

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

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Commandes électriques

THÈME

**Application du contrôle par mode glissant du convertisseur Buck-Boost
intégré dans un système photovoltaïque**

Préparés par :

Otmane walid nacer

Devant le Jury :

| Nom et prénom | Grade | Qualité |
|-------------------------|--------------|-------------------|
| BELFEDAL Cheikh | Pr | Président |
| OGAB Chahrazed | MCB | Examineur |
| KOUADRIA Mohamed | MCB | Examineur |
| MIHOUB Youcef | MCA | Encadrants |
| HASSAINE Said | Pr | |

PROMOTION 2023 /2024

REMERCIEMENTS

Louange à Allah le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience pour accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à remercier nos encadrants Messieurs MIHOUB Youcef et HASSAINE Said pour leurs précieux conseils et leur aide durant toute la période du travail.

Nos vifs remerciements s'adressent également aux membres du jury : Monsieur BELFEDAL Cheikh pour avoir accepté de présider la soutenance de notre travail ainsi que Messieurs OGAB Chahrazed et KOUADRIA Mohamed pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous remercions tous les enseignants du département de Génie Electrique d'avoir contribué à notre formation.

*Nous remercions tous les membres du Laboratoire GEGI
Nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loin pour l'élaboration de ce travail.*

| | |
|----------------------------|---|
| Introduction générale..... | 1 |
|----------------------------|---|

Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes PV.

| | |
|---|---|
| I.1 Introduction | 3 |
| I.2 Historique | 3 |
| I.3 Rayonnement solaire..... | 4 |
| I.4 Potentiel solaire en Algérie..... | 5 |
| I.5 Effet photovoltaïque..... | 5 |
| I.6 Cellule photovoltaïque | 6 |
| I.6.1 Définition | 6 |
| I.6.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque | 6 |
| I.6.3 Différents types des cellules photovoltaïques..... | 7 |
| I.6.3.1 Cellules monocristallines | 7 |
| I.6.3.2 Cellules Poly-cristallines..... | 7 |
| I.6.3.3 Cellules amorphes | 7 |
| I.7 Modules photovoltaïques | 8 |
| I.8 Générateur photovoltaïque..... | 9 |
| I.9 Conclusion | 9 |

Chapitre II : Modélisation du Système PV

| | |
|--|----|
| II.1 Introduction | 10 |
| II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque..... | 10 |
| II.2.1 Modèle électrique idéal à une diode | 10 |
| II.2.2 Modèle électrique réel à deux diodes | 11 |
| II.2.3 Modèle électrique réel à une diode..... | 13 |
| II.3 Courant de court-circuit..... | 14 |
| II.4 Tension de circuit ouvert V_{co} | 14 |
| II.5 Facteur de forme FF | 15 |
| II.6 Rendement énergétique | 15 |
| II.7 Courbes caractéristiques d'une cellule photovoltaïque..... | 16 |
| II.8 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$ | 18 |
| II.8.1 Influence de l'éclairement | 18 |
| II.8.2 Influence de température | 19 |
| II.9 Modélisation du générateur photovoltaïque..... | 20 |
| II.9.1 Association de Ns cellules en série | 20 |
| II.9.2 Association de Ns cellules en parallèle..... | 21 |
| II.9.3 Association série-parallèle des cellules | 21 |
| II.10 Convertisseur DC/DC (hacheur)..... | 22 |

| | | |
|---|---|-----------|
| II.10.1 | Convertisseur élévateur (Boost) | 22 |
| II.10.2 | Principe de fonctionnement d'un hacheur boost | 22 |
| II.11 | Convertisseur Buck-Boost | 26 |
| II.11.1 | Principe de fonctionnement d'un Convertisseur Buck-Boost | 28 |
| II.11.2 | Modèle moyen du convertisseur..... | 29 |
| II.12 | Dimensionnement de l'inductance | 32 |
| II.13 | Dimensionnement de capacité | 32 |
| II.14 | Conclusion | 32 |
| III.1 | Introduction | 33 |
| III.2 | Poursuite du point de puissance maximale (PPPM ou MPPT) | 33 |
| III.2.1 | Principe de la commande MPPT | 34 |
| III.2.2 | Étapes du Fonctionnement de la Commande MPPT | 34 |
| III.3 | Les techniques de recherche du point de puissance maximale | 35 |
| III.3.1 | La méthode Perturbation et Observation (P&O) | 35 |
| III.3.2 | Commande par la logique floue | 36 |
| III.3.3 | Commande par mode glissant | 37 |
| III.3.3.1 | Principe de la commande par mode de glissement (SMC) | 38 |
| III.3.3.2 | Surface de glissement..... | 38 |
| III.3.3.3 | Condition de stabilité et convergence | 39 |
| III.3.3.4 | Méthodes de synthèse classiques de la commande par mode de glissement | 39 |
| III.3.3.5 | Commande MPPT d'un système PV par mode glissant | 40 |
| III.4 | Commande mode glissant double intégrale (DISMC) | 40 |
| III.5 | Conclusion | 43 |
| Chapitre IV : Résultats de simulation. | | |
| IV.1 | Introduction | 44 |
| IV.2 | Analyse des résultats : | 45 |
| IV.2.1 | MPPT avec irradiation fixes | 45 |
| IV.2.2 | MPPT avec irradiation variable | 52 |
| IV.3 | Conclusion | 53 |
| Annexes | | 58 |
| Références Bibliographiques | | 55 |

| | |
|--|----|
| Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes PV. | |
| Figure I 1 Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil [4]. | 4 |
| Figure I 2 Principe de la conversion photovoltaïque [6]. | 7 |
| Figure I 3 Les différents types de cellules photovoltaïques. | 8 |
| Figure I 4 Externe d'un module photovoltaïque [8]. | 9 |
| Chapitre II : Modélisation du Système PV | |
| Figure II 1 Modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale à une diode. | 10 |
| Figure II 2 Modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle à deux diodes. | 12 |
| Figure II 3 Modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle à une diode [10]. | 13 |
| Figure II 4 Constitution de la caractéristique d'une cellule photovoltaïque [12]. | 16 |
| Figure II 5 Caractéristique Courant-Tension ($I - V$) d'une cellule photovoltaïque [12]. | 16 |
| Figure II 6 Caractéristique Puissance-Tension ($P - V$) d'une cellule photovoltaïque [12]. | 17 |
| Figure II 7 Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ [14]. | 18 |
| Figure II 8 Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$ [15]. | 18 |
| Figure II 9 Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ [14]. | 19 |
| Figure II 10 Influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ [15]. | 19 |
| Figure II 11 Configuration de connexion des cellules photovoltaïques. | 20 |
| Figure II 12 Association parallèle des cellules. | 20 |
| Figure II 13 Association parallèle des cellules | 21 |
| Figure II 14 Association série-parallèle | 21 |
| Figure II 15 Schéma de base d'un convertisseur Boost. | 22 |
| Figure II 16 Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé. | 23 |
| Figure II 17 Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert. | 24 |
| Figure II 18 Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost [18]. | 26 |
| Figure II 19 Structure du convertisseur Buck-Boost [19]. | 27 |
| Chapitre III Commande MPPT d'un système photovoltaïque | |
| Figure III 1 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT [22]. | 34 |
| Figure III 2 Organigramme de l'algorithme P&O [29]. | 35 |
| Figure III 3 Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O [30]. | 36 |
| Figure III 4 Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue [31]. | 37 |
| Figure III 5 Mode de glissement [32]. | 37 |
| Chapitre IV : Résultats de simulation. | |

Liste des figures et des tableaux

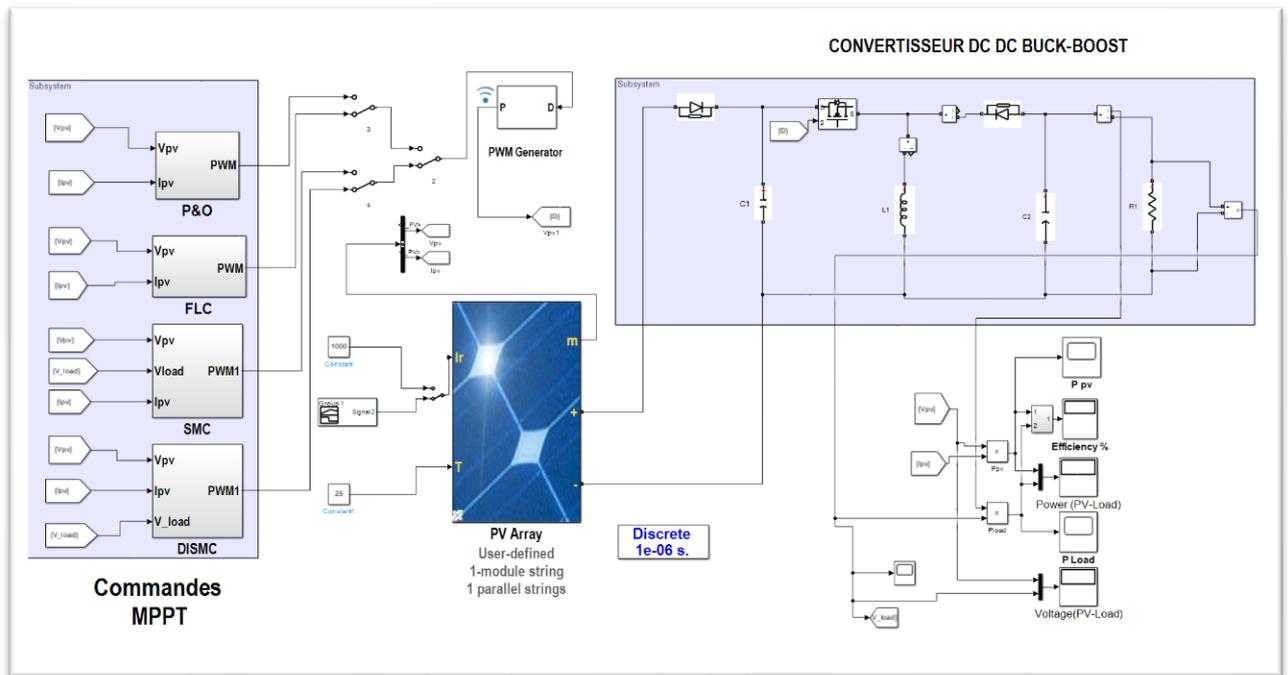


Figure IV. 1 Schéma bloc Simulink du système global 44
 Figure IV. 2 Tension de sortie et puissance de sortie pour une MPPT P&O avec une irradiation fixe 47
 Figure IV. 3 Tension de sortie et puissance de sortie pour une MPPT floue avec une irradiation fixe 48
 Figure IV. 4 Tension de sortie et puissance de sortie pour une MPPT SMC avec une irradiation fixe 49
 Figure IV. 5 Tension de sortie et puissance de sortie pour une MPPT DISMC avec une irradiation fixe . 50
 Figure IV. 6 Tension de sortie et puissance de sortie pour les quatre MPPT proposées avec une irradiation fixe..... 51
 Figure IV. 7 Tension de sortie et puissance de sortie pour les quatre MPPT proposées avec une irradiation variable..... 52

Listes des tableaux

Tableau I.1 Potentiel solaire en Algérie..... 5
 Tableau I.2 Performances des différentes filières silicium..... 8
 Tableau III 1 Principe de l'algorithme P&O..... 36
 Tableau IV 1 Comparaison des puissances de sortie et des tension avec irradiation fixe..... 53

Liste des symboles

| Symbole | Signification | Unité |
|-----------|--|---------------------|
| G_{ref} | L'ensoleillement de référence en condition nominal (1000). | [W/m ²] |
| I_D | Courant de diode. | [A] |
| I_L | Le courant aux bornes d'inductance du « Buck Boost ». | [A] |
| I_{cc} | Le courant de court-circuit. | [A] |
| I_{mpp} | Le courant de point maximal. | [A] |
| I_{ph} | Courant photonique. | [A] |
| I_{pv} | Le courant délivrée par le module PV. | [A] |
| I_s | Le courant de sortie du «Buck Boost». | [A] |
| I_{sat} | Courant de saturation. | [A] |
| K_i | Coefficient de la température en court-circuit. | [A/°C] |
| K_v | Coefficient de la température en circuit ouvert. | [V/°C] |
| P_{max} | La puissance maximal | [W] |
| R_s | La résistance série de la cellule PV. | [Ω] |
| R_{sh} | La résistance shunt/parallèle de la cellule PV. | [Ω] |
| T_{ref} | La température de référence en condition nominal. | [K] |
| V_{co} | La tension en circuit ouvert. | [V] |
| V_e | La tension d'entrée du « Buck Boost ». | [V] |
| V_{mpp} | La tension de point maximal. | [V] |
| V_{pv} | La tension délivrée par le module PV. | [V] |
| V_s | La tension de sortie du «Buck Boost ». | [V] |
| V_t | La tension thermique. | [V] |
| f | Fréquence de coupure de convertisseur. | [Hz] |
| i_e | Le courant d'entrée du «Buck Boost». | [A] |

Liste des symboles

| Symbole | Signification | Unité |
|----------------|---|---------------------|
| ΔI | L'ondulation de courant. | [A] |
| ΔT | Déférence entre la température de cellule et température nominal. | [K] |
| ΔV | L'ondulation de la tension de sortie. | [V] |
| G | L'ensoleillement du module PV. | [W/m ²] |
| K | La constante Boltzmann ($1.381 \cdot 10^{-23}$) | Joule/Kelvin |
| T | La température du module PV. | [K] |
| α | Le facteur d'idéalité de diode. | --- |
| q | La charge d'électron ($1.602 \cdot 10^{-19} c$). | [C] |
| D | Rapport cyclique de convertisseur [0 ; 1]. | --- |
| η | Le rendement énergétique. | --- |
| λ | La longueur d'onde. | [m] |

| Acronyme | Signification |
|-----------------|---|
| DC | Courant Continu |
| FF | Facteur de Forme |
| FLC | Fuzzy Logic Controller ou Contrôleur à base de Logique Floue. |
| GPV | Générateur Photovoltaïque |
| SMC | Sliding mode control |
| PWM | Modulation de Largeur d'Impulsion |
| MPPT | Maximum Power Point Tracking ou Poursuite du Point de Puissance Maximale. |
| P&O | Perturber et Observer |
| PV | Photovoltaïque |
| DISMC | Double intégrale Sliding mode control |

Introduction générale

Le monde dépend actuellement de la consommation en énergies fossiles, ce qui entraîne de nombreux problèmes pour l'environnement et l'individu en particulier la pollution atmosphérique et réchauffement climatique. Les énergies renouvelables sont la solution alternative appelée aussi l'énergie verte qui respecte l'environnement. On compte par ce type d'énergies particulièrement l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne.

L'énergie photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable qui convertit la lumière du soleil en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques. Ces cellules, souvent regroupées en panneaux solaires, capturent les photons de la lumière solaire et libèrent des électrons, générant ainsi un courant électrique.

Le problème de cette énergie est relié généralement à sa dépendance des facteurs climatiques de la région, la température et de l'ensoleillement. Cela nous oblige à développer un système de contrôle précis qui répond aux changements des facteurs externes. (température et l'ensoleillement). L'objectif de cette étude est de développer des stratégies de commande MPPT (Point de puissance maximum.), en s'appuyant sur la théorie non linéaire.

Le commande par mode glissant est une commande non linéaire. Elle est caractérisée par sa robustesse vis-à-vis des incertitudes paramétriques du modèle et des perturbations extérieures. Et se prête à la commande du convertisseur DC-DC utilisé dans notre système.

Pour se faire, le plan du manuscrit est organisé de la manière suivante :

Dans le premier chapitre, nous passons en revue de l'identité de l'énergie solaire, son principe de fonctionnement et de ses composants constitutifs.

Dans le deuxième chapitre, la partie électronique de puissance associée au générateurs PV est décrite. Il s'agit des convertisseurs DC-DC, à savoir le Boost et le convertisseur Buck Boost. L'accent est mis sur le convertisseur Buck Boost. Par la suite, la modélisation des générateurs photovoltaïques ainsi que le convertisseur Buck boost est effectuée.

Dans le chapitre trois, quant à lui, la commande MPPT sous différentes structures. les techniques les plus couramment utilisées à savoir la méthode de perturbation et observation (P&O), la méthode basée sur la logique floue FLC et en particulier la commande par mode glissant

SMC et le mode glissant par double intégrale DISMC.. La comparaison entre les performances des différentes méthodes, classiques et avancées, est réalisée.

Dans le quatrième chapitre, le lecteur trouvera les résultats de simulation obtenus sous l'environnement Matlab/Simulink.

Le mémoire est clôturé par une conclusion générale.

Chapitre I:

Etat de l'art sur les systèmes PV

I.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque, souvent désignée par l'acronyme PV, représente une révolution silencieuse mais déterminante dans le domaine des énergies renouvelables. Exploitant la source d'énergie la plus abondante et la plus accessible de notre planète – le soleil – les technologies photovoltaïques transforment directement la lumière solaire en électricité grâce à des matériaux semi-conducteurs. Cette conversion offre une alternative durable et propre aux combustibles fossiles traditionnels, répondant ainsi aux défis environnementaux et énergétiques du XXI^e siècle.

