I_s * \left[e^{\frac{(V+I \cdot R_s) \cdot q}{A \cdot K \cdot Top \cdot N_s}} - 1 \right] - I_{sh} \quad (III.9)$$

Le tableau (III-1) donne les constantes et les variables utilisé dans les équations précédentes.

| |
|----------------------------------------------------------------------|
| I_{cc} : Le courant de court-circuit (8.21 A) |
| $Tref$: Température de référence (298K) |
| Top : Température de fonction (K) |
| GO : Eclairage pour les STC 1000 (W / m ²) |
| G : Irradiation (W / m ²) |
| Ki : Coefficient de température de courant de court-circuit 0,0032 |
| A : Facteur d'idéalité de la diode 1.3 |
| q : Charge électrique élémentaire (1.6 × 10 ⁻¹⁹ C) |
| K : La constante de Boltzmann (1.38 × 10 ⁻²³ J/K) |
| E_g : énergie de gap de cellule (1.1 eV) |
| V : Tension aux bornes de la cellule (V) |
| V_{oc} : Tension en circuit ouvert (32.9 V) |
| R_s : Résistance série (221 Ω) |
| R_{sh} : Résistance shunt 415.405 Ω) |
| N_s : Nombre de cellules en série 54 |
| N_p : Nombre de cellules en parallèle 1 |

Tableau (III-1) les constantes et les variables utilisé dans les équations de module PV

III.1.1.2 Blocs diagramme des fonctions de module PV sous Matlab/Simulink :

