

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique**

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

Faculté de Technologie

**Mémoire de Fin d'Études
En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE**

Faculté de la Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques

Thème

**Étude comparative de techniques de
poursuite du point de puissance maximale
MPPT pour un système photovoltaïque**

Réalisé par :

KHALIKA ZAKRIA

DOU ABDELGHANI

ZELACI ASMA

Encadré par :

Dr: GACEM ABDELMALEK

Soutenu en Juin 2022



Dédicace

Je dédie cet humble travail :

A mes très chers parents

à tous mes frères

A toutes mes sœurs

A tous mes amis et collègues

Pour ceux qui me connaissent de près ou de loin



A.Z.A

Remerciement

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

Nous tenons à exprimer notre remerciement et notre gratitude à notre

encadreur :

Dr.« GACEM ABDELMALEK »

Nos remercie : ments à tous les enseignants qui nous enseignés durant les années

du Cours au département de Génie Electrique

Université Echahid Hamma Lakhdar

El-Oued.

Nos remerciements sont également adressés aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.

Abstract:

Photovoltaic energy (PV) is increasingly gaining its place in alternative energy sources but solar panels, despite the development in manufacturing technologies, suffer from a fairly low energy conversion efficiency, this efficiency can be even lower if the photovoltaic generator (PVG) does not work around a point called: maximum power point MPP. The pursuit of this point, which changes position with climatic conditions, is a very important step in the design of a PV system. In this thesis we are going to simulation, optimization and realization of a photovoltaic system operating with a booster converter. This study covers the implementation of different algorithms of the maximum power point such as by the perturbation and observation algorithm (P&O) and Increment de conductance and Particle swarm optimization and Coucou search. These algorithms gave satisfactory results after study and simulation with the photovoltaic system

Keywords : Photovoltaic generator, Buck- Booster, P&O, Incrément de conductance , Particle swarm optimization , Coucou search

Résumé :

L'énergie photovoltaïque (PV) gagne de plus en plus sa place dans les sources d'énergie alternatives mais les panneaux solaires, malgré l'évolution des technologies de fabrication, souffrent d'un rendement de conversion d'énergie assez faible, ce rendement pouvant être encore plus faible si le générateur photovoltaïque (PVG) ne fonctionne pas autour d'un point appelé : point de puissance maximale MPP. La poursuite de ce point, qui change de position avec les conditions climatiques, est une étape très importante dans la conception d'un système PV. Dans cette thèse nous allons vers la simulation, l'optimisation et la réalisation d'un système photovoltaïque fonctionnant avec un convertisseur booster. Cette étude couvre la mise en œuvre de différents algorithmes du point de puissance maximale tels que l'algorithme de perturbation et d'observation (P&O) et l'optimisation de l'Incrément de conductance et de l'essaim de particules et Coucou search . Ces algorithmes ont donné des résultats satisfaisants après étude et simulation avec le système photovoltaïque

Cléage : générateur photovoltaïque , Buck- Booster , P&O, Incrément de conductance , Particle swarm optimization , Coucou search

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|----|
| TABLE DES MATIÈRES | 6 |
| LISTE DE FIGURES | 9 |
| LISTE DE TABLEAUX | 11 |
| LISTE DES SYMBOLS ET ABRÉVIATIONS | 12 |
| Introduction générale | 14 |
| Chapitre I Généralités sur les systèmes photovoltaïques..... | 17 |
| I.1. Introduction: | 18 |
| I.2. Les ressources des énergies renouvelables:..... | 19 |
| I.3. L'énergie solaire:..... | 19 |
| I.3.1. Rayonnement solaire: | 20 |
| I.3.2. Spectre du rayonnement: | 21 |
| I.3.3. Durée d'insolation: | 22 |
| I.4. Description des éléments d'un système photovoltaïque: | 22 |
| I.4.1. Cellule photovoltaïque:..... | 22 |
| I.4.1.1. Historique:..... | 22 |
| I.4.1.2. Constitution de la cellule photovoltaïque: | 23 |
| I.4.2. L'effet photovoltaïque: | 24 |
| I.4.3. La cellule photovoltaïque:..... | 24 |
| I.4.3.1. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque: | 24 |
| a) La résistance série R_s :..... | 27 |
| b) Le courant de saturation I_s :..... | 28 |
| c) photo actuelle I_{ph} : | 28 |
| I.4.3.2. Paramètres d'une cellule photovoltaïque:..... | 28 |
| A. Courant de court-circuit (I_{cc}):..... | 28 |
| B. Tension de circuit-ouvert (V_{co}): | 29 |
| C. Rendement énergétique: | 29 |
| I.5. La protection des modules solaires:..... | 30 |
| I.5.1. La diode anti-retour: | 30 |
| I.5.2. Les diodes by-pass:..... | 31 |
| I.6. Modélisation d'une cellule photovoltaïque: | 31 |
| I.6.1. Cas d'une cellule idéale:..... | 31 |
| I.6.2. Cas d'une cellule réelle: | 33 |

| | |
|--|----|
| I.7. Simulation de générateur photovoltaïque: | 34 |
| I.7.1. Plaque signalétiques d'un générateur photovoltaïque de 75(w): | 34 |
| I.7.2. Présentation générale de Proteus: | 35 |
| I.7.3. Schéma équivalente de (GPV):..... | 35 |
| I.7.4. l'influentes de température:..... | 36 |
| I.7.5. l'influentes de l'éclairement : | 36 |
| I.8. Avantages et inconvénients d'une installation PV: | 37 |
| a)Avantages..... | 37 |
| b) Inconvénient: | 38 |
| I.9.Conclusion..... | 38 |
| Chapitre II Convertisseur DC/DC | 39 |
| II .1. Introduction: | 40 |
| II .2. Applications des convertisseurs DC/DC: | 40 |
| II.3. Convertisseur DC/DC: | 40 |
| II.4.Type hacheurs: | 41 |
| II.4.1. Hacheur survolteur (Boost): | 41 |
| II.4.1.1. Fonctionnement:..... | 42 |
| II.4.1.2. modèle mathématique: | 43 |
| II.4.2. Hacheur dévolteur (Buck): | 44 |
| II.4.2.1. Fonctionnement:..... | 44 |
| II.4.2.2. modèle mathématique: | 46 |
| II.4.3. Hacheur survolteur – dévolteur:..... | 47 |
| II.4.4. Convertisseur Ćuk : | 48 |
| II.4.5. Convertisseur Sepic :..... | 50 |
| II.5. Modèle de le hacheur survolteur : | 51 |
| II.6. Etage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge: | 53 |
| II.6.1. Adaptation par convertisseurs électroniques :..... | 53 |
| II.7. Problème MPPT : | 55 |
| II.8.Conclusion: | 56 |
| Chapitre III méthodes MPPT..... | 57 |
| III.1. Introduction..... | 58 |
| III.2. La commande MPPT : | 58 |
| III.3 Principe de la recherche du point de puissance maximal : | 58 |
| III.4.Classification de l'algorithme de suiveur la puissance max :..... | 60 |

| | |
|--|----|
| III.4.1.Méthodes indirectes : | 60 |
| III.4.1.1. La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur : | 61 |
| III.4.2.Les méthodes directes : | 61 |
| III.4.2.1 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe): | 62 |
| III.4.2.2.Algorithme de Incrément de Conductance (IncCond): | 64 |
| III.4.2.3 Optimisation d’essaim de particules (PSO): | 66 |
| III.4.2.4 Algorithme de coucou search (CS) : | 67 |
| III.4.2.4.1 Les principales étapes de l’algorithme de recherche coucou: | 68 |
| III.5. Définitions des différents rendements d’une chaîne de conversion photovoltaïque: .. | 69 |
| III.6. Critères d’évaluation d’une commande MPPT: | 69 |
| III.7. Conclusion: | 69 |
| CHAPITRE IV SIMULATION DE SYSTÈME | 70 |
| IV.1. Introduction: | 71 |
| IV.2. Simulation d’un système photovoltaïque | 71 |
| IV.4. Résultats de la simulation: | 73 |
| IV.4.1. Algorithme PO : | 73 |
| a) stable radiation (1000w/ m2): | 73 |
| b) variable radiation (1000 – 750 – 500 w/ m2): | 74 |
| IV.4.2. Algorithme INC : | 75 |
| a) stable radiation (1000 w/ m2): | 75 |
| b) variable radiation (1000 – 750 – 500 w/ m2): | 76 |
| IV.4.3. Algorithme PSO : | 77 |
| IV.4.4. Algorithme de coucou search: | 79 |
| IV.5.Conclusion: | 80 |
| Conclusion générale | 81 |
| Bibliographie | 83 |

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure (I.1) : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.

Figure (I.2) : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal

Figure (I.3) : Schéma d'une cellule élémentaire.

Figure (I.4) : Schéma équivalent d'une cellule solaire

Figure (I.5) : schéma équivalent simplifié d'une cellule solaire réelle connectée à une charge

Figure (I.6) : Caractéristiques U-I et P-V d'une cellule photovoltaïque

Figure (I.7) : Exemple d'association sécurisée de deux modules PV commerciaux en parallèle avec leurs diodes de protection

Figure (I.8) : Effet de la diode by-pass sur la caractéristique I(V).

Figure (I.9) : Schéma équivalent d'une cellule idéale

Figure (I.10) : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

Figure (I.11) : Schéma équivalent de générateur photovoltaïque à l'aide de Proteuse

Figure (I.12) : caractéristiques $I=f(V)$ pour différent température

Figure (I.13) : caractéristiques $P=f(V)$ pour différent température

Figure (I.14) : caractéristiques $I=f(V)$ pour différent clairement

Figure (I.15) : caractéristiques $P=f(V)$ pour différent clairement

Chapitre II

La Figure (II.1): montre le convertisseur DC/DC qui lie la source de tension continue à la charge.

Figure(II.2): Schéma électrique de convertisseur survolteur

Figure(II.3): Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.

Figure(II.4): Tensions et courants d'entrée et de sortie en D et Ts pour un Boost

Figure(II.5): Schéma électrique du convertisseur dévolteur.

Figure (II.6): Les deux configurations d'un convertisseur Buck suivant l'état de l'interrupteur.

Figure (II.7) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Buck.

Figure(II.8): Forme d'ondes des tensions et des courants d'entrée et de sortie du « Buck » en

fonction du rapport cyclique D et la période T_s

Figure(II. 9): Schéma du convertisseur dévolteur-survolteur

Figure(II.10): Convertisseur $\acute{C}uk$

Figure(II.11): Signaux de tensions et de courants du convertisseur $\acute{C}uk$.

Figure(II.12): Schéma électrique de convertisseurSepic

Figure(II.13): Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Sepic.

Figure(II.14): Schéma topologique du convertisseur survolteur.

Figure(II.15): Schéma topologique équivalent en utilisant un commutateur idéal

Du convertisseur survolteur.

Figure(II.16): Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC-DC) contrôlé par une commande (PPM) sur charge DC.

Figure(II.17): Adaptation entre un générateur photovoltaïque et les batteries par convertisseur DC/DC

Chapitre III

Figure (III.1):Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

Figure (III.2):Recherche et recouvrement du point de puissance maximale.

Figure (III.3):Recherche du PPM par la méthode (P&O).

Figure (III.4):Algorithme de P&O classique

Figure (III.5): Méthode IncCond pour poursuivre le MPP

Figure (III.6): Organigramme de la méthode IncCond

Figure (III.7): Organigramme de la PSO.

Chapitre IV

Figure(IV.1):Données sur les caractéristiques électriques du module PV

Figure(IV.2):Schéma Matlab/Simulink du système photovoltaïque.

Figure(IV.3):Changement de rapport cyclique

Figure(IV.4):Resultat de simulation de PV puissance.

Figure(IV.5):Resultat de simulation de PV tension.

Figure(IV.6):Resultat de simulation de PV courant

Figure(IV.7): Changement de rapport cyclique

Figure(IV.8):Resultat de simulation de PV puissance.

Figure(IV.9):Changement de rapport cyclique
Figure(IV.10):Resultat de simulation de PV puissance.
Figure(IV.11):Résultat de simulation de PV tension.
Figure(IV.12):Résultat de simulation de PV courant
Figure(IV.13):Changement de rapport cyclique
Figure(IV.14):Resultat de simulation de PV puissance.
Figure(IV.15): Changement de rapport cyclique
Figure(IV.16):Resultat de simulation de PV puissance.
Figure(IV.17):Resultat de simulation de PV tension
Figure(IV.18):Resultat de simulation de PV courant
Figure(IV.19): Changement de rapport cyclique
Figure(IV.20):Résultat de simulation de PV puissance
Figure(IV.21):Résultat de simulation de PV tension
Figure(IV.22):Résultat de simulation de PV courant

LISTE DES TABLEAUX

Tableau(I.1) : Plaque signalétiques d'un générateur photovoltaïque de 75(w)

Table(IV.1):Paramètre de convertisseur buck-boost

LISTE DES SYMBOLS ET ABRÉVIATIONS

- E : Eclairement (W/m^2).
- Λ : vitesse spécifique
- H : Constante de PLANCK [J/s]
- E_{pv} : L'énergie de photon [eV]
- I_{ph} : Le photo-courant (A).
- I : Le courant généré par la photopile(A).
- I_s : Le courant de saturation(A).
- I_{sc} : le courant du court-circuit(A).
- I_L : Le courant de l'inductance du hacheur (A).
- I_{pv} : Courant délivré par le générateur PV (A).
- V : la tension aux bornes de la cellule(V).
- q : La charge de l'électron = $1,6 \cdot 10^{-19}$ C.
- R_s : La résistance série (Ω).
- R_{sh} : La Résistances shunt (Ω).
- T : La température de fonctionnement en Kelvin.
- A : le facteur de qualité de la cellule.
- V_{th} : La tension thermique.
- V_{oc} : La tension de circuit ouvert(V).
- P : La puissance caractéristique(W).
- P_{max} : La puissance maximale(W).
- FF : Facteur de forme.
- N_s : Nombre de modules dans le panneau en série.
- N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.
- V_{opt} : Tension optimale (V).
- I_{opt} : Courant optimum (A)
- η : Rendement de la cellule
- η_{mpp} : Rendement du MPPT
- MPPT : maximum power point tracking
- PPM : point de fonctionnement optimale
- G : L'éclairement de référence ($1000 W/m^2$).
- C : Condensateur de filtrage de sortie du hacheur [F].
- L : Inductance du hacheur.
- Q : L'interrupteur du hacheur.

CS : Convertisseur Statique.
D : Rapport cyclique.
PV : Photovoltaïque.
GPV : Générateur Photovoltaïque.
FF : Facteur de forme.
MPPT : Maximum Power Point Tracking.
PO : Perturbation et Observation.
DC : Courant Continu (Direct Current)
DC-DC : conversion continu-continu
PSO : Optimisation d'essaim de particules
Inc : Incrément de conductance
CS : Coucou search

Introduction générale

Introduction générale

La production d'énergies renouvelables est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrielles ne cessent d'augmenter et l'énergie produite à partir de sources fossiles diminue. De plus, les pays en développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. Aujourd'hui, une grande partie de la production énergétique mondiale est assurée par des sources fossiles à l'aide d'énergies renouvelables. La consommation de ressources fossiles entraîne des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est que la consommation excessive des stocks de ressources naturelles réduit dangereusement les réserves de ce type d'énergie, ce qui complique les choses pour les générations futures .

Par énergie renouvelable, on entend l'énergie du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou de la biomasse. Contrairement aux énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies aux ressources illimitées, continues et inépuisables. Les énergies renouvelables regroupent plusieurs secteurs technologiques en fonction de la source d'énergie utilisée et de l'énergie utile obtenue .

L'exploitation directe de l'énergie solaire par des capteurs comprend deux technologies bien distinctes : l'une qui produit des calories, qui est l'énergie solaire thermique, et l'autre qui produit de l'électricité .

Ce que l'on sait de l'énergie solaire, c'est que le rendement de conversion réel du module PV est faible. Par conséquent, il est nécessaire d'exploiter plus d'énergie que le module solaire ne peut fournir. Il existe plusieurs façons de procéder, et nous les aborderons au cours de ce message dans lequel nous examinons les meilleurs moyens d'obtenir la plus grande énergie de l'énergie solaire .

Cette thèse est composée de quatre chapitres

Le premier chapitre est constitué de généralités sur le système énergétique solaire et ses principes de base, les différents types d'énergies renouvelables, la définition de l'énergie solaire, la modélisation et la simulation de la cellule photovoltaïque .

Dans le deuxième chapitre nous étudions et modélisons les différents types de convertisseurs DC/DC .

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté une étude théorique de plusieurs méthodes pour suivre le point d'énergie maximale .

Dans le quatrième chapitre, nous avons simulé le système photovoltaïque avec les quatre algorithmes étudiés dans le chapitre précédent, et ils ont donné des résultats satisfaisants

Nous terminons cette thèse par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et simulée .



Chapitre I

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction:

Répondre aux besoins énergétiques actuels sans compromettre les besoins des générations futures, accroître l'indépendance énergétique des pays en développement et fournir de l'énergie aux deux milliards de personnes sur la planète qui vivent encore sans électricité : tels sont les enjeux du XXI^e siècle .

Le soleil est une boule de gaz géante qui émet un puissant rayonnement.

Elle est à l'origine de toutes les sources d'énergie de la planète : le pétrole, le charbon et le gaz sont devenus les plus traditionnellement consommés. Ce sont des énergies fossiles : elles sont épuisables et polluantes. Il faut alors conserver ces énergies et chercher d'autres sources de chaleur : le concept d'énergie solaire est né. S'il faut conserver les ressources épuisables, réduire les rejets radioactifs et les émissions de gaz à effet de serre, les énergies renouvelables restent une solution potentielle. Exploiter l'énergie solaire pour réaliser le meilleur profit et aux meilleures conditions de prix . [1]

L'énergie photovoltaïque est produite à partir de la conversion directe de la lumière du soleil en énergie électrique par des cellules qui reposent généralement sur du silicium cristallin qui reste le secteur le plus avancé technologiquement et industriellement, en fait le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de non-toxique silice . [2]

La tension et le courant produits par le GPV peuvent varier en fonction du matériau utilisé pour fabriquer la cellule. La connexion de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle crée un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique de tension non linéaire (I-V) qui présente un point de puissance maximale. [3]

Dans ce chapitre, nous passons en revue les énergies renouvelables, l'énergie solaire, le rayonnement, l'effet photovoltaïque, les ressources énergétiques renouvelables, décrivons les éléments d'un système photovoltaïque, la protection des modules solaires, la modélisation des cellules photovoltaïques, la simulation du générateur photovoltaïque, les avantages et les inconvénients d'une installation photovoltaïque.

I.2. Les ressources des énergies renouvelables:

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Ces énergies satisfont quant à elles 13 % de la demande, dont 10 % pour hydraulique. Comparé aux énergies classiques (fossiles et nucléaires), les énergies renouvelables présentent le double avantage de ne pas être source d'émissions de gaz à effet de serre lors de leur utilisation et de présenter des gisements renouvelables donc inépuisables. Ce sont des énergies de flux, par opposition aux énergies dites de stock (gaz, fioul, charbon, uranium, ...). La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement.[4].

I.2.1. Définition d'énergie renouvelable:

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) c'est-à-dire, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...), à l'échelle de la durée de vie de humanité .Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires.[3].

I.3. L'énergie solaire:

Le soleil est une source d'énergie presque inépuisable qui envoie un rayonnement à la surface de la terre qui représente environ 8 400 fois la consommation énergétique de l'humanité chaque année. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1kWc/m² répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que l'humanité n'en consomme en un an.

L'énergie solaire est produite et utilisée de plusieurs façons

➤ L'énergie solaire thermique : qui consiste simplement à produire de la chaleur à l'aide de panneaux solaires. Vous pouvez également produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil, puis convertir la vapeur en électricité

-
- L'énergie solaire photovoltaïque : qui consiste à produire de l'électricité directement à partir de la lumière grâce à des panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, notamment dans les pays ou les régions qui ne disposent pas de ressources énergétiques conventionnelles telles que les hydrocarbures ou le charbon
 - énergie solaire passive : est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser la lumière directement pour le chauffage [5]

I.3.1. Rayonnement solaire:

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2 et 4. m. sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent [3].

◆ **Le rayonnement direct:** est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un pyréliomètre [4].

◆ **Le rayonnement diffus:** est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet (éclatement) des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques [3].

◆ **Le rayonnement solaire réfléchi:** ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige) [3].

◆ **Le rayonnement global :** est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran.

Les stations météorologiques généralement mesurer le rayonnement global horizontal par un pyranomètre placé horizontalement à l'endroit requis [4].

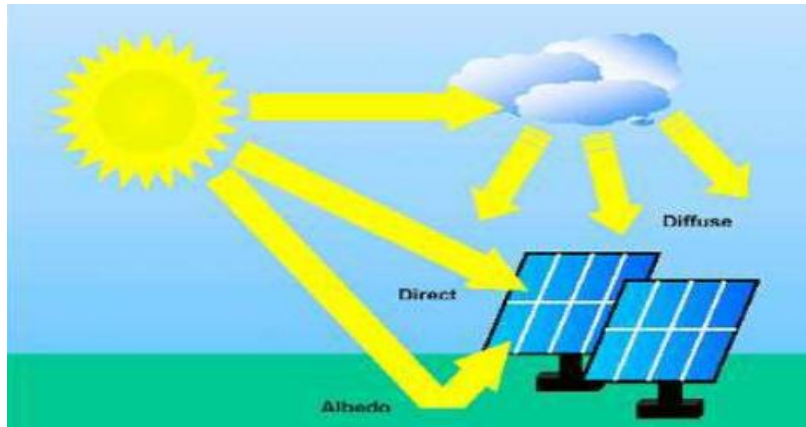


Figure (I.1) : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.