Ce chapitre explore les fondements scientifiques et techniques de l'énergie photovoltaïque, en commençant par l'historique de l'énergie photovoltaïque et le rayonnement solaire de façon générale et on passe en revue des Potentiels solaires en Algérie. La présentation des principes de la conversion photovoltaïque avec l'effet photovoltaïque est effectuée

I.2 Historique

Les systèmes photovoltaïques sont en usage depuis 45 ans. Leur utilisation a débuté dans le cadre du programme spatial pour assurer la transmission radio des satellites. Par la suite, ils ont été déployés pour des applications telles que les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans de nombreux pays, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil[1].

Les dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque sont mentionnées ci-dessous[2]

- 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. Ces chercheurs ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs.
- 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 4000 km en Australie.

I.3 Rayonnement solaire

La lumière du soleil est composée de particules appelées photons, qui ont une gamme de longueurs d'onde allant de l'ultraviolet à l'infrarouge.

Pour décrire le spectre solaire en fonction de l'énergie émise, on se réfère à la notion d'AM pour "Air Mass". En dehors de l'atmosphère terrestre (AM0).

L'énergie transportée par le rayonnement solaire sur la distance entre le soleil et la terre est d'environ 1350 W/m^2 (voir Figure I.1). En passant à travers l'atmosphère, ce rayonnement subit une réduction et une altération de son spectre en raison des phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz. Au niveau du sol, à un angle de 90° , cette valeur est d'environ 1000 W/m^2 . [3].

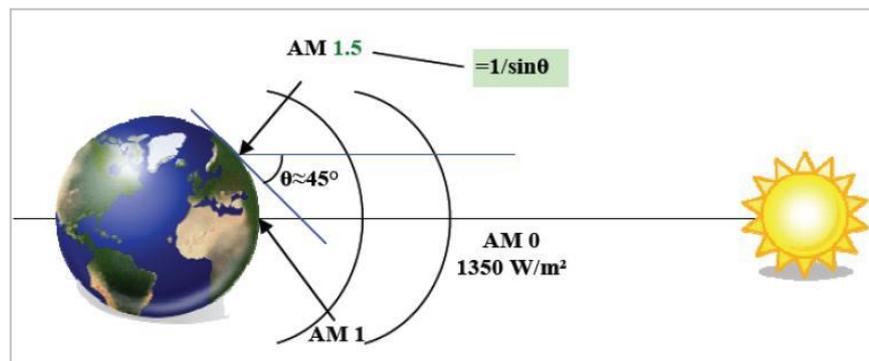


Figure I 1 Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil [4].

Du point de vue énergétique, le rayonnement électromagnétique solaire est constitué de photons de longueur d'onde λ transportant une énergie donnée par la relation :

$$E = h \frac{c}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

Avec

E : Énergie en J ;

h : constante de Plank ($h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$) ;

c : vitesse de la lumière ($c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

λ : longueur d'onde souvent exprimée en micromètre.

I.4 Potentiel solaire en Algérie

En raison de sa position géographique, l'Algérie bénéficie d'un ensoleillement parmi les plus élevés au monde. Sur la majeure partie de son territoire, l'exposition au soleil dépasse 2000 heures par an, pouvant même atteindre jusqu'à 3900 heures dans les régions des hauts plateaux et du Sahara. Chaque jour, une surface horizontale d'1m² reçoit environ 5 kWh d'énergie solaire, ce qui équivaut à près de 1700 kWh/m²/an dans le nord du pays et à 2263 kWh/m²/an dans le sud. Dans le Sahara, ce potentiel pourrait jouer un rôle crucial dans le développement durable s'il est exploité de manière économiquement viable. Le tableau ci-dessous présente le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie[5].

Tableau I.4.1 Potentiel solaire en Algérie.

| Régions | Régions côtières | Hauts plateaux | Sahara |
|---|------------------|----------------|--------|
| Superficie | 4% | 10% | 86% |
| Durée moyenne de l'ensoleillement (Heure/An) | 2650 | 3000 | 3500 |
| Énergie moyenne reçue (KWh/m ² /an) | 1700 | 1900 | 2650 |

I.5 Effet photovoltaïque

Il s'agit de convertir l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique à l'aide d'un capteur composé de matériaux sensibles à la lumière, capables de convertir l'énergie des photons en tension électrique, généralement de l'ordre de 0,4 à 0,7 volts. Ce capteur est représenté à une échelle élémentaire par une cellule photovoltaïque (PV). L'effet photovoltaïque a été observé pour la première fois en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel. Cependant, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la société Bell, aux États-Unis, ont réussi à fabriquer la première photopile, l'élément de base de la conversion photovoltaïque [1].

I.6 Cellule photovoltaïque

I.6.1 Définition

Le terme "photovoltaïque" est composé de "photo", qui fait référence à la lumière, et de "voltaïque", en hommage à Alessandro Volta, celui qui a découvert la pile électrique. Une cellule photovoltaïque est essentiellement une photodiode conçue pour générer un courant électrique en réponse à l'exposition à la lumière. Cet effet photovoltaïque, utilisé dans les cellules solaires, permet de convertir directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité. Ce processus implique la production et le transport de charges électriques positives et négatives à travers un matériau semi-conducteur sous l'impact de la lumière.

I.6.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les cellules solaires permettent de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière

Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la Zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue.

Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure I.2.

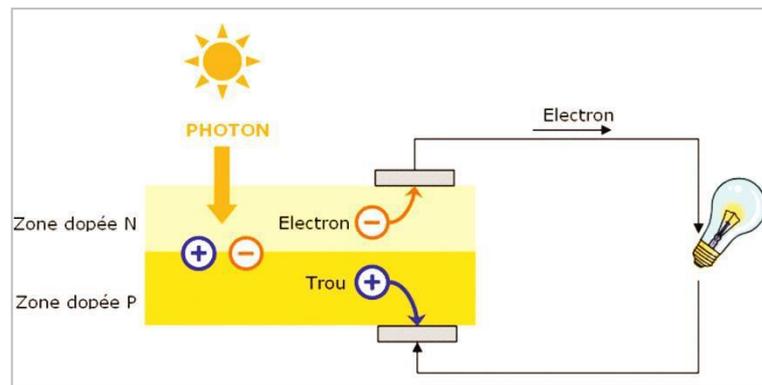


Figure I 2 Principe de la conversion photovoltaïque [6].

I.6.3 Différents types des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules photovoltaïques, les plus répandues sont constituées de semi-conducteur, principalement à base de Silicium. On y trouve trois principaux types de cellules

I.6.3.1 Cellules monocristallines

Ces cellules sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de Silicium cristallisé en un seul cristal. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie, plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium poly cristallin. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Les cellules sont rondes ou presque carrées, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 12 à 16%, mais la méthode de production est laborieuse[7].

I.6.3.2 Cellules Poly-cristallines

Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vue de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes). Elles ont un rendement de 11 à 14%, mais leur coût de production est moins élevé que celui des cellules monocristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées.

L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication[7].

I.6.3.3 Cellules amorphes

Elles ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 7% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium

qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies poly cristallines ou monocristallines. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première[7].

Le tableau I.2 montre les performances des différentes filières silicium présentent actuellement sur le marché[4].

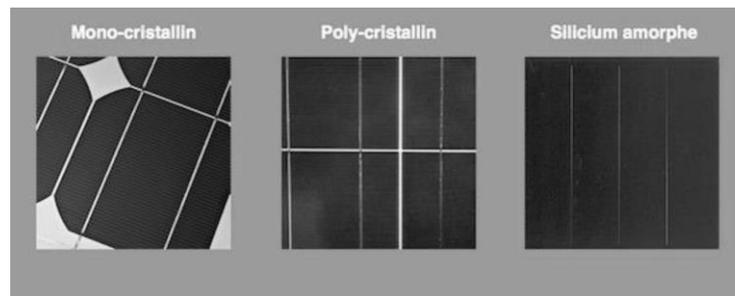


Figure I 3 Les différents types de cellules photovoltaïques.

Tableau I.6.1 Performances des différentes filières silicium.

| Technologies | Rendement typique | Influence de la température | Taux de dégradation |
|------------------------|--------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| Monocristallin | 12 à 16 % | -0.442% par °C | -0.38% par an |
| Poly-cristallin | 11 à 14 % | -0.416% par °C | -0.35% par an |
| Amorphe | 6 à 7 % | -0.175% par °C | -1.15% par an |

I.7 Modules photovoltaïques

Le module photovoltaïque est un assemblage de cellules élémentaires connectées les unes aux autres pour former des chaînes directement utilisables. Il assure une double fonction :

- La première fonction est l'association des cellules pour l'obtention d'une caractéristique courant-tension intéressante pour l'application. En effet, les modules peuvent être connectés soit en série pour augmenter leur tension d'utilisation et en parallèle pour augmenter leur courant.
- La deuxième fonction est la protection contre des agents atmosphériques extérieurs afin d'augmenter leurs durées de vie. En effet, les chaînes de cellules sont encapsulées dans un plastique E.V.A. (Ethylène Vinyle Acétate) pour les protéger des agressions extérieures (rayons U.V., humidité). L'ensemble est protégé sur la surface avant par un verre trempé à haute transmission et ayant une bonne résistance mécanique, et sur la face arrière par une feuille de

Tedlar ou de polyéthylène. Le module est placé dans un cadre métallique rigide qui va lui donner une grande rigidité mécanique.

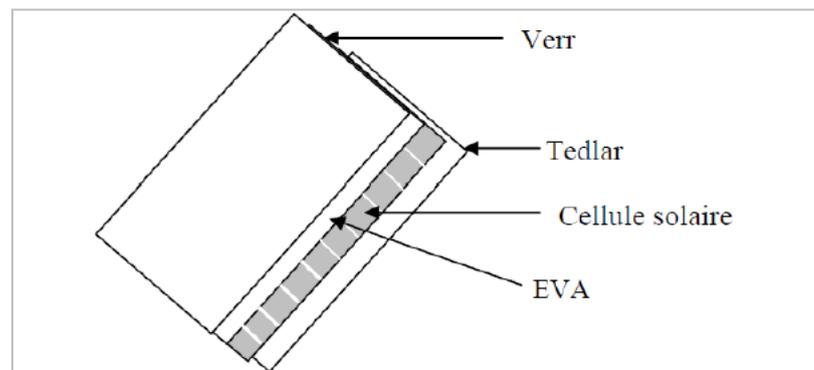


Figure I 4 Externe d'un module photovoltaïque [8].

I.8 Générateur photovoltaïque

La cellule PV fait à peu près 150 cm^2 , produit 2,3 Watt-crête (Wc) sous approximativement 0,5 V. Cette faible puissance est généralement insuffisante pour la majorité des applications PV domestiques ou industrielles. Afin de fournir au récepteur une tension et une puissance adéquate, plusieurs cellules PV doivent être connectées entre elles en série pour former ce qu'on appelle : "un module". Les modules peuvent être assemblés en série et/ou en parallèle pour former des panneaux (Générateur), eux-mêmes interconnectés pour former un champ PV.

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les aspects généraux des systèmes photovoltaïques en commençant par l'histoire de l'énergie photovoltaïque et en passant sur le rayonnement solaire et le potentiel solaire en Algérie pour arriver au l'effet photovoltaïque ainsi que le fonctionnement de la cellule photovoltaïque. Le module photovoltaïque et le générateur photovoltaïque constituent une partie de ce chapitre.

Chapitre II :

Modélisation du Système PV

II.1 Introduction

Généralement, les photocellules représentent des phénomènes qu'on peut représenter mathématiquement. Le sens de circulation de courant est représenté par des diodes et les pertes par des résistances. Sur cette base, il existe de nombreux modèles équivalents de cellule photovoltaïque qui seront traités dans ce chapitre.

Le modèle repose sur les caractéristiques de cellule de (I-V) l'intensité en fonction de tensions et (P-V) la puissance en fonction de tensions, l'effet des facteurs climatiques externes sur la cellule photovoltaïque (Température et éclairage solaire) et l'association des cellules photovoltaïques. Les modèles d'état des convertisseurs DC DC BOOST et BUCK BOOST feront l'objet de cette modélisation

II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Généralement, la simulation du comportement des modules photovoltaïque est basée sur la caractéristique $I - V$. Dans ce sens, plusieurs études ont été proposées utilisant différents modèles mathématiques. Cette section présente trois principaux modèles : le modèle idéal, le modèle réel à deux diodes et le modèle réel à une diode que nous allons utiliser.

II.2.1 Modèle électrique idéal à une diode

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, une cellule photovoltaïque est une diode de grandes dimensions, son illumination provoque la génération d'un photo-courant I_{ph} . En effet, une partie de ce courant est dissipée dans la jonction, ce qui conduit au modèle simplifié de la cellule photovoltaïque qui est équivalente à une source de courant shuntée avec une diode.

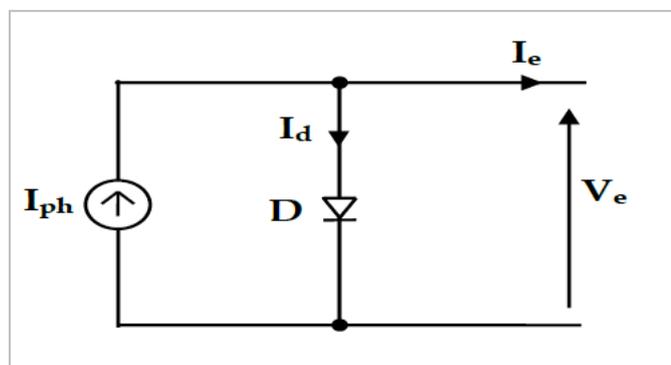


Figure II 1 Modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale à une diode.

Le courant de sortie I_e est obtenu à partir du circuit équivalent.

$$I_e = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.1})$$

$$I_d = I_{sat} \left(\exp\left(\frac{Ve}{nVT}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

$$V_T = \frac{KT}{q} \quad (\text{II.3})$$

Où :

- I_e : Courant fourni par la cellule.
- I_{ph} : Photo-courant, dépendant de l'intensité de l'irradiation.
- I_d : Courant qui traverse la diode.
- I_{sat} : Courant de saturation inverse de la diode d'une cellule, dépendant de la température.
- Ve : Tension aux bornes de la cellule.
- n : Facteur de non idéalité de la jonction compris entre 1 et 5 dans la pratique.
- VT : Tension thermique.
- K : Constante de Boltzmann $K=1.381 \times 10^{-23}$ J/K.
- T : Température effective de la cellule en kelvin.
- q : Charge d'électron $q=1.602 \times 10^{-19}$ C.

II.2.2 Modèle électrique réel à deux diodes

La représentation précédente de la cellule photovoltaïque est idéale, ce qui n'est pas le cas en réalité. Afin de prendre en compte les différents phénomènes physiques présents au niveau de la cellule photovoltaïque, le modèle électrique précédent est complété par deux résistances série (R_s) et parallèle (R_p) comme le montre la figure I.7. En effet, le modèle réel à deux diodes est constitué de deux diodes parallèles D_1 et D_2 ayant les courants de saturation respectifs I_{sat1} et I_{sat2} et les facteurs de diode respectifs n_1 et n_2 , d'une source de courant produisant le courant I_{ph} qui dépend de l'éclairement solaire G . Une résistance série R_s qui modélise les pertes ohmiques du matériau et des contacts (résistivité du matériau et du contact semi-conducteur-métal). La valeur de R_s peut être déterminée par l'inverse de la pente de la caractéristique $I - V$ pour la tension à

circuit ouvert V_{co} . Enfin, une résistance parallèle R_p qui présente l'admittance parallèle du générateur de courant (la présence d'un courant de fuite dans la jonction).

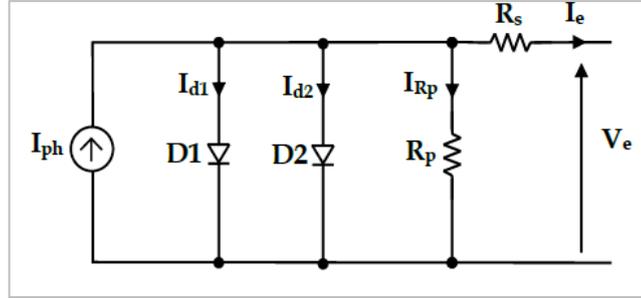


Figure II 2 Modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle à deux diodes.

le courant généré par la cellule pourra être présenté par l'équation suivante[9].

$$I_e = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{Rp} \quad (II.4)$$

Avec :

$$I_{d1} = I_{sat1} \left(\exp \left(\frac{V_e + R_s I_e}{n_1 V_T} \right) - 1 \right) \quad (II.5)$$

$$I_{d2} = I_{sat2} \left(\exp \left(\frac{V_e + R_s I_e}{n_2 V_T} \right) - 1 \right) \quad (II.6)$$

$$I_{Rp} = \frac{V_e + R_s I_e}{R_p} \quad (II.7)$$

Et la tension thermique V_T est donnée par l'équation (II.3). Où :

- I_{sat1} : Courant de saturation inverse de la diode D_1 .
- I_{sat2} : Courant de saturation inverse de la diode D_2 .
- n_1 : Facture de non idéalité de la jonction de la diode D_1 .
- n_2 : Facture de non idéalité de la jonction de la diode D_2 .
- I_{Rp} : Courant dérivé par la résistance parallèle.
- R_p : Résistance de shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction.
- R_s : Résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions.