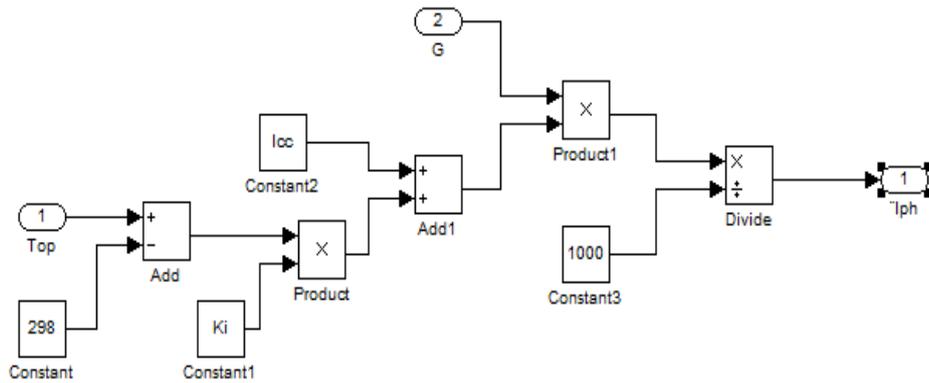


Figure III.1 : Blocs diagramme de la fonction I_{ph}

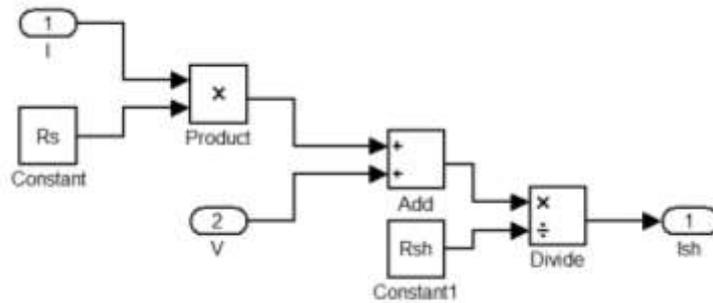


Figure III.2 : Blocs diagramme de la fonction I_{sh}

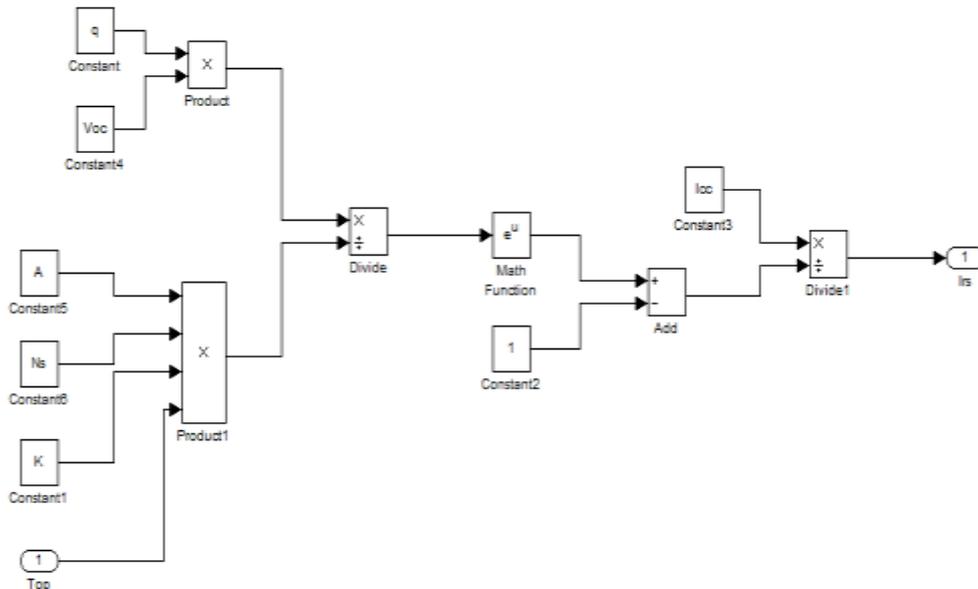


Figure III.3 : Blocs diagramme de la fonction I_{rs}

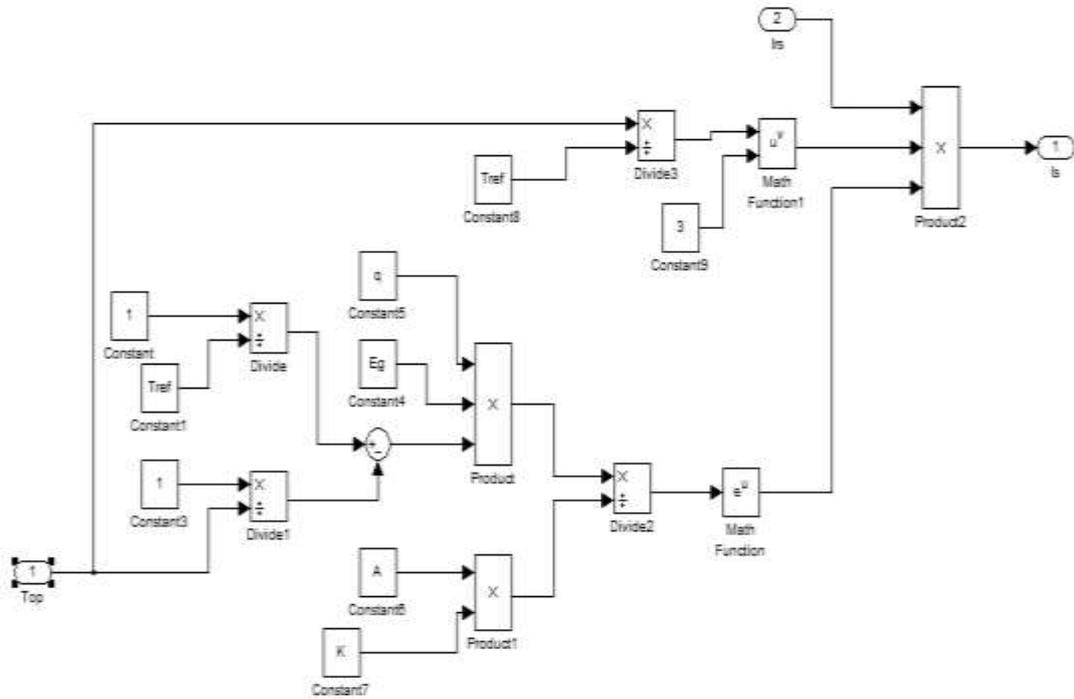


Figure III.4 : Blocs diagramme de la fonction I_s

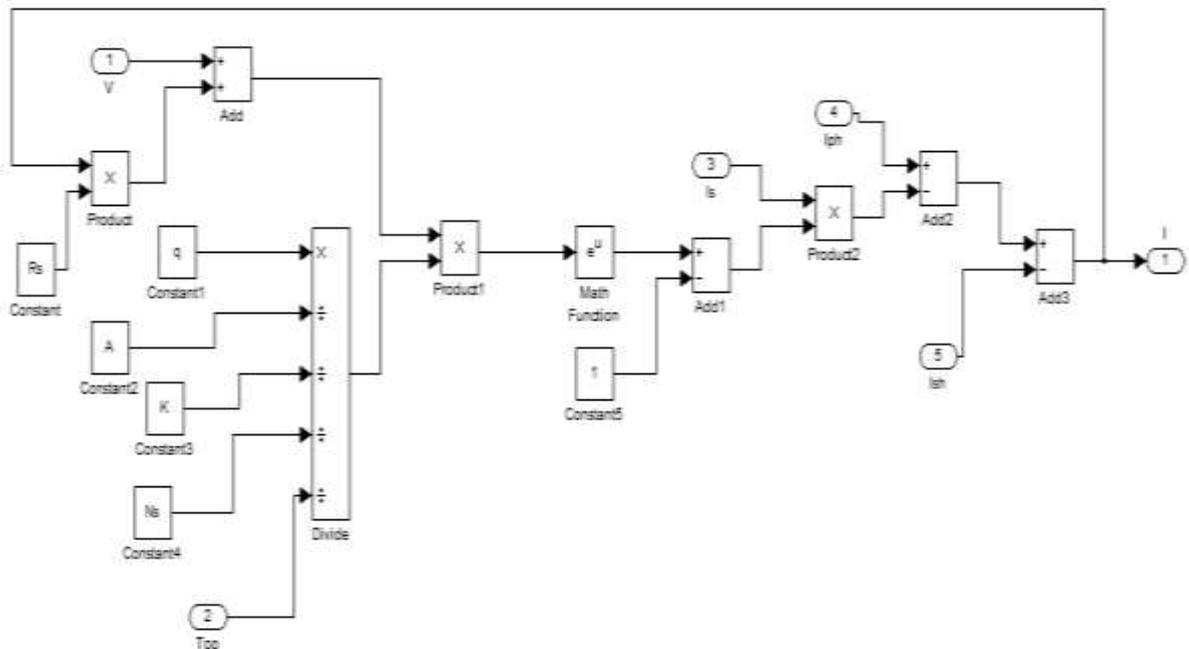


Figure III.5 : Blocs diagramme de la fonction I

La Figure III.6 représente le schéma bloc du module photovoltaïque étudié.

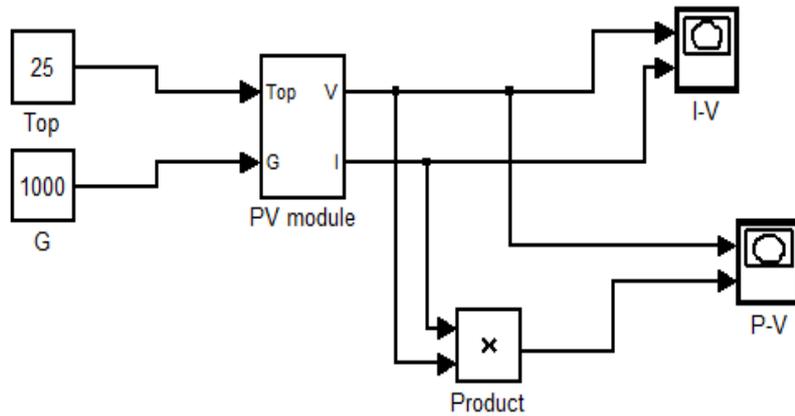


Figure III.6 Schéma de simulation d'un panneau PV

III.1.1.3 Résultats de simulation :

Les courbes I-V et P-V obtenus sous les conditions de température et d'irradiation de référence (25°C et 1000 W/m^2) sont représentée dans la Figure III.7.

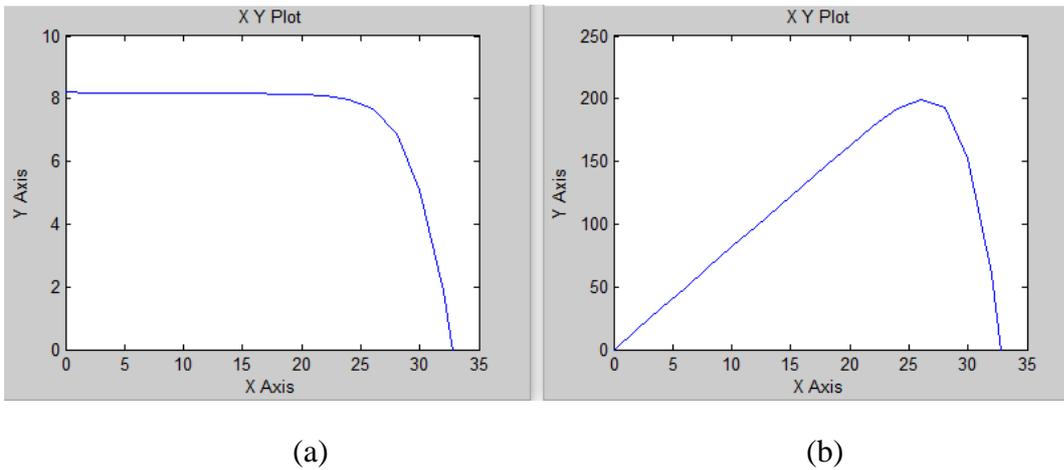


Figure III.7 : Caractéristique I-V (a) et P-V (b) d'un panneau photovoltaïque à 25°C et 1000 W/m^2

On observe que pour le bon fonctionnement de panneau PV le courant doit atteindre 8A et la tension 25V ce qui donne une puissance maximale de 200W.

Pour une température ou une irradiation défèrent de (25°C et 1000 W/m^2) cause une perturbation de courant et de tension ainsi que la puissance.

Les courbes I-V et P-V obtenus Pour une température 40°C et d'irradiation de référence constante (1000 W/m^2) sont représentée dans la Figure III.8.

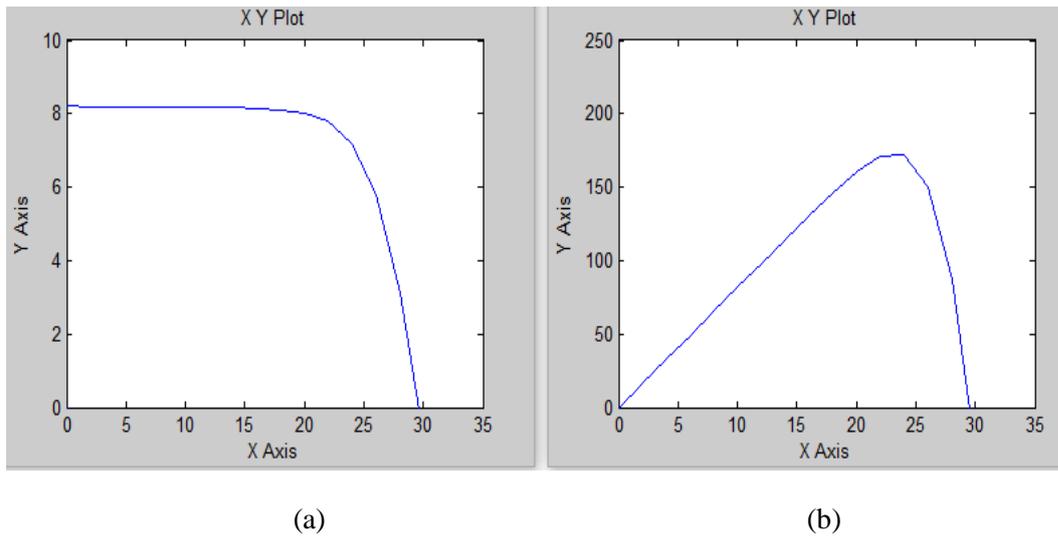


Figure III.8 : Caractéristique I-V (a) et P-V (b) d'un panneau photovoltaïque a 40°C et 1000 W/m²

La tension et la puissance diminuent avec l'augmentation de la température.

Les courbes I-V et P-V obtenus Pour une température 25°C et l'irradiation 1200 W/m² sont représentée dans la Figure III.9.

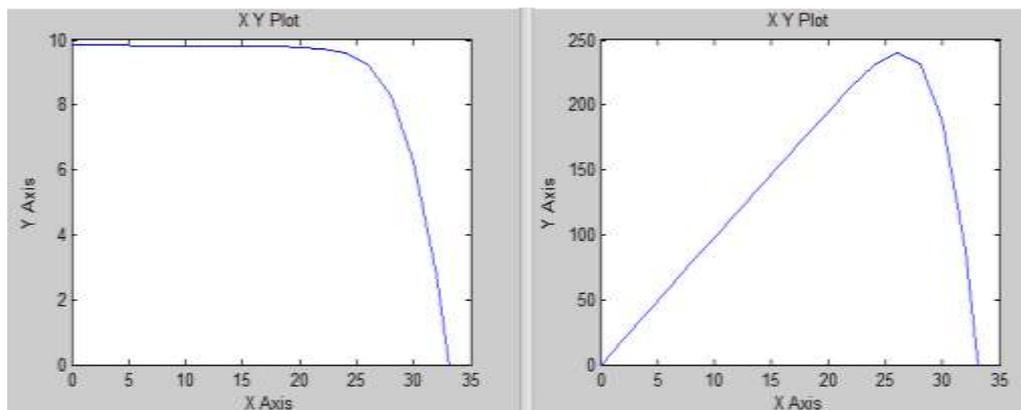


Figure III.9: Caractéristique I-V (a) et P-V (b) d'un panneau photovoltaïque à 25°C et 1200 W/m²

L'augmentation de l'irradiation cause une augmentation du courant jusqu'à (A) et la puissance jusqu'à 240 (W).

III.1.2 Simulation de convertisseur :

Le convertisseur choisi est le Boost la Figure III.10 représente le schéma bloc de ce convertisseur sous Matlab/Simulink.