I.3.2. Spectre du rayonnement:

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons.

L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde :

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom d'AM0. Sa distribution en énergie est répartie en: [4]

- Ultraviolet $0.20 < \lambda < 0.38 \text{ } \mu\text{m}$ 6.4%
- Visible $0.38 < \lambda < 0.78 \text{ } \mu\text{m}$ 48.0%
- Infrarouge $0.78 < \lambda < 10 \text{ } \mu\text{m}$ 45.6%

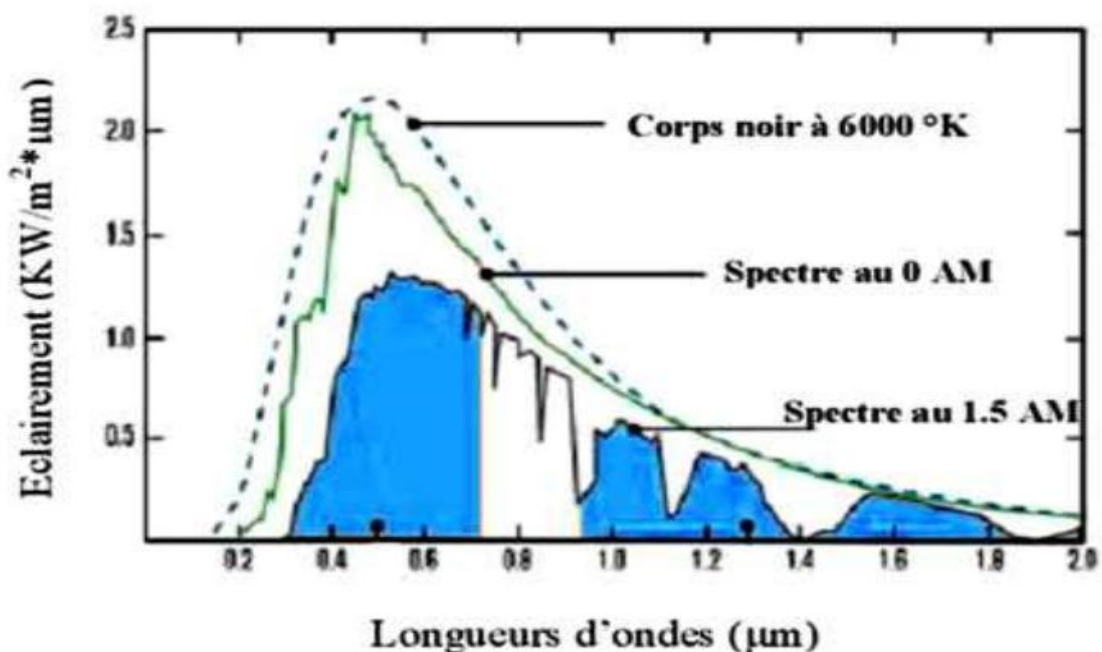


Figure (I.2) : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.

I.3.3. Durée d'insolation:

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell- Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages. Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil [3].

I.4. Description des éléments d'un système photovoltaïque:

I.4.1. Cellule photovoltaïque:

I.4.1.1. Historique:

IL est important de citer les dates les plus importantes dans l'histoire du photovoltaïque qui noté:

1839:Le physicien français [Edmond becquerel] découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

1875:Werner von Siemens expose devant l'académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1954:Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958: Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973:La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware.

1983:La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000km en Australie .

I.4.1.2. Constitution de la cellule photovoltaïque:

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

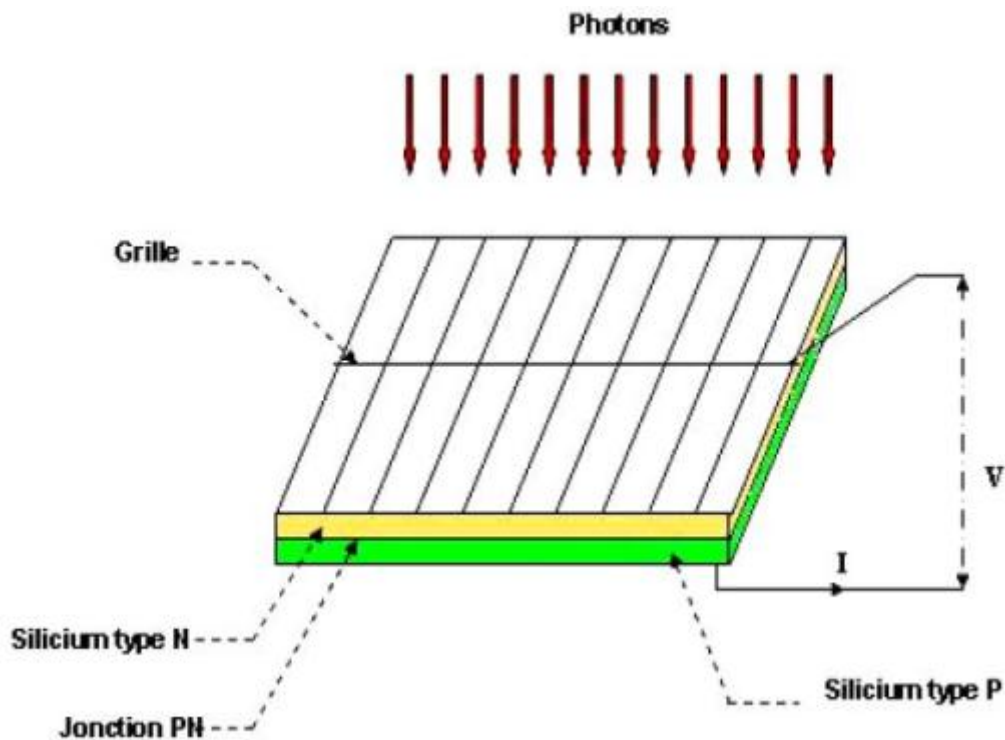


Figure (I.3) : Schéma d'une cellule élémentaire.

I.4.2. L'effet photovoltaïque:

C'est la conversion de l'énergie portée par les photons de lumière lorsqu'ils entrent en collision avec des matériaux semi-conducteurs convenablement traités en énergie électrique capable de créer un courant d'électrons à travers un circuit externe. La clé pour produire un courant électrique utile est d'extraire les électrons qui sont libérés.

Une méthode consiste à introduire des éléments chimiques dans le matériau semi-conducteur qui aident à produire des électrons et des trous en excès. Ces éléments, qui altèrent significativement les propriétés intrinsèques du semi-conducteur, sont appelés dopants et le matériau est dit dopé lorsque le processus d'incorporation dans le semi-conducteur est terminé

Un dopant approprié pour le silicium est le bore. La structure créée est appelée semi-conducteur de type P (positif). Un autre dopant possible pour le silicium est le phosphore. Le semi-conducteur est dit de type N (négatif). Si les photons de la lumière incidente transmettent de l'énergie aux électrons dans le semi-conducteur, certains électrons peuvent traverser la barrière de potentiel, étant expulsés du semi-conducteur vers un circuit externe. Cela génère un courant électrique. Les électrons, après avoir parcouru le circuit extérieur, reviennent dans le semi-conducteur par la face opposée

Le matériau semi-conducteur ne stocke donc pas d'énergie électrique mais la génère en transformant l'énergie incidente. La physique quantique prédit un rendement théorique pour la cellule silicium de 26% mais les cellules commerciales obtenues industriellement ne dépassent pas 17%. Ces valeurs, impliquant une limitation de la puissance électrique pouvant être obtenue, montrent que seule une petite partie de l'énergie solaire peut générer de l'électricité [6].

I.4.3. La cellule photovoltaïque:

I.4.3.1. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque:

La cellule photovoltaïque est formée par un matériau semi-conducteur de type P-N. La taille de chaque cellule varie de quelques centimètres carrés jusqu'à 100 cm² ou plus. Sa forme est circulaire, carrée ou dérivée des deux géométries .

La tension maximale de la cellule est d'environ 0,6 V pour un courant nul. Cette tension est appelée tension de circuit ouvert (V_{oc}) . Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court

circuit (I_{sc}) et dépend fortement du niveau d'éclairement. Une cellule PV a, comme on le voit sur la figure (I.4), une caractéristique non linéaire $I = f(v)$

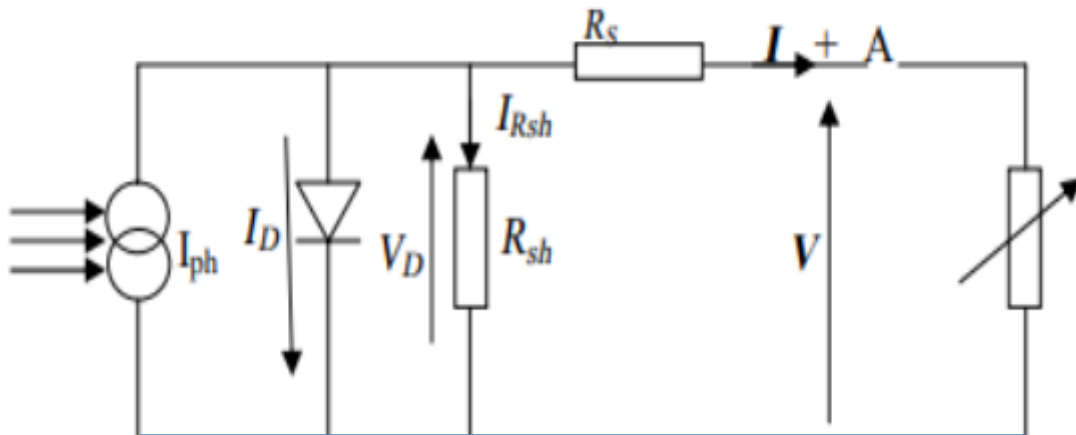


Figure (I.4) : Schéma équivalent d'une cellule solaire

Et par conséquent, une cellule PV composée d'une jonction PN à base de silicium peut être modélisée par l'équation suivante :

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

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(q \frac{v + R_s I}{AKT} \right) - 1 \right] - \frac{v + R_s I}{R_{sh}} \quad (I.2)$$

$$V_{th} = \frac{AKT}{q} \quad (I.3)$$

Where:

I_{ph} : The photo-current. q : The charge of the electron = $1.6 \cdot 10^{-19}$ C.

I : The current generated by the solar cell. A : The quality factor of the cell.

V : The voltage at the terminals of the cell. K : the Boltzmann constant = $1.38 \cdot 10^{-23}$ J /K

R_s : The series resistance. T : The operating temperature in Kelvin.

R_{sh} : The shunt resistance. V_{th} : Thermal tension.

I_s : The saturation current .

Cinq paramètres doivent être évalués, quelles que soient les conditions d'éclairage et de température, ce sont : R_s ; I_s ; R_{sh} ; I_{ph} ; V_{th} .

Nous pouvons les déterminer à savoir:

- la tension en circuit ouvert V_{oc}
- le courant de court-circuit I_{sc}
- la puissance caractéristique P
- la puissance maximale P_{max}
- le facteur de forme FF , et l'efficacité

De brèves définitions de ces paramètres, ainsi que leurs déterminations caractéristiques sont données ci-dessous [7]

Le facteur de qualité de la cellule A dépend des mécanismes de recombinaison ; il est égal à 2 pour les cellules cristallines et compris entre 1 et 2 pour les cellules amorphes. Il est proche de 1 pour les forts courants et passe à 2 pour les faibles courants [8]

La résistance R_{sh} provient des pertes par recombinaison principalement dues à l'épaisseur, aux effets de surface, ainsi qu'à la non-idéalité de la jonction. En pratique, cette résistance est très grande par rapport à la résistance série (de l'ordre du méga Ohm), son effet est négligé. Il en résulte un circuit électrique équivalent simplifié comme illustré dans la figure ci-dessous:

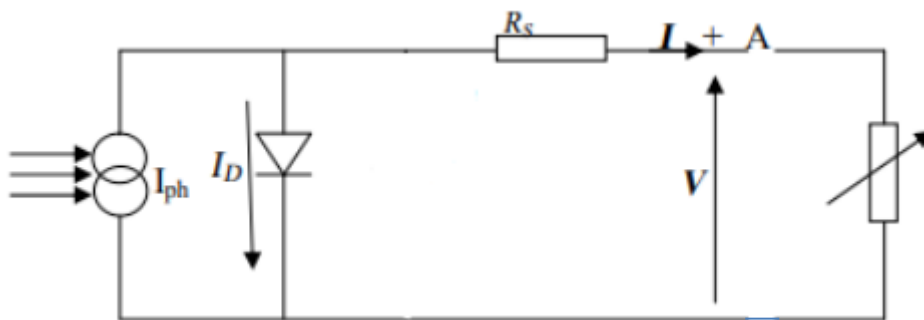


Figure (I.5) : schéma équivalent simplifié d'une cellule solaire réelle connectée à une charge

Et son équation originale devient alors:

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(q \frac{v + R_s I}{A k T} \right) - 1 \right] \quad (I.4)$$

une cellule PV a, comme on le voit sur la figure (1.6), une caractéristique $I = f(V)$ et $P = f(V)$ non linéaire. L'utilisation du modèle électrique de la cellule PV permet de simuler son comportement dans l'environnement MATLAB de Math Works

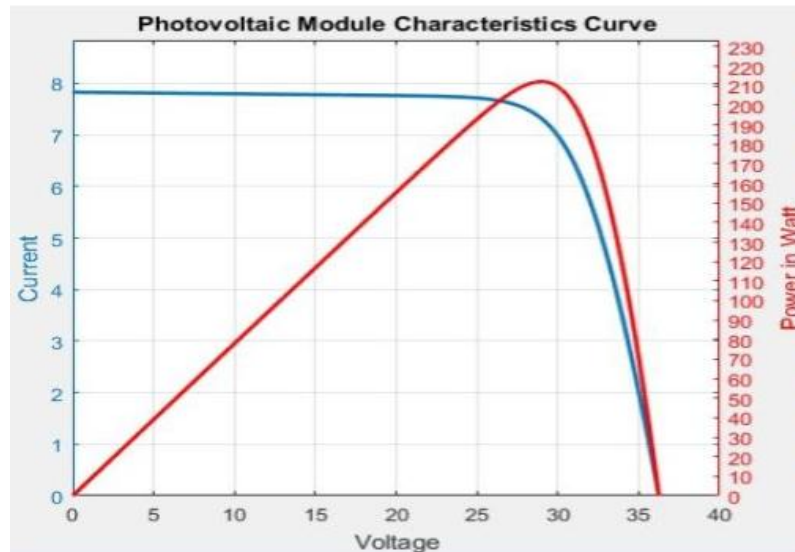


Figure (I.6) : Caractéristiques U-I et P-V d'une cellule photovoltaïque

a) La résistance série R_s :

La résistance série R_s représente les différentes résistances de contact et de connexion, elle est principalement due aux pertes par effets Joule à travers les grilles de collecte et à la résistance propre des semi-conducteurs, ainsi qu'aux mauvais contacts (semi-conducteur, électrodes). Elle joue un rôle important sur la pente de la courbe (I-V) en circuit ouvert, En pratique, la résistance série R_s est très faible (de l'ordre de quelques milli-ohms). Il a pour relation:

$$R_s = - \left. \frac{dv}{di} \right|_{V_{oc0}} - \frac{1}{X_v} \tag{I.5}$$

$$X_v = \frac{I_{s0}}{V_{th0}} e^{\frac{V_{oc0}}{V_{th0}}} \tag{I.6}$$

b) Le courant de saturation I_s :

Le courant de saturation I_s de la diode à une température T_0 est donné par:

$$I_{s0} = \frac{I_{sc0}}{(e^{V_{oc0}/V_{th0}} - 1)} \quad (I.7)$$

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

$$I_s = I_{s0} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^3 \cdot e^{-\frac{qV_g}{nk} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (I.8)$$

c) photo actuelle I_{ph} :

La photo actuelle I_{ph} est directement proportionnelle au rayonnement solaire E (W / m^2) pour une température choisie T_0 ($^{\circ}$ Kelvin). Lorsque la cellule est court-circuitée, un courant négligeable traversera la diode. Il est donné par:

$$I_{ph}|_{T_0} = \frac{I_{sc0}}{E_0} \cdot E = C_1 \cdot E \quad (I.9)$$

$$I_{ph} = I_{ph}|_{T_0} \cdot (1 + K_0(T - T_0)) \quad (I.10)$$

$$K_0 = \frac{I_{sc|T_2} - I_{sc0}}{T_2 - T_0} \quad (I.11)$$

Avec un coefficient de température de K_0 de I_{ph} (généralement indiqué par le fabricant sur la fiche technique en pourcentage de variation par degré Celsius).

1.4.3.2. Paramètres d'une cellule photovoltaïque:

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique

Les plus usuels sont les suivantes:[6]

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

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_{ser} nulle et R_{shu} infinie), ce courant se confond avec le photo courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation ,

on obtient:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{e(I_{cc} * R_{ser})}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{I_{cc} * R_{ser}}{R_{shu}} \quad (I.12)$$

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

$$I_{sat} \left[\exp \left(\frac{e(V_{pv} + (I_{pv} * R_{ser}))}{nKT} \right) - 1 \right] \quad (I.13)$$

devant . L'expression approchée du courant de court circuit est alors:

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_{ser}}{R_{shu}}\right)} \quad (I.14)$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement $I_{cc} = I_{ph}$ [6].

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

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{e V_{pv}}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_{shu}} \quad (I.15)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à : [6]

$$V_{co} = V_T \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (I.16)$$

C. Rendement énergétique:

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule $P_{max}(I_{opt}, V_{opt})$ et la puissance solaire incidente. Il est donné par :

$$n = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt} V_{opt}}{P_{inc}} \quad (I.17)$$

Avec est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique [6].

D. Facteur de forme:

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule) et le produit du courant de court-circuit par la tension de circuit-ouvert (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ;

et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites et . Il est défini par : [6]

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} V_{co}} = \frac{I_{opt} V_{opt}}{I_{cc} V_{co}} \quad (I.18)$$

I.5. La protection des modules solaires:

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en séries et de panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles figure (I.7) [9].

I.5.1. La diode anti-retour:

Empêchant un courant négatif dans les GPV (pour éviter les courants inverses). Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur [9].

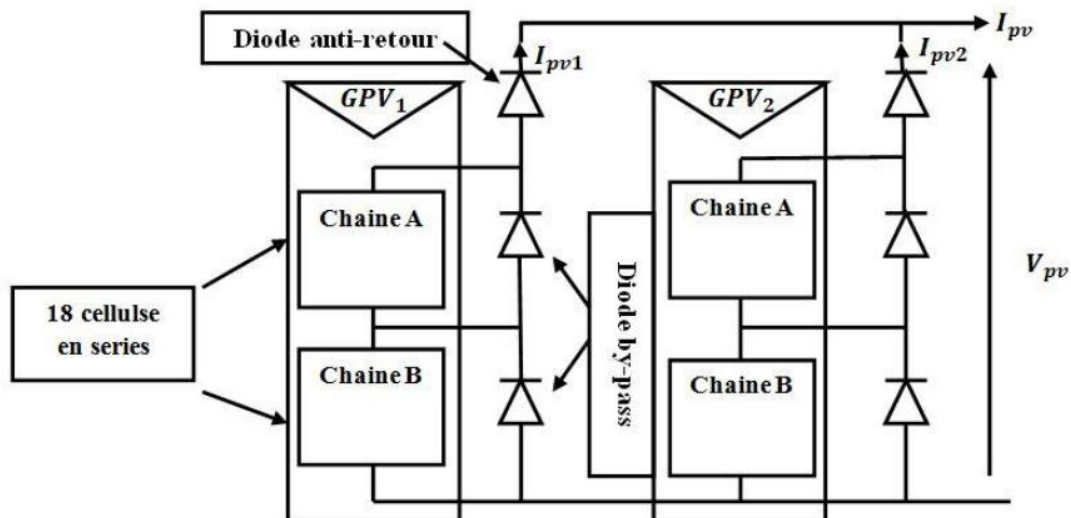


Figure (I.7) : Exemple d'association sécurisée de deux modules PV commerciaux en parallèle avec leurs diodes de protection

I.5.2. Les diodes by-pass:

Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur, comme illustré sur la figure (I.8), par la perte d'une partie de la production d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dues a de l'ombrage, de la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente [9].

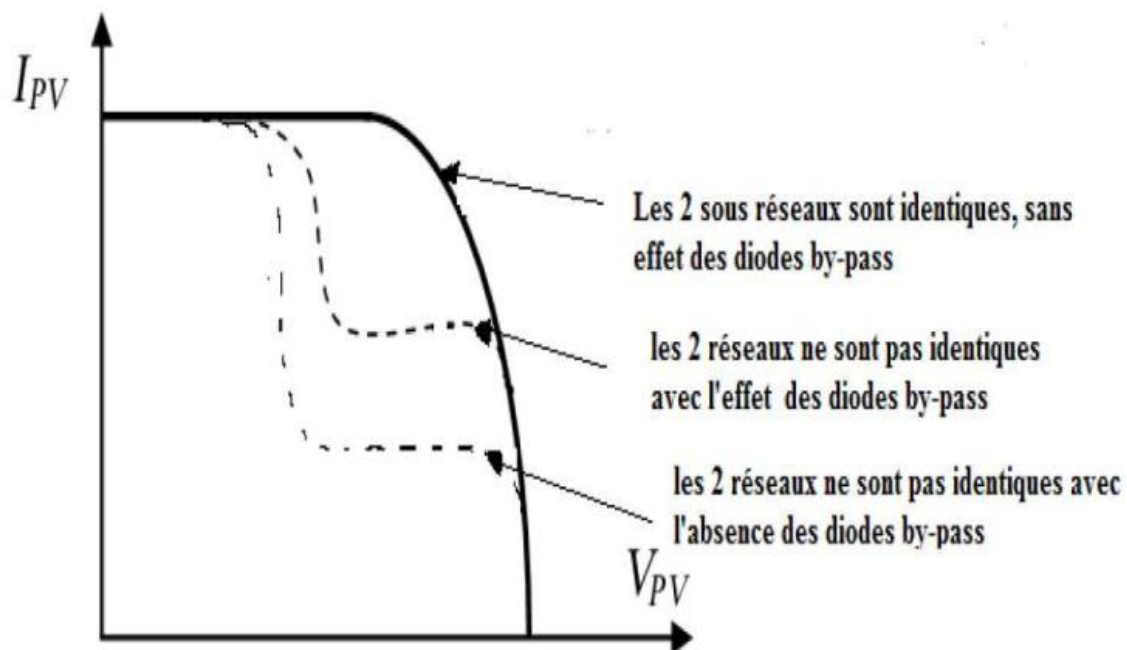


Figure (I.8) : Effet de la diode by-pass sur la caractéristique I(V).