Ainsi, le courant fourni par une cellule est donné par la relation suivante.

$$I_e = I_{ph} - I_{sat1} \left(\exp \left(\frac{V_e + R_s I_e}{n_1 V_T} \right) - 1 \right) - I_{sat2} \left(\exp \left(\frac{V_e + R_s I_e}{n_2 V_T} \right) - 1 \right) - \frac{V_e + R_s I_e}{R_p} \quad (II.8)$$

II.2.3 Modèle électrique réel à une diode

La cellule photovoltaïque est aussi représentée par le modèle « standard » à une diode. Ce modèle comporte une diode en moins par rapport au modèle à deux diodes.

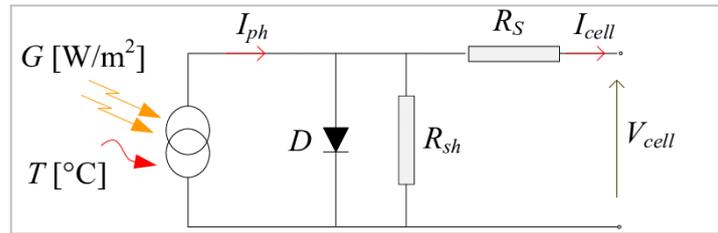


Figure II 3 Modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle à une diode [10].

En se basant sur le circuit de la figure II.3, le courant généré par la cellule pourra être présenté par l'équation suivante.

Ainsi, et à partir des équations données précédemment, le courant fourni par une cellule est donné par la relation suivante [11].

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (II.10)$$

$$I_d = I_{sat} \left(e^{\frac{V_D}{n \cdot V_t}} - 1 \right) \quad (II.11)$$

$$V_t = \frac{K \cdot T}{q} \quad (II.12)$$

Donc, la relation sera.

$$I_d = I_{sat} \left(e^{\frac{q(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{n \cdot K \cdot T}} - 1 \right) \quad (II.13)$$

Le courant dans la résistance shunt est calculé par.

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad (II.14)$$

Et on déduit l'expression du court fourni par une cellule PV.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{\frac{q(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{n \cdot K \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad (II.15)$$

Où : I_{pv} : est le courant fournit par le module PV.

$I_{ph} = I_{cc} (G/1000)$: est le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).

I_{sat} : est le courant de saturation.

K: est la constante de Boltzmann ($1.381 \cdot 10^{-23}$ joule/Kelvin).

q: est la charge d'électron ($1.602 \cdot 10^{-19}$ c).

T: est la température du module PV en Kelvin (K).

n : est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n < 3$).

V_{pv} : est la tension délivrée par le module PV.

R_s : est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et connexions.

R_{sh} : est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction.

II.3 Courant de court-circuit

Cette valeur représente le courant généré par une cellule éclairée non raccordée c'est-à-dire que ($V = 0$). Pour une cellule solaire idéale le courant de court-circuit est égal au courant photovoltaïque I_{ph} .

II.4 Tension de circuit ouvert V_{co}

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul, elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

$$V_{co} = \alpha \cdot V_t \cdot \log \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (\text{II.16})$$

II.5 Facteur de forme FF

On appelle facteur de forme FF le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule ($P_{max} = I_{mpp} \cdot V_{mpp}$) et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit ouvert V_{co} . Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; il peut nous renseigner sur le vieillissement 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 R_s et R_{sh} est défini par :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} V_{co}} = \frac{I_{mpp} V_{mpp}}{I_{cc} V_{co}} \quad (\text{II.17})$$

II.6 Rendement énergétique

On appelle rendement énergétique le rapport de la puissance maximale fournie par la cellule P_{max} sur la puissance du rayonnement solaire incident (P_i).

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{\phi \cdot S} \quad (\text{II.18})$$

Où :

V_{mpp} : la tension de point maximal.

I_{mpp} : le courant de point maximal.

P_{max} : puissance maximale.

S : est la surface de la cellule.

ϕ : est le flux incident.

II.7 Courbes caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Les caractéristiques non linéaires d'une cellule photovoltaïque à base de silicium pour un éclairement et une température donnée.

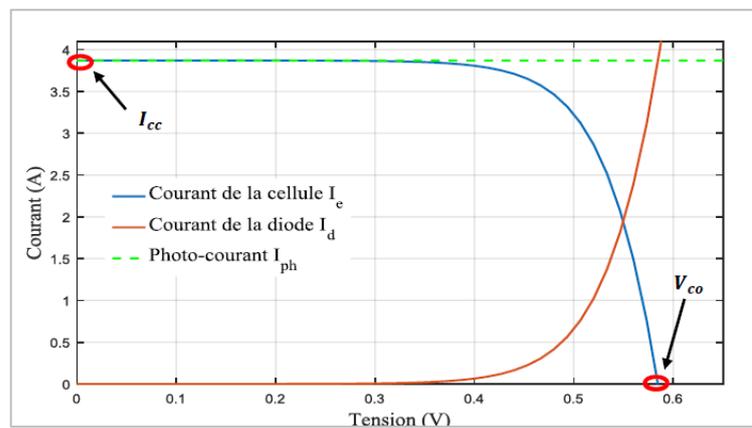


Figure II 4 Constitution de la caractéristique d'une cellule photovoltaïque [12].

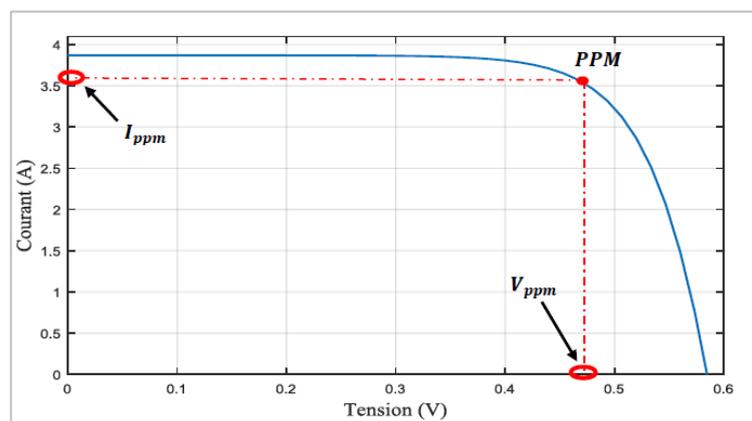


Figure II 5 Caractéristique Courant-Tension ($I-V$) d'une cellule photovoltaïque [12].

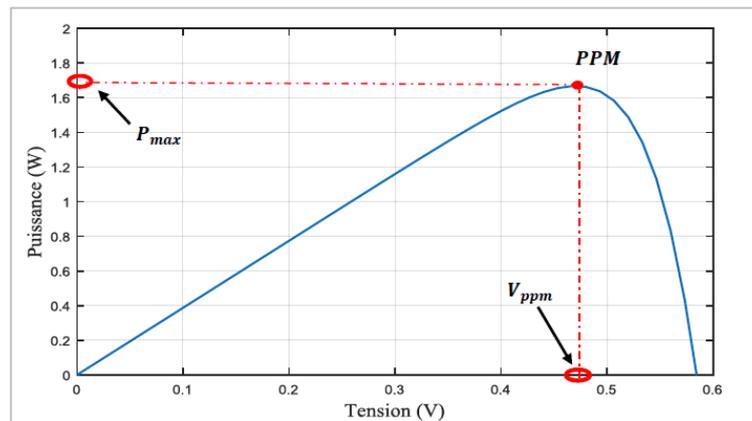


Figure II 6 Caractéristique Puissance-Tension ($P - V$) d'une cellule photovoltaïque [12].

La puissance de la cellule photovoltaïque est calculée par la relation suivante:

$$P_e = I_e V_e \quad (\text{II.19})$$

D'après les courbes caractéristiques précédente, on remarque que la cellule photovoltaïque présente une caractéristique $I - V$ non linéaire allant du point de fonctionnement extrême correspondant au courant de court-circuit I_{cc} vers un autre point extrême correspondant à la tension en circuit ouvert V_{co} tout en passant par le point de fonctionnement souhaité (optimal) qui est le Point de Puissance Maximale (PPM)[13].

Trois modes de fonctionnement de la cellule photovoltaïque peuvent être distingués en regardant sa caractéristique $I-V$:

- Si sa tension est inférieure à 0,4 V : elle se comporte comme générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'irradiation G . Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants élevés et des tensions faibles.
- Si son courant est moins de 3 A : elle se comporte comme générateur de tension V_{co} proportionnelle à la température T . Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants faibles et des tensions élevées.
- Entre ces deux limites : elle fonctionne dans son point optimal PPM. Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances élevées à valeurs de courant et tension modérées permettant ainsi d'exploiter au mieux le gisement solaire.

II.8 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$

II.8.1 Influence de l'éclairement

La figure (II.7) et (II.8) représentent la caractéristique courante tension et puissance tension d'un générateur photovoltaïque pour différentes valeurs de l'éclairement, à une température constante.

Il est observable que la puissance et le courant évoluent proportionnellement à l'intensité lumineuse, et que la puissance maximale est atteinte lorsque l'irradiation nominale est présente. En revanche, la tension présente des variations légères.

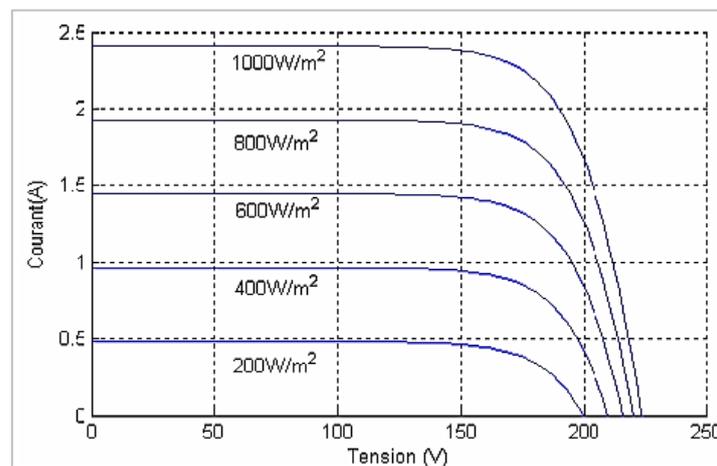


Figure II 7 Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ [14].

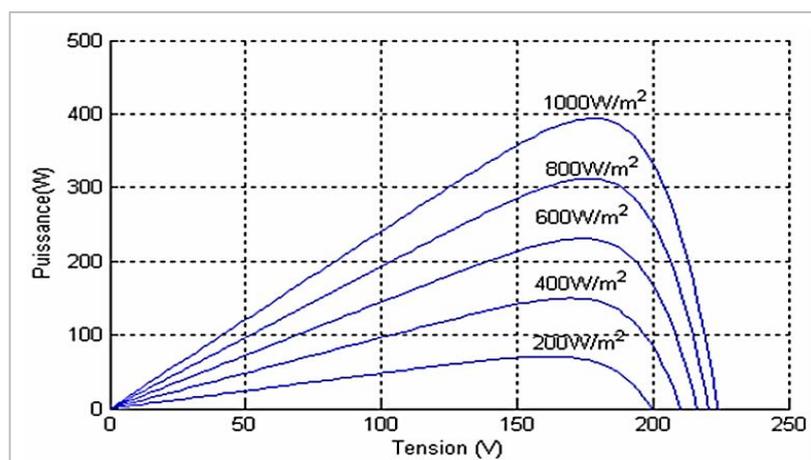


Figure II 8 Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$ [15].

II.8.2 Influence de température

Les propriétés électriques d'une cellule photovoltaïque sont influencées par la température de la jonction à la surface exposée. Les schémas (II.9) et (II.10) présentent l'aspect général des propriétés électriques d'un générateur photovoltaïque pour diverses températures, tout en maintenant un éclairage constant. La figure (II.9) montre l'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$, il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique I-V dont le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influence négativement sur la tension du circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution.

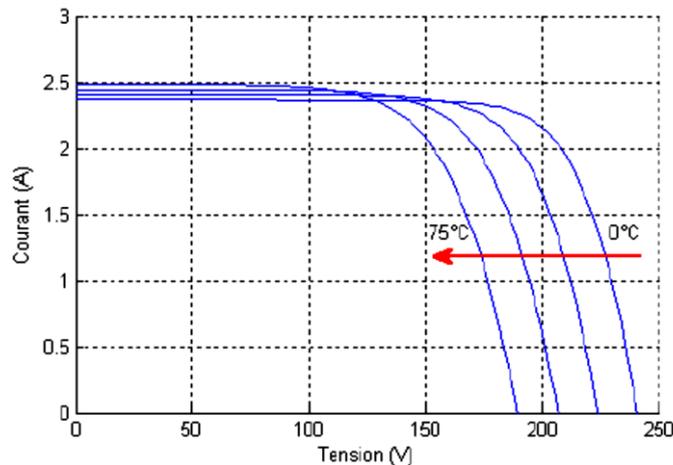


Figure II 9 Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ [14].

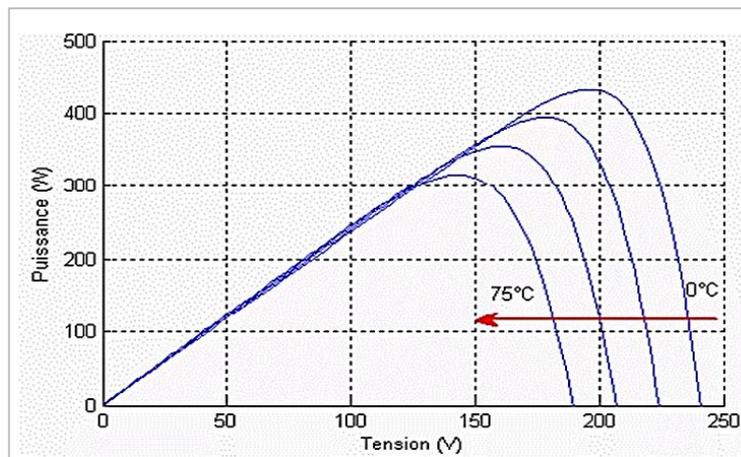


Figure II 10 Influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ [15].

II.9 Modélisation du générateur photovoltaïque

L'équation de base (II.11) de la cellule photovoltaïque élémentaire ne représente pas la caractéristique $I-V$ d'un générateur photovoltaïque. Le GPV est un regroupement d'un grand nombre de cellules élémentaires, connectées dans différentes topologies. Trois types de structure d'interconnexion sont généralement utilisés, à savoir série-parallèle, Total Cross Tied (TCT), et Bridge Linked (BL). La Figure II.11 illustre ces différentes configurations pour un module photovoltaïque 2×6 [16].

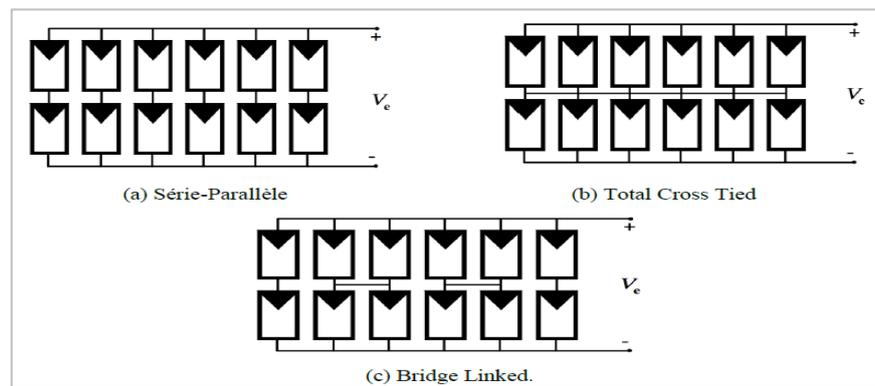


Figure II 11 Configuration de connexion des cellules photovoltaïques.

II.9.1 Association de N_s cellules en série

L'association parallèle de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque comme le montre la figure II.12.

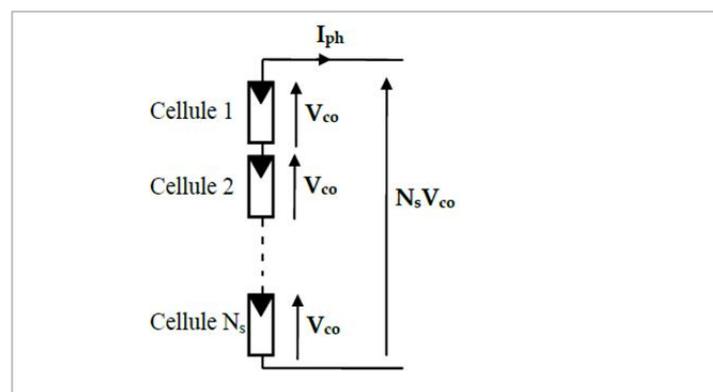


Figure II 12 Association parallèle des cellules.