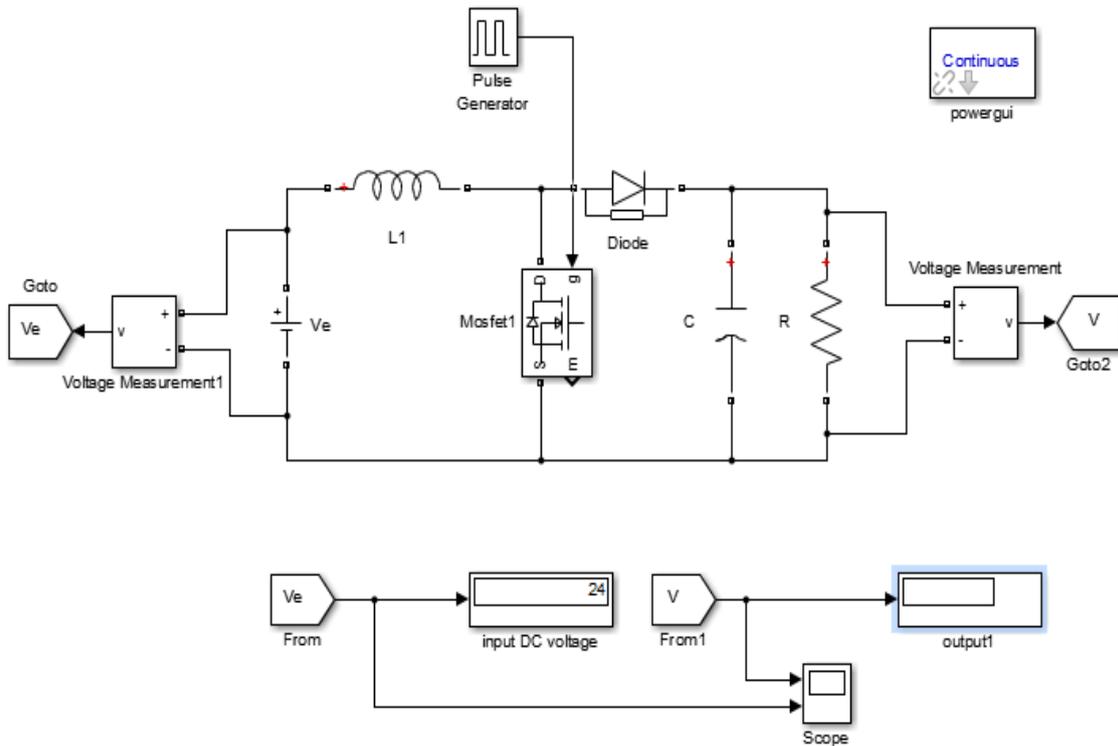


Figure III.10 : schéma bloc de ce convertisseur sous Matlab/Simulink

D'où Les paramètres choisis sont $V_e = 24 V$, $L = 10^{-3}H$, $R = 50\Omega$, $C = 470 * 10^{-6}F$.

Le convertisseur DC-DC étudiée peut augmenter le tension d'entrée selon le rapport cyclique dont il fonctionne.

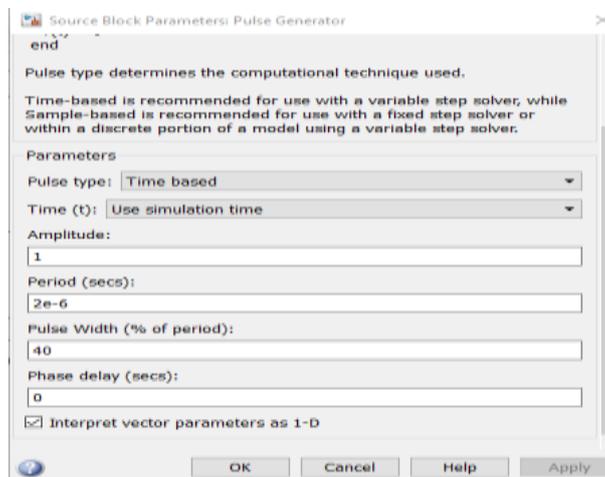


Figure III.11 : le rapport cyclique fixée au convertisseur Boost

Le résultat obtenu :

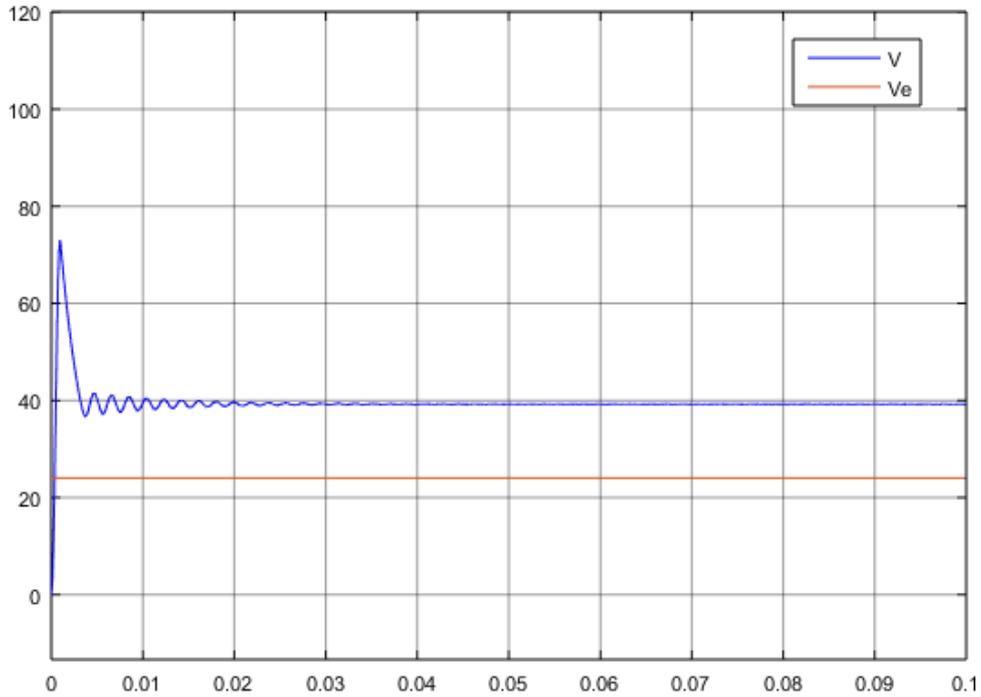


Figure III.12 : forme de tension d'entrée et de sortie pour $D = 0.4$

Dans cette figure on remarque que lorsque $D = 0.4$ la tension de sortie atteint 39.35V.

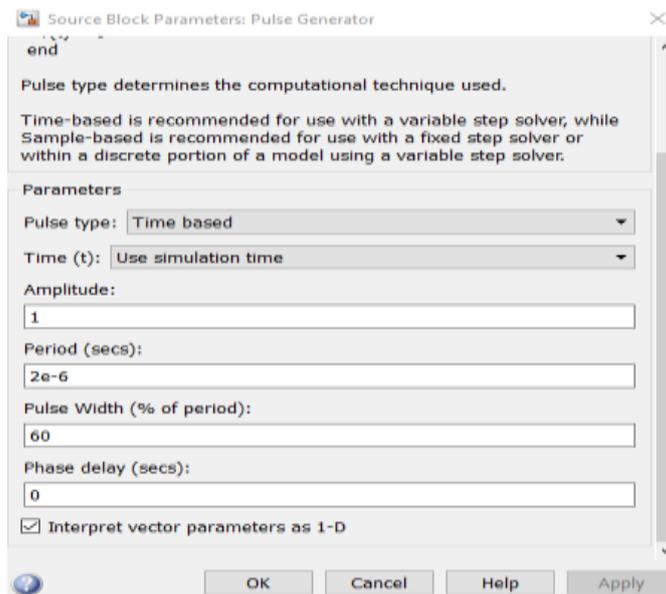


Figure III.13 : le rapport cyclique fixée au convertisseur Boost

Le résultat obtenu :

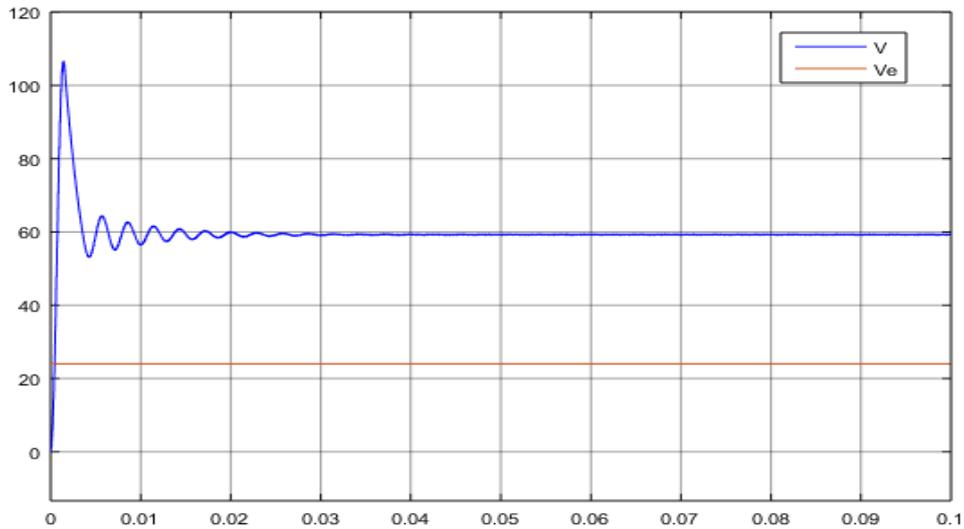


Figure III.14 : forme de tension d'entrée et de sortie pour $D = 0.6$

Dans ce cas ou $D = 0.4$ la tension de sortie augmente jusqu'à 59.5V.