I.6. Modélisation d'une cellule photovoltaïque:

I.6.1. Cas d'une cellule idéale:

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connecté à une charge peut être schématisée par un générateur de courant en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (I.9), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire e idéale [4].

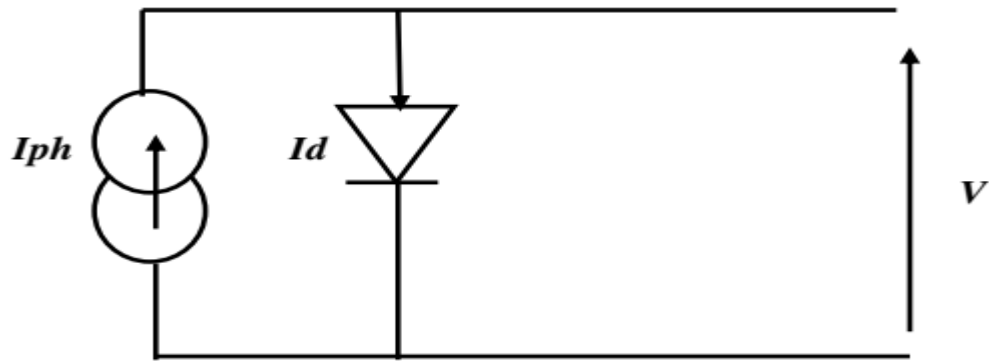


Figure (I.9) : Schéma équivalent d'une cellule idéale

♦ Les équations retenues de ce modèle sont:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (I.19)$$

♦ Le courant est assimilé au courant avec $= 0$, courant de court-circuit obtenu en court ci cuitant la charge.

$$I_{ph} = I_{sc} = \frac{E}{E_{ref}} \quad (I.20)$$

E : L'éclairement absorbé par la cellule

E_{ref} : L'éclairement de référence (1000 w/m²)

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{v_d}{v_t}} - 1 \right) \quad (I.21)$$

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode

$$I_t = \frac{NKT}{q} \quad (I.22)$$

V_t : Tension thermique

N : Facteur d'idéalité de la photopile

K : Constant de Boltzmann (1,38.10⁻²³J/K)

q : Charge de l'électron (1,6.10⁻¹⁹C)

I.6.2. Cas d'une cellule réelle:

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la figure (I.10). Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_{ser}) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (R_{shu}) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_{ser}) [4].

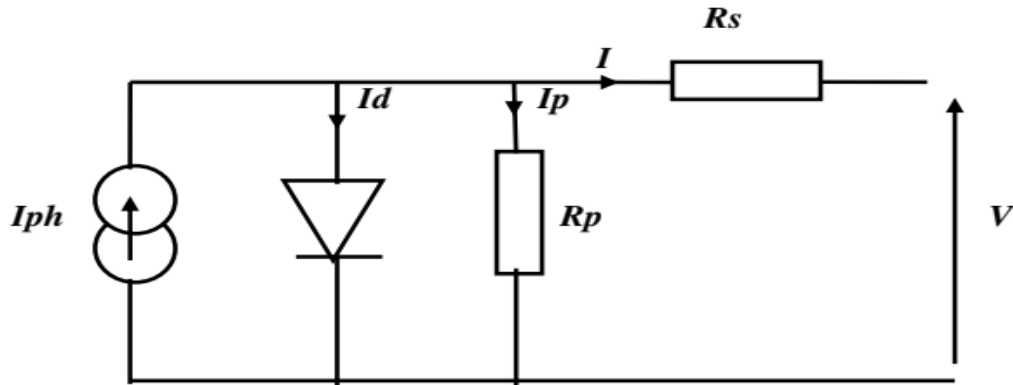


Figure (I.10) : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

Dans notre travail, nous avons utilisé le modèle mathématique du module solaire à exponentiel simple.

♦ Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante:

$$I_{pv} = I_{pv} - I_d - I_p \quad (\text{I. 23})$$

I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)

I_d : Le courant circulant dans la diode.

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{v_d}{v_t}} - 1 \right) \quad (\text{I. 24})$$

$$I_0 = I_{0r} \left(\left(\frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\left[\frac{E_g}{BK} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right]} - 1 \right) \quad (\text{I. 25})$$

I_{0r} : est le courant de court-circuit de la cellule à la température de référence T_n et l'éclairement de référence

T : Température de la jonction des cellules PV [$^{\circ}\text{K}$]

Tn : Température de référence des cellules PV [°K]

B : facteur d'idéalité de la jonction

Eg : Énergie de gap [ev]

Rs : résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi- conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules

Vpv : La tension de sortie

Ip : Le courant circulant dans la résistance

Rp : Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

Les résistances Rs et Rp sont calculées par une boucle de programmation.

En substituant les équations (I.14; I.15) dans l'équation (I.13) le courant IPV devient Donc:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_p} \quad (I.26)$$

I.7. Simulation de générateur photovoltaïque:

Dans ce simulation nous utilise l'outil Proteus Isis, pour simule un GPV de 75 (w). La puissance générée par cette GPV est affecté par l'éclairement et la température, pour change l'éclairement nous utilise une source (Pwlin) et nous change la température dans les paramètres de la diode. Nous avons acquis les caractéristique I=f(v) et P=f(v) [3].

I .7.1. Plaque signalétiques d'un générateur photovoltaïque de 75(w):

| | |
|-----------------------------|------------|
| Puissance Maximum (Pmax) | 75 +/- 10% |
| Courant Max (Imax) | 4.34 A |
| Tension Max (Vmax) | 17.3 V |
| Courent Court Circuit (Icc) | 4.67 A |
| Tension Circuit Overt (Voc) | 21.6 |
| Eclairmetn Standard, G | 1000W/ |
| Temperateur Standard, T | 25°C |

Tableau(I.1) : Plaque signalétiques d'un générateur photovoltaïque de 75(w)

I.7.2. Présentation générale de Proteus:

Le logiciel PROTEUS est composé de trois modules :

- L'éditeur de schéma ISIS
- Le simulateur LISA
- L'outil de conception de circuit imprimé ARES

ISIS produit d'une part, une liste d'équipotentiels qui peut être utilisée par le simulateur LISA et l'outil de conception de circuit imprimé ARES, d'autre part, une liste de matériel et des rapports de contrôle des règles électriques.

LISA est un ensemble de modules de simulation lié à ISIS. Le noyau de simulation PROSPICE est basé sur la version 3F5 du moteur SPICE publié par l'université de Berkeley. ARES est un module de conception de circuit imprimé compatible Windows, 98 2000 et XP. Il permet le placement des composants en mode automatique, manuel ou semi-automatique et le routage des liaisons sur plusieurs couches en mode automatique manuel ou semi-automatique [10].

I.7.3. Schéma équivalente de (GPV):

Le schéma de générateur photovoltaïque en l'environnement Proteus est représenté par :

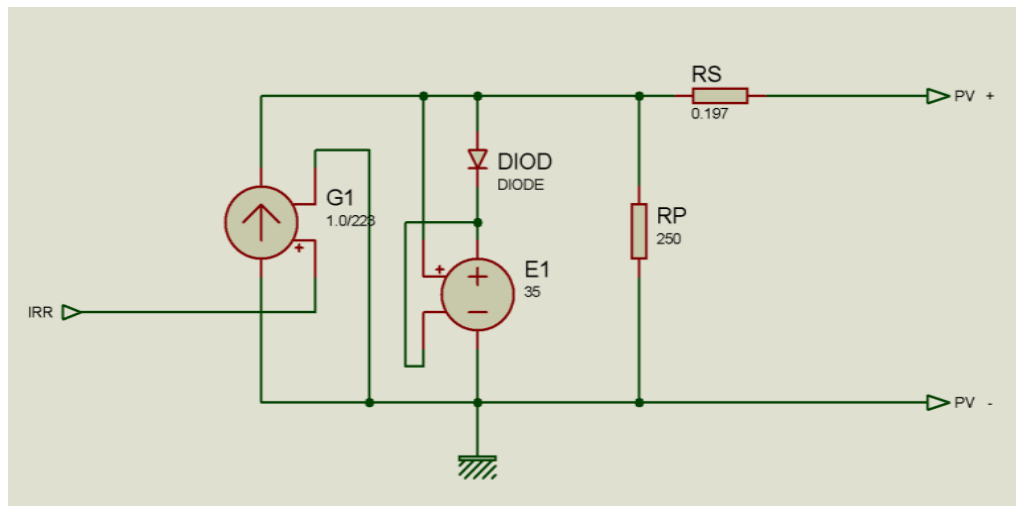


Figure (I.11) : Schéma équivalent de générateur photovoltaïque à l'aide de Proteuse

Les résultats de simulation du générateur photovoltaïque représentent par les figures (I.12) à (I.15). Ces figures représentent les caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension pour différents températures et différents éclairagements.

I.7.4. l'influentes de température:

Les figures (I.12) et (I.13) ci-dessous montrent que la tension à vide d'un module photovoltaïque diminue avec l'augmentation de la température du module PV. Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température du module PV (de la cellule solaire).

Ces figures montrent clairement la baisse du rendement causée par l'augmentation de la chaleur sur la cellule. On peut remarquer sur la figure (I.13) que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

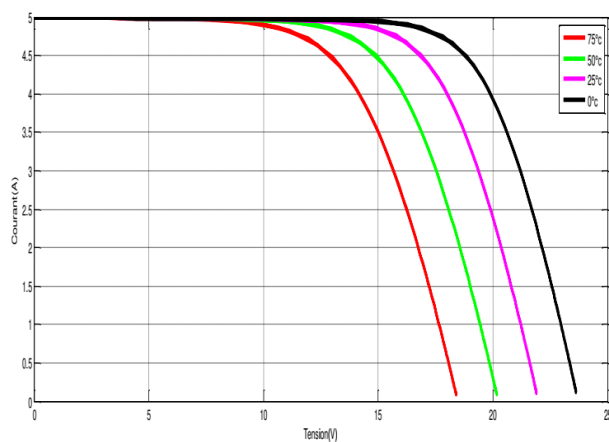


Figure (I.12) : caractéristiques $I=f(V)$ pour différent température

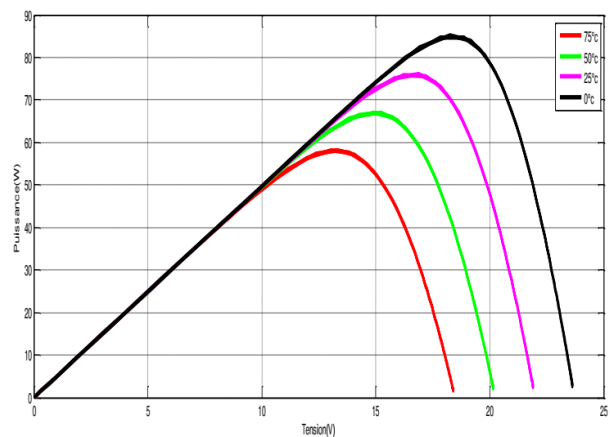


Figure (I.13) : caractéristiques $P=f(V)$ pour différent température

I.7.5. l'influentes de l'éclairement :

Les figures (I.14) et (I.15) montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique

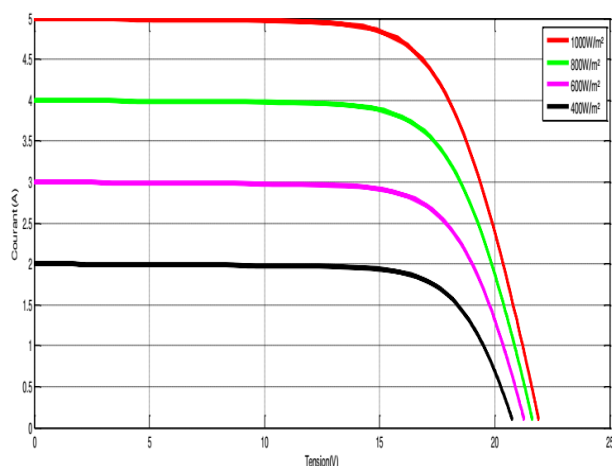


Figure (I.14) : caractéristiques $I=f(V)$ pour différents niveaux d'irradiation

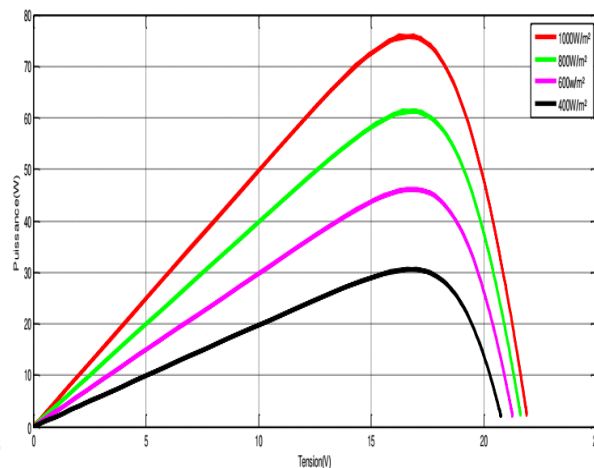


Figure (I.15) : caractéristiques $P=f(V)$ pour différents niveaux d'irradiation

I.8. Avantages et inconvénients d'une installation PV:

a) Avantages:

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [11].

b) Inconvénient:

- La fabrication du module photovoltaïque est de haute technologie et nécessite des coûts élevés
- Le rendement de conversion réel d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %, avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs qu'avec les générateurs diesel pour les faibles besoins en énergie dans les régions éloignées
- Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour pouvoir déplacer un électron, l'énergie de l'ion doit être d'au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents de plus faible énergie ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur
- En fonction des conditions météorologiques
- Lorsque le stockage d'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est requis, le coût du générateur est augmenté.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes [12].

I.9. Conclusion:

Dans ce chapitre, On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et module photovoltaïque et l'influence de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques (I-V), (P-V) dans la simulation de générateur photovoltaïque. On a constaté que la tension à vide d'un module photovoltaïque diminue avec l'augmentation de la température du module PV, et l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale. Ainsi que le courant de court-circuit d'un module photovoltaïque augmente régulièrement selon de l'ensoleillement, et l'augmentation de l'éclairage se traduit aussi par une augmentation de la puissance maximale. Dans le chapitre prochain, on présentera une étude sur les convertisseurs DC-DC (hacheurs).

Chapitre II

Convertisseur DC/DC

II .1. Introduction:

La conception d'un étage d'adaptation permet aujourd'hui de relier aisément un générateur photovoltaïque (GPV) à une charge de type continue (DC), avec un rendement de conversion très élevé. En fait, le concept de cet étage correspond à la modélisation des fonctions basiques idéalisées d'un convertisseur à découpage continu-continu (DC/DC). Ce concept est nommé ainsi à cause des liens que le convertisseur crée entre ses quatre grandeurs électriques sur les ports d'entrée et de sortie qui sont ses courants et ses tensions d'entrée et de sortie [13]. Dans ce chapitre nous étudierons la modulation de différent type des convertisseurs (DC /DC), et la simulation d'un hacheur survolteur.

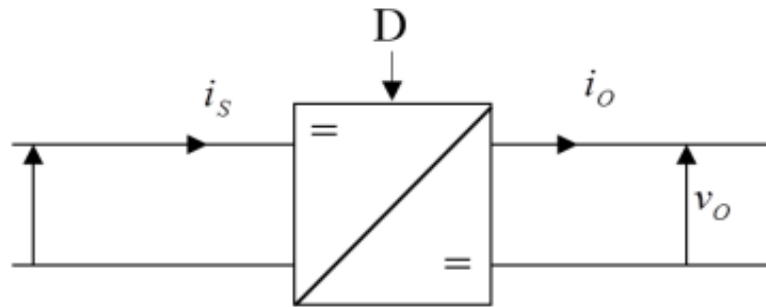
II .2. Applications des convertisseurs DC/DC:

Les niveaux de puissance que l'on trouve dans les convertisseurs vont de moins d'un watt dans les convertisseurs des équipements portables, à une dizaine ou centaine de watts dans les alimentations des ordinateurs de bureau, aux kilowatts ou mégawatts dans la commande des moteurs à vitesse variable, et jusqu'aux térawatts dans les centrales électriques du secteur [3]. Les convertisseurs DC/DC en général réalisent deux fonctions: modifier le niveau de tension (élever ou abaisser) et réguler la tension. L'électronique de conversion se trouve à l'interface entre les batteries (la source d'énergie en général) et l'ensemble des blocs constitutifs du système considéré, des circuits électroniques numériques et analogiques, des écrans, des actionneurs, des claviers, etc. Plus de 5 à 6 niveaux de tensions peuvent cohabiter dans un ordinateur portable [14].

II.3. Convertisseur DC/DC:

Les dispositifs électroniques de technologie nouvelle doivent satisfaire certains critères tels que la haute qualité, la fiabilité, la dimension, le poids et le coût réduit [15]. Les régulateurs de puissance linéaire, dont le principe de fonctionnement est basé sur un diviseur de courant ou de tension, peuvent fournir une tension de sortie de très haute qualité [16]. Cependant, ce type de régulateurs restent inefficaces du fait que leur domaine principal d'application est à des niveaux de puissance faibles [17]. Les régulateurs de commutation appelés convertisseurs DC/DC utilisent des interrupteurs électroniques, à base de semi-conducteurs tels que : le thyristor, transistor de puissance ou l'IGBT... etc. parce qu'ils engendrent une faible perte de puissance lors de basculement d'un état à un autre [18].

Ces convertisseurs assurent des rendements élevés de conversion d'énergie et ils peuvent fonctionner à des fréquences élevées. Les caractéristiques dynamiques des convertisseurs DC/DC s'améliorent avec l'augmentation des fréquences de fonctionnement. Les fréquences de fonctionnement élevées permettent donc de parvenir à une réponse dynamique plus rapide aux changements rapides dans le courant de charge ou de la tension d'entrée [19].



D : Rapport cyclique.

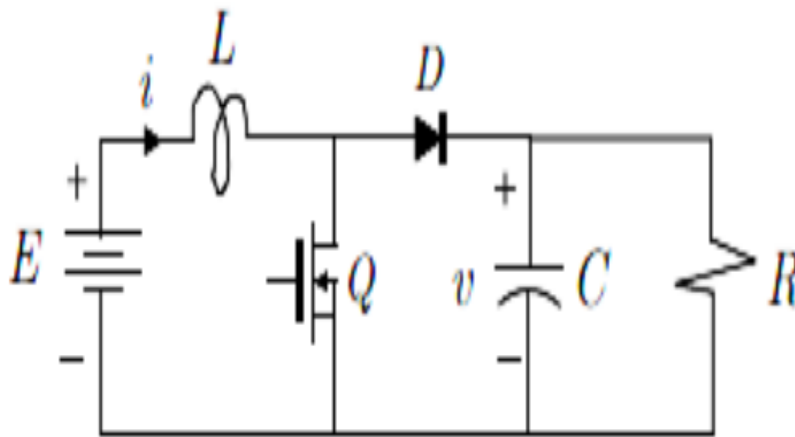
La Figure (II.1): montre le convertisseur DC/DC qui lie la source de tension continue à la charge.

Il est considéré comme un transformateur de grandeurs électriques continues [20]. Les performances du convertisseur DC/DC lui permettent de réguler la tension de sortie DC malgré les variations de charge et de ligne et de réduire les harmoniques de la tension de sortie DC au-dessous du niveau toléré [17]. Il existe plusieurs types de hacheurs DC/DC sur le marché, dans ce chapitre, on va passer en revue les convertisseurs suivants

II.4.Type hacheurs:

II.4.1. Hacheur survolteur (Boost):

Le circuit électrique du convertisseur survolteur est illustré à la Figure (II.2) nous supposons que les semi-conducteurs sont idéaux. Cela permet que l'état de conduction et le blocage soit activés instantanément. Ainsi, le convertisseur présente le comportement suivant: lorsque le transistor Q est dans l'état ON, La diode D est inversement polarisée. En conséquence, il n'y a pas de connexion entre la source de tension E et la charge système R[21].