II.9.2 Association de N_s cellules en parallèle

L'association parallèle de N_p cellules permet d'accroître le courant du générateur photovoltaïque comme le montre la figure II.13.

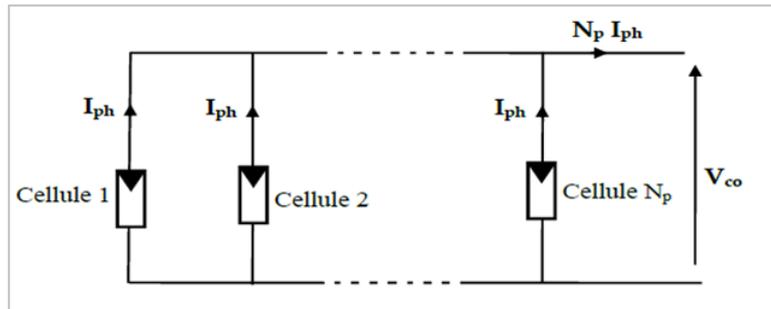


Figure II 13 Association parallèle des cellules

II.9.3 Association série-parallèle des cellules

L'association série-parallèle permet d'augmenter la tension et le courant du générateur photovoltaïque comme le montre la figure II.14.

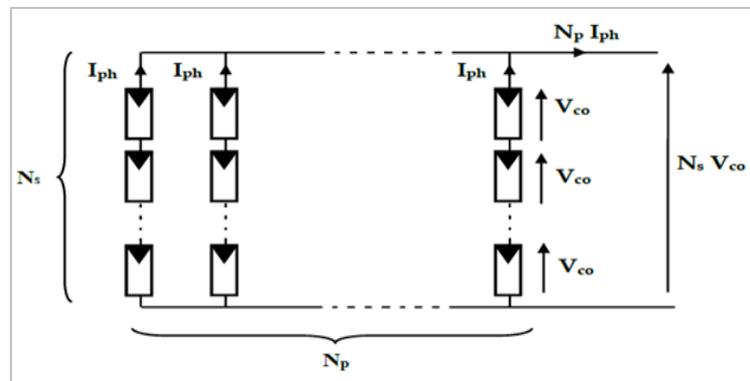


Figure II 14 Association série-parallèle

À partir de l'équation (II.1) et de la figure II.14, la relation entre le courant et la tension dans un générateur photovoltaïque, constitué de N_s cellules connectées en série et de N_p cellules connectées en parallèle est donnée par l'équation suivante :

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_{sat} \left(e^{\frac{q(V_{pv} + \frac{N_p}{N_s} R_s \cdot I_{pv})}{n \cdot K \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + \frac{N_p}{N_s} R_s \cdot I_{pv}}{\frac{N_p}{N_s} R_{sh}} \quad (II.20)$$

II.10 Convertisseur DC/DC (hacheur)

Un hacheur est un dispositif électronique capable de produire une tension continue variable en convertissant une source de tension continue donnée.

Les hacheurs sont utilisés comme interface de puissance à contrôler par le régulateur MPPT, afin d'adapter la tension de sortie du hacheur à la tension requise par la charge. A partir de cette règle et selon le type de contrôleur, on peut raisonner sur plusieurs et différentes méthodes, afin d'extraire le maximum de puissance d'un panneau solaire[17].

II.10.1 Convertisseur élévateur (Boost)

Un hacheur boost est un type spécifique de hacheur, également connu sous le nom de convertisseur élévateur (ou step-up en anglais). Il est conçu pour augmenter la tension continue d'entrée à une valeur de tension continue de sortie plus élevée. Ce dispositif est couramment utilisé dans les applications où une tension d'alimentation plus élevée est requise, comme dans les systèmes d'alimentation des véhicules électriques, les panneaux solaires, ou les alimentations à découpage.

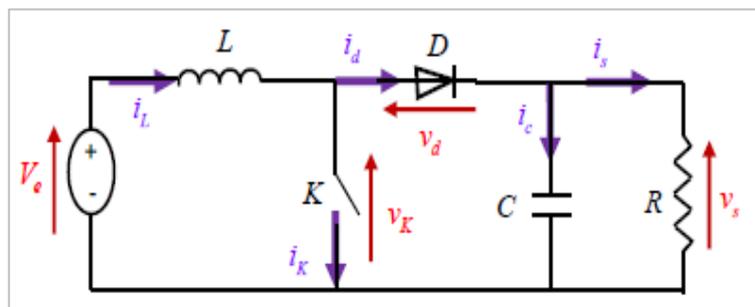


Figure II 15 Schéma de base d'un convertisseur Boost.

II.10.2 Principe de fonctionnement d'un hacheur boost

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être séparé en deux phases distinctes en fonction de l'état de l'interrupteur K , alors que le circuit est alimenté par une source de tension V_e .

Lorsque l'interrupteur K est fermé pendant la fraction αT de la période de découpage T ($0 < t < \alpha T$), le courant traversant L augmente de manière linéaire, stockant ainsi de l'énergie dans L .

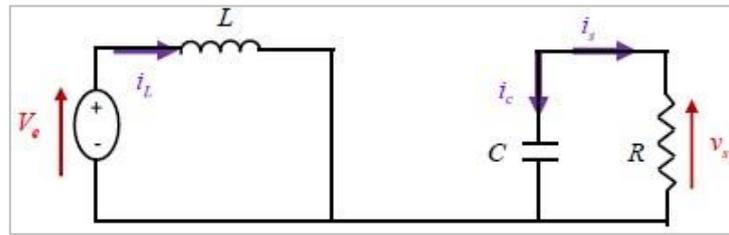


Figure II 16 Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé.

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e \quad (\text{II.21})$$

$$i_L = I_{\min} + \frac{V_e}{L} t \quad (\text{II.22})$$

avec : I_{\min} la valeur minimale du courant dans l'inductance à l'instant $t=0$.

A l'instant : $t=\alpha T$, le courant dans l'inductance atteint sa valeur maximale I_{\max} .

$$I_{\max} = I_{\min} + \frac{V_e}{L} \alpha T \quad (\text{II.23})$$

Soit $\Delta i_L = I_{\max} - I_{\min}$ l'ondulation du courant dans la l'inductance. De l'expression (II.21) on exprime l'ondulation de courant dans l'inductance.

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L} T = \frac{\alpha V_e}{L f} \quad (\text{II.24})$$

Avec :

f : Fréquence de découpage,

L : Valeur de l'inductance de lissage (H),

V_e : Tension aux bornes du générateur(V),

T : Période de découpage du signal de l'interrupteur $T=1/f$ en secondes (s),

α : Rapport cyclique du signal de l'interrupteur $\alpha=t_{\text{on}}/T$

I_L : Courant de l'inductance

Pour tracer les formes d'ondes, dans l'instant ($0 < t < \alpha T$) on a :

$$\begin{cases} V_K(t) = 0 \\ i_d(t) = 0 \\ V_L(t) = V_e \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Lors du blocage du transistor ($\alpha T < t < T$), la diode D assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de la charge. Le circuit du convertisseur sera comme montré dans la figure (II. 17)

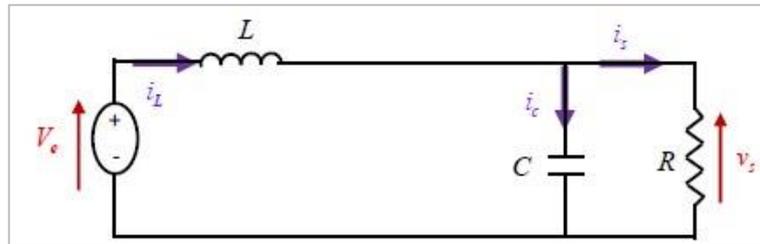


Figure II 17 Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert.

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e - V_s \quad (\text{II.25})$$

$$i_L = I_{\max} + \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T) \quad (\text{II.26})$$

En faisant l'égalité des valeurs de l'ondulation du courant tirées des équations (II.22) et (II.25), on peut déduire la valeur moyenne de la tension de sortie V_s :

$$V_s = \frac{1}{1 - \alpha} V_e \quad (\text{II.27})$$

Faisant varier sa tension d'entrée ou son rapport cyclique. Ce dernier étant toujours compris entre 0 et 1, alors le montage fonctionne en élévateur de tension.

En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut établir la valeur moyenne du courant dans l'inductance en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique :

$$I_L = \frac{1}{1 - \alpha} I_s \quad (\text{II.28})$$

Pendant la première séquence de fonctionnement ($0 < t < \alpha T$), seul le condensateur donne de l'énergie à la charge, on peut écrire :

$$C \frac{dv_s}{dt} = -i_s \quad (\text{II.29})$$

Dans la fraction ($\alpha T < t < T$), on a :

$$\begin{cases} V_K(t) = V_s \\ i_K(t) = 0 \\ V_L(t) = V_e - V_s \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Avec :

V_s Tension de sortie du convertisseur (V),

i_s Courant de sortie du convertisseur (A).

Les formes d'ondes en conduction continue sont représentées à la figure (III.4), en régime permanent, la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle

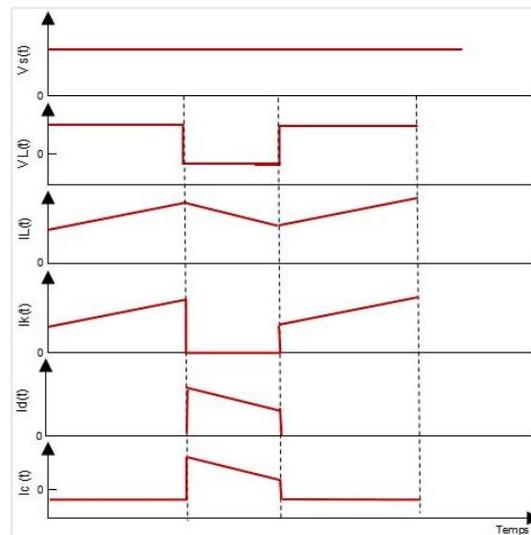


Figure II 18 Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost [18].

II.11 Convertisseur Buck-Boost

Le hacheur inverseur est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur k_1 peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). C'est un convertisseur qui peut donner à sa sortie une tension supérieure ou inférieure à celle de l'entrée suivant la valeur du rapport cyclique

Le circuit du convertisseur Buck-Boost est montré sur le schéma figure II.19. Il se compose d'un transistor MOSFET de puissance utilisé comme commutateur contrôlable, inducteur L , diode (k_2), condensateur de filtre C , et résistance de charge R . Le commutateur est tourné on-off à la fréquence de commutation $f_S = \frac{1}{T}$

avec le rapport cyclique $\alpha = \frac{T_{on}}{T}$ où T_{on} est l'intervalle de temps quand le commutateur est allumé

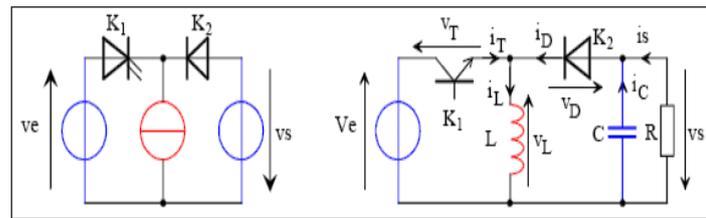


Figure II 19 Structure du convertisseur Buck-Boost [19].

L'interrupteur K_1 est fermé pendant la fraction αT de la période de découpage T . La source d'entrée fournit l'énergie à l'inductance L . La charge est déconnectée du montage (diode K_2 bloquée).

Lors du blocage du transistor, la diode K_2 assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge.

En régime permanent, la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, ce qui impose la relation suivante qui donne la tension de sortie en fonction de la tension d'entrée :

$$V_s = V_e \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (\text{II.31})$$

Par définition, $0 < \alpha < 1$, ce qui induit que le montage est abaisseur ET élévateur de tension (négative) autrement dit :

- Si le rapport cyclique $\alpha < 0.5$ le convertisseur fonctionne en abaisseur
- Si le rapport cyclique $\alpha > 0.5$ le convertisseur fonctionne en élévateur

Autrement dit un hacheur Buck-Boost est un convertisseur DC-DC qui permet de réguler la tension de sortie en fonction de la tension d'entrée. Il est composé d'un interrupteur (généralement un transistor) et d'un inducteur. Lorsque l'interrupteur est fermé, l'inducteur stocke de l'énergie. Lorsque l'interrupteur est ouvert, l'inducteur décharge cette énergie dans la charge en produisant une tension de sortie. Le rapport cyclique (rapport entre le temps pendant lequel l'interrupteur est fermé et le temps total de commutation) permet de réguler la tension de sortie. Un hacheur Buck-Boost peut donc abaisser ou élever la tension d'entrée, selon la configuration du circuit.

II.11.1 Principe de fonctionnement d'un Convertisseur Buck-Boost

La modélisation de ce convertisseur passe par l'analyse des différentes séquences de fonctionnement que nous supposons de durées fixées par la commande α . Il apparaît deux séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur K, que nous pouvons représenter chacune par une équation différentielle.

Séquence 1: Phase active, $0 < t < \alpha T$

Sur l'intervalle $0 < t < \alpha T$ $K_1 = 1$, $K_2 = 0$

On a: $V_{k1} = 0$; $I_{k2} = 0$

Après l'application de la loi des mailles, on obtient

$$V_e = \frac{L di_L}{dt} \quad (II.32)$$

Par contre, on a :

$$I_c = -\frac{V_c}{R} \Rightarrow C \frac{dV_c}{dt} = -\frac{V_c}{R} \quad (II.34)$$

La représentation d'état des équations (II.32) et (II.33) donne le modèle suivant

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} V_e \quad (II.35)$$

Séquence 2: Phase de roue libre

Sur l'intervalle $\alpha T < t < T$; $K_1 = 0$; $K_2 = 1$; $i_{k1} = 0$; $v_{k2} = 0$

On applique la loi des mailles, on obtient :

$$\frac{di_L}{dt} = -V_c \quad (II.36)$$

$$C \frac{dV_c}{dt} = I_L - \frac{V_s}{R} \quad (\text{II.37})$$

La représentation d'état des équations (II,36) et (II,37) donne le modèle suivant

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{L} \\ \frac{1}{C} & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_e \quad (\text{II.38})$$

II.11.2 Modèle moyen du convertisseur

Après l'application de cette relation de la linéarisation $\alpha A + (1-\alpha)B$ on obtient :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-(1-\alpha)}{L} \\ \frac{1-\alpha}{C} & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha \\ 0 \end{bmatrix} V_e \quad (\text{II.39})$$

Après la conversion dans le domaine fréquentiel :

$$\begin{cases} si_L = \frac{-(1-\alpha)}{L} V_c + \frac{\alpha}{L} V_e \\ sV_c = \frac{1-\alpha}{C} i_L + \frac{-1}{RC} V_c \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} si_L = \frac{\alpha}{L} V_e - \frac{1}{L} V_s + \frac{\alpha}{L} V_s \\ sV_c = \frac{1}{C} i_L - \frac{1}{RC} V_s - \frac{\alpha}{C} i_L \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

Le système est linéarisé autour d'un point équilibre. Dans ces conditions, on peut écrire

$$\widehat{i}_L = i_L + \widehat{i}_L ; \widehat{V}_s = V_s + \widehat{V}_s ; \widehat{\alpha} = \alpha + \widehat{\alpha} ; V_c = V_s \quad (\text{II.41})$$

En utilisant le modèle de petits signaux (Small Signal Model), il vient :

$$\begin{bmatrix} \frac{d\widehat{i}_L}{dt} \\ \frac{d\widehat{v}_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-(1-\alpha)}{L} \\ \frac{1-\alpha}{C} & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{i}_L \\ \widehat{V}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_s + V_e}{L} \\ -\frac{1}{C} i_L \end{bmatrix} \widehat{\alpha} \quad (\text{II.42})$$

En utilisant la transformation de Laplace, Le système linéarisé est alors :

$$\begin{cases} s\widehat{I}_L = \frac{-(1-\alpha)}{L} \widehat{V}_s + \frac{V_s + V_e}{L} \widehat{\alpha} \\ s\widehat{V}_c = \frac{1-\alpha}{C} \widehat{I}_L + \frac{-1}{RC} \widehat{V}_s - \frac{1}{C} i_L \widehat{\alpha} \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

Recherche de : $\frac{\widehat{V}_s}{\widehat{\alpha}}$

A partir de la deuxième équation du système linéarisé (II,10) , nous pouvons retirer :

$$\frac{1-\alpha}{C} \widehat{I}_L = s\widehat{V}_c + \frac{1}{RC} \widehat{V}_s + \frac{1}{C} i_L \widehat{\alpha} \quad (\text{II.44})$$