Après l'augmentation du rapport cyclique nous avons obtenu une tension de sortie plus élevée par rapport au premier cas ce qui vérifie l'équation ((II-12), alors le convertisseur Boost achève très bien son travail.

III.2. Simulation de système photovoltaïque avec la commande MPPT

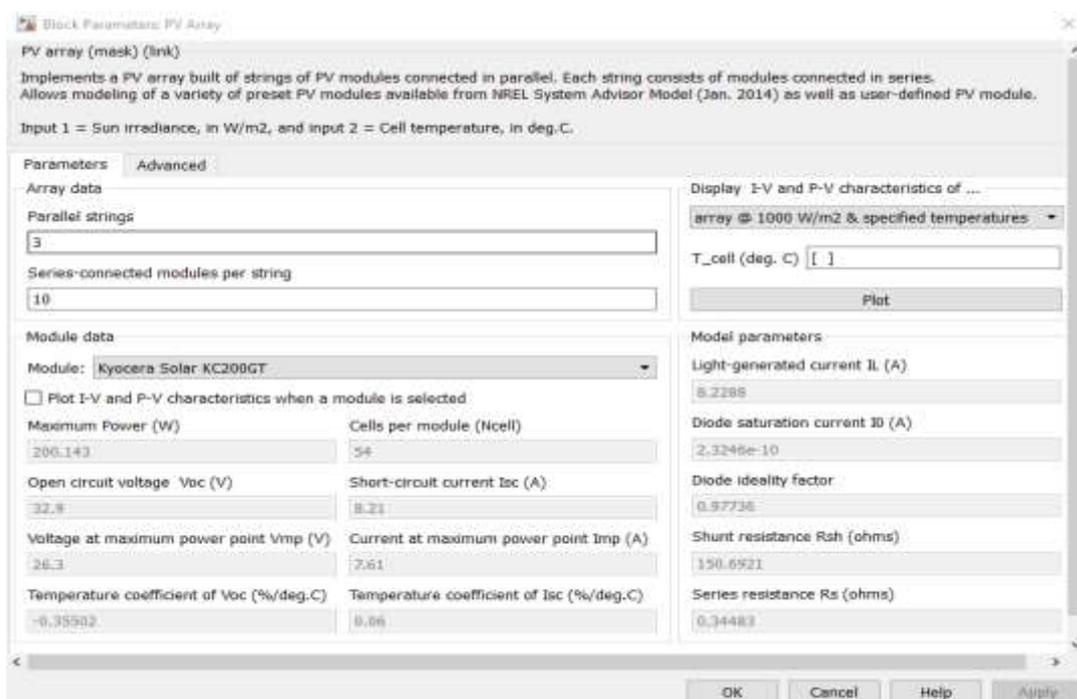


Figure III.15 : les paramètres du panneau PV

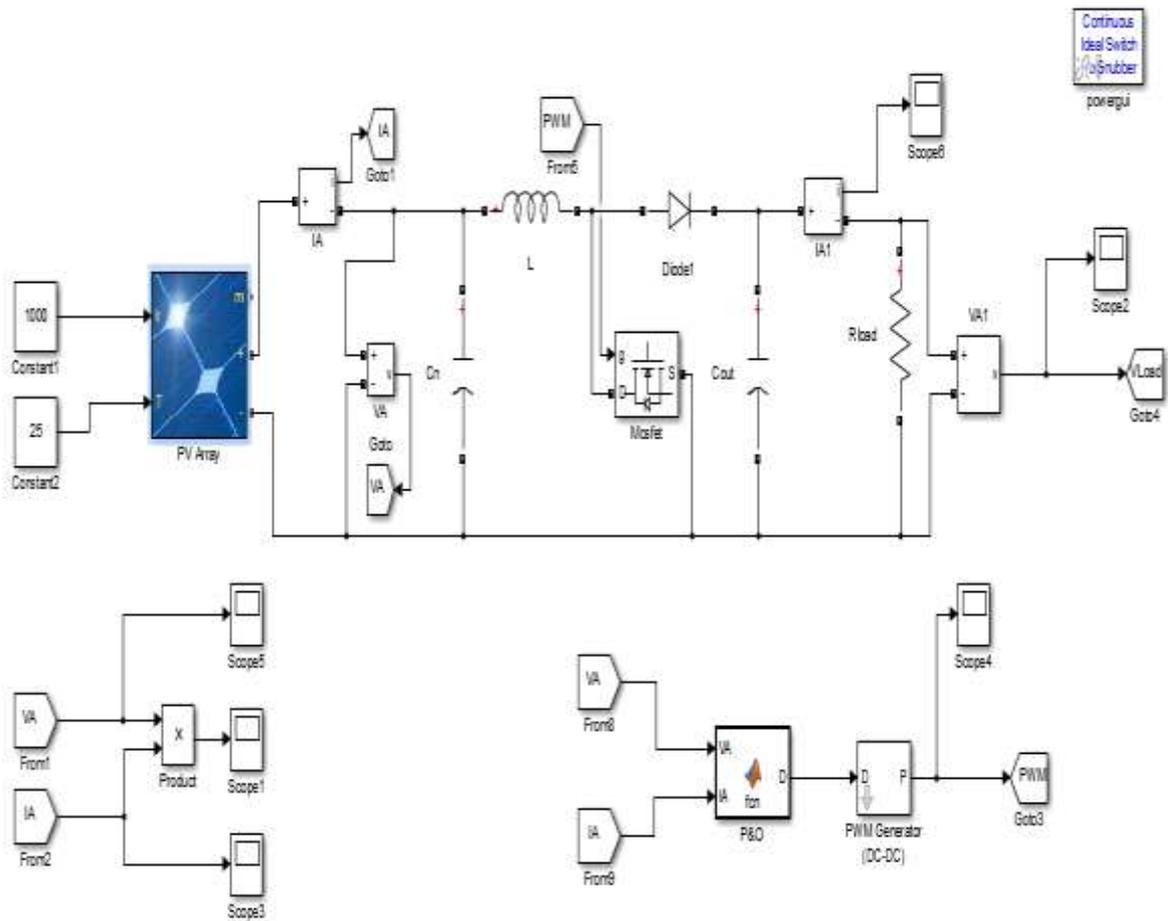


Figure III.16 : Le bloc schématique de SIMULINK du SPV

III.2.1. Simulation avec la méthode P&O :

La Figure III.17 représente le programme sous script MATLAB.

```

1  function D = fcn(VA, IA)
2  - persistent VAprev
3  - persistent PAprev
4  - persistent Dprev
5
6  - if isempty(VAprev)
7  -     VAprev = 0;
8  - end
9  - if isempty(PAprev)
10 -     PAprev = 0;
11 - end
12 - if isempty(Dprev)
13 -     Dprev = 0.5;
14 - end
15 - D=Dprev;
16 - PA=VA*IA;
17 - DeltaVA=VA-VAprev;
18 - DeltaPA=PA-PAprev;
19
20 - if DeltaPA>0
21 -     if DeltaVA>0
22 -         D=Dprev-0.01;
23 -     elseif DeltaVA<0
24 -         D=Dprev+0.01;
25 -     end
26 - elseif DeltaPA<0
27 -     if DeltaVA>0
28 -         D=Dprev+0.01;
29 -     elseif DeltaVA<0
30 -         D=Dprev-0.01;
31 -     end
32 - end
33
34 - if D>0.9
35 -     D=0.9;
36 - elseif D<0
37 -     D=0;
38 - end
39
40 -     VAprev=VA;
41 -     PAprev=PA;
42 -     Dprev=D;

```

Figure III.17 : le programme P&O sous script MATLAB.

Le principe de cet algorithme est de calculer ΔV et ΔP pour chaque instant et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande qui est la variation de rapport cyclique d'un pas de 0.01 afin d'entraîner une variation sur la tension tel que L'incrémentatif de la tension sera avec une diminution de rapport cyclique, et l'incrémentatif négatif de la tension sera avec l'augmentation de rapport cyclique

La simulation du système photovoltaïque à base de la commande MPPT du type PO Figure III.17, avec les paramètres du panneau de type ARRAY sont donnés par la figure suivant.

III.2.1.1. Fonctionnement sous des conditions climatiques fixe :

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT de type « Perturbation et Observation » sous des conditions atmosphériques fixes (un éclairement 1000W/m^2 et une température de 25°C) sont représentés par les figures ci-dessous.