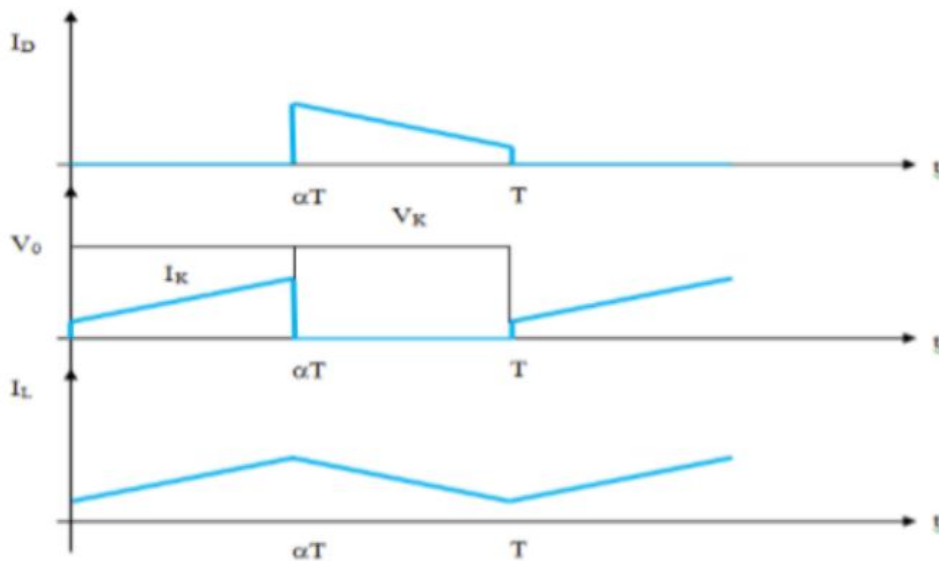


Figure(II.2): Schéma électrique de convertisseur survolteur

II.4.1.1. Fonctionnement:

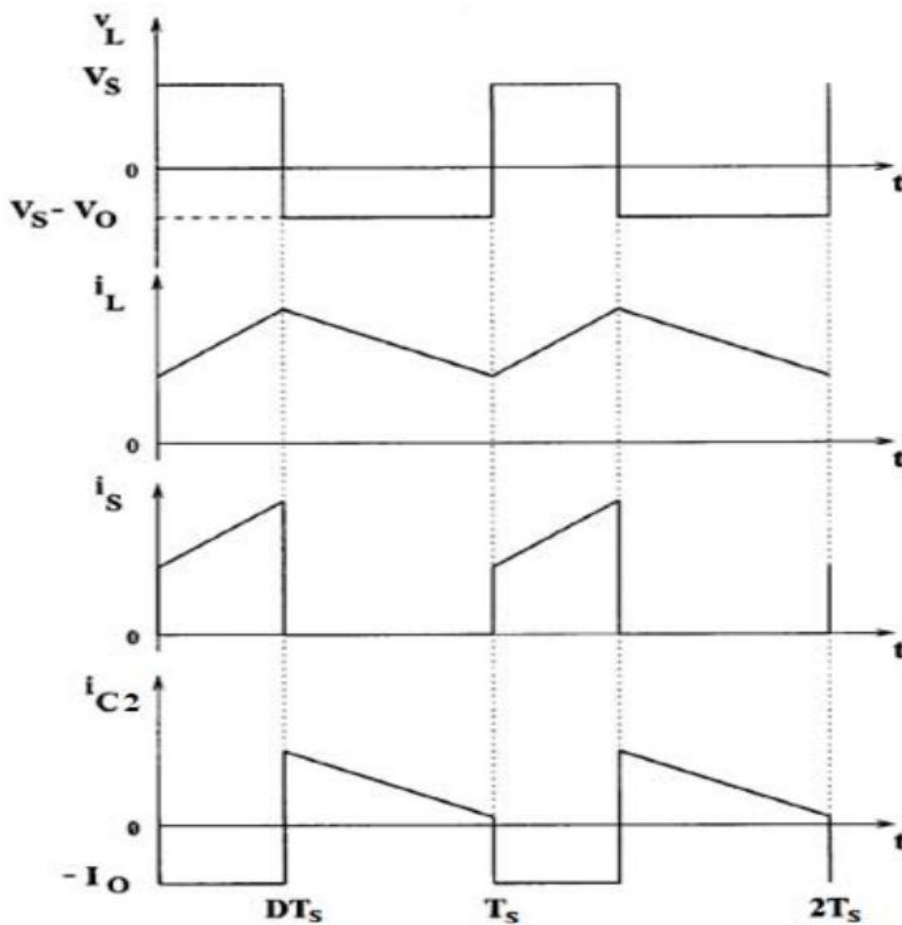
Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée $\alpha \cdot T_e$, le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de S est nulle. Pendant le temps $t \in [\alpha T_e, T_e]$, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a alors $V_k = V_0$.

En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [22] :



Figure(II.3): Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.

II.4.1.2. modèle mathématique:



Figure(II.4): Tensions et courants d'entrée et de sortie en D et Ts pour un Boost

Selon la Figure(II.4), Q se ferme et la diode est polarisée en inverse pour $t \in [0, DT_s]$ L se charge et le courant délivré par la source commence à augmenter progressivement. Pendant cet intervalle de temps on a:

$$\begin{cases} i_{c1} = c_1 \frac{dv_l(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \\ i_{c2} = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ i_{c1} = L \frac{di_l(t)}{dt} = v_s(t) \end{cases} \quad (II.1)$$

Pour $t \in [DT_s, T_s]$, S est ouvert et L libère la tension emmagasinée qui s'ajoute à celle de la source pour alimenter la charge. On obtient l'ensemble suivant d'équations :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_s(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = v_s(t) - v_0(t) \end{cases} \quad (II.2)$$

A partir des équations (II.1) et (II.2), on peut écrire l'équation suivante :

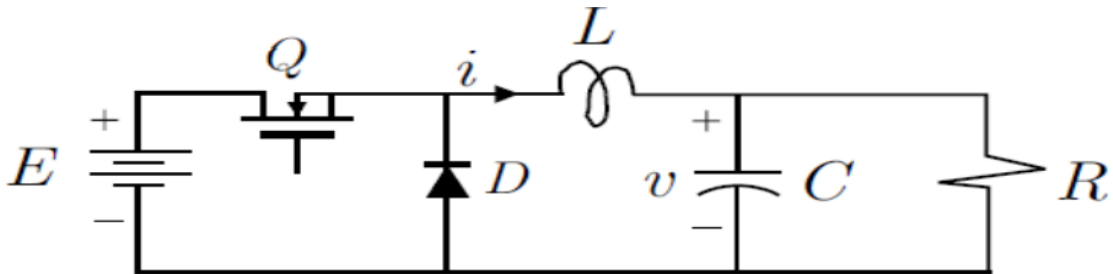
$$(V_s)DT_s = (V_o - V_s) * (1 - D) * T_s \quad (II.3)$$

Le rapport de conversion $M(D)$ s'écrit sous la forme suivante :

$$M(D) = V_o / V_s = 1 / (1 - D) \quad (II.4)$$

II.4.2. Hacheur dévolteur (Buck):

Le schéma de circuit du convertisseur dévolteur est illustré à la Figure(II.5) ce schéma contient un transistor et une diode avec un filtre LC. Son principe de fonctionnement consiste à multiplier la tension d'entrée constante E par un facteur scalaire, plus petit que l'unité [23].



Figure(II.5): Schéma électrique du convertisseur dévolteur.

II.4.2.1. Fonctionnement:



Figure (II.6): Les deux configurations d'un convertisseur Buck suivant l'état de l'interrupteur.

Dans l'état passant, l'interrupteur S est fermé, la tension aux bornes de l'inductance vaut :

$$V_L = V_i - V_o \quad (II.5)$$

Le courant traversant l'inductance augmente linéairement. La tension aux bornes de la diode étant négative, aucun courant ne la traverse.

On note: α : le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur. T_e : étant la période des impulsions.

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e y a une tension appliquée aux bornes de la diode. L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $f_e = 1 / T_e$ La source V_i fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps $t \in [\alpha T_e, T_e]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle [24].

Les chronogrammes de la figure (II.7) sont tracés dans le cas d'une conduction continue, (tracés dans le cas idéal) c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro. Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle [24].

$$V_0 = \alpha \cdot V_i$$

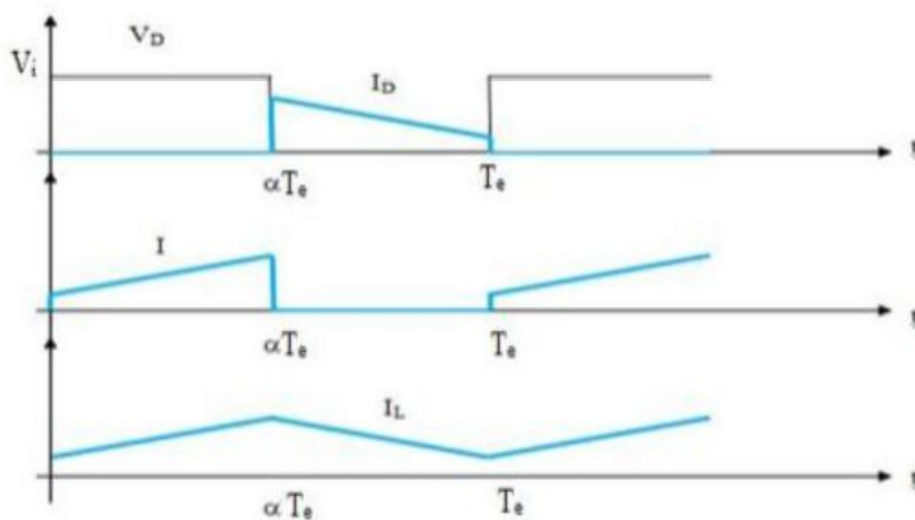
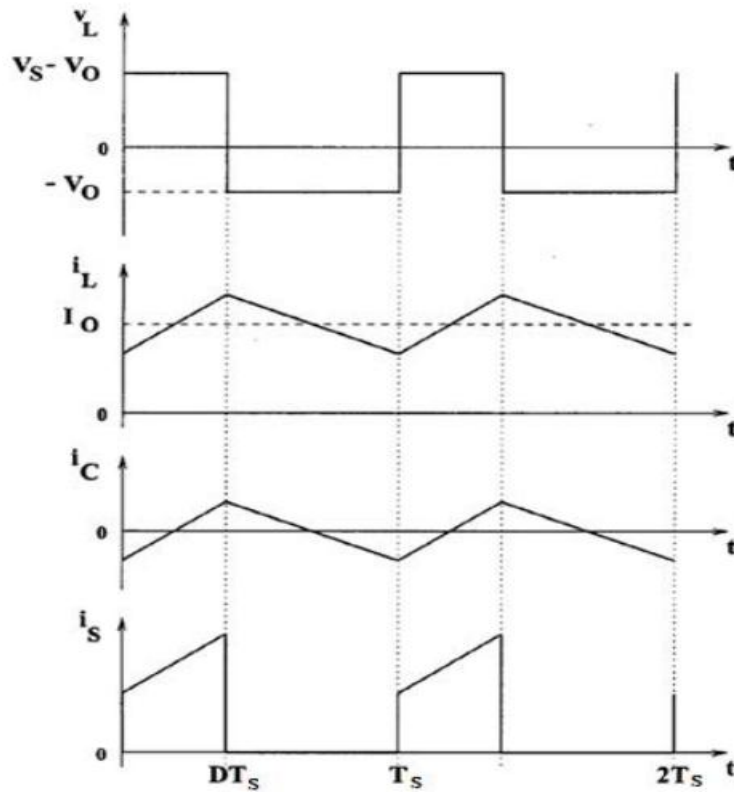


Figure (II.7) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Buck.

II.4.2.2. Modèle mathématique:



Figure(II.8): Forme d'ondes des tensions et des courants d'entrée et de sortie du « Buck » en fonction du rapport cyclique D et la période T_s

La Figure(II.8) représente les formes d'ondes des courants inductif, capacitif, et de commutation. [19]

L'expression de la tension moyenne d'inductance peut être facilement dérivée de la forme d'onde sur la Figure(II.8). La tension moyenne d'inductance est égale à zéro en régime permanent :

$$V_L(t) = D(V_s - V_o) + (1 - D)(-V_o) = 0 \quad (\text{II.6})$$

La relation de la tension d'entrée V_s et de sortie V_o en fonction du rapport cyclique D est donnée par l'équation (II.7) :

$$(V_s - V_o) D T_s = V_o (1 - D) T_s \quad (\text{II.7})$$

A partir de l'équation (II.7), le rapport de conversion du hacheur dévolteur est donné par la forme suivant :

$$\mathbf{M(D)=V0/Vs=D} \quad \text{(II.8)}$$

Le rapport de conversion M(D) varie proportionnellement avec le rapport cyclique de commutation D.

Pour étudier le convertisseur abaisseur et extraire son modèle mathématique, on analyse le fonctionnement du circuit équivalent pour S ouvert et fermé.

Pour $T \in]0, D.T_s[$, Q est fermé :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_s(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = v_s(t) - v_0(t) \end{cases} \quad \text{(II.9)}$$

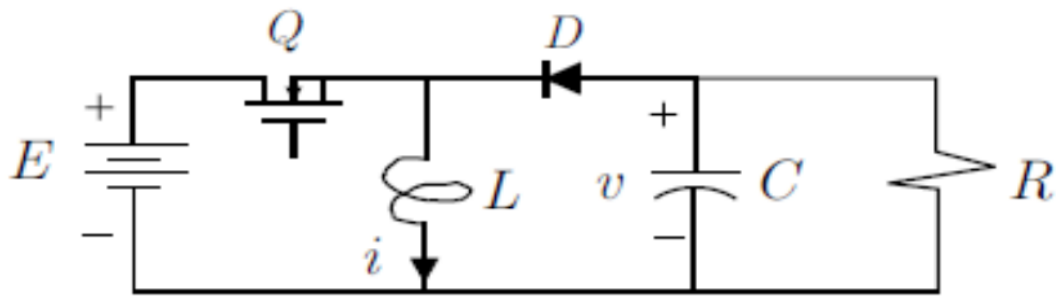
• Pour $t \in [DT_s, T_s]$, Q est ouvert:

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_s(t)}{dt} = i(t), \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ v_{l(t)} = L \frac{di_l(t)}{dt} = -v_0(t) \end{cases} \quad \text{(II.10)}$$

II.4.3. Hacheur survolteur – dévolteur:

Un autre arrangement possible des commutateurs à semi-conducteurs permet d'ajouter un autre type de convertisseur DC-to-DC connu sous le nom de convertisseur survolteur-dévolteur [25]

En fait, ce nouveau convertisseur est obtenu en échangeant la diode D et l'inductance L du convertisseur dévolteur. Le circuit est illustré à la figure (II. 9). Dans ce type de convertisseur, le gain de circuit peut être supérieur ou inférieur à un par rapport au changement de polarité. La différence fondamentale de cette classe de convertisseur avec les convertisseurs dévolteur et survolteur est que la tension de sortie est de signe opposé à celle de la source constante E [26]



Figure(II. 9): Schéma du convertisseur dévolteur-survolteu

II.4.4. Convertisseur Ćuk :

La Figure (II. 10) montre le convertisseur Ćuk qui doit son nom à son inventeur Slobodan Ćuk . Contrairement aux autres convertisseurs vus précédemment, c'est le condensateur qui stocke l'énergie et non pas l'inductance. Grâce à ce convertisseur, on obtient une autre tension désirée mais de polarité inverse . [27][28]

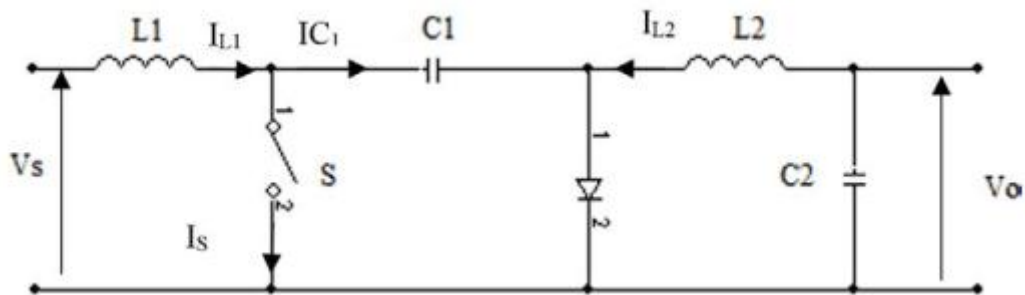


Figure (II. 10): Convertisseur Ćuk

Selon la Figure (II. 11) et pour $t \in] DT, 0[$. S est fermé, l'inductance L1 se charge de la source de tension d'entrée et l'inductance L2 est connectée en série avec les condensateurs C1 et C2.

Donc on a :

$$\begin{cases} v_{L1}(t) = v_s(t) \\ v_{L2}(t) = v_0 - v_{c1}(t) \end{cases} \quad \text{(II.11)}$$

Pour $t \in] DT , Ts[$. S est bloqué et la diode est passante, on a :

$$\begin{cases} v_{L1}(t) = v_s(t) - v_{c1}(t) \\ v_{L2}(t) = v_0 \end{cases} \quad \text{(II.12)}$$

Les valeurs moyennes de VL1 et VL2 sont obtenues par :

$$\begin{cases} V_{L1} = V_s D + (V_s - V_{c1})(1 - D) = 0 \\ V_{L2} = (V_0 - V_{c1})D + (1 - D) = 0 \\ V_{c1} = \frac{V_0}{D} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Le rapport de conversion M(D) est calculé comme suit :

$$M(D) = \frac{V_0}{V_s} = \frac{D}{(1-D)} \quad (\text{II.14})$$

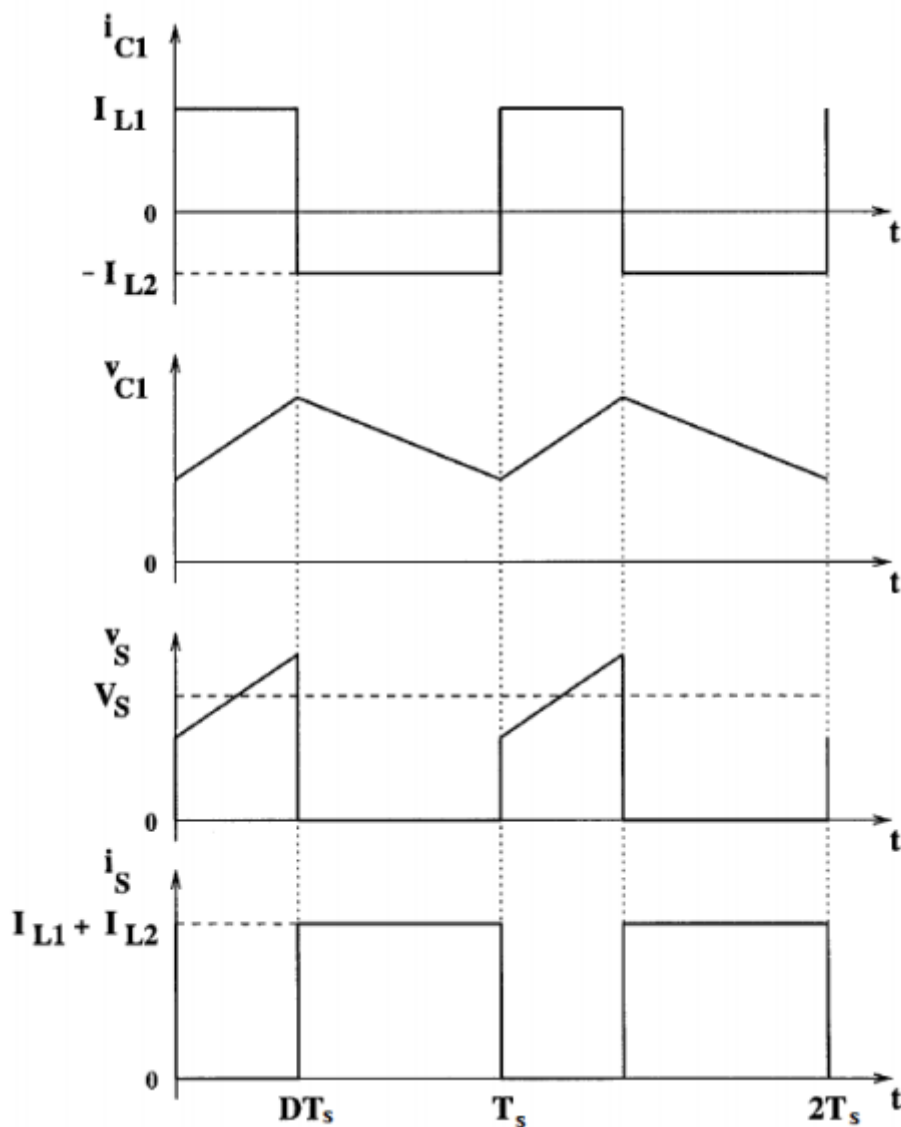
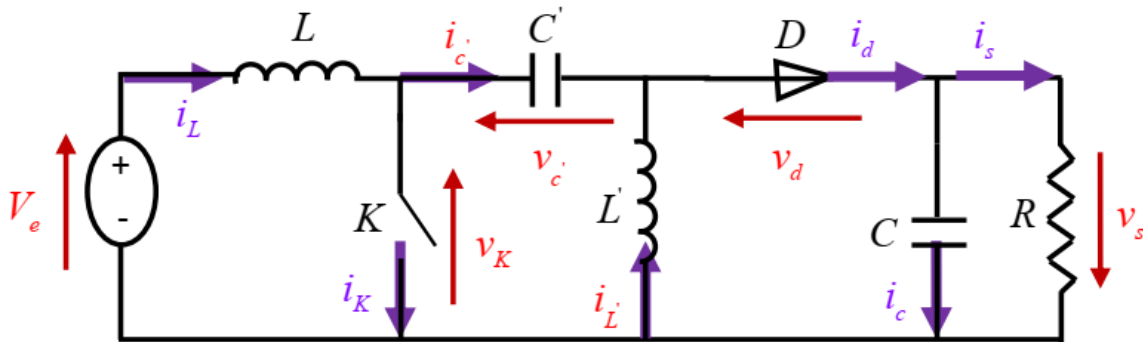


Figure (II. 11): Signaux de tensions et de courants du convertisseur Ćuk .