Avec

$$\widehat{I}_L = \frac{Cs\widehat{V}_s + \frac{1}{R}\widehat{V}_s + i_L \widehat{\alpha}}{1-\alpha} \quad (\text{II.45})$$

Donc on obtient :

$$s \left(\frac{Cs\widehat{V}_s + \frac{1}{R}\widehat{V}_s + i_L \widehat{\alpha}}{1-\alpha} \right) = -\frac{1-\alpha}{C} \widehat{V}_s + \frac{V_s + V_e}{L} \widehat{\alpha} \quad (\text{II.46})$$

$$\left[LCs^2 + \frac{L}{R}s + (1-\alpha)^2 \right] \widehat{V}_s = [(1-\alpha)V_s + ((1-\alpha)V_e) - sLi_L] \widehat{\alpha} \quad (\text{II.47})$$

$$\frac{\widehat{V}_s}{\widehat{\alpha}} = \frac{(1-\alpha)V_s + ((1-\alpha)V_e) - sLi_L}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + (1-\alpha)^2} \quad (\text{II.48})$$

Rappelons que :

$$V_s = V_e \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (\text{II.49})$$

$$i_L = \frac{V_e \alpha}{R(1-\alpha)^2} \quad (\text{II.50})$$

Alors la fonction de transfert de la tension de sortie sur le rapport cyclique :

$$\frac{\widehat{V}_s}{\widehat{\alpha}} = \frac{(1 - \alpha) \left[V_e \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right] + ((1 - \alpha)V_e) - sL \left[\frac{V_e \alpha}{R(1 - \alpha)^2} \right]}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + (1 - \alpha)^2} \quad (\text{II.51})$$

$$\frac{\widehat{V}_s}{\widehat{\alpha}} = \frac{V_e \left[1 - \frac{Ls\alpha}{R(1 - \alpha)^2} \right]}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + (1 - \alpha)^2} \Rightarrow \frac{\left[V_s \frac{1 - \alpha}{\alpha} \right] \left[1 - \frac{Ls\alpha}{R(1 - \alpha)^2} \right]}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + (1 - \alpha)^2} \quad (\text{II.52})$$

Après simplification on a :

$$\frac{\widehat{V}_s}{\widehat{\alpha}} = \frac{V_s}{\alpha(1 - \alpha)} \left[\frac{1 - \frac{s}{R \frac{(1 - \alpha)^2}{L\alpha}}}{1 + \frac{s}{\left(\frac{(1 - \alpha)R\sqrt{C}}{\sqrt{L}} \right) \left(\frac{1 - \alpha}{\sqrt{LC}} \right)} + \left(\frac{s}{\sqrt{LC}} \right)^2} \right] \quad (\text{II.53})$$

On pose $(1 - \alpha) = \acute{\alpha}$

$$\frac{\widehat{V}_s}{\widehat{\alpha}} = \frac{V_s}{\alpha \acute{\alpha}} \left[\frac{1 - \frac{s}{R \frac{\acute{\alpha}^2}{L\alpha}}}{1 + \frac{s}{\left(\frac{\acute{\alpha}R\sqrt{C}}{\sqrt{L}} \right) \left(\frac{\acute{\alpha}}{\sqrt{LC}} \right)} + \left(\frac{s}{\sqrt{LC}} \right)^2} \right] \quad (\text{II.54})$$

la fin on peut écrire la fonction de transfert de l'hacheur Buck-Boost de cette manière:

$$G_{vd}(s) = \frac{\widehat{V}_s}{\widehat{\alpha}} = G_{d0} \frac{\left(1 - \frac{s}{w_z} \right)}{\left(1 + \frac{s}{Qw_0} + \left(\frac{s}{w_0} \right)^2 \right)} \quad (\text{II.55})$$

$$Q = \frac{\acute{\alpha}R\sqrt{C}}{\sqrt{L}} \quad (\text{II.56})$$

$$w_z = R \frac{\acute{\alpha}^2}{L\alpha} \quad (\text{II.57})$$

$$G_{d0} = \frac{V_s}{\alpha \acute{\alpha}} \quad (\text{II.58})$$

$$w_0 = \frac{\alpha}{\sqrt{LC}} \quad (\text{II.59})$$

II.12 Dimensionnement de l'inductance

Le calcul de l'inductance débute par le calcul du courant d'entrée maximal. On impose la fréquence de découpage en haute fréquence et on vérifie si l'ondulation de courant est correcte en basses fréquences. Après calculs, l'inductance peut se trouver dans le marché ou bien être fabriquée.

Pour notre cas, nous l'avons conçu et en s'appuyant sur la formulation suivante

$$L = \frac{R(1-\alpha)^2}{2f} \quad (\text{II.60})$$

II.13 Dimensionnement de capacité

Pour les capacités des condensateurs d'entrée (de découplage) et de sortie (lissage), leurs influences se manifestent sur les ondulations des tensions. Leurs valeurs sont en fonction de l'ondulation voulue ainsi que des grandeurs moyennes désirées. Nous avons placé en entrée comme en sortie des condensateurs chimiques à l'entrée pour filtrer les variations de tension et celui de la sortie pour filtrer les variations de tension et pour la compensation de l'énergie fournie par la bobine à la fermeture du transistor. En effet, nous avons :

$$C = \frac{\alpha V_S}{f_s R V_{c_{pp}}} \quad (\text{II.61})$$

II.14 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation du système PV à savoir la cellule photovoltaïque et de convertisseurs DC-DC. Nous avons obtenu les équations mathématiques de courant fournis par la cellule photovoltaïque et les trois modèles d'état pour différents fonctionnements de convertisseur Buck Boost. Nous sommes passés par la suite au modèle de petits signaux pour avoir la fonction de transfert ayant pour sortie le rapport de la tension sur le rapport cyclique. Nous avons représenté la caractéristique courant-tension ainsi que l'influence de l'éclairage et la température puis nous avons présentés les différentes structures d'associations des modules PV

Chapitre III

Commandes MPPT et contrôle par Mode Glissant

III.1 Introduction

La maximisation de la puissance extraite des panneaux solaires est une exigence cruciale pour améliorer l'efficacité et la rentabilité des systèmes photovoltaïques. Pour atteindre cet objectif, les techniques de suivi du point de puissance maximale, ou MPPT (Maximum Power Point Tracking), jouent un rôle essentiel. La commande MPPT permet d'adapter en temps réel les conditions de fonctionnement des cellules photovoltaïques afin d'extraire la quantité maximale d'énergie, malgré les variations des conditions environnementales telles que l'irradiation solaire et la température.

Ce chapitre vise à détailler les principes, les méthodes et les applications des techniques de commande MPPT dans les systèmes photovoltaïques. Les points suivants seront détaillés : la poursuite du point de puissance maximale, le principe de la commande MPPT et les étapes du fonctionnement.

Notre étude est concernée par les techniques les plus couramment utilisées à savoir la méthode de perturbation et observation (P&O), la méthode basée sur la logique floue FLC et en particulier la commande par mode glissant SMC et le mode glissant par double intégrale DISMC.

Chaque méthode sera analysée en termes de principes de fonctionnement, des avantages et des limitations, ainsi que des performances en conditions réelles.

III.2 Poursuite du point de puissance maximale (PPPM ou MPPT)

Pour que le système photovoltaïque fonctionne à des points de puissance maximums de leurs caractéristiques, il existe des lois de commande spécifiques qui répondent à ce besoin. Cette commande est nommée dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou « Maximum Power Point Tracking » en Anglais (MPPT). Le principe de ces commandes est de chercher le point de puissance maximale (PPM) en gardant une bonne adaptation entre le générateur et sa charge pour assurer le transfert de la puissance maximale[12][13].

III.2.1 Principe de la commande MPPT

Figure III 1 représente une chaîne de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT.

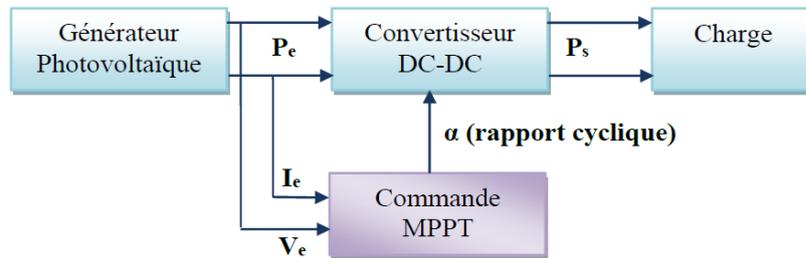


Figure III 1 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT [22].

Les panneaux solaires ont une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire qui varie en fonction des conditions d'ensoleillement et de température. Pour un point de fonctionnement donné, il existe un point de puissance maximale (MPP) où le produit de la tension (V) et du courant (I) est maximal. Le rôle du MPPT est de suivre ce point de puissance maximale pour optimiser l'efficacité du système PV.

III.2.2 Étapes du Fonctionnement de la Commande MPPT

1. Mesure des Paramètres tension (V) et le courant (I) du panneau solaire.
2. Calcul de la Puissance instantanée $P = V \times I$
3. Algorithme de Suivi
4. Ajustement du Point de Fonctionnement : Ajuster le rapport cyclique du convertisseur DC-DC connecté aux panneaux solaires pour déplacer le point de fonctionnement vers le MPP.
5. Répétition : Répéter continuellement le processus pour suivre les variations de conditions météorologiques et maintenir le fonctionnement au MPP.

III.3 Les techniques de recherche du point de puissance maximale

La littérature propose un certain nombre d'algorithmes de recherche de MPP dont plusieurs ont été élaborés il y a déjà quelques décennies [23], [24], [25], [26].

III.3.1 La méthode Perturbation et Observation (P&O)

L'idée principale de la méthode P&O consiste à perturber périodiquement (en augmentant ou diminuant) la tension d'un panneau photovoltaïque en ajustant le rapport cyclique α . Après chaque perturbation, on calcule la puissance produite par le panneau PV à l'instant $P(k)$ et on la compare à celle de l'instant précédent $P(k-1)$. Si la puissance augmente, cela signifie que l'on se rapproche du point de puissance maximale (PPM) et la variation du rapport cyclique est maintenue dans la même direction. En revanche, si la puissance diminue, cela indique que l'on s'éloigne du PPM, et il devient alors nécessaire d'inverser la direction de la variation du rapport cyclique [27], [28].

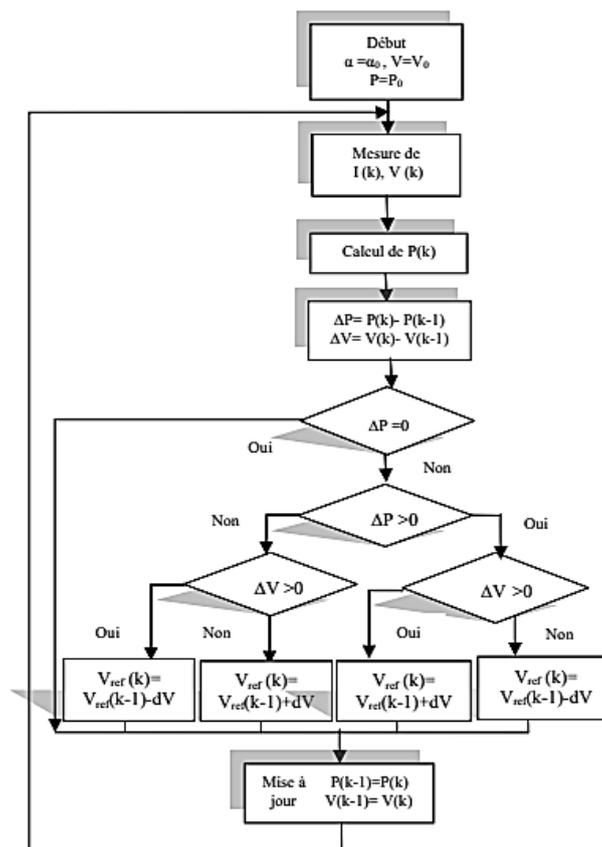


Figure III 2 Organigramme de l'algorithme P&O [29].

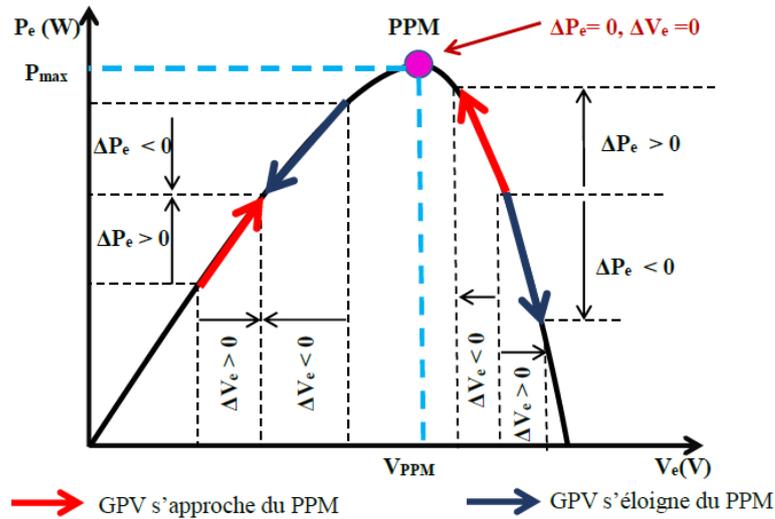


Figure III 3 Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O [30].

Tableau III 1 Principe de l'algorithme P&O.

| Cas n° | ΔV | ΔP | $\frac{\Delta P}{\Delta V}$ | Sens de la poursuite | Action de contrôle |
|---------------|------------|------------|-----------------------------|----------------------|---|
| 1 | + | + | + | Bon | Incrémenter $V_{ref} = V_{ref} + dV$ |
| 2 | - | - | - | Mauvais | Incrémenter $V_{ref} = V_{ref} + dV$ |
| 3 | + | - | + | Mauvais | Décrémenter $V_{ref} = V_{ref} - dV$ |
| 4 | - | + | - | Bon | Décrémenter $V_{ref} = V_{ref} - dV$ |

III.3.2 Commande par la logique floue

La logique floue a été introduite en 1965 par L. Zadeh. La commande floue vise les mêmes objectifs de régulation et de suivi que ceux d'une commande classique en automatique[17].

Récemment, la commande basée sur la logique floue a été appliquée aux systèmes de suivi du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques. Cette approche présente l'avantage d'être robuste et de ne pas nécessiter une connaissance précise du modèle mathématique du système.[27]

En particulier, cette commande convient mieux aux systèmes non linéaires. L'algorithme fonctionne en trois étapes : d'abord, la fuzzification des variables d'entrée en valeurs floues à l'aide de fonctions triangulaires et trapézoïdales ; ensuite, l'inférence, où ces valeurs floues sont comparées à des ensembles prédéfinis pour déterminer la réponse appropriée ; et enfin, la

défuzzification, qui convertit les ensembles flous en valeurs concrètes en utilisant la méthode du centroïde.[17]

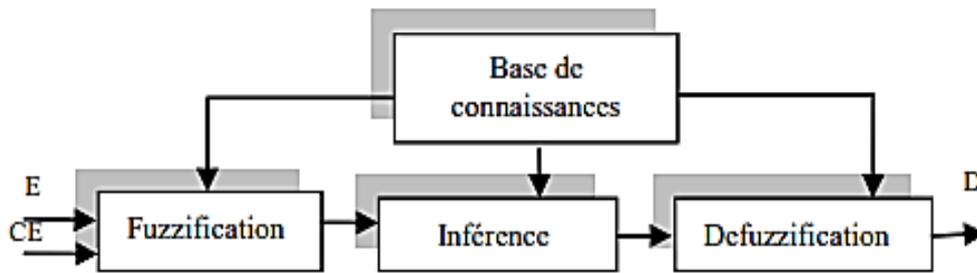


Figure III 4 Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue [31].

III.3.3 Commande par mode glissant

Le mode glissant est un type de fonctionnement spécifique aux systèmes à structure variable. Cette méthode de commande est devenue l'une des techniques de contrôle les plus populaires et efficaces.