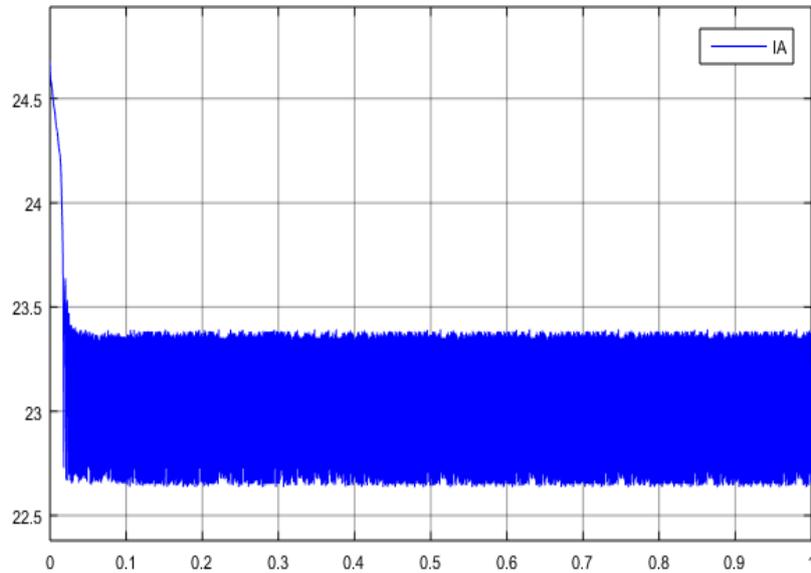


Figure III .18 : Evolution de courant du panneau PV avec l'application de PO

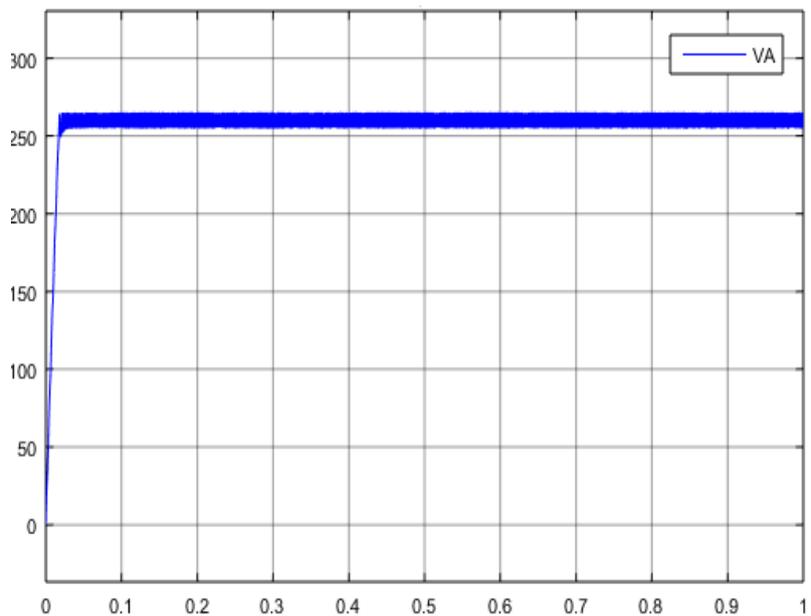


Figure III .19 : Evolution de tension du panneau PV avec l'application de PO

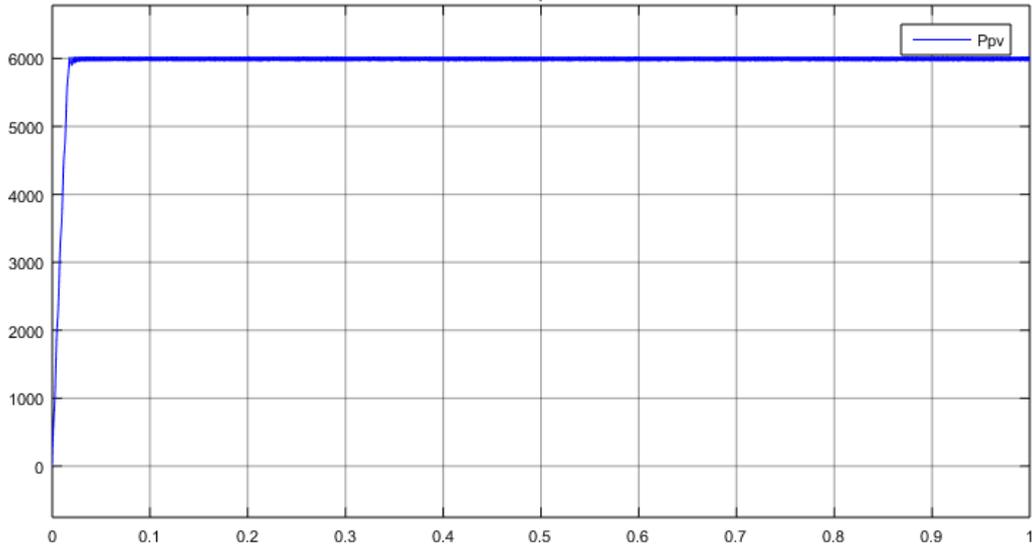


Figure III .20 : Evolution de la puissance du panneau PV avec application de PO

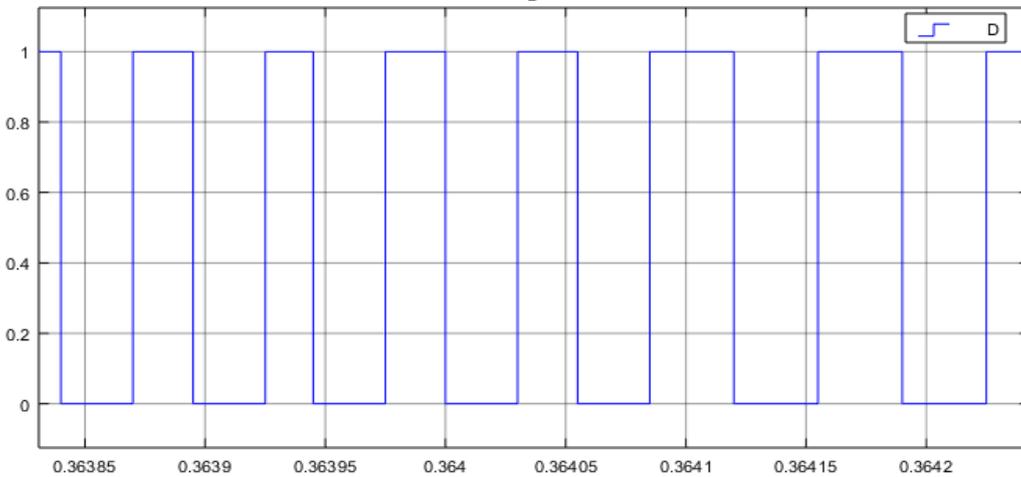


Figure III .21 : Evolution de rapport cyclique du panneau PV avec l'application PO

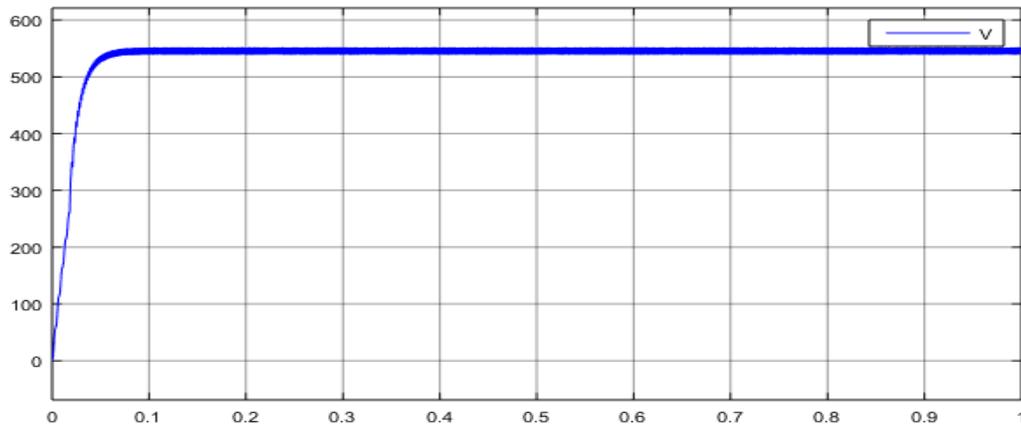


Figure III .22 : Evolution de la tension de sortie du panneau PV avec l'application PO

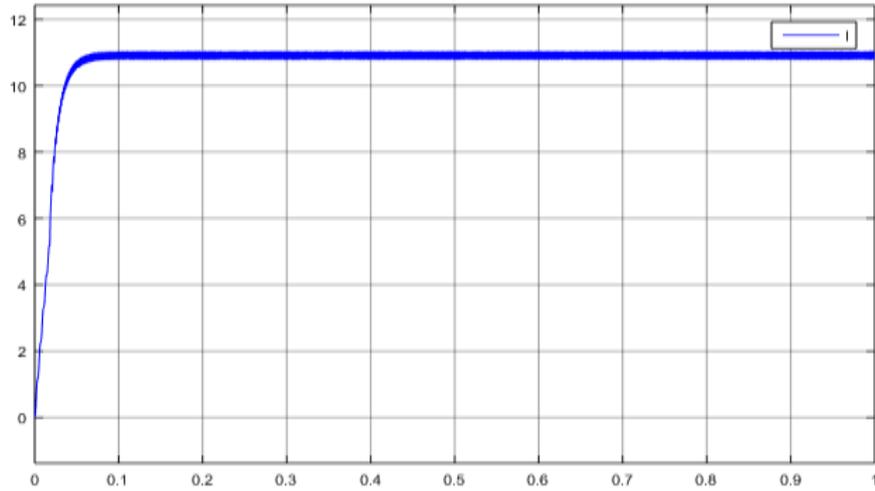


Figure III .23 : Evolution de courant de sortie du panneau PV avec l'application PO

On remarque d'après la Figure III .20 que la commande P&O oscille autour de PPM, et d'après la Figure III .19 la tension du GPV atteint 266V, ce qui est compatible avec les caractéristiques du champ présentées sur la Figure III.16.