II.4.5. Convertisseur Sepic :

De la même façon, on commence par donner le circuit de principe du convertisseur Sepic et ses formes d'ondes de courant et de tension obtenues en mode de conduction continu à la figure (II.13). Les caractéristiques de ce convertisseur sont identiques à celles du Cuk, mais il n'est pas inverseur en tension. [29]



Figure(II.12): Schéma électrique de convertisseur Sepic

La tension de sortie moyenne est donnée par

$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_e \quad (\text{II.15})$$

L'expression reliant les valeurs moyennes des courants est :

$$I_L = \left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right) I_{L'} = \left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right) I_s \quad (\text{II.16})$$

Les ondulations de courant dans les deux inductances :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L f} \quad (\text{II.17})$$

$$\Delta i_{L'} = \frac{\alpha V_e}{L' f} \quad (\text{II.18})$$

L'ondulation de la tension de sortie:

$$\Delta v_s = \frac{\alpha^2 V_e}{(1-\alpha) R C f} \quad (\text{II.19})$$

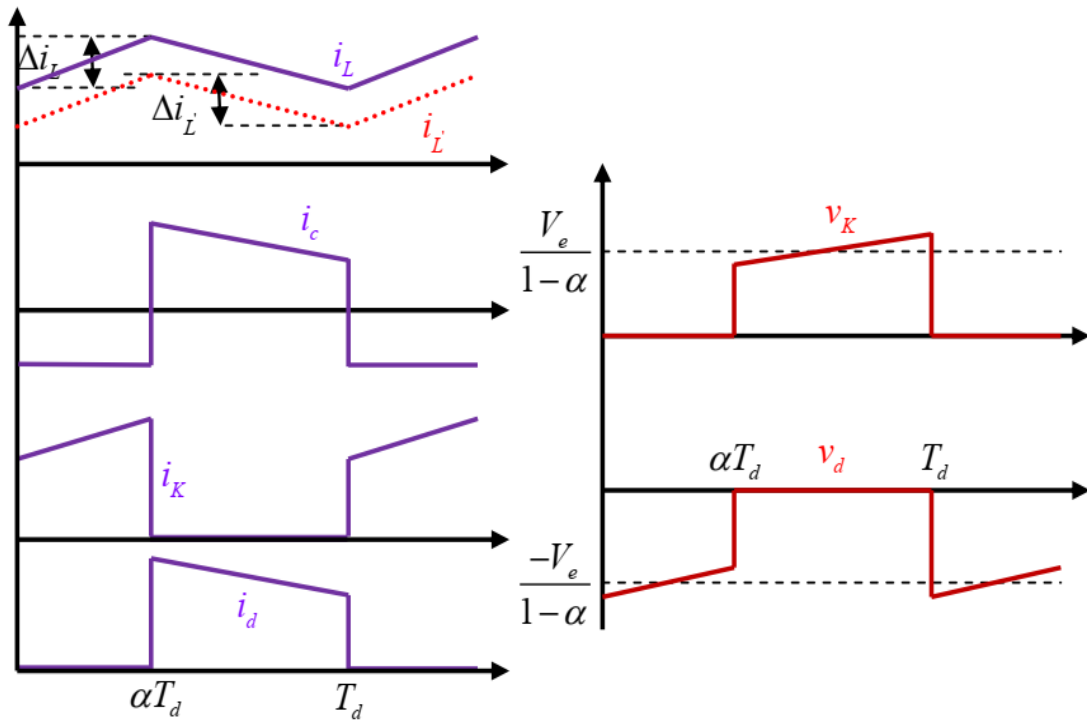
L'ondulation de la tension aux bornes de \$C'\$

$$\Delta v_{C'} = \frac{(1-\alpha) I_L}{C' f} = \frac{\alpha^2 V_e}{(1-\alpha) R C' f} \quad (\text{II.20})$$

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont :

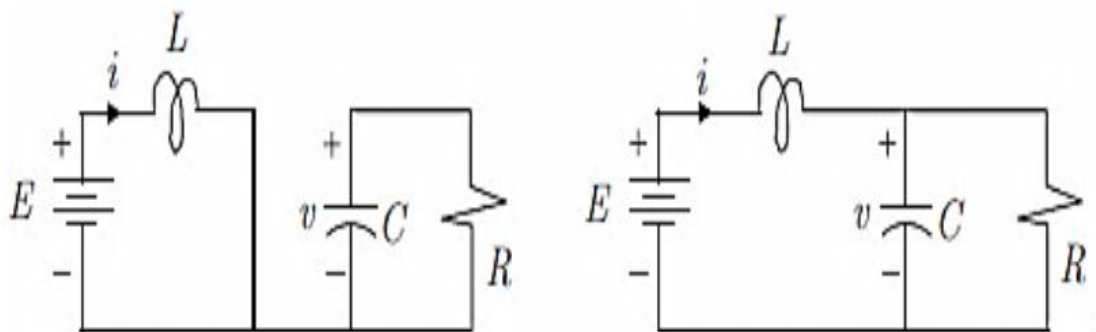
$$V_{K,max} = |V_{d,max}| = V_{C',max} + V_{S,max} = \frac{V_e}{(1-\alpha)} + \frac{\Delta V_{c'} + \Delta V_S}{2} \quad (\text{II.21})$$

$$i_{K,max} = i_{d,max} = I_L + I_{L'} + \frac{\Delta i_L + \Delta i_{L'}}{2} \quad (\text{II.22})$$

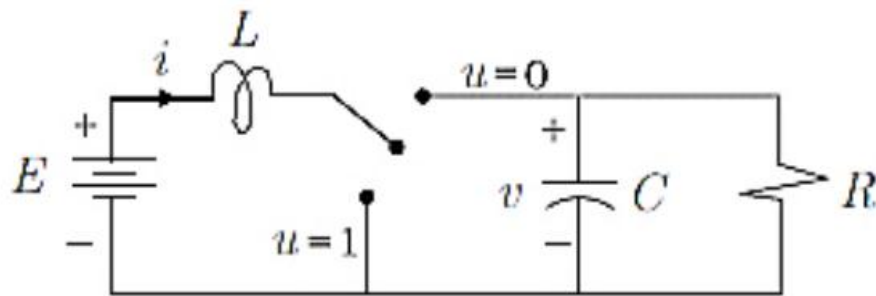


Figure(II.13): Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Sepic.

II.5. Modèle de le hacheur survolteur :



Figure(II.14): Schéma topologique du convertisseur survolteur.



Figure(II.15): Schéma topologique équivalent en utilisant un commutateur idéal du convertisseur survolteur.

En appliquant les lois de Kirchhoff :

Lorsque la position du commutateur est réglée sur $u = 1$, nous obtenons les équations suivantes :

$$L \frac{di}{dt} = E \quad (\text{II.23})$$

$$C \frac{dv}{dt} = -\frac{v}{R} \quad (\text{II.24})$$

Lorsque la fonction de position du commutateur est réglée sur $u = 0$, nous obtenons les équations suivantes :

$$L \frac{di}{dt} = -v + E \quad (\text{II.25})$$

$$C \frac{dv}{dt} = i - \frac{v}{R} \quad (\text{II.26})$$

La dynamique du convertisseur survolteur est ensuite décrite par système d'équations

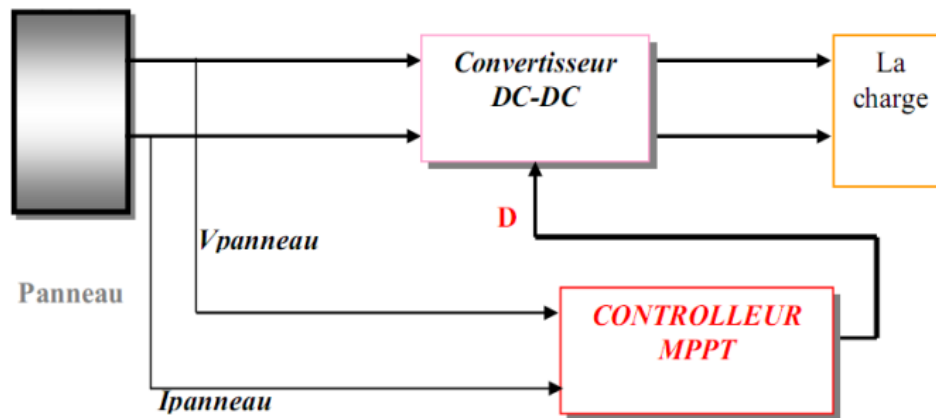
Suivantes :

$$L \frac{di}{dt} = -(1 - u)v + E \quad (\text{II.27})$$

$$C \frac{dv}{dt} = (1 - u)i - \frac{v}{R} \quad (\text{II.28})$$

II.6. Etage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge:

L'introduction d'un étage d'adaptation permettant de fixer le point de fonctionnement du GPV indépendamment de celui de la charge, permet l'extraction de la puissance optimale. L'ensemble peut fonctionner de façon idéale, si diverses boucles de contrôle en entrée et en sortie de l'étage d'adaptation sont prévues. En entrée, elles garantissent l'extraction à chaque instant, du maximum de puissance disponible aux bornes du GPV. Et en sortie, des boucles de contrôle spécifiques permettent un fonctionnement optimal de chaque application dans son mode le plus approprié[30]. Les techniques utilisées classiquement pour les boucles de contrôle en entrée consistent à associer à l'étage d'adaptation une commande appelée MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui effectue une recherche permanente du point de puissance maximale.(MPP).[31]



Figure(II.16): Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC-DC) contrôlé par une commande (PPM) sur charge DC.

II.6.1. Adaptation par convertisseurs électroniques :

Dans ce paragraphe, on présentera la méthode d'adaptation des tensions la plus utilisée et qui est plus simple que l'adaptation par modification des connexions électriques des modules photovoltaïques. Cette méthode d'adaptation se base sur l'utilisation d'un convertisseur électronique commandé par un signal PWM généré selon les méthodes MPPT qu'on étudiera aux chapitres 5 et 6. L'interrupteur du convertisseur est fermé (tension nulle) pendant une durée aT de la période T . Il est ouvert (courant nul) pendant le reste $(1-a)T$ de la période. La variable a , compris entre 0 et 1, porte le nom de rapport cyclique. L'interrupteur du convertisseur est généralement un transistor MOSFET[32]. Dans le cas d'un transistor MOSFET idéal ($R_m = 0$), lorsque le courant est nul ou la tension est nulle, la puissance

dissipée dans l'interrupteur, qui est le produit de la tension par le courant, est en permanence nulle. En pratique la résistance interne du transistor est non nulle, donc la tension n'est pas tout à fait nulle pendant le temps de conduction, et la commutation d'un état à l'autre n'est pas instantanée, ce qui produit une perte d'énergie dans l'interrupteur du convertisseur. Pour cela, afin de réduire une perte d'énergie dans le convertisseur on choisit un transistor à faible résistance interne R_{on} [26]. Comme l'indique la figure, on suppose que l'énergie fournie par le générateur photovoltaïque aux batteries et à la charge DC transite via le convertisseur DC/DC sans pertes de puissance. Dans ce cas, le convertisseur DC/DC est assimilable à un transformateur à courant continu avec un le rapport de transformation k réglable. Les tensions et courants d'entrée et de sortie du convertisseur DC/DC sont donnés par les équations suivantes [33][34] :

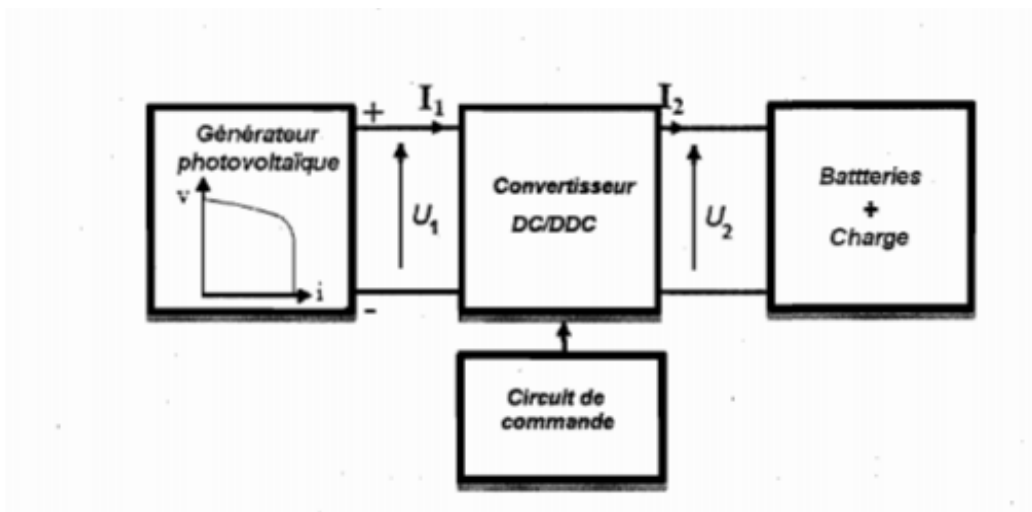
Les equations

$$\frac{U_1}{U_2} = k \quad (\text{II.29})$$

$$\text{Et } \frac{I_1}{I_2} = k \quad (\text{II.30})$$

Les équations (II.29) et (II.30) donnent:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad (\text{II.31})$$



Figure(II.17): Adaptation entre un générateur photovoltaïque et les batteries par

convertisseur DC/DC.

Le convertisseur DC/DC peut être survolteur, dévolteur ou survolteur-dévolteur selon le niveau de tension des modules photovoltaïques et des batteries avec ou sans isolation galvanique.

II.7. Problème MPPT :

Les systèmes photovoltaïques (PV) sont de plus en plus utilisés dans les technologies de l'énergie électrique. Le principal les inconvénients des systèmes PV sont le coût de fabrication élevé et le faible rendement de conversion d'énergie, qui est en partie causée par leurs V-I et P-I non linéaires et dépendant de la température les caractéristiques. Pour pallier ces inconvénients, trois approches essentielles peuvent être suivies :

- 1) Améliorer les procédés de fabrication des panneaux solaires : de nombreux efforts de recherche ont été réalisées en ce qui concerne les matériaux et la fabrication des générateurs photovoltaïques
- 2) Contrôle de l'entrée d'isolation des panneaux photovoltaïques : l'énergie solaire d'entrée est maximisée en utilisant des capteurs solaires à suivi du soleil ou en réorganisant les configurations de cellules solaires du PV tableaux en ce qui concerne les changements dans les conditions environnementales [35].
- 3) Utilisation du suivi du point de puissance maximale (MPPT)

Une modification du rayonnement solaire ou de la température entraîne un déplacement du MPP sur une large gamme, les conditions d'ombrage instantanées et le vieillissement des cellules PV affectent également le MPP lieu. De plus, les caractéristiques électriques de la charge peuvent également varier [36]

Comme mentionné précédemment, le MPPT est la technique qui garantit que le panneau PV quel que soit le changement des conditions d'éclairement et de température de la cellule, donne le maximum disponible Puissance. En d'autres termes, il est nécessaire de suivre le MPP pour maximiser la puissance prélevée du panneau PV en toute circonstance susceptible d'entraîner la perte du système règlement [37]

II.8.Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons révélé quelques architectures de base pour les alimentations à découpage, et ce sont les différents convertisseurs DC/DC. Ce sont les convertisseurs buck, boost, buck, uk et Sepic, qui permettent d'ajuster la valeur de tension (moyenne) d'une source de tension 1 DC avec un rendement élevé et peuvent être utilisés dans une installation photovoltaïque [24]. Nous avons également vu en détail le fonctionnement et les caractéristiques électriques de ces transformateurs. Ensuite nous avons mentionné quelques problèmes MPPT et dans le chapitre suivant nous étudierons quelques méthodes MPPT telles que perturbation et observation , Incrément de Conductance , optimisation d' essaim de particules et recherche de coucou

Chapitre III

méthodes MPPT

III.1. Introduction

Les panneaux solaires, bien qu'ils soient en plus performants, ont des rendements qui restent assez faibles. C'est pourquoi il faut exploiter le maximum de puissances qu'ils peuvent générer en réduisant au maximum les pertes d'énergie. Une caractéristique importante de ces panneaux est que la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement appelé le point de puissance maximale (MPP), définie par une tension et un courant donnés ; ce point se déplace en fonction des conditions météorologiques (ensoleillement, température, etc.). Extraire le maximum de puissance nécessite donc un mécanisme de poursuite de ce point qu'on appelle MPP Tracker (MPPT).

Dans ce chapitre nous allons citer les différentes méthodes de poursuite du point de puissance maximale et en terminant par notre méthode qui est choisie parmi les précédentes s'appelle perturbation et observation (P&O) , Incrément de Conductance (INC) , Particle swarm optimization (PSO) et coucou search (CS) .

III.2. La commande MPPT :

C'est un montage électronique au niveau du régulateur, permettant de tirer le maximum d'énergie d'une installation solaire photovoltaïque . Le régulateur MPPT permet d'optimiser le rendement des panneaux solaires jusqu'à 30% : pour un panneau photovoltaïque donné, les batteries recevront 30% d'électricité en plus par rapport à un régulateur solaire classique [38]. Les cellules PV utilisent pour fournir de l'énergie dans le but d'obtenir la puissance maximale du panneau.

Un serveur MPPT est utilisé pour la commande du hacheur. Cette technique a été développée depuis 1968 et il a eu un rôle essentiel pour le fonctionnement du panneau. Le principe de la commande est de faire varier le rapport cyclique D automatiquement jusqu'à ce que l'on obtienne la valeur optimale de manière à maximiser la puissance du panneau, ainsi que quels que soient les conditions météorologiques T et G , la commande du convertisseur place le système au point de fonction maximum (V_{mpp} , I_{mpp}) [38]

III.3 Principe de la recherche du point de puissance maximal :

Il existe un point de fonctionnement où la puissance débitée est maximale. 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 se fait 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.

Ce type de commande est souvent nommé « Recherche du Point de Puissance maximale existant ou la puissance débitée est maximale Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » (MPPT). La Figure (III.1) représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT.

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 quelle puisse ensuite être transférée directement à la charge [39] [40] [41].

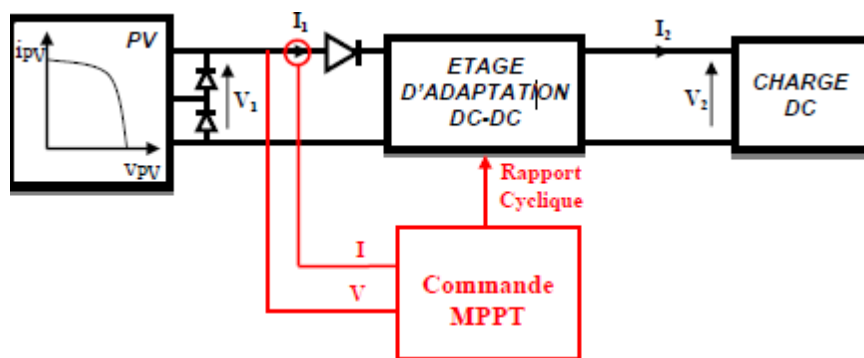


Figure (III.1): Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement quelles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir.

La Figure (III.2), illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

✓ Pour une variation de l'ensoleillement (cas a),

Il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2.

✓ Variations de température de fonctionnement du GPV (cas b).

Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande.

✓ Pour une variation de charge (cas c),

On peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.

En résumé, le suivi du PPM :

Est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV. Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV [40] [41] [42].

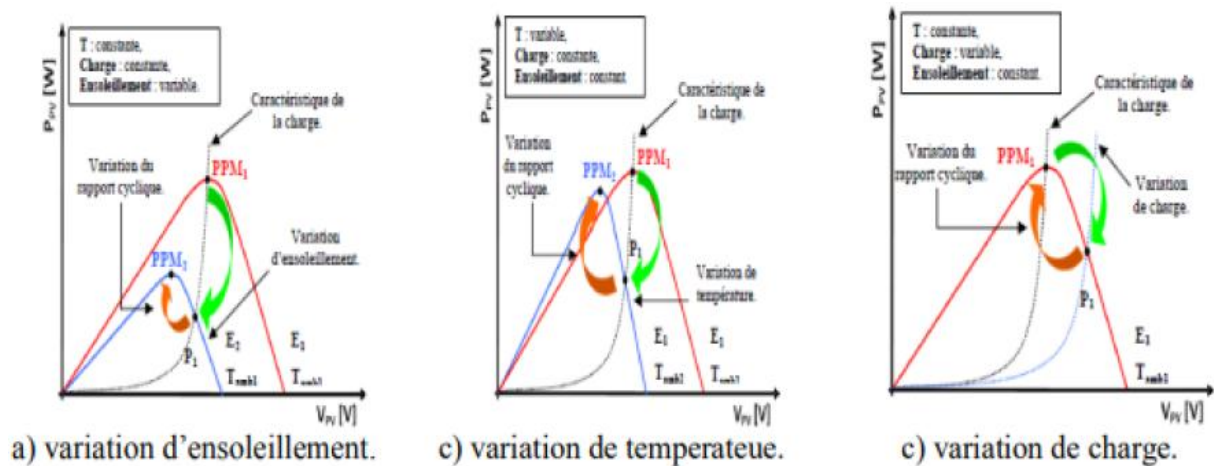


Figure (III.2):Recherche et recouvrement du point de puissance maximale.