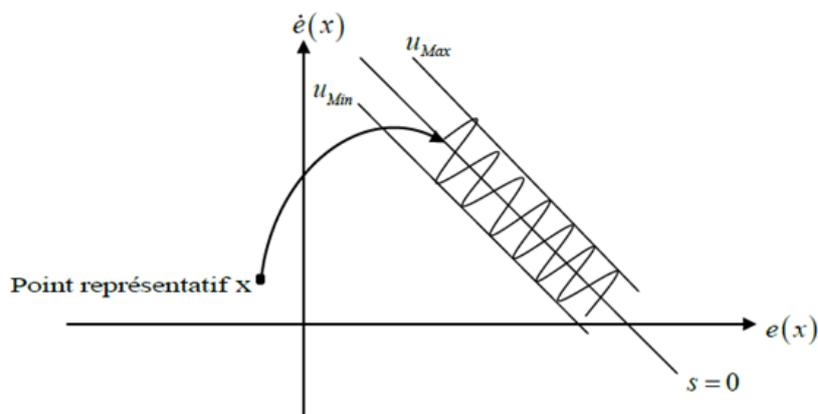


Figure III 5 Mode de glissement [32].

populaire pour une large gamme de systèmes non linéaires et suscite un grand intérêt dans de nombreux domaines. Elle se distingue par sa simplicité de mise en œuvre, sa réponse dynamique remarquable, et surtout par sa robustesse face aux incertitudes internes, ce qui se traduit par une insensibilité aux variations des paramètres du système à contrôler, ainsi qu'aux perturbations externes.[33]

III.3.3.1 Principe de la commande par mode de glissement (SMC)

L'idée principale de la commande par mode glissant consiste d'abord à diriger les états du système vers une région choisie de manière appropriée, puis à élaborer une loi de commande qui garantira que le système reste constamment dans cette région.

En résumé, la commande par mode glissant se décompose en deux phases.

$$U = u_{eq} + u_n \quad (III.01)$$

u_n : Le glissement est efficace pour compenser les incertitudes du modèle. Il se compose de la fonction signe « sign » de la surface de glissement s , multipliée par une constante K_{gliss} . La surface de glissement est définie de manière à ce que toutes les trajectoires du système suivent un comportement désiré en termes de poursuite, de régulation et de stabilité.

u_{eq} : La commande équivalente ou nominale est déterminée par le modèle du système, qu'il soit linéaire ou non linéaire. Cette section est conçue en utilisant la méthode de la commande équivalente, qui repose sur l'évaluation du comportement du système lorsqu'il se trouve sur la surface de glissement s .

III.3.3.2 Surface de glissement

Pour assurer la stabilisation et définir une dynamique souhaitée du système en mode de glissement, la surface de glissement $s(x)$ est généralement choisie comme un hyperplan passant par l'origine de l'espace des états.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u_{eq} \quad (III.02)$$

Où :

$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$: une variété différentiable.

u : la commande du système.

f et g : des champs de vecteur, définis sur X .

Pour définir la forme de la surface,[34] a proposé une formule générale qui garantit la convergence des variables d'état :

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{r-1} e(x) \quad (\text{III.03})$$

OU :

x :variable a réguler.

e(x) : L'écart entre la variable à réguler et la référence.

l :Une constante positive.

r :Degré relatif

III.3.3.3 Condition de stabilité et convergence

En tenant compte du fait que le contrôle discontinu pour assurer le critère de stabilité de Lyapunov est possible, ce qui est donné par :

$$S(\dot{x}) S(x) \leq 0 \quad (\text{III.04})$$

III.3.3.4 Méthodes de synthèse classiques de la commande par mode de glissement

La commande u est conçue de manière à diriger les trajectoires du système vers la surface de glissement, puis à les maintenir à proximité de celle-ci. u est une loi de commande à structure variable, définie comme suit :

$$\begin{cases} u^+(x) & \text{si } s(t,x) > 0 \\ u^-(x) & \text{si } s(t,x) < 0 \end{cases} \quad (\text{III.05})$$

u^+ et u^- étant des fonction continues. Il est à noter que le caractère discontinu de la loi de commande permet d'obtenir une convergence en temps fini sur la surface ainsi que des propriétés de robustesse vis-à-vis de certaines perturbations.

La méthode de la commande équivalente[35] est un moyen pour déterminer le mouvement sur la surface de glissement. Soit le système donné.

par l'équation (III-2) en régime de glissement.

$$\begin{cases} S(x) = 0 \\ S(\dot{x}) = \frac{ds}{dt} = \left[\frac{ds}{dx} \right] (f(x) + g(x)u_{eq}) = 0 \end{cases} \quad (III.06)$$

$$u_{eq} = - \left(\frac{\left[\frac{ds}{dx} \right] f(x)}{\left[\frac{ds}{dx} \right] g(x)} \right) \quad (III.07)$$

III.3.3.5 Commande MPPT d'un système PV par mode glissant

La fonction de commutation u est déterminée par le fait que, à gauche du point de puissance maximale (MPP), dP/dV est positif, tandis qu'à droite du MPP, dP/dV est négatif. Ainsi, u peut être exprimée par.

$$\begin{cases} U = 0 & \text{quand } s > 0 \\ U = 1 & \text{quand } s < 0 \end{cases} \quad (III.08)$$

Qui peut aussi s'écrire

$$U = \frac{1(1 - \text{sign}(s))}{2} \quad (III.09)$$

Où S est donnée par

$$S = \frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (III.10)$$

III.4 Commande mode glissant double intégrale (DISMC)

La commande double intégrale par mode glissant implique l'utilisation de deux intégrations successives pour concevoir une loi de commande qui dirige les états du système vers une surface de glissement et les maintient ensuite à proximité de celle-ci.

Afin d'atteindre une puissance de sortie maximale, le modèle MPPT proposé, fondé sur le DISMC, est mis en œuvre dans Matlab/Simulink. Cet algorithme a été conçu pour éliminer les fluctuations indésirables.

Lorsque des perturbations indésirables surviennent dans les systèmes photovoltaïques, elles sont souvent considérées comme gênantes. Le système de commande en mode glissant se divise généralement en deux parties principales : la première consiste à déterminer la surface de glissement à partir des paramètres fournis par le convertisseur DC-DC, tandis que la seconde porte sur l'élaboration de la loi de commande pour orienter et maintenir le système vers la surface de glissement.

La surface de glissement est choisie de manière à fournir la puissance de sortie maximale. La surface de glissement est définie par.

$$S(x) = \frac{dP_{pv}}{dI_{pv}} = 0 \Rightarrow \frac{dP_{pv}}{dI_{pv}} = I_{pv} \times \frac{dv_{pv}}{dI_{pv}} + V_{pv} \quad (\text{III.11})$$

Pour la conception du contrôleur, l'erreur de suivi e est donnée comme suit :

$$S(x) = e(x) \quad (\text{III.12})$$

$$e(x) = e_1(x) + e_2(x) \quad (\text{III.13})$$

$$e_1(x) = \int \left(\frac{dP}{dI} \right) dt \quad (\text{III.14})$$

$$e_2(x) = \int \left(\int \left(\frac{dP}{dI} \right) dt \right) dt \quad (\text{III.15})$$

$$\begin{cases} dP = (p_{pv}(k) - p_{pv}(k-1)) \\ dI = (I_{pv}(k) - I_{pv}(k-1)) \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

Généralement, la loi de commande en mode glissant est composée de deux termes, le terme de commande équivalent et le terme de commande discontinu. L'algorithme DISMC est utilisé

pour stabiliser le système et le pousser à atteindre la convergence vers le chemin souhaité au bon moment.

$$U = u_{eq} + u_n \quad (III.17)$$

Afin d'obtenir un contrôle équivalent, la condition de stabilité doit être assurée.

$$\begin{cases} S(x) = 0 \\ \dot{S}(x) = 0 \end{cases} \quad (III.18)$$

Le contrôle équivalent peut être obtenu en résolvant l'équation algébrique suivante :

$$S(x) = \left[\frac{ds}{dx} \right] \quad (III.19)$$

$$\dot{X} = \left[\frac{ds}{dx} \right] (f(x) + g(x)u_{eq}) = 0 \quad (III.20)$$

$$u_{eq} = - \left(\frac{\left[\frac{ds}{dx} \right] f(x)}{\left[\frac{ds}{dx} \right] g(x)} \right) = -k \int s(x) dx + \frac{V_o}{V_o + V_{in}} \quad (III.21)$$

En tenant compte du fait que le contrôle discontinu pour assurer le critère de stabilité de Lyapunov est possible, ce qui est donné par :

$$\dot{S}(x) S(x) \leq 0 \quad (III.22)$$

L'expression de la loi de commande discontinue est donnée par :

$$u_n = k_2 |S|^\alpha \times \text{sign}(S) \quad (III.23)$$

$$0 < \alpha < 1$$

La fonction sign

$$\begin{cases} \text{sign}(S) = 1 \text{ si } S(x) > 0 \\ \text{sign}(S) = 0 \text{ si } S(x) = 0 \\ \text{sign}(S) = -1 \text{ si } S(x) < 0 \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

Alors la loi de commande c'est

$$U = u_{eq} + u_n \Rightarrow k_2 |S|^\alpha \times \text{sign}(S) - k_1 \int s(x) dx + \frac{V_o}{V_o + V_{in}} \quad (\text{III.25})$$

Où K_2 et K_1 sont des constantes positives

V_{in} = la tension d'entrée

V_o = la tension de sortie

III.5 Conclusion

En conclusion, ce chapitre vise à fournir une compréhension approfondie des techniques de commande MPPT et de leur rôle central dans l'optimisation des systèmes photovoltaïques et nous avons aussi fait connaître les différentes techniques MPPT classiques et avancées.

Les connaissances acquises permettront aux ingénieurs et aux chercheurs de concevoir et d'améliorer des solutions de suivi de puissance maximisée, contribuant ainsi à l'efficacité énergétique et à la viabilité économique des énergies renouvelables.

Chapitre IV:
Résultats de simulation.

IV.1 Introduction

Ce chapitre vise à faire une comparaison des résultats de simulations obtenus avec l'outil Matlab Simulink pour différentes techniques MPPT qui sont couramment utilisées en plus de celles qui font l'objet de notre travail à savoir le contrôle par mode glissant. On a utilisé quatre MPPT qui sont respectivement, P&O, FLC, SMC et DISMC. Le but de ces essais est de vérifier le fonctionnement de chaque technique et comparer leurs performances dans des conditions de fonctionnement différentes.

Nous avons développé deux essais pour chaque MPPT :

- Le premier dans lequel le système est soumis à des conditions climatiques normales. (La température 25°C l'irradiation solaire, $1000 \text{ w}/\text{m}^2$).
- Dans le second essai, il y a un changement d'irradiation pendant le fonctionnement pour vérifier l'efficacité de la poursuite du MPP dans des conditions proches à la réalité. De l'instant 0 à 0.4s l'irradiation est égale à $1000\text{W}/\text{m}^2$. De 0.4 à 0.8 s elle est égale à $800\text{w}/\text{m}^2$ pour prendre une valeur de $600\text{w}/\text{m}^2$ entre 0.8 et 1.2s. Entre 1.2 et 1.6s, l'irradiation est de $800\text{w}/\text{m}^2$. Dans le dernier intervalle entre 1.6 et 2 s on fixe l'irradiation à une valeur de $1000\text{w}/\text{m}^2$

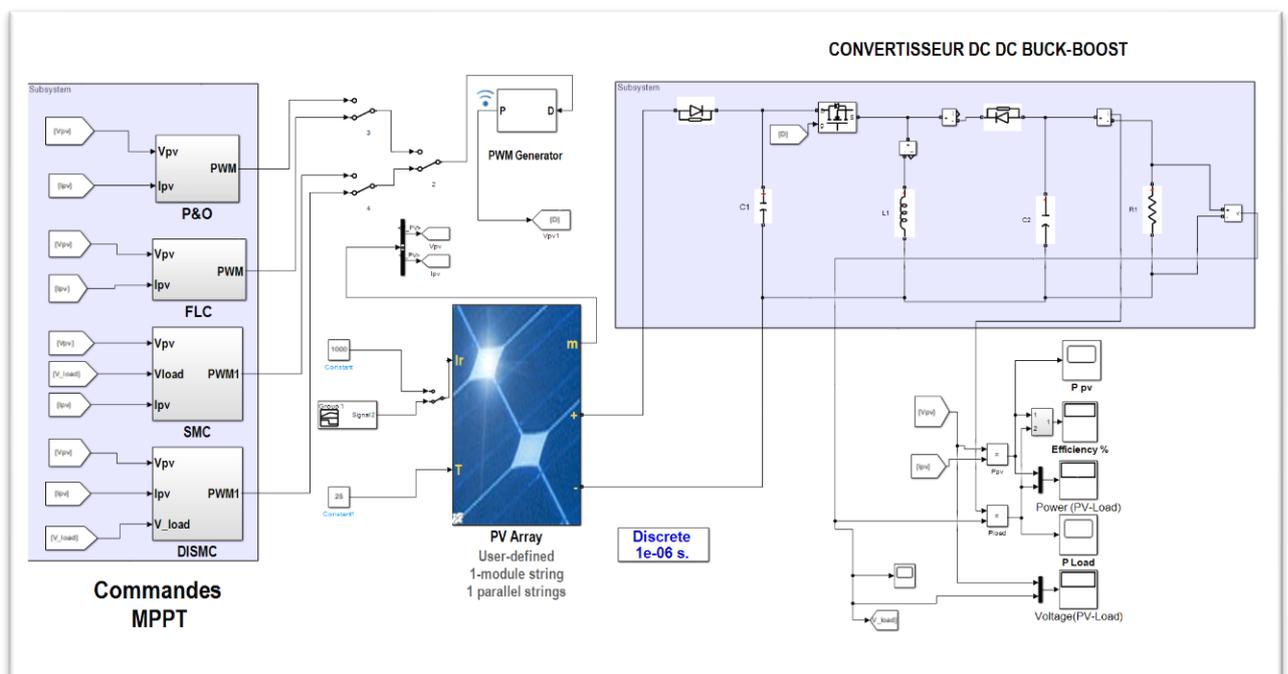


Figure IV. 1 Schéma bloc Simulink du système global.

IV.2 Analyse des résultats :

Deux essais ont été développés. Le premier est relatif aux conditions nominales avec une irradiation fixe. Le deuxième est basé sur la variation d'irradiation dans des intervalle différents. Pour premier cas nous allons présenter la puissance de sortie et la tension de sortie afin de vérifier le fonctionnement du hacheur pour extraire le maximum de puissance. En dernier, et pour les deux essais, on va regrouper les quatre MPPT sur une seule figure pour pouvoir comparer leurs performances.

IV.2.1 MPPT avec irradiation fixe

Les figure IV.2, IV.3, IV.4 et IV.5 représentent respectivement la tension de sortie du convertisseur DC-DC et la puissance de sortie pour les MPPT P&O, floue, SMC et DISMC pour les conditions de fonctionnement nominales à savoir une température de 25°C et une irradiation de 1000W/m². Les points suivants ont été remarqués après analyse des résultats :

P&O (Perturb and Observe) : Cette méthode présente des oscillations significatives pendant les transitions et une stabilité relative dans les phases stables.

SMC (Sliding Mode Control) : Cette méthode présente des oscillations similaires à P&O mais offre une réponse plus rapide dans certaines transitions.

FLC (Fuzzy Logic Control) : Cette méthode possède une performance intermédiaire avec des oscillations modérées.

DISMC (Double intégrale Sliding Mode Control) : Cette méthode offre la réponse la plus lisse avec moins d'oscillations, une meilleure robustesse et une transition plus rapide et stable.

On peut confirmer que la meilleure performance globale avec des transitions rapides, meilleur robuste et peu d'oscillations est obtenue avec la MPPT DISMC, tandis que les autres méthodes montrent diverses oscillations et temps de réponse plus lents.

Performance globale : La méthode DISMC (rouge) offre la meilleure performance en termes de rapidité de convergence et de stabilité, suivie par FLC (cyan), SMC (bleu), et enfin P&O (noir).

Rapidité de convergence : Toutes les méthodes finissent par converger vers la même valeur maximale de puissance, mais la rapidité de convergence varie, avec DISMC étant la plus rapide.

Stabilité : DISMC présente des oscillations minimales et une réponse très rapide, ce qui la rend supérieure pour les applications nécessitant une puissance de sortie stable et rapide.

La figure IV.6 montre l'efficacité comparative de quatre algorithmes de contrôle en termes de réponse dynamique et de stabilité pour la tension de sortie.