III.2.1.2. Fonctionnement sous des conditions climatiques variables.

Le fonctionnement du système étudié sous une température fixe et un éclairement variable ($500W \text{ m}^{-2}$, $1000W \text{ m}^{-2}$).

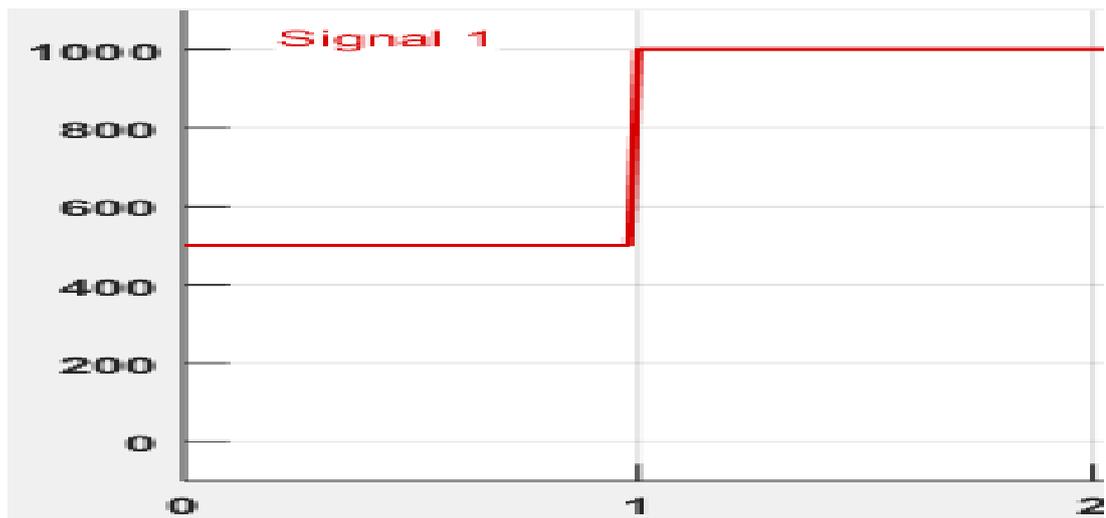


Figure III.24 : Profile d'un éclairement injecté dans le générateur photovoltaïque

Les résultats de simulation :

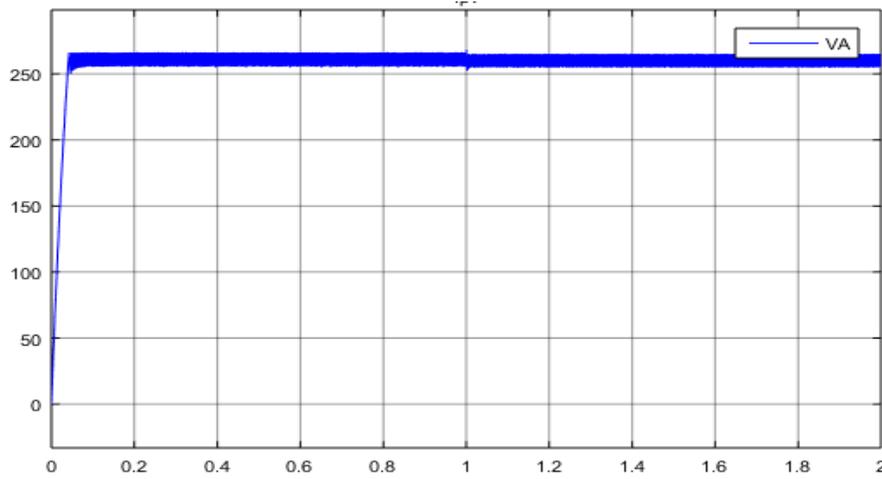


Figure. III.25 : Courbe de tension du GPV aux changements d'irradiations

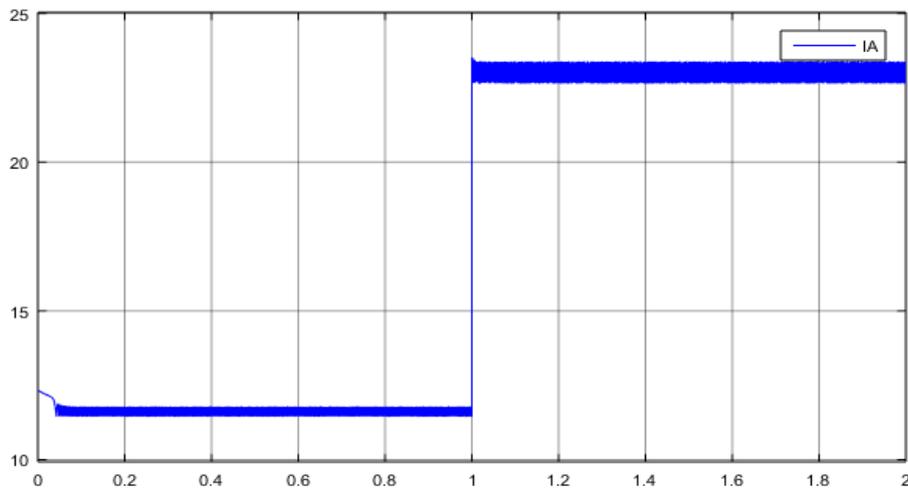


Figure. III.26 : Courbe de courant du GPV aux changements d'irradiations

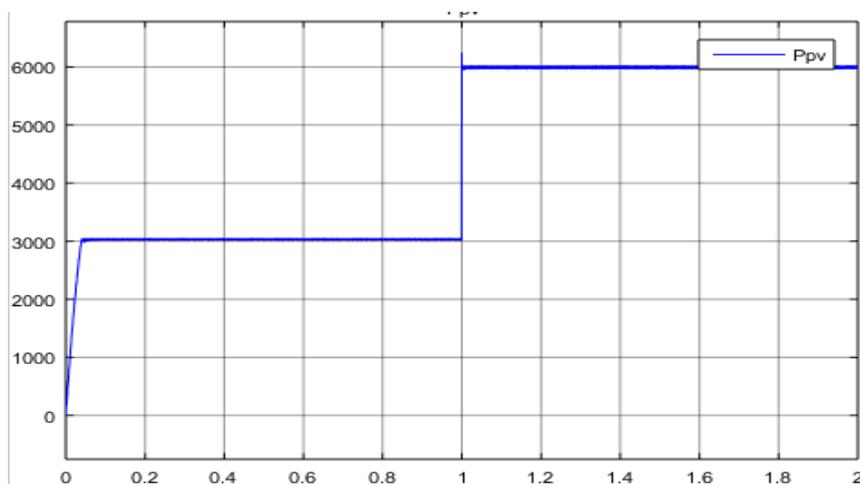


Figure. III.27 : Courbe de puissance du GPV aux changements d'irradiations

Analyse des résultats :

Aux changements d'irradiation la puissance et le courant changent linéairement, aussi que la variation du pas d'incrémentation ΔD influe sur les oscillations autour du point de puissance maximal (MPPT), cela démontre que la commande MPPT fonctionne efficacement.

III.2.2. Simulation avec la méthode INC :

Le programme utilisée sous script MATLAB est donné par la figure suivante.

```

1  function Duty = IC(VA, IA)
2  -   Delta=0.00001;
3  -   duty_init=0;
4  -   duty_min=0;
5  -   duty_max=1;
6  -   persistent Vold duty_old Iold;
7  -   if isempty(Vold)
8  -       Vold=0;
9  -       Iold=0;
10 -       duty_old=duty_init;
11 -   end
12 -   dV=VA-Vold;
13 -   dI=IA-Iold;
14 -   if dV==0
15 -       if dI==0
16 -           Duty=duty_old;
17 -       else
18 -           if dI>0
19 -               Duty=duty_old-Delta;
20 -           else
21 -               Duty=duty_old+Delta;
22 -           end
23 -       end
24 -   else
25 -       if dI/dV==-IA/VA
26 -           Duty=duty_old;
27 -       else
28 -           if dI/dV>-IA/VA
29 -               Duty=duty_old-Delta;
30 -           else
31 -               Duty=duty_old+Delta;
32 -           end
33 -       end
34 -   end
35 -   if Duty>=duty_max && Duty<=duty_min
36 -       Duty=duty_old;
37 -   end
38 -   duty_old=Duty;
39 -   Vold=VA;
40 -   Iold=IA;

```

Figure III.28 : le programme INC sous script MATLAB

III.2.2.1. Fonctionnement sous des conditions climatiques fixe :

Pour des conditions atmosphériques fixes (un éclairage 1000W/m^2 et une température de 25°C), Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT de type « Incrémentation » sont représentés par les figures ci-dessous.