III.4.Classification de l'algorithme de suiveur la puissance max :

La classification des algorithmes du suiveur peut être basée sur la fonction des technique sou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées: méthodes directes et indirectes .[43]

III.4.1.Méthodes indirectes :

Dans les méthodes indirectes, les bases de données regroupant les valeurs physiques du panneau PV sont généralement utilisées pour générer les signaux de contrôle dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement). Ces méthodes, utilisées uniquement pour les systèmes PV sont la méthode de tension en circuit ouvert (V_{co}), la méthode du courant de court-circuit (I_{cc}), ainsi que la méthode MPPT basée sur l'intelligence artificielle (IA).

Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis, devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques [44].

III.4.1.1. La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur :

Cette méthode est basée sur la tension du générateur PV au point de puissance maximale qui est approximativement proportionnelle à sa tension à circuit ouvert V_{oc} . La constante proportionnelle k_1 , dépend de la technologie de cellules photovoltaïques, du facteur de forme et des conditions météorologiques.

$$K_2 = \frac{I_{MPP}}{I_{oc}} \cong Cte < 1 \quad (III. 1)$$

La tension de circuit ouvert du générateur PV est mesurée et stockée en arrêtant le système cette opération s'effectuant à une certaine fréquence. Le MPP est calculé suivant l'équation . et la tension de fonctionnement est ajustée sur le point de puissance maximale .[43]

Bien que cette méthode soit apparemment simple, il est difficile de choisir une valeur optimale de k_1 Cette méthode souffre donc d'inexactitude mais présente l'avantage d'être simple et abas prix. Aussi, l'interruption de service à la limite des systèmes avec stockage où la déconnexion des panneaux est « transparente » pour l'utilisateur.

III.4.2. Les méthodes directes :

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction [45][46].

III.4.2.1 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe):

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension VPV d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance PPV qui en résulte [47][48]. Ainsi, comme l'illustre la figure III.3, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension VPV engendre un accroissement de la puissance PPV, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. À partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique PPV(VPV), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

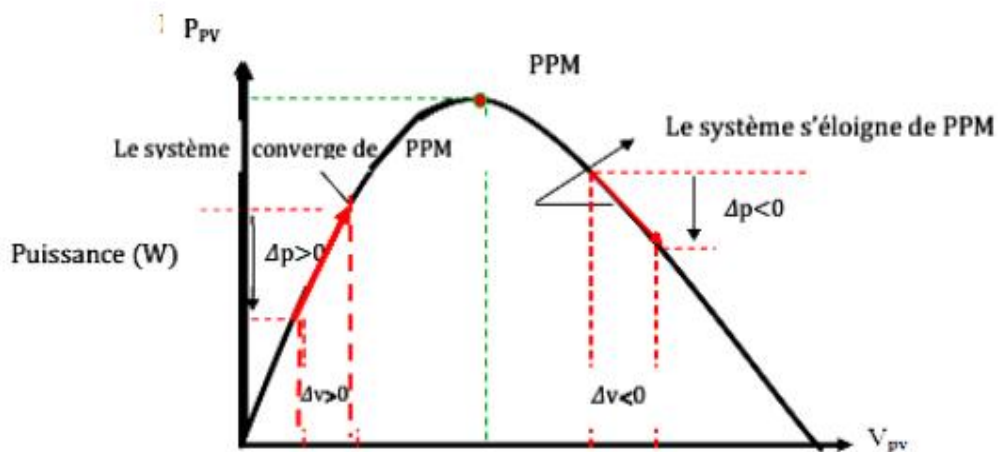


Figure (III.3): Recherche du PPM par la méthode (P&O).

La Figure (III.4) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de Type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

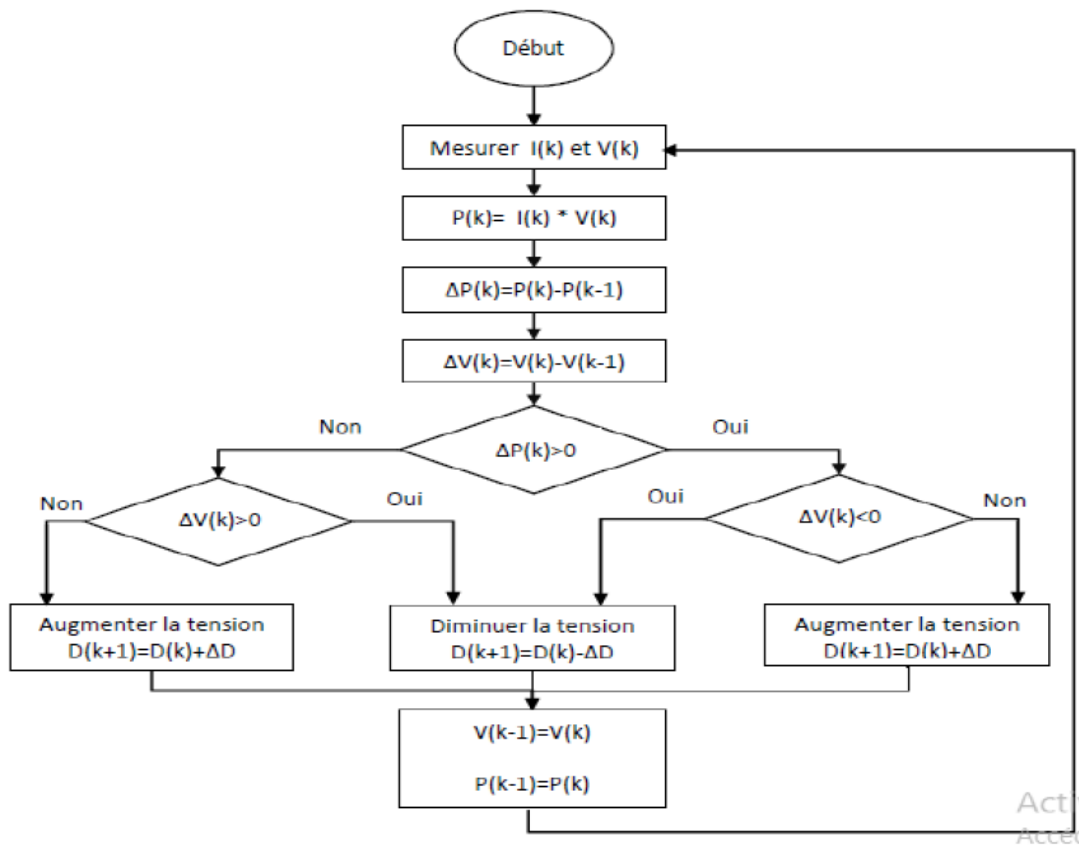


Figure (III.4):Algorithme de P&O classique

Avec :

p_{pvn} : la nouvelle puissance

p_{pvn-1} : l'enceint puissance dans le temps (t-1)

$$\Delta_v = V_{pv n} - V_{pv n-1} \quad (III. 2)$$

$$\Delta_p = P_{pv n} - P_{pv n-1} \quad (III. 3)$$

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de part sa facilité d'implémentation ,cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralenti la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser [49].

III.4.2.2. Algorithme de Incrément de Conductance (IncCond):

C'est une méthode basée sur la dérivée de la puissance de sortie du GPV par rapport à la tension VPV du GPV qui doit être égale à 0 au point de puissance maximale (MPP). [50][51]

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} = - \frac{I}{V} \quad (\text{III. 4})$$

Au PPM ces deux membres doivent être égaux. Si le point de fonctionnement n'est pas sur le PPM, alors une inégalité apparaît dans l'équation. Ceci indique que la tension de fonctionnement est au-dessus ou au-dessous de la tension optimale comme montré dans la Figure (III.5) Cette situation nous conduit aux équations suivantes

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} > 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} > - \frac{I}{V} & \text{A gauche du PPM} \\ \frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} < 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} < - \frac{I}{V} & \text{A droite du PPM} \end{cases} \quad (\text{III. 5})$$

Si $\frac{dI}{dV} > - \frac{I}{V}$, le point de fonctionnement est à gauche de MPP, donc il faut augmenter la tension pour atteindre le MPP.

Si $\frac{dI}{dV} < - \frac{I}{V}$, le point de fonctionnement est à droite de MPP, donc il faut diminuer la tension pour atteindre le MPP.

Si $\Delta V = 0$ et $\Delta I = 0$, on a les conditions atmosphériques qui n'ont pas changées et le MPPT fonctionne toujours au MPP.

Si $\Delta V = 0$ et $\Delta I > 0$, alors c'est l'ensoleillement qui a augmenté, ceci exige au INC-MPPT d'augmenter la tension de fonctionnement pour retrouver le MPP.

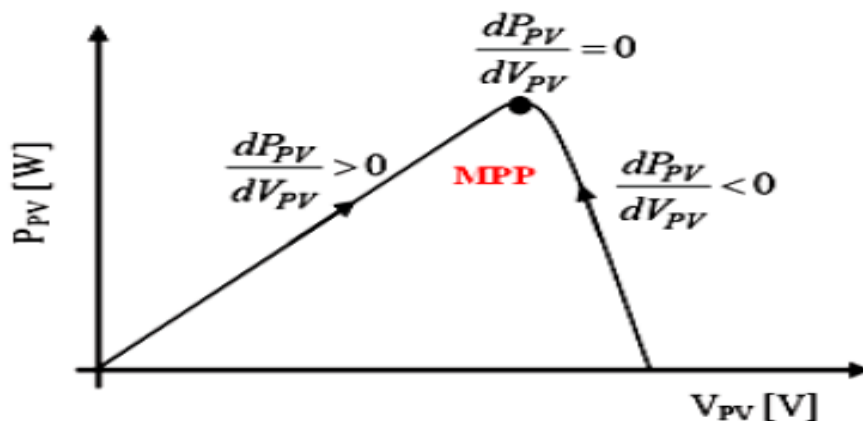


Figure (III.5): Méthode IncCond pour poursuivre le MPP

Si $\Delta V = 0$ et $\Delta I < 0$, c'est l'ensoleillement qui a diminué, ceci exige au INC-MPPT de diminuer la tension de fonctionnement pour retrouver le PPM.

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque

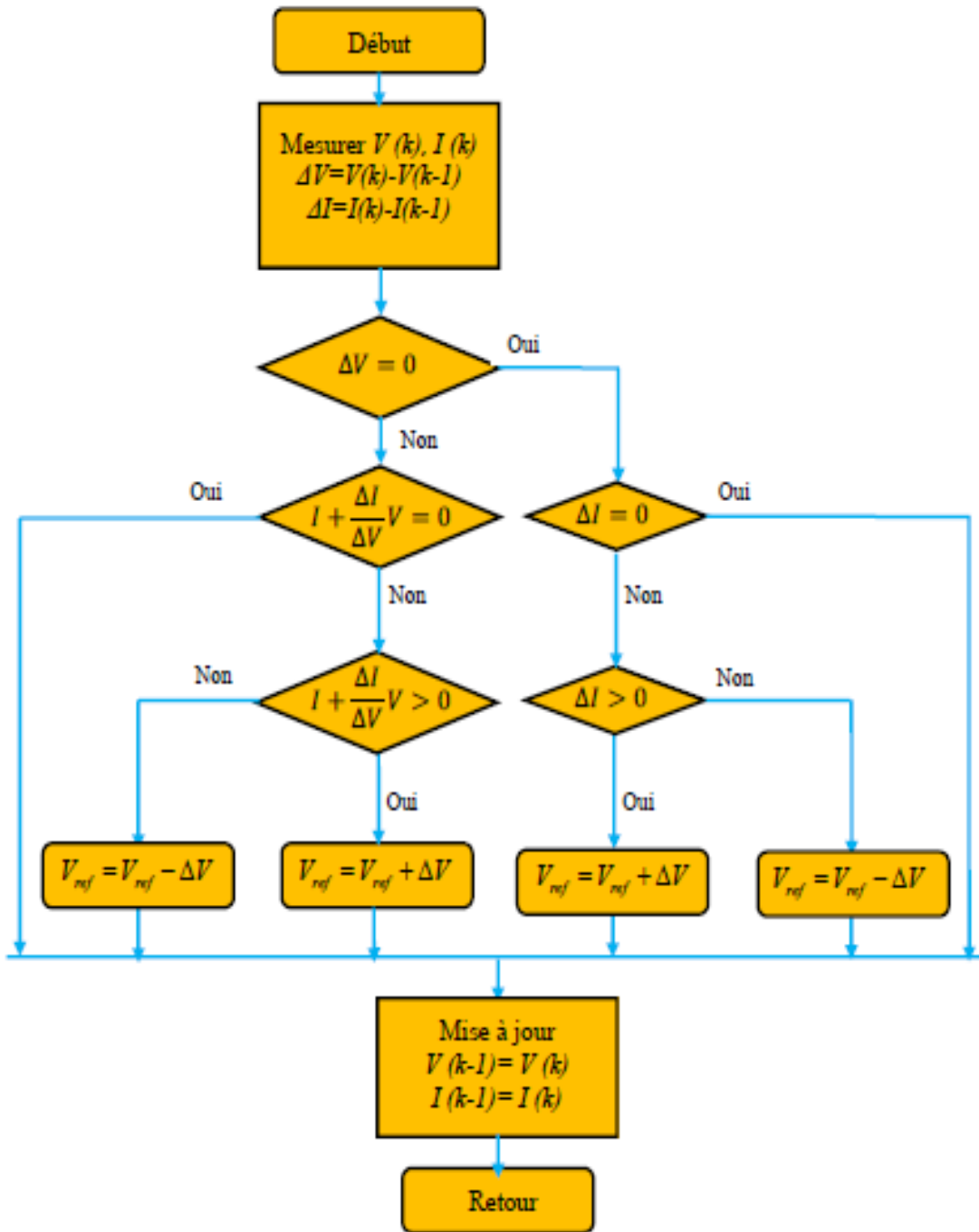


Figure (III.6): Organigramme de la méthode IncCond

instant de la valeur de la conductance (IPV/VPV) avec celle de l'incrément de conductance

III.4.2.3 Optimisation d'essaim de particules (PSO):

En 1995, James Kennedy et Russell Eberhart ont développé l'algorithme d'optimisation d'essaim de particules (Particle swarm optimization (PSO)). Cet algorithme est une technique d'optimisation stochastique inspirée du comportement des animaux tels que les oiseaux [52] [53].

La PSO est une méthode méta-heuristiques de recherche globale qui est basée sur l'activité commune et auto-organisationnelle des particules de même groupe [54][55]. Comme le montre la Fig. 3.4, cette technique est régie 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 [56]. Le Tableau 3.2 donne les paramètres de la PSO, la position de la particule est corrigée en fonction de sa vitesse actualisée (vélocité), la meilleure position personnelle obtenue (PBest) et la meilleure position obtenue au voisinage (GBest).

La PSO repose sur les règles, de la mise à jour des positions locales et globale de particules et du groupe, donnée par les équations . [56] [54][55]

$$\mathbf{V} \mathbf{i}(t+1) = \mathbf{w} * (\mathbf{V} \mathbf{i}(t) + c1 * \mathbf{rand1} * (\mathbf{PBesti}(t) - \mathbf{Pi}(t)) + c2 * \mathbf{rand2} * (\mathbf{GBesti}(t) - \mathbf{Pi}(t))) \quad (\text{III. 6})$$

$$\mathbf{Pi}(t + 1) = \mathbf{Pi}(t) + \mathbf{V} \mathbf{i}(t + 1) \quad (\text{III. 7})$$

P : Position de la particule.

V : Vitesse.

PBest : Meilleure position de la particule qui correspond à Local-Dbest.

GBest : Meilleure position du groupe de particule qui correspond à Global-Dbest.

rand : Variable aléatoire uniformément distribuée sur un intervalle de [0, 1] (fonction définie dans Matlab).

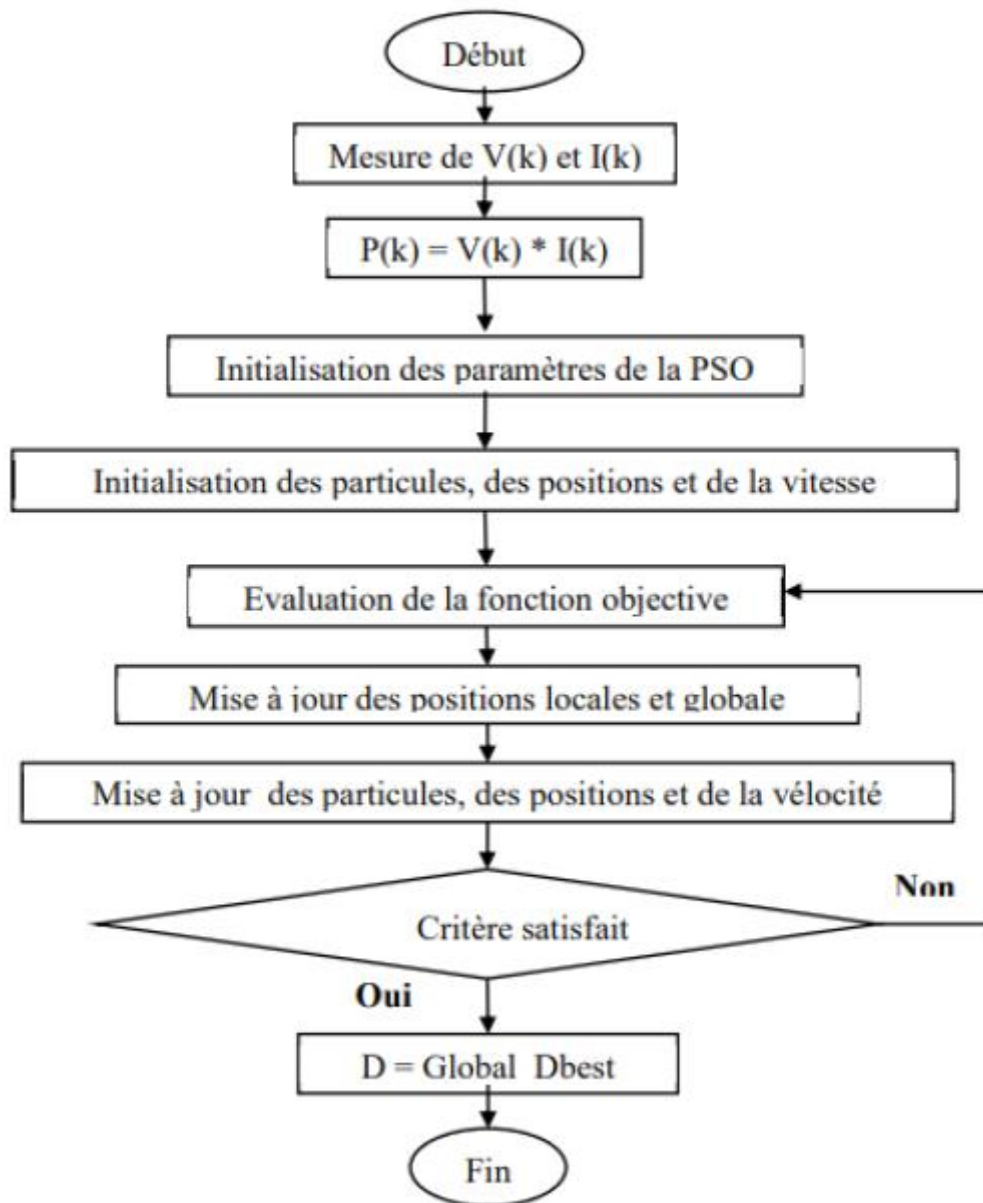


Figure (III.7): Organigramme de la PSO.

III.4.2.4 Algorithme de coucou search (CS) :

L'algorithme de Coucou search une méthode d'optimisation méta heuristique bio inspirée. Elle se base sur le système productif agressif des oiseaux coucou. Il est calqué sur le comportement des femelles coucou lors de la période de couvaion. Les oiseaux coucou sont des oiseaux fascinants .Ils se nourrissent principalement d'insectes et de chenilles velues. Il se nourrit dans les arbre set les broussailles, à découvert .Ils vivent aux lisières des forêts et dans les clairières, les fermes, les marais, les dunes côtièreset les campagnes ouvertes, les zones cultivées avec des arbres et des buissons, et près des roselières.

Quelques espèces des oiseaux coucou ont un système agressif, en effet :

Ils pondent leurs oeufs des nids d'autres oiseaux, ils peuvent aussi enlever les oeufs des autres pour augmenter la probabilité d'éclosion de leurs propres oeufs. Lorsqu'un oiseau haut découvre qu'un oeuf étranger est dans le nid, il engage un conflit direct avec les coucou parasites, comme il abandonne le nid en cours, ou bien il construit un autre ailleurs.

La force de CS est sa manière d'exploiter et d'explorer l'espace de solutions à l'aide des coucous. Le coucou montre une certaine intelligence de façon à détecter les meilleures solutions

Donc, il représente un outil de contrôle direct pour intensifier ou diversifier les recherches.

III.4.2.4.1 Les principales étapes de l'algorithme de recherche coucou:

L'algorithme de la recherche du coucou se résume autour des règles idéales suivantes:

- ✓ Chaque œuf du coucou dans un nid représente une solution.
- ✓ Chaque oiseau de coucou pondra un seul œuf à la fois, et choisit son nid de façon aléatoire. Donc, chaque individu de la population des coucous a le droit de générer aléatoirement une seule nouvelle solution.
- ✓ Les meilleurs nids de meilleure qualité d'œufs nous mèneront vers les nouvelles générations. Ici, on a introduit implicitement la notion d'intensification ou la recherche autour des meilleures solutions.
- ✓ Certaines nouvelles solutions doivent être générées par les vols du Lévy autour de la meilleure solution obtenue jusqu'ici. Cela accélérera la recherche locale.
- ✓ Le nombre de nids hôtes est fixe, et l'œuf pondu par l'oiseau est découvert par l'hôte avec une probabilité $P_a \in [0,1]$ Dans ce cas, l'oiseau hôte choisi de se débarrasser de l'œuf, ou d'abandonner le nid et de reconstruire un autre nid quelque part.
- ✓ Pour la simplification, cette dernière hypothèse sera approximée par la fraction P_a des n nids qui sont remplacées par des nouveaux (nouvelles solutions aléatoires).