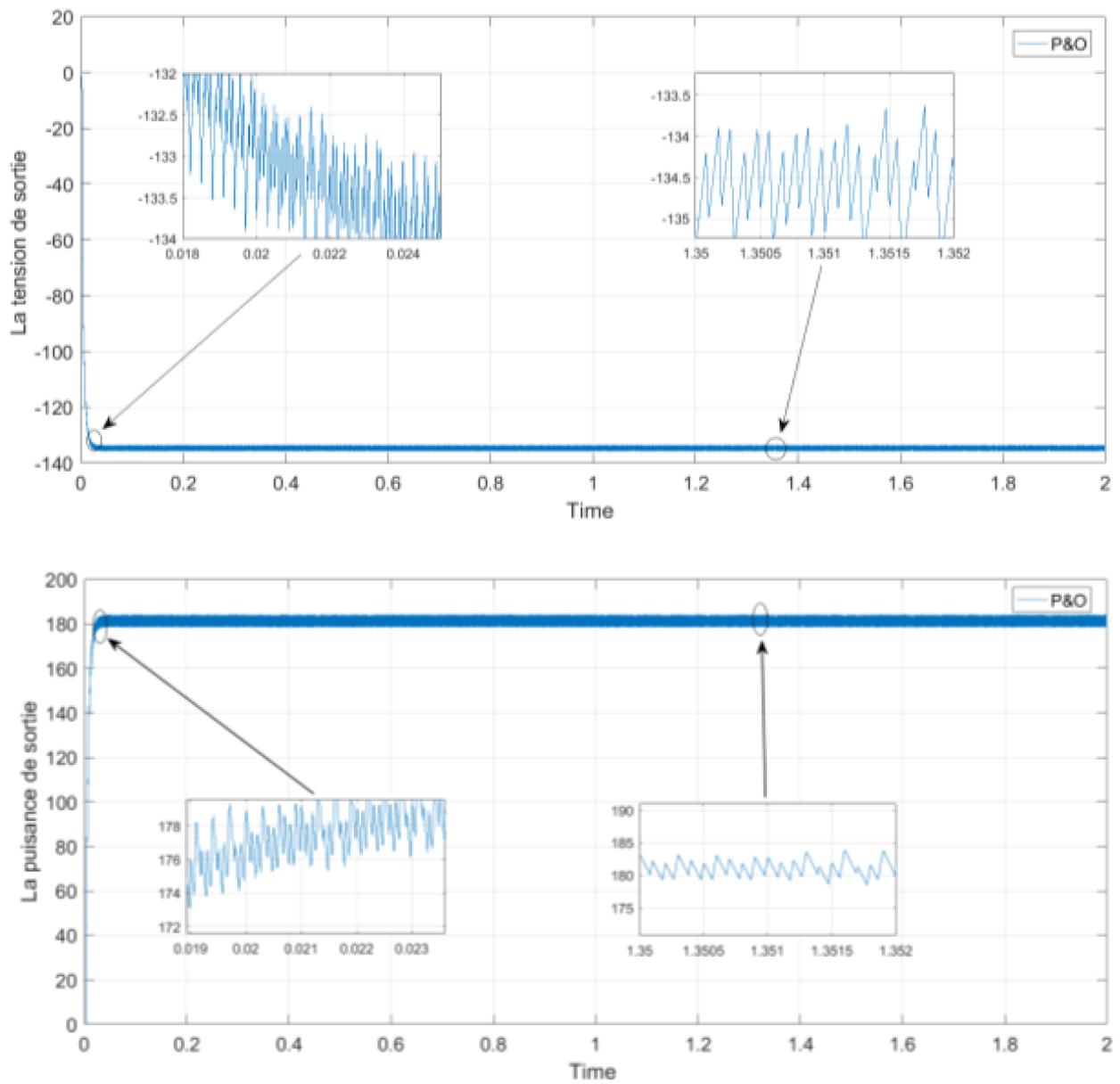


Figure IV. 2 Tension de sortie et puissance de sortie pour une MPPT P&O avec une irradiation fixe

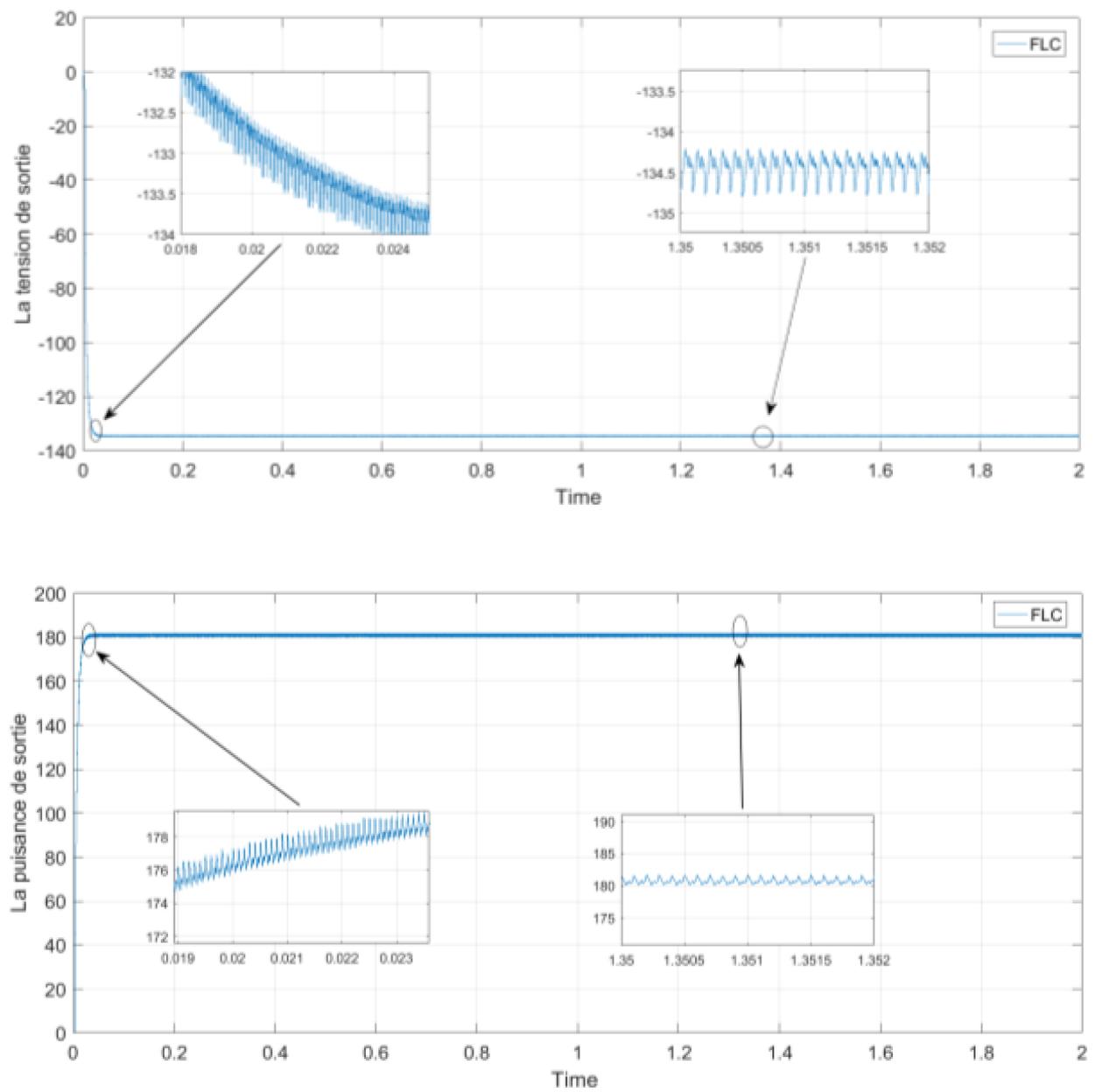


Figure IV. 3 Tension de sortie et puissance de sortie pour une MPPT floue avec une irradiation fixe

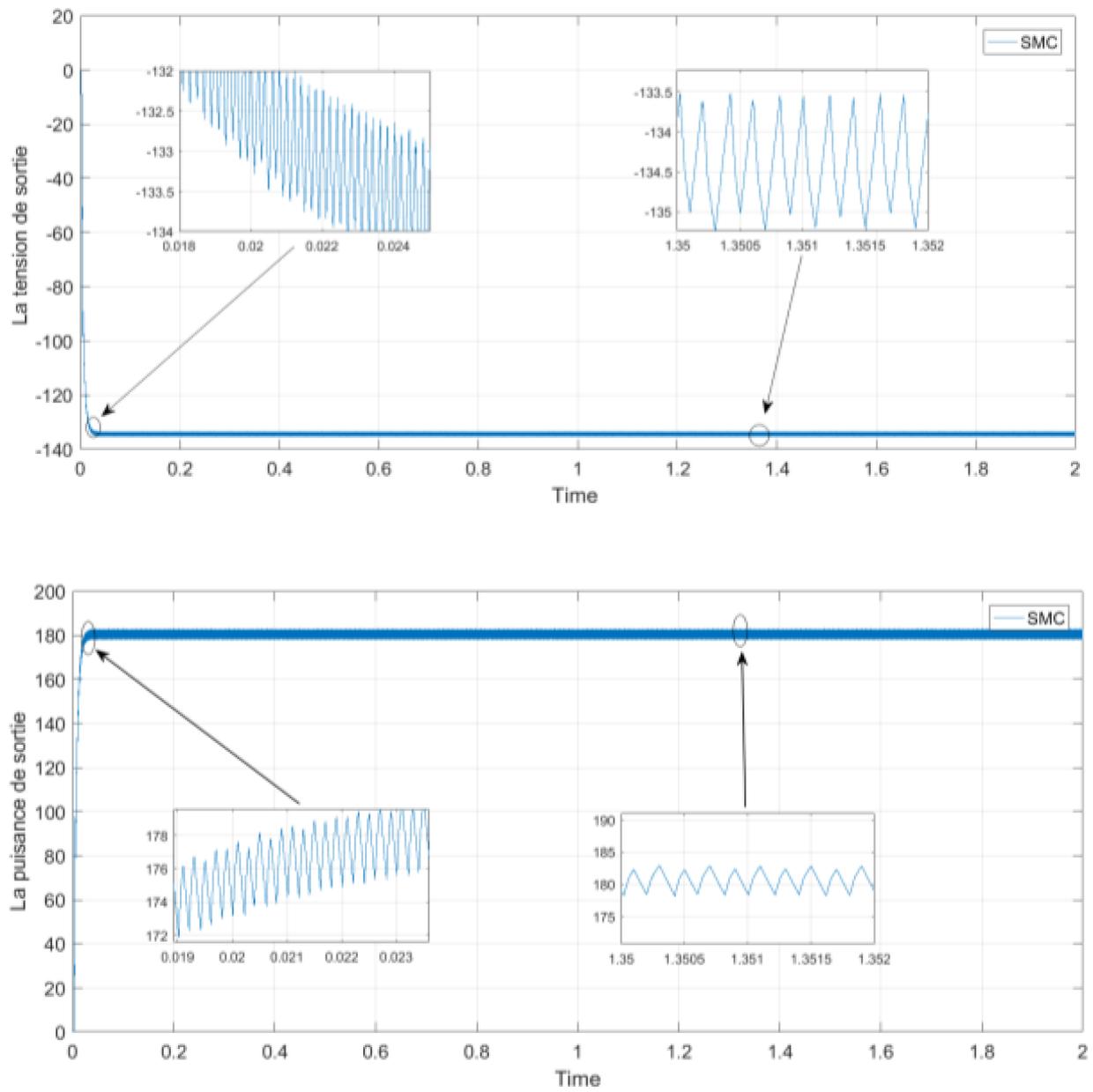


Figure IV. 4 Tension de sortie et puissance de sortie pour une MPPT SMC avec une irradiation fixe

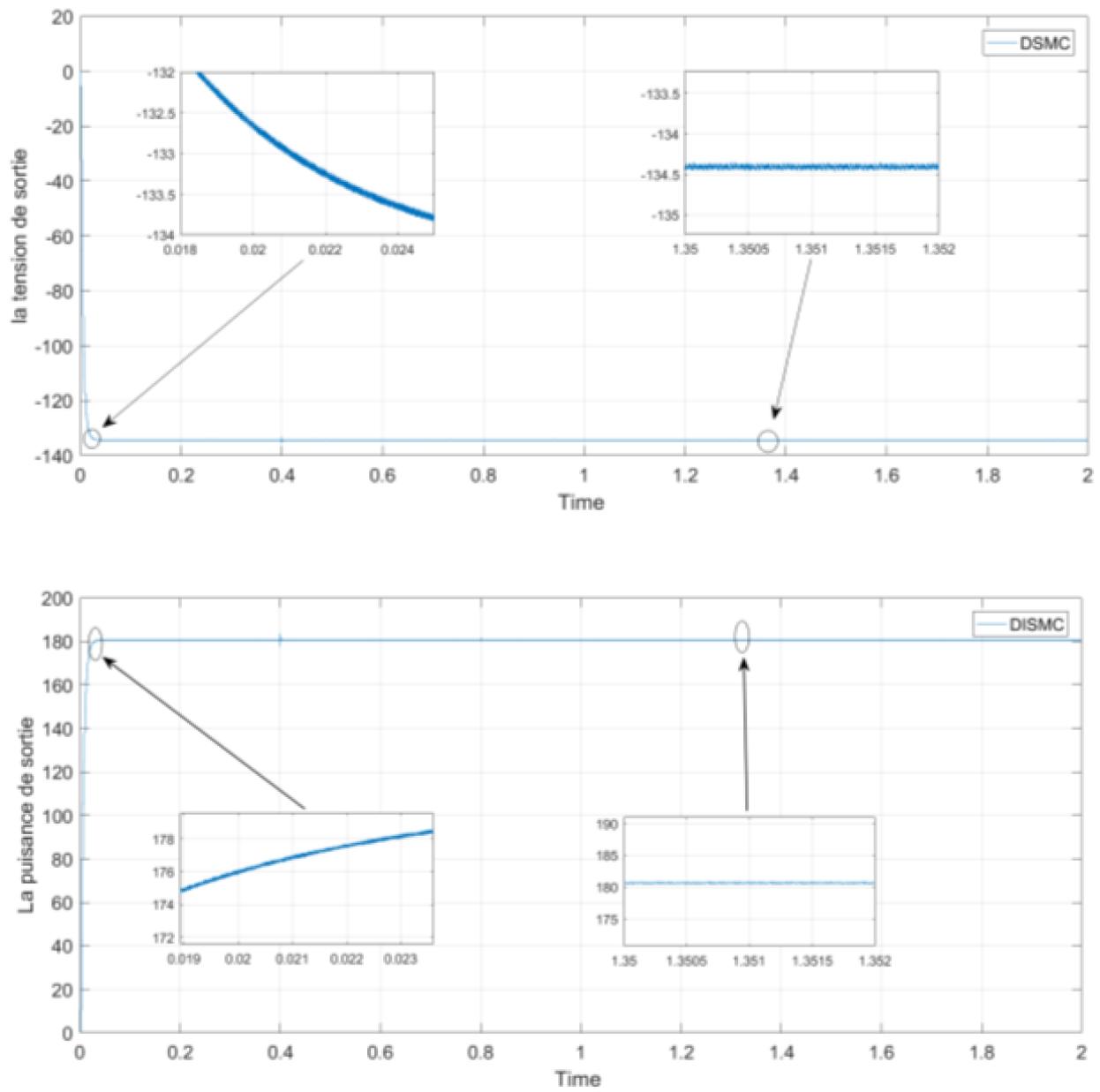


Figure IV. 5 Tension de sortie et puissance de sortie pour une MPPT DISMC avec une irradiation fixe

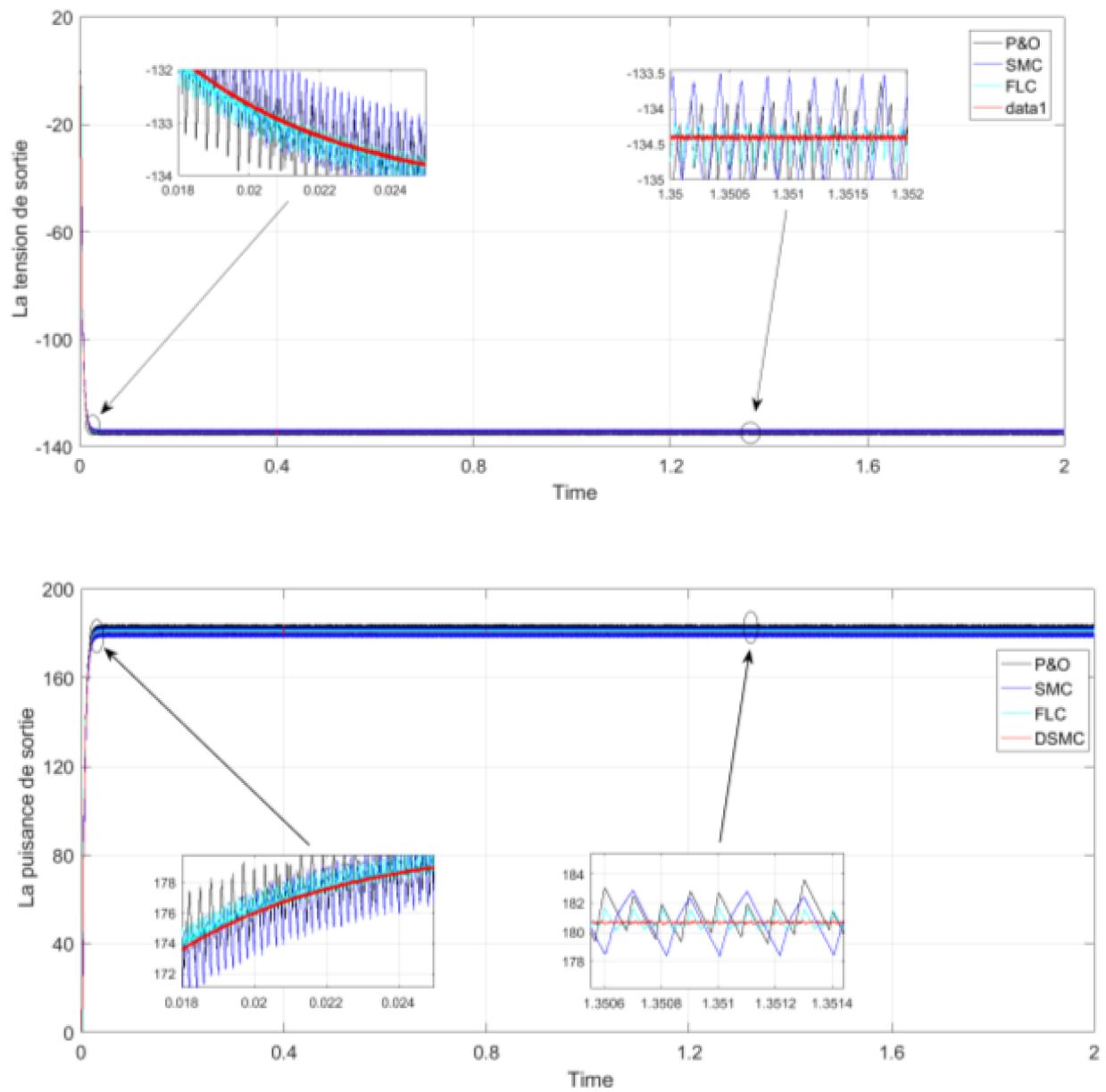


Figure IV. 6 Tension de sortie et puissance de sortie pour les quatre MPPT proposées avec une irradiation fixe

IV.2.2 MPPT avec irradiation variable

Pour cet essai les quatre MPPT ont été regroupés sur la figure IV.7.