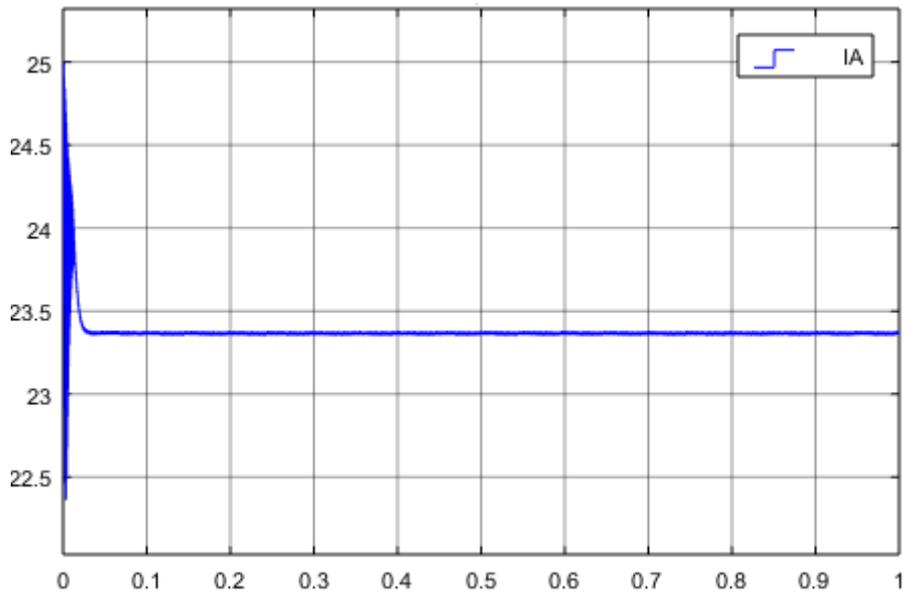


Figure III .29 : Evolution de courant du panneau PV avec l'application de INC

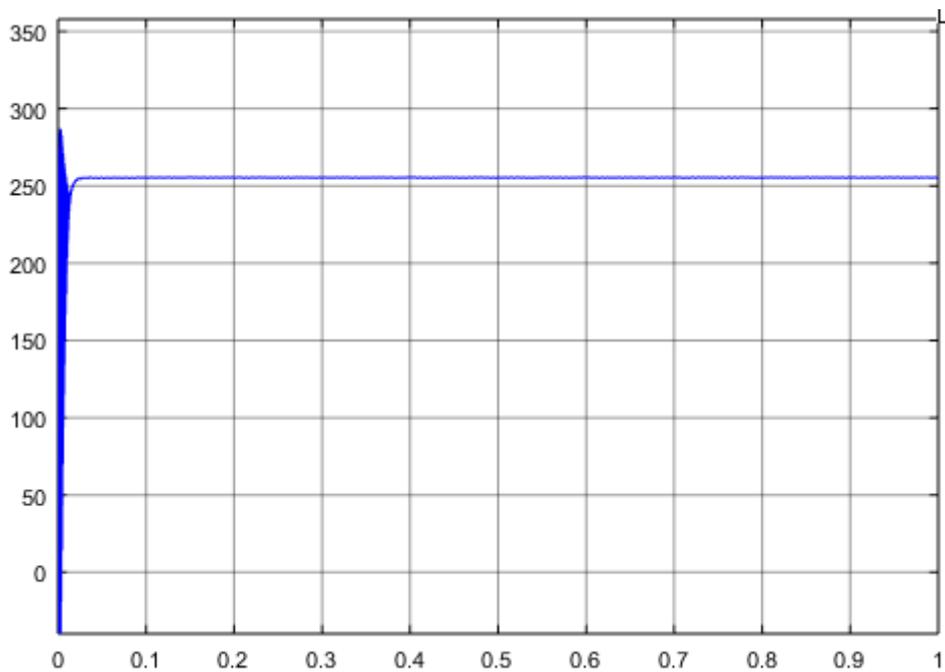


Figure III .30 : Evolution de tension du panneau PV avec l'application de INC

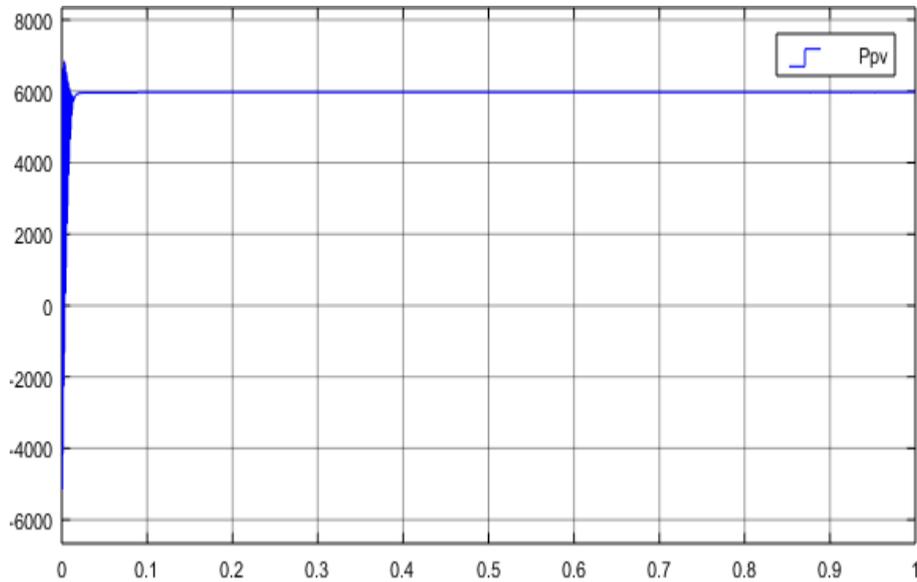


Figure III .31 : Evolution de la puissance du panneau PV avec application de INC

III.2.2.2. Fonctionnement sous des conditions climatiques variables.

Pour une température fixe et un éclaircissement variable ($500W \text{ m}^{-2}$, $1000W \text{ m}^{-2}$) les résultats de simulation sont représentés dans la figure suivante.