Une fraction importante des nouvelles solutions doivent être générées par randomisation vers des régions lointaines et dont les emplacements doivent être assez loin de la meilleure solution actuelle, ce qui fera que le système ne sera pas pris au piège dans un optimum local.

- ✓ Chaque nid peut contenir plusieurs œufs signifiant un ensemble de solutions. La probabilité P_a représente la fraction de N nids qui vont être remplacés par de nouveaux nids (avec de nouvelles solutions aléatoires dans de nouvelles positions dans l'espace de recherche). La qualité d'un nid ou d'une solution est mesurée en fonction de la fonction fitness (fonction objective) qui se varie d'un problème un autre [57]

III.5. Définitions des différents rendements d'une chaîne de conversion photovoltaïque:

Selon l'application, l'énergie électrique photovoltaïque est soit utilisée telle quelle par une charge, soit stockée temporairement ou bien même injectée directement à un réseau électrique. Pour les installations solaires devant fournir de l'énergie à un réseau électrique plus puissant ou bien à des sites isolés, la chaîne de conversion de l'énergie photovoltaïque est aujourd'hui généralement munie d'un étage de conversion de puissance, associé à une commande MPPT et adapté à la nature de la charge.

III.6. Critères d'évaluation d'une commande MPPT:

La qualité d'une commande MPPT peut être définie comme la position du point de Fonctionnement du système par rapport au PPM.

La puissance P_{in} effectivement délivrée par le GPV dépend de la commande utilisée au niveau du convertisseur (MPPT, asservissement de tension, connexion directe, . . .). Le rendement du point de fonctionnement qui en découle et que nous noterons η_{mppt} , permet de mesurer l'efficacité de la commande qui a en charge le contrôle du convertisseur de puissance.

En résumé cela donne le % de pertes de puissance d'un module PV par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait produire.

$$\eta_{mppt} = P_{in} / P_{max} \quad (\text{III. 8})$$

Les performances d'une commande MPPT ne se résument pas à ce seul paramètre (η_{MPPT}). D'autres critères, présentés dans la suite du document, tels que le temps de réponse et son aptitude à fonctionner sur une large gamme de puissance est importante pour évaluer les qualités de ce type de commande [58].

III.7. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous rappelons brièvement la problématique de la recherche du PPM en établissant une classification des commandes MPPT présentes dans la littérature. Comme nous l'avons vu dans ce chapitre, MPPT est un processus important pour le système PV fournir une puissance maximale à la charge et aussi pour augmenter l'efficacité. Dans ce chapitre, nous avons étudié la commande MPPT et son principe et les différents types des méthodes de poursuite du point de puissance maximal générée par le générateur photovoltaïque .

CHAPITRE IV

SIMULATION DE SYSTÈME

IV.1. Introduction:

La simulation est un outil pour l'évaluation des performances théoriques d'un système. En effet cette partie nous permettra d'effectuer des simulations d'un générateur photovoltaïque suivi par un convertisseur DC/DC et de tester les commandes MPPT. Ceci nous permet de modifier les paramètres du système facilement telles que les conditions météorologiques, et de visualiser l'apport de la commande sur le générateur photovoltaïque. 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.

IV.2. Simulation d'un système photovoltaïque

Comme nous l'avons montré dans le chapitre précédente, pour que le générateur photovoltaïque (PV) fonctionne dans les conditions optimales, il doit être doté d'un quadripôle d'adaptation. Cette adaptation se réalise par la recherche automatique du point de puissance maximale (PPM) du générateur PV et ceci lorsque le système est placé dans un environnement où les conditions météorologiques (ensoleillement, température) et charge sont stables.

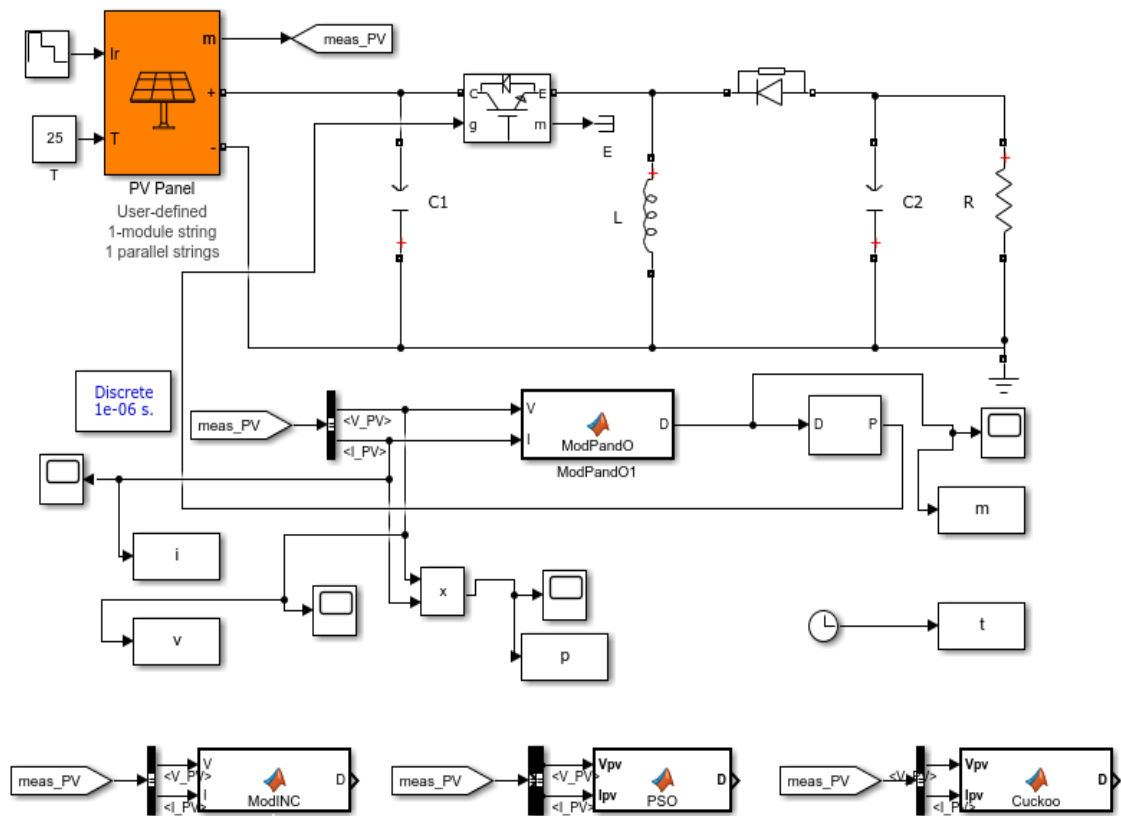
| Module data | |
|--|--------------|
| Module: | User-defined |
| Maximum Power (W) | 51.6026 |
| Cells per module (Ncell) | 36 |
| Open circuit voltage Voc (V) | 21.87 |
| Short-circuit current Isc (A) | 3.04 |
| Voltage at maximum power point Vmp (V) | 17.98 |
| Current at maximum power point Imp (A) | 2.87 |
| Temperature coefficient of Voc (%/deg.C) | -0.229 |
| Temperature coefficient of Isc (%/deg.C) | 0.030706 |

Figure(IV.1):Données sur les caractéristiques électriques du module PV

| convertisseur buck-boost | Valeurs |
|----------------------------|-------------|
| Capacité d'entrée (Cin) | 100 μ F |
| Inductance (L) | 0.018 mH |
| Capacitance (C) | 100 μ F |
| Résistance à la charge (R) | 30 Ω |

Table(IV.1):Paramètre de convertisseur buck-boost

IV.3. Schéma du simulationde système photovoltaïque:

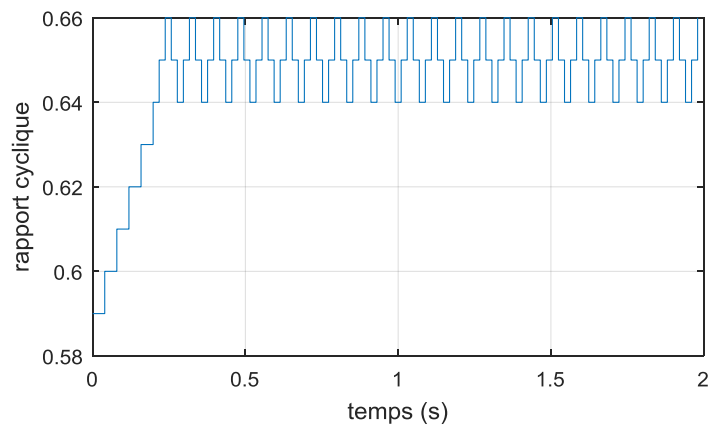


Figure(IV.2): Schéma Matlab/Simulink du système photovoltaïque.

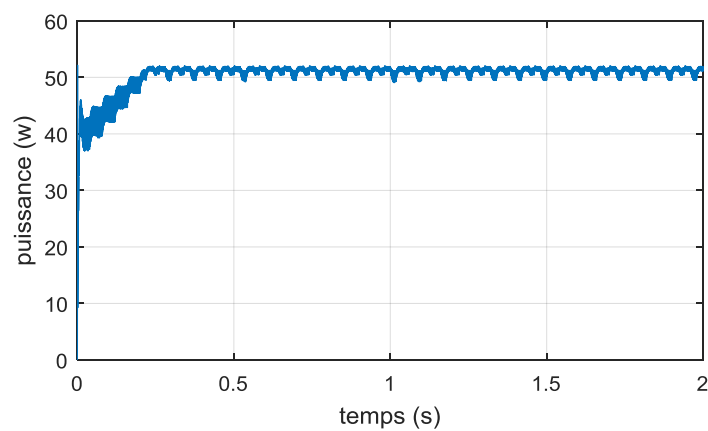
IV.4. Résultats de la simulation:

IV.4.1. Algorithme PO :

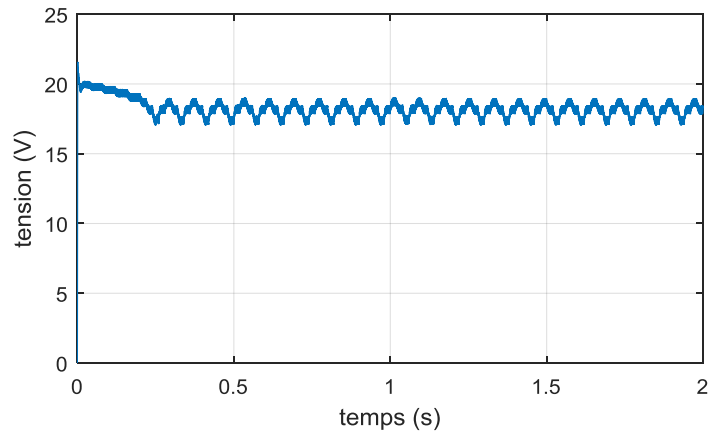
a) stable radiation ($1000\text{w}/\text{m}^2$):



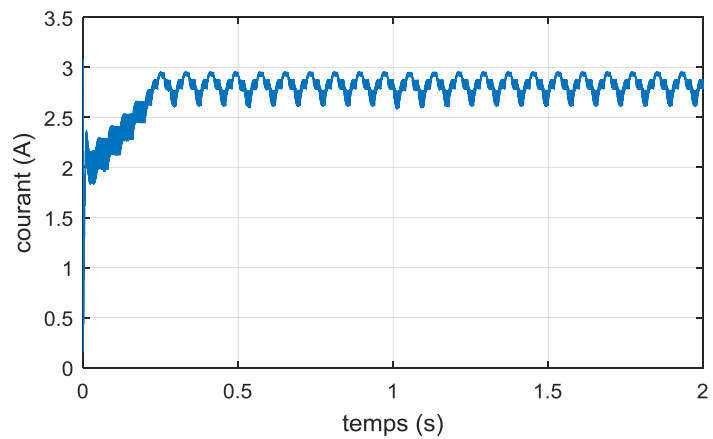
Figure(IV.3): Changement de rapport cyclique



Figure(IV.4): Resultat de simulation de PV puissance.

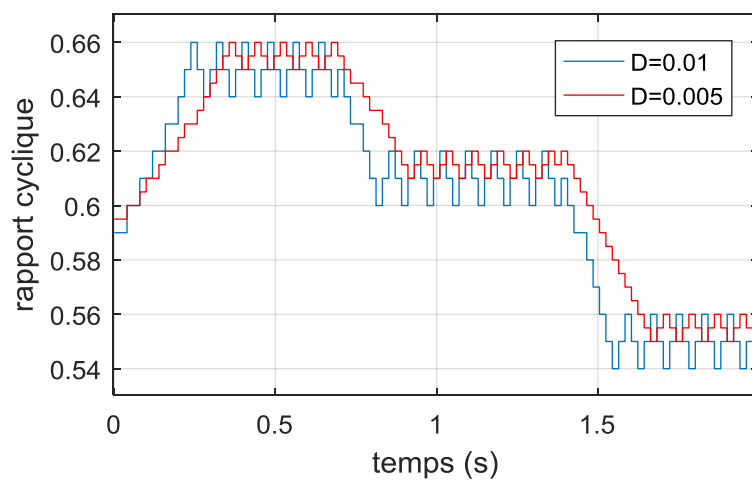


Figure(IV.5): Resultat de simulation de PV tension.

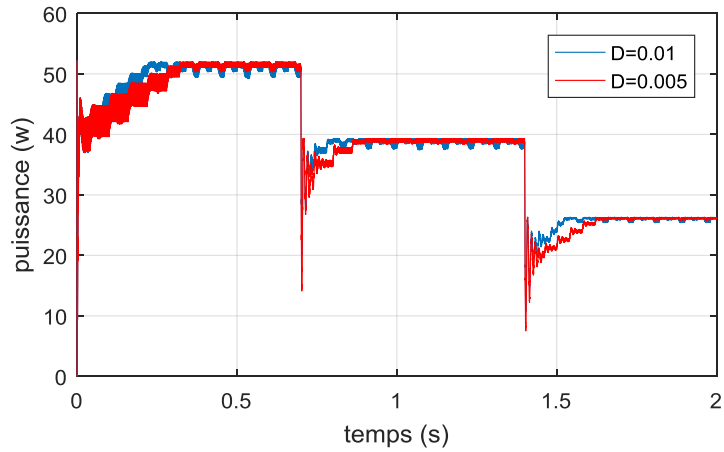


Figure(IV.6): Resultat de simulation de PV courant.

b) variable radiation (1000 – 750 – 500 w/ m²):



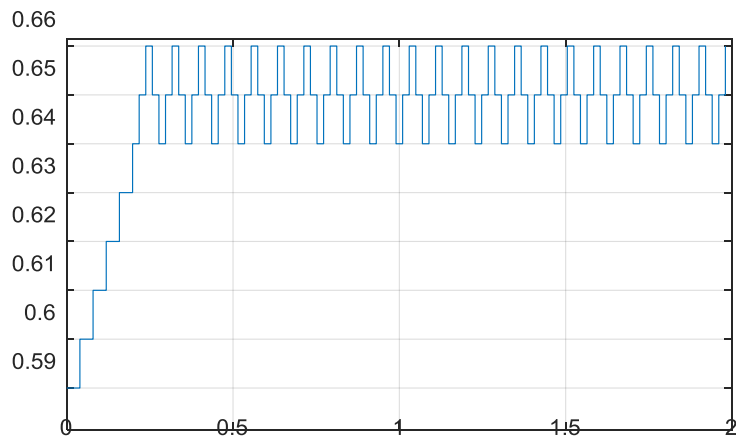
Figure(IV.7): Changement de rapport cyclique



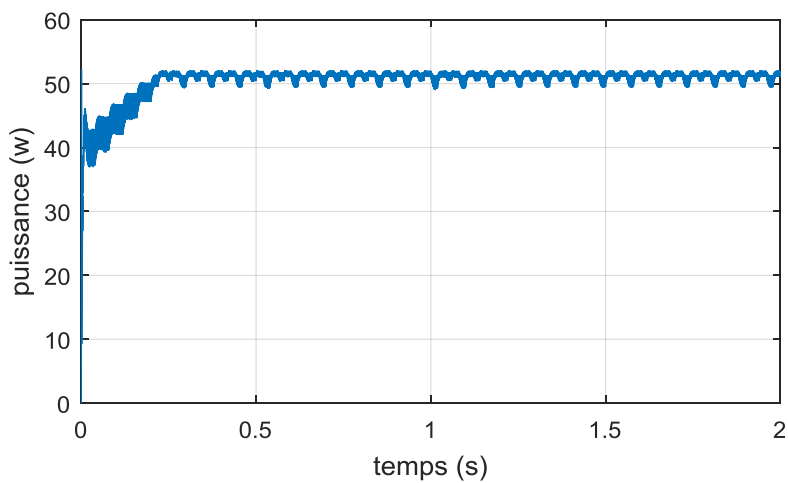
Figure(IV.8): Resultat de simulation de PV puissance.

IV.4.2. Algorithme INC :

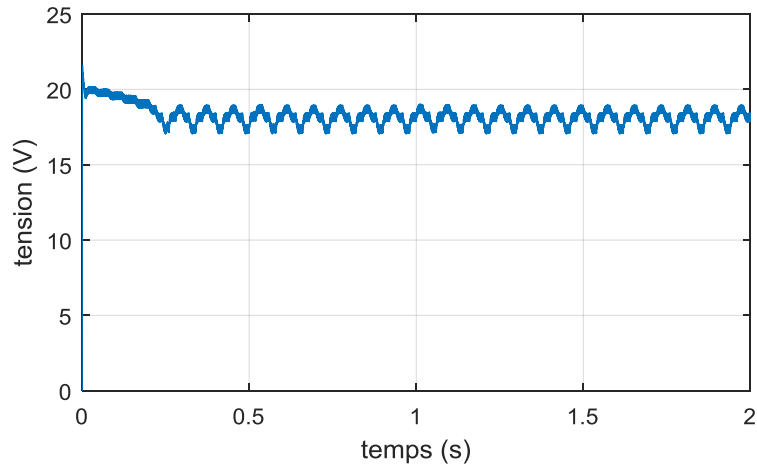
a) stable radiation (1000 w/ m²):



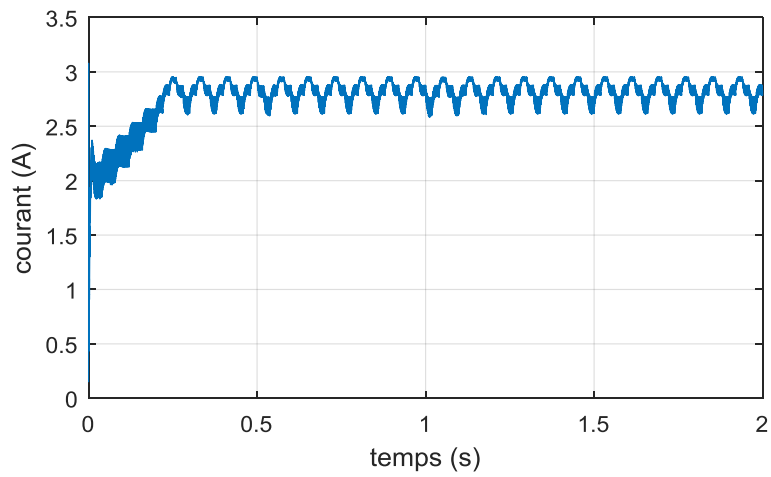
Figure(IV.9): Changement de rapport cyclique



Figure(IV.10): Resultat de simulation de PV puissance.

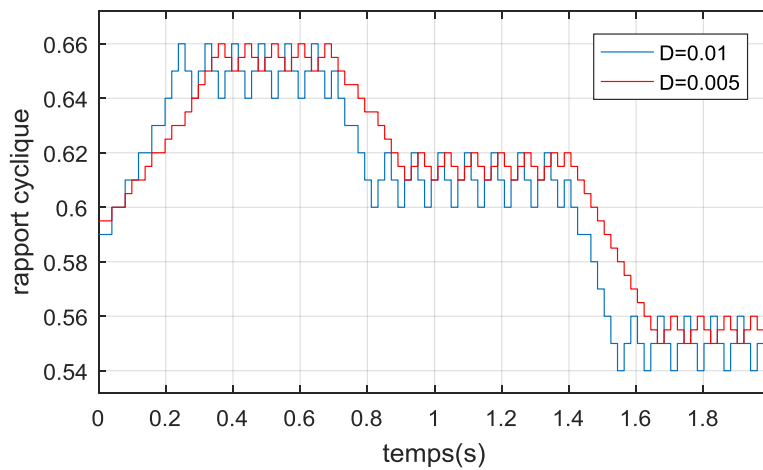


Figure(IV.11): Résultat de simulation de PV tension.

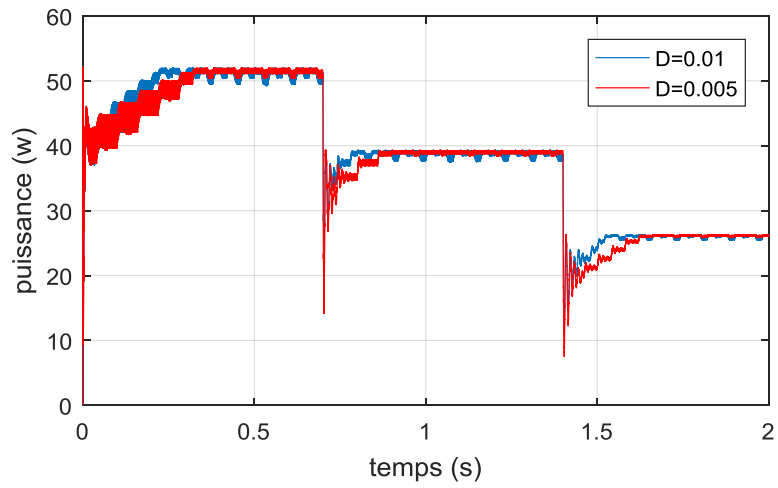


Figure(IV.12): Résultat de simulation de PV courant

b) variable radiation (1000 – 750 – 500 w/ m²):

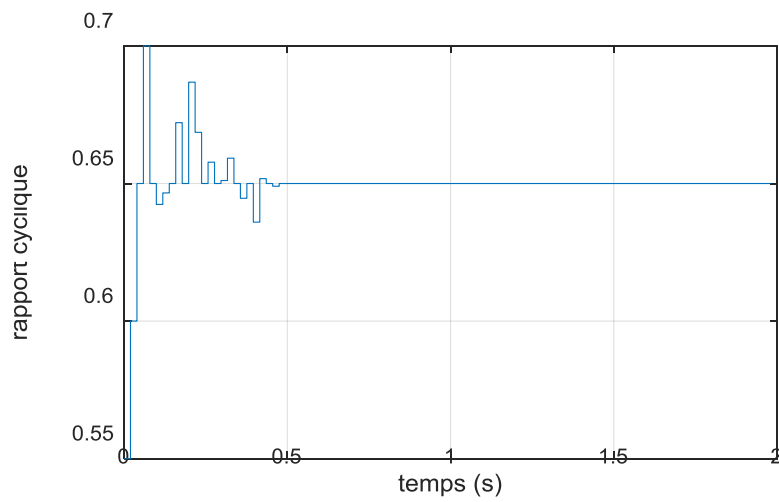


Figure(IV.13): Changement de rapport cyclique

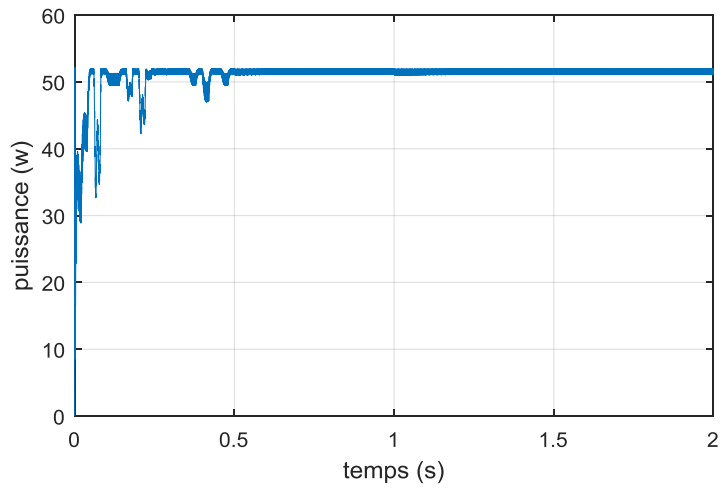


Figure(IV.14): Resultat de simulation de PV puissance.

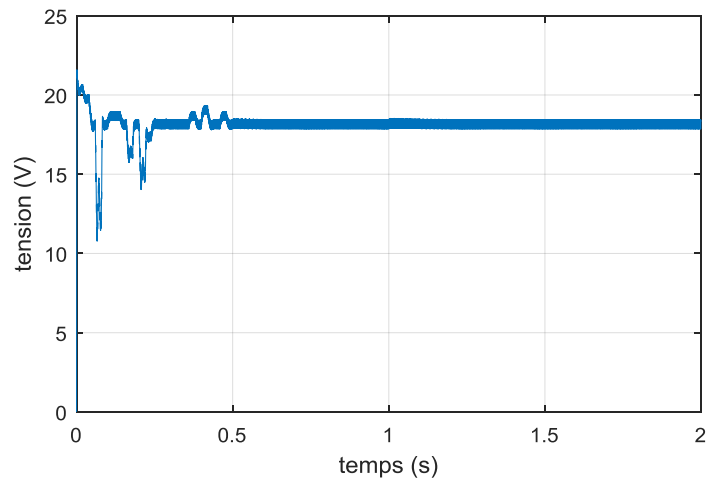
IV.4.3. Algorithme PSO :



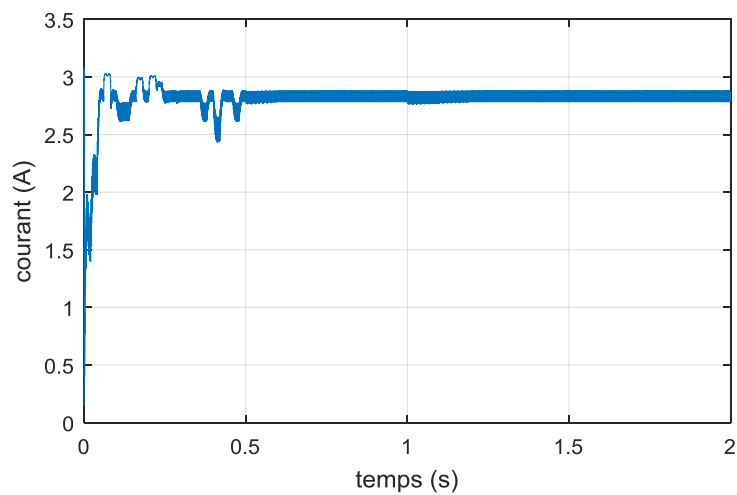
Figure(IV.15): Changement de rapport cyclique



Figure(IV.16): Resultat de simulation de PV puissance.

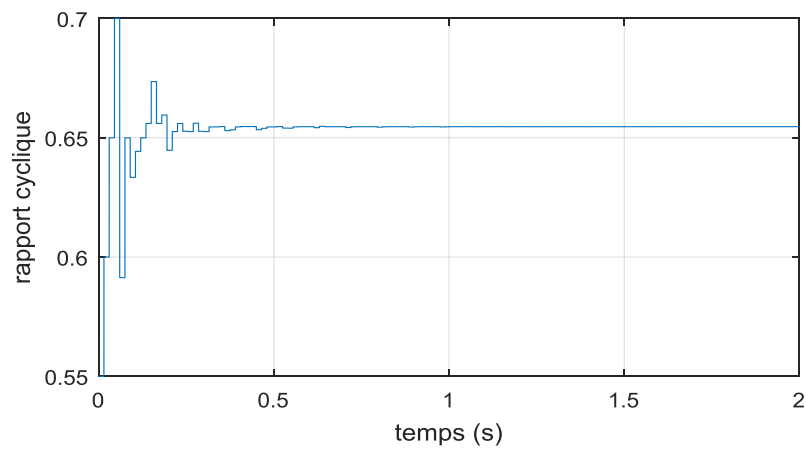


Figure(IV.17): Resultat de simulation de PV tension.

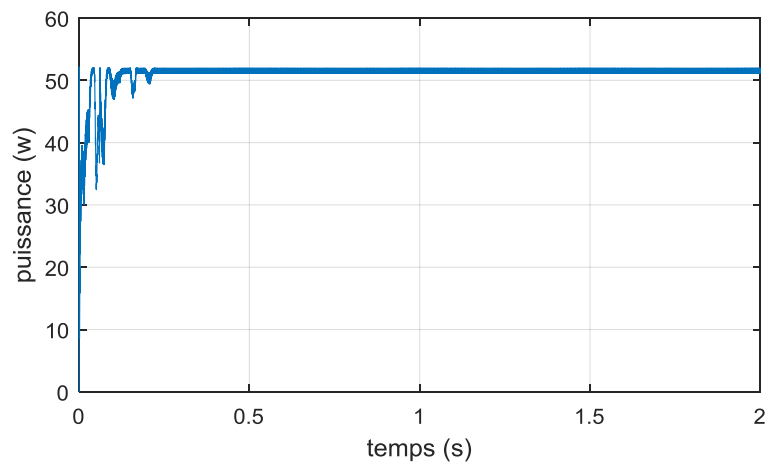


Figure(IV.18): Resultat de simulation de PV courant

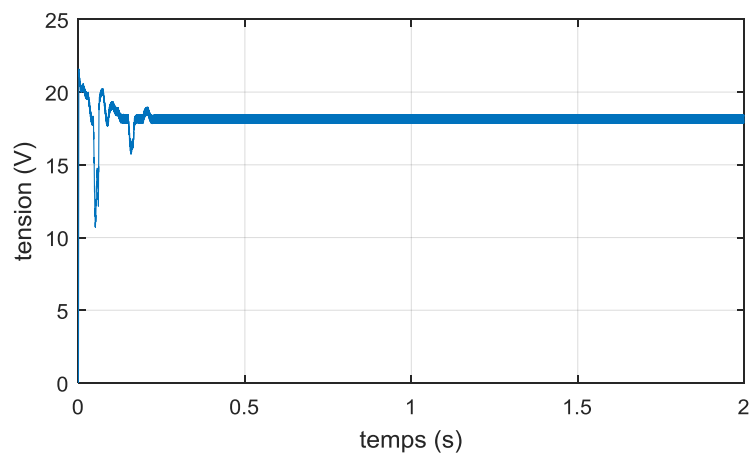
IV.4.4. Algorithme de coucou search:



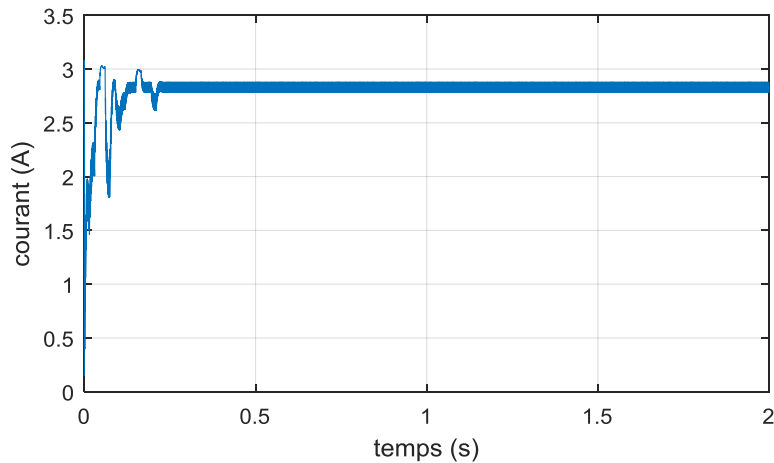
Figure(IV.19): Changement de rapport cyclique



Figure(IV. 20): Résultat de simulation de PV puissance.



Figure(IV. 21): Résultat de simulation de PV tension.



Figure(IV.22): Résultat de simulation de PV courant

IV.5.Conclusion:

Ce chapitre est pour l'installation et la simulation sous matlab/simulink du système PV, nous avons contrôlé le système par différents types d'algorithmes MPPT, on peut conclure qu'en utilisant les algorithmes MPPT proposés, le panneau PV peut fournir la puissance maximale comme indiqué dans les résultats expérimentaux de PO, INC et CS et POS ont des résultats proches et bons, cependant, il a la capacité de réduire la tension perturbatrice lors de la reconnaissance du MPP. Cette procédure maintient directement une puissance de sortie plus stable par rapport au MPPT conventionnel où la puissance de sortie fluctue autour du MPP.

Selon la simulation, il peut être déduit à l'aide d'algorithmes professionnels, le panneau photovoltaïque peut économiser le maximum de puissance.

Conclusion générale

Conclusion générale

La demande mondiale d'énergie reste plus importante qu'auparavant et ne cesse d'augmenter, et les ressources énergétiques naturelles telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent constamment et remarquablement en raison de la grande expansion et du développement industriels de ces dernières années. pour couvrir les besoins énergétiques .

Pour cela, nous recherchons d'autres moyens et ressources pour produire de l'énergie qui puisse répondre à la demande, ou plutôt se rapprocher de la satisfaction de la demande. Parmi ces sources, l'énergie solaire photovoltaïque est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite, et surtout, elle est continue et non organisée .

Le travail présenté porte sur une analyse de modélisation et de simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par commande numérique (contrôleur MPPT) qui assure le maintien de la puissance maximale fournie par le générateur PV à partir de l'énergie solaire .

Dans un premier temps, nous avons fourni des informations générales sur les systèmes photovoltaïques, le principe de l'effet photovoltaïque et la cellule photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque et ses performances. Nous avons vu que l'effet de la température et du rayonnement sur les propriétés de (I-V), (P-V), et nous concluons que les performances du générateur se détériorent avec l'augmentation de la température, une diminution de l'intensité de l'éclairage .

Nous avons examiné pour la deuxième fois certains types de convertisseurs DC-DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques .

Ensuite, nous avons étudié les différentes manières de suivre le point de puissance maximale fourni par le générateur photovoltaïque et sa structure, et enfin les résultats obtenus ont montré que l'utilisation de la commande MPPT peut améliorer considérablement les performances des installations photovoltaïques .

Bibliographie

- [1] N. Achaïbou, « Introduction à l'Etude du Système de Stockage dans un Système Photovoltaïque », rev. Energ. Ren: Valorisation (1999) 1-6, 1999.
- [2] D.Boukhers, « optimisation d'un system d'énergie photovoltaïque application pompage », mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [3] H. Mounir et K. Allel , «Etude et simulation d'un étage MPPT pour un générateur photovoltaïque à base d'un kit Arduino », mémoire de magister, Université d'ADRAR , 2017.
- [4] N.Touil et S.ghenbazi, « Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque », mémoire de master, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 2015.
- [5] Attar, « Les énergies renouvelables » ancien PDG de Sonatrach et ancien Ministre des Ressources en Eau.
- [6] W.Bencasi, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », mémoire de master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2012.
- [7] A. BOURABI. « Élaboration et Caractérisation des Couches Minces CuInSe₂ par Électrodéposition ». Thèse de université MENTOURI – CONSTANTINE .2009.
- [8] Green, Martin A. Solar Cells; Operating Principles, Technology, and System Applications Prentice Hall Inc., 1982
- [9] F. Belkague, « Etude de la technique d'MPPT d'un système photovoltaïque », mémoire de master, Université Ziane Achour de Djelfa, 2017.
- [10] http://www.louis-armandparis.fr/elec/claroline/document/goto/?url=%2FTP_PROTEUS%2F1_Cours_ISIS.do&cidReq=2S&dd838bc1453abef7bd5b584c95f0e97c=ixxakljbxiwsg.
- [11] F. Hananou et A. Rouabah, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque », mémoire de master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2014.
- [12] S. Saber et M. Salah Eddine et N. Idris , « Simulation and Realization of MPPT methods in photovoltaic system », mémoire de master, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 2021

-
- [13] M. S Fateh, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », mémoire de master, Université Ferhat Abbas – Setif, 2011.
- [14] S. Ghandour, « Conception de convertisseurs DC/DC à base de MEMS. Micro et nanotechnologies/Micro électronique », these de doctorat, Université de Grenoble, 2011.
- [15] Babaei E, Esmaeel M, Mahmoodieh S. Electrical Power and Energy Systems Systematical method of designing the elements of the Cuk converter. Int J Electr Power Energy Syst 2014;55:351–61. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.09.024>.
- [16] Enrique JM, Dura E. Theoretical assessment of the maximum power point tracking efficiency of photovoltaic facilities with different converter topologies 2007;81:31–8. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.06.006>
- [17] Rashid MH. POWER ELECTRONICS. Academic Press Series in Engineering; 2001.
- [18] Mazouz N, Midoun A. Electrical Power and Energy Systems Control of a DC / DC converter by fuzzy controller for a solar pumping system. Int J Electr Power Energy Syst 2011;33:1623–30. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2011.06.016>.
- [19] Nedjma Aouchiche , Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02902953>
- [20] Harrag A, Messalti S. Adaptive GA-based reconfiguration of photovoltaic array combating partial shading conditions. Neural Comput Appl 2016. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2757-y>
- [21] S.Ramirez, H.silva, Control Design Techniques in power Electronics devices, Springer, 2006
- [22] M.N.Mchalikh et CH.Hmada, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau », Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla 2013
- [23] H. Knopf, « Analysis, Simulation and Maximum of Evaluation Power Point Tracking (MPPT) Methods for a Solar Powered Vehicle », Master of Science in Electrical and Computer Engineering, Portland State University, 1999.
- [24] BABACI Hanane et BENKHEDDA Issaad " une etude comparative entre les differents MPPT's photovoltaïques " 2018
- [25] DJELLAL LEILA IMEMNE et DIB YASMINA "Etude comparative de deux commandes MPPT appliquées à un Système Photovoltaïque"

-
- [26] A.S. Kislovski, "Dynamic behaviour of a constant-frequency buck power cell in a photovoltaic battery charger with a maximum power tracker", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1990. APEC '90, Conference Proceedings 1990, Fifth Annual, pp. 212 - 220, 11-16 March 1990.
- [27] Babaei E, Esmael M, Mahmoodieh S." Electrical Power and Energy Systems Systematical method of designing the elements of the Cuk converter". Int J Electr Power Energy Syst .2013.
- [28] Rashid MH. POWER ELECTRONICS. Academic Press Series in Engineering; 2001
- [29] BELKAID ABDELHAKIM "Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome "DOCTORAT EN SCIENCES UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF 1 , 2015
- [30]M. AYAT Yahia "Système photovoltaïque alimentant un filtre actif de puissance connecté au réseau" 2015
- [31] Mme.OBEIDI , "Commande des hacheurs MPPT par logique floue", Ecole Nationale Polytechnique Mémoire de Magister, 2006.
- [32]YAMINA AZZOUG "COMMANDE DE LA CHARGE D'UNE BATTERIE DANS UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE"
- [33] N. Mohan, T. M. Undeland, and W: P. Robbins, "Power Electronics, Applications and Design", 2nd ed. New York: Wiley, 1995.
- [34] Site web: www.lei.ucl.be.
- [35] Mohammad A. S. Masoum, Hooman Dehbonei, and Ewald F. Fuchs, Fellow: "Theoretical and Experimental Analyses of Photovoltaic Systems with Voltage- and Current-Based Maximum Power-Point Tracking" IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, 2002.
- [36] D. Shmilovitz: "On the Control of Photovoltaic Maximum Power Point Tracker Via Output Parameters" IEE Proc.-Electr. Power Appl., 2005
- [37] Mirjana Milosevic: "On the Control of Distributed Generation in Power System" thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2007.
- [38] Cabal, C. (2008). Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque(Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier).

-
- [39] A. B. Learreta, C. Alonso, and C. Cabal, “Réalisation de commandes mppt numériques,” Report. Tarragona, Spain : Rovira i Virgili University, p. 3, 2006.
- [40] C. Cabal, “Optimisation énergétique de l’étage d’adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque,” Ph.D. dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2008.
- [41] K. Kassmi, M. Hamdaoui, and F. Olivié, “Conception et modélisation d’un système photovoltaïque adapté par une commande mppt analogique,” *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 10, no. 4, pp. 451–462, 2007.
- [42] T. Mrabti, M. El Ouariachi, K. Kassmi, F. Olivié, and F. Bagui, “Conception, modélisation et réalisation d’un système photovoltaïque de moyenne puissance,” *Journal of Renewable Energies*, vol. 11, no. 4, pp. 567–575, 2008.
- [43] T Nacer Eddine , G Slimane " Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque " Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued ,2015
- [44] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, «Etude et réalisation d’un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné a une installation photovoltaïque », Mémoire d’ingénieur, université de Ouargla, Algérie, 2005.
- [45] Angel Cid Pastor, “Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques”, thèse de Doctorat : Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse 2008.
- [46] M. Boukli-Hacene Omar « conception et réalisation d’une génération photovoltaïque muni d’un convertisseur mppt pour une meilleure gestion énergétique » magister en automatique productique informatique 2010/2011.
- [47] Z. Bendjellouli ‘ Contribution a la modélisation d'une cellule solaire’, Mémoire de magister université de bachar, 2009.
- [48] O. BELABBASSI, M. REZMA ‘Contribution a l’étude et dimensionnement d’un système hybride photovoltaïque / réseau sone gaz’ mémoire d'ingénieur d'état université de Laghouat, 2011.
- [49] MLLE BENHADDOUCHE NESRINE FATIMA ‘La commande d’un système photovoltaïque d’un satellite’ Thèse de master université tlemcen 2013/2014.

-
- [50] C. CABAL, « Optimisation Energétique de l'Etage d'Adaptation Electronique Dédie à la Conversion Photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, France, 2008
- [51] S. A. TADJER, « Etude d'un Système de Compensation d'Harmonique En Utilisant un Générateur Photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université Mouhamed Bougara- Boumerdes, Algérie, 2008.
- [52] N. Altin and S. Ozdemir, "Three-phase three-level grid interactive inverter with fuzzy logic based maximum power point tracking controller," *Energy Conversion and Management*, vol. 69, pp. 17–26, 2013.
- [53] K. Tsang and W. L. Chan, "Model based rapid maximum power point tracking for photovoltaic systems," *Energy conversion and management*, vol. 70, pp. 83–89, 2013.
- [54] C.Sakthigokulrajan and K.Ravi "Retracted: Combined role of derived array configurations and mpso based mppt in improving the energy yield under partial shading conditions," 2017.
- [55] J. Shi, W. Zhang, Y. Zhang, F. Xue, and T. Yang, "Mppt for pv systems based on a dormant pso algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 123, pp. 100–107, 2015.
- [56] S. Lyden and M. Haque, "Maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems : A comprehensive review and comparative analysis," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 52, pp. 1504–1518, 2015.
- [57] A. Gherboudj, "Méthodes de résolution de problèmes difficiles académiques," Université de Constantine2, 2013.
- [58] A. Cid Pastor, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques" dissertation, Toulouse, INSA, 2006.