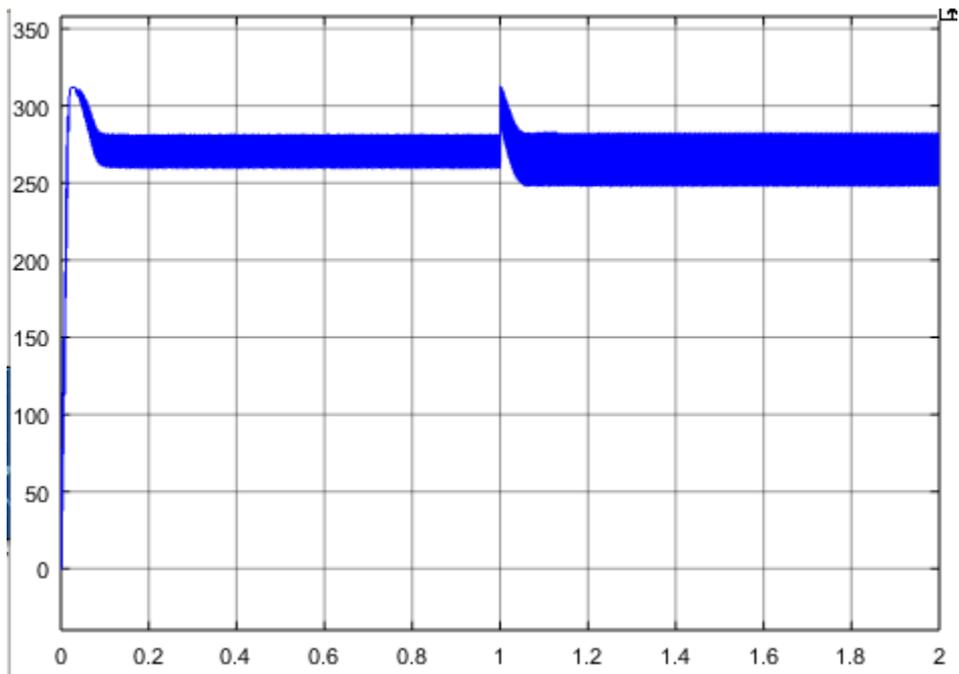


Figure.III.32 : Courbe de tension du GPV aux changements d'irradiations

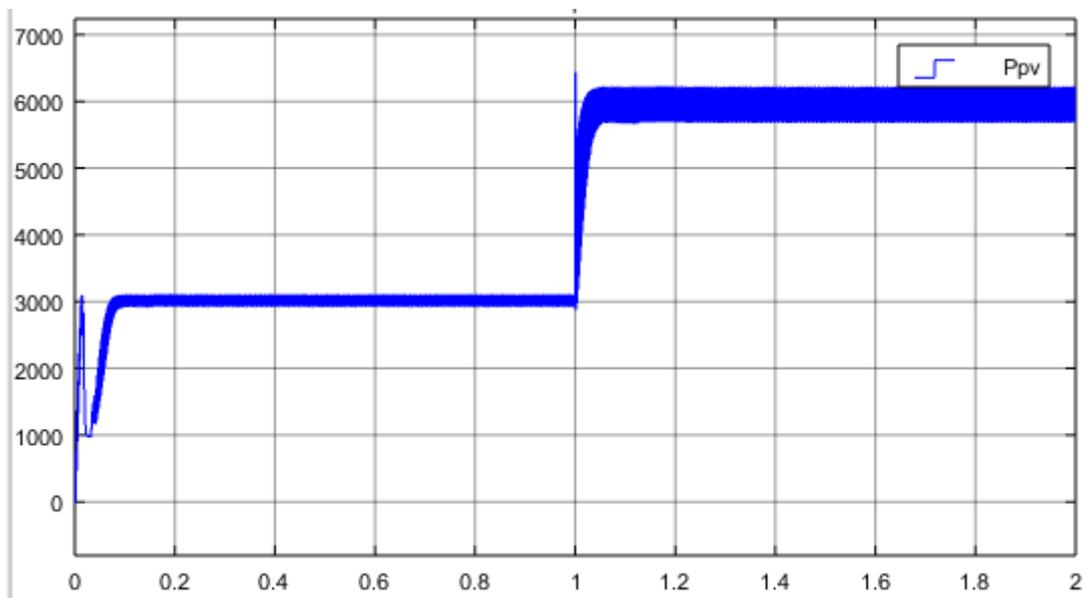


Figure.III.33 : Courbe de puissance du GPV aux changements d'irradiations

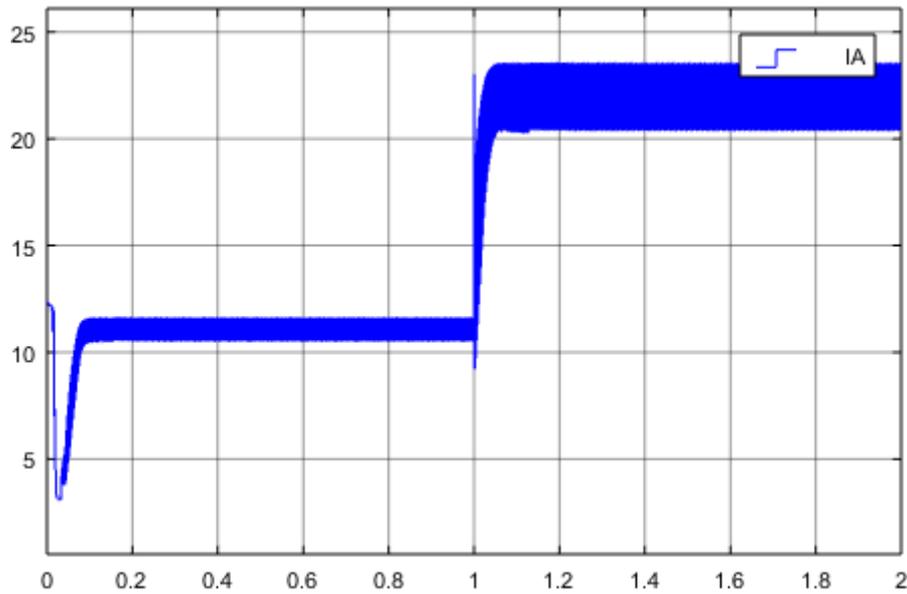


Figure.III.34 : Courbe du courant du GPV aux changements d'irradiations

Les résultats obtenus se sont presque les mêmes qu'on a obtenue lors de la simulation avec la méthode P&O. Mais la commande INC comporte mieux lors d'un changement rapide d'éclairément. Cela montre l'efficacité de la commande dans la poursuite du point de puissance maximale.

Conclusion :

Ce chapitre a consacré la modélisation du système PV, on'a fait l'étude et simulation sur un panneau PV mathématique, aussi une simulation d'un convertisseur DC-DC de type Boost, ensuite nous avons effectuée une simulation de systèmes PV avec la commande MPPT à base de deux méthodes P&O et INC.

De ce fait, les simulations fournissent la meilleure opportunité pour analyser le comportement des deux méthodes aux différents changements d'irradiation.

Les résultats de simulation montrent que l'algorithme INC donne les meilleurs résultats que l'algorithme P&O.

Conclusion générale

Le travail que nous avons effectué avait comme l'objectif l'étude de la commande MPPT d'un système photovoltaïque pour le but d'atteindre et fixer le point de fonctionnement de panneau solaire à son point de puissance maximale. Ce système est composé d'un générateur photovoltaïque associé à une charge capacitive, un étage d'adaptation convertisseur DC-DC, et un étage de commande MPPT pour piloter le convertisseur.

Dans ce cadre nous avons procédé à une étude des différents organes constituant, le système photovoltaïque à savoir la cellule PV, les modèles PV et leur comportement lors des changements environnementaux, le convertisseur et son fonctionnement dans le rôle adaptateur source-charge, ainsi que les différents types de stratégie et algorithmes proposés pour poursuivre le point de puissance maximale. Pour cela des algorithmes de recherche ont été utilisés dans la littérature à savoir : la méthode perturbation et observation, la méthode de la conductance incrémentale.

La présentation de ce modèle nous a permis d'élaborer le schéma SIMULINK de notre système. En conditions atmosphériques normales, les cellules du panneau sont exposées à une température de 25 C et un éclairement variable, Les simulations effectuées par l'utilisations de ces deux techniques ont permis de comprendre les problèmes liés au fonctionnement de chaque méthode MPPT.

La première méthode, appelée « Perturbations et observation » considérée comme étant le plus simple mécanisme, parmi les méthodes algorithmiques du point de vue nombre de variables traitées et complexité de l'algorithmique de traitement. Cette méthode a un problème de déviation du vrai point MPP lorsqu'une augmentation brusque de l'ensoleillement est produite ce qui cause une perte de puissance. Tandis que la méthode « Incrémental Conductance » traite la dérivée de puissance d'une autre manière, elle donne des résultats presque similaires à la méthode P&O malgré sa rapidité vis-à-vis des variations brusques des conditions atmosphériques.

Par ce travail, nous souhaitons avoir apporté une contribution à l'étude des systèmes photovoltaïque et leurs commandes notamment MPPT classique et améliorée.

Un travail de recherche n'est jamais fini...En effet, les perspectives de ce travail sont tellement nombreuses, qu'on va se limiter au niveau de celles qui ont un impact direct avec notre projet, en perspective, ce travail sera suivi ultérieurement par l'utilisation d'autres

structures de convertisseurs plus performants et par l'application d'une méthode MPPT plus évoluée comme les méthodes PSO.

Références Bibliographiques

- [1] : Mr BELKAID ABDELHAKIM, « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome », Thèse du doctorat, Université FERHAT ABBAS-SETIF 1.
- [2] : A. TOULAIT, R. AILI, « Modélisation et simulation sous MATLAB/SIMULINK d'un système photovoltaïque adaptée par une commande MPPT », Mémoire de Fin d'Etude de MASTERR ACADEMIQUE, Université Mouloud Mammeri DE Tizi-Ouzou.
- [3] : C. TIGRINE, O. AIT OUALI, « Etude et simulation des techniques MPPT d'un système photovoltaïque », Mémoire de Fin d'Etude de MASTERR ACADEMIQUE, Université A. MIRA-BEJAIA.
- [4] : A. LABOURET, P. CUMNUL, J-P. BRAUN, « CELLULES SOLAIRES, les bases de l'énergie photovoltaïque », ED-3. Page 24.
- [5] : A. AYOUDJ, « Etude des différentes commandes MPPT pour générateur photovoltaïque » Mémoire de Fin d'Etude, Université A. MIRA-BEJAIA.
- [6] : Bellazouz Lynda, « Réalisation d'une commande MPPT Numérique », Mémoire d'ingénieur en électronique de fin d'études, Université Abderrahmane Mira de Bejaia 2009/2010.
- [7] : A. BIBOO LEORRTA, « Réalisation de techniques MPPT numérique », Rapport de stage, Projet de Fin d'Etudes, Université Virgila.
- [8] : E. Bianconi, J. Calvente, R. Giral, G. Petrone, « A fast current-based MPPT technique based on sliding mode controller », IEEE International Symposium on Industrial Electronics(ISIE), Poland, pp.59-64.
- [9]: B. AZOUI, « Modelization and experimentation of low power system aimed to electrification of mauntainous and isolation region », Mémoire de Magister, Université de Batna.
- [10] : N. AOUCHICHE, « Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque », Thèse de doctorat de l'Etablissement université Bourgogne Franche-Comté.
- [11] : H. MEDDAH, « Etude d'un système photovoltaïque à base d'un convertisseur statique DC/DC à gain tension élevé », Projet fin d'Etude, Université A. MIRA-BEJAIA.

Résumé :

Ce mémoire présente une étude de quelques commandes MPPT pour un générateur photovoltaïque, qui ont pour le but d'atteindre et fixer le point de fonctionnement de panneau solaire à son point de puissance maximale, ce sont la méthode « Perturbation et Observation », « Incrémentation du conductance ».

La simulation des systèmes PV nous permis grâce à la méthode P&O et INC d'assurer la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque, avec l'ajustement du rapport cyclique du convertisseur qui mène le système vers le point puissance désiré.