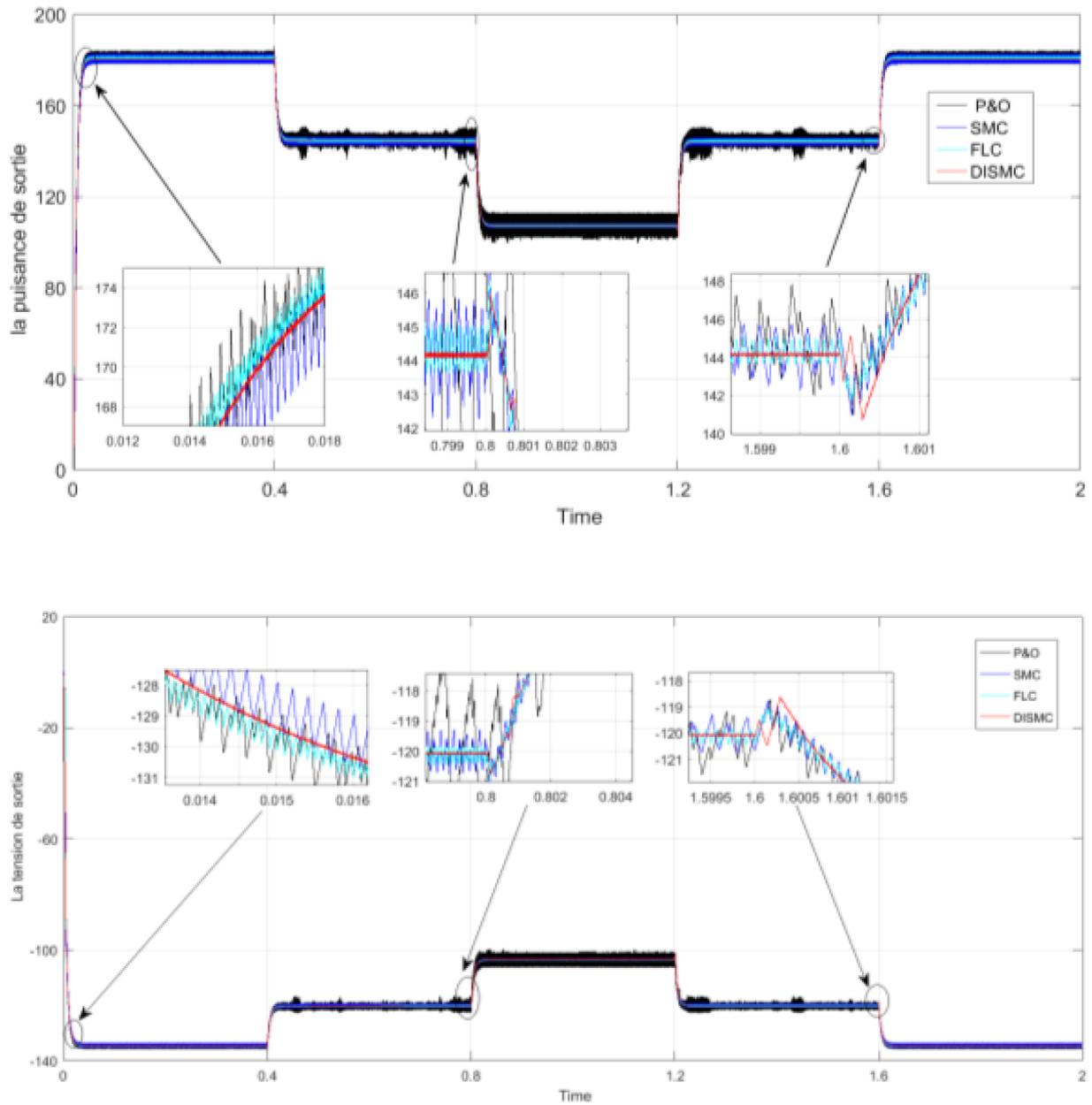


Figure IV. 7 Tension de sortie et puissance de sortie pour les quatre MPPT proposées avec une irradiation variable.

A partir de la figure IV.7, on constate clairement que la méthode DISMC est la plus efficace parmi les quatre pour maximiser la puissance de sortie tout en minimisant les oscillations. Le contrôle DISMC offrent une meilleure performance en termes de réduction des oscillations à long terme comparés à FLC P&O et SMC.

La stabilité finale des tensions est atteinte plus rapidement par le contrôle DISMC.

Le contrôle DISMC est plus efficaces pour réduire les oscillations et atteindre une stabilité à long terme plus rapidement que les contrôle P&O et SMC.

Tableau IV 1 Comparaison des puissances de sortie et des tension avec irradiation fixe.

| Les contrôles | La puissance de sortie | La tension de sortie. |
|----------------------|-------------------------------|------------------------------|
| P&O | 181.9 | -134.9 |
| SMC | 179 | -133.8 |
| FLC | 181.5 | -134.7 |
| DISMC | 180.6 | -134.4 |

IV.3 Conclusion

Les essais de simulations ont été développés en premier temps dans des conditions nominales proches aux conditions météorologiques normales les valeurs utilisées pour l'irradiation fixe de 1000w/m^2 et une température de 25°c . La MPPT proposées ont été réalisées avec succès et on pouvait remarquer clairement la supériorité et l'efficacité du contrôle par mode glissant

Pour vérifier l'efficacité de ces algorithmes dans des condition de fonctionnement variable ce qui est proche de la réalité, les essais ont été réalisés avec succès et il a été confirmé que la MPPT DISMC donne les meilleures performances.

Conclusion Générale

Dans cette étude, les différents aspects des systèmes photovoltaïques (PV) sont évoqués. Un état de l'art sur la commande des systèmes PV est établi. L'historique d'énergie photovoltaïque, le rayonnement solaire et le potentiel solaire en Algérie, l'effet photovoltaïque ainsi que le fonctionnement de la cellule photovoltaïque ont été présentés. Nous avons examiné les différentes technologies de cellules solaires, les configurations des systèmes PV, ainsi que les méthodes de conversion et de gestion de l'énergie

La mise en équations des systèmes PV associés aux convertisseurs DC-DC est effectuée. En effet, Nous avons élaboré des modèles mathématiques du générateur PV, tout en tenant en tenant compte des paramètres environnementaux tels que l'irradiation solaire et la température. Les différentes topologies de convertisseurs DC-DC ont été analysées. En effet, pour la modélisation du convertisseurs DC-DC Buck-Boost, le modèle d'état est écrit. La fonction de transfert entre la tension de sortie de l'hacheur et le rapport cyclique est ensuite calculée.

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), qui est essentielle pour maximiser la production d'énergie des systèmes PV, est étudiée. Nous avons passé en revue les différentes techniques de commande MPPT, allant des méthodes classiques comme P&O (Perturb and Observe) et SMC(Sliding mode control) aux approches plus avancées basées sur logique floue control FLC. Cependant, l'analyse des techniques de contrôle MPPT existantes dans la littérature est faite. . Une comparaison des performances de ces techniques a été réalisée pour évaluer leur efficacité et leur robustesse dans des conditions variées d'irradiation solaire.

Le contrôle par mode glissement sous deux versions sont calculées. Dans un premier temps la structure du contrôleur classique par mode de glissement est calculée. Ensuite, une version avancée est développée. Elle est basée l'introduction d'une double intégration. Cette nouvelle structure a montré sa supériorité par rapport à la version classique.

Enfin, le quatrième chapitre présent les résultats des simulations réalisées sous MATLAB/Simulink. Les simulations ont permis de valider les modèles développés et d'évaluer les performances des différentes techniques de commande MPPT dans des conditions d'irradiation solaire uniforme et variable. Les résultats obtenus ont démontré l'efficacité des techniques avancées de commande MPPT pour optimiser la production d'énergie, même en présence de fluctuations rapides de l'irradiation solaire.

En conclusion, cette thèse a apporté une contribution modeste à la compréhension et à l'amélioration des systèmes photovoltaïques. Les résultats des simulations ont confirmé l'efficacité et la supériorité de la commande SMC et en particulier la DISMC pour maximiser la production des systèmes photovoltaïques.

En perspective les points suivants pourront être proposés :

La structure DISMC peut être étendue pour une connexion au réseau industriel,

La même structure peut être validée et testée dans le cas de présence de défauts dans les panneaux ou dans le cas de présence de l'ombrage partiel,

Une validation expérimentale pour valider les approches développées.

Annexes

Hacheur Buck Boost utilisé

Nous avons utilisé les paramètres du hacheur Buck Boost suivantes dans le modèle Simulink [32]:

| Paramètres | Valeurs |
|--|--------------|
| Fréquence de commutation f | 10 KHz |
| Capacité à l'entrée du Hacheur Buck Boost $C1$ | 200 μ F |
| Capacité $C2$ | 100 μ F |
| Inductance L | 3.5 mH |
| Resistance R | 100 Ω |

Le panneau PV.

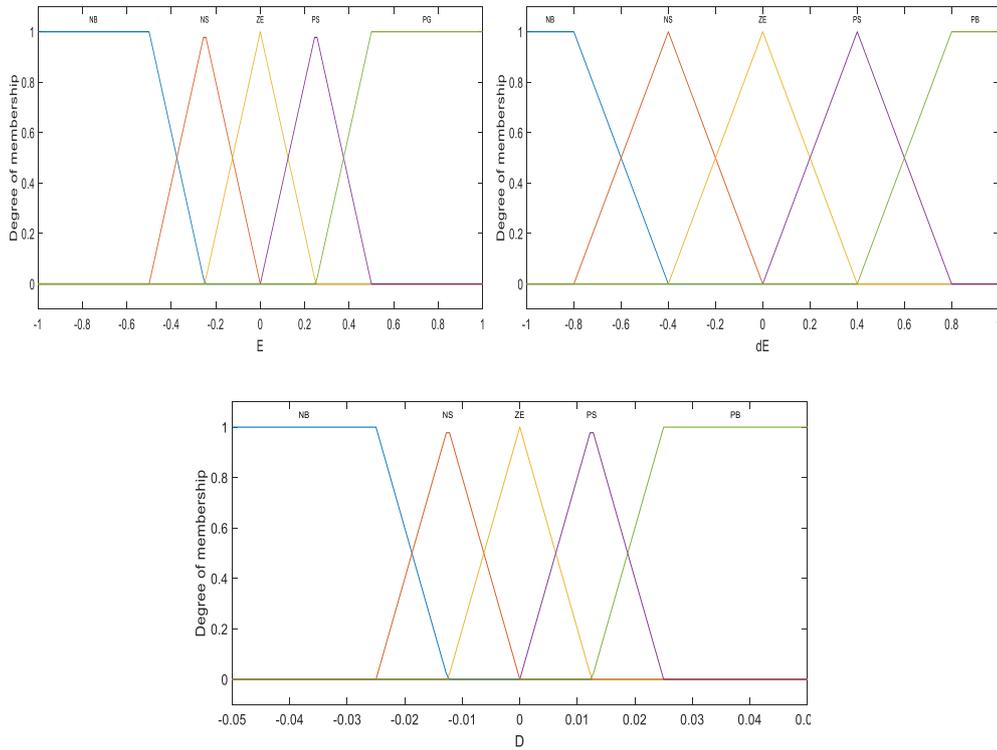
Nous avons utilisé un panneau photovoltaïque qui présente les caractéristiques suivantes.

| Paramètres | Valeurs |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| Le module | Définit dans la bibliothèque Matlab |
| Puissance maximale | 200.22 |
| Tension en circuit ouvert | 57.6 |
| Tension à puissance maximale | 47 |
| Le nombre de cellules de module | 60 |
| Courant de court-circuit | 4.6 |
| Current at maximum power point | 4.26 |

Schéma blocs Simulink Pour Les MPPT proposées

| | |
|----------------|--|
| P&O | |
| Floue | |
| SMC | |
| DISMC | |

Entrées sortie et règles du FLC



| <div style="display: inline-block; transform: rotate(-45deg);"> E dE </div> | NB | NS | ZE | PS | PG |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| NB | NS | ZE | PG | PG | PG |
| NS | ZE | ZE | PG | PG | PG |
| ZE | PS | ZE | ZE | ZE | NS |
| PS | ZE | NS | NS | ZE | ZE |
| PG | NB | NB | NB | ZE | ZE |

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

| | |
|-----|---|
| [1] | Z. Bendjellouli, « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire », Mémoire de magister. Université de Bechar, 2009, Consulté le: 8 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://scholar.google.com/scholar?cluster=11074175581405471808&hl=en&oi=scholarr |
| [2] | M. T. Dang, « Elaboration de cellules solaires photovoltaïques à base de polymères conjugués : études des systèmes réticulables », These de doctorat, Bordeaux 1, 2009. Consulté le: 11 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://theses.fr/2009BOR13892 |
| [3] | S. Abouda, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques : application aux systèmes de pompes. », These de doctorat, Reims, 2015. Consulté le: 8 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://theses.fr/2015REIMS005 |
| [4] | S. Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». |
| [5] | O. Boukli-Hacene, « Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour meilleure gestion énergétique », Thesis, 2011. Consulté le: 8 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: http://dspace1.univ-tlemcen.dz/handle/112/1165 |
| [6] | « 404 ». Consulté le: 11 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.ef4.be/fr/404.html?vID= |
| [7] | K. Sabiha, I. Djamel, et M. Khddoudja, « Simulation d'un émulateur d'un panneau photovoltaïque en utilisant un hacheur Buck sous Matlab-SIMULINK. », Université Mouloud Mammeri, 2012. Consulté le: 8 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://dspace.ummo.dz/handle/ummo/9137 |
| [8] | A. Diche, K. Ghedamsi, K. Djamila, et O. Fetta, « Commande d'un Système de Pompage PPhaorttoievoII:taïque ». |

Références bibliographiques

| | |
|-------------|---|
| [9] | K. Helali, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative », Université Mouloud Mammeri, 2012. Consulté le: 11 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://dspace.ummo.dz/handle/ummo/607 |
| [10] | « 3 -Modèle électrique équivalent [2] Download Scientific Diagram ». Consulté le: 11 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/figure/Modele-electrique-equivalent-2_fig3_363474843 |
| [11] | C. Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », phdthesis, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2008. Consulté le: 8 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://theses.hal.science/tel-00357487 |
| [12] | B. Messaoud et L. M. Islam, « Commande par mode glissant des systèmes photovoltaïques ». |
| [13] | A. Belkaid, « onception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome », Thesis, 2018. Consulté le: 8 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: http://dspace.univ-setif.dz:8888/jspui/handle/123456789/1704 |
| [14] | E. Kechar, E. Azzag, et I. Toua, « Influence des rayonnements solaires sur le rendement des panneaux photovoltaïques », <i>International Journal of Scientific Research</i> , 2015. |
| [15] | O. Mehdi, T. Anis, D. M. S. Meridjet, et D. D. Djalel, « Etude et Caractérisation sous Matlab/Simulink d'un Générateur Photovoltaïque », 2012. |
| [16] | M. Abdelmoula, « Phénomènes non linéaires et chaos dans les systèmes d'énergie renouvelable – Application à une installation photovoltaïque », These de doctorat, Reims, 2017. Consulté le: 8 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://theses.fr/2017REIMS001 |
| [17] | G. Amar, M. Abderrahmane, et K. Mohamed, « La Commande MPPT Basée sur les Algorithmes Intelligents Destinée aux Applications Photovoltaïques : Etude comparative et implémentation sur FPGA », 2016. |

Références bibliographiques

| | |
|-------------|--|
| [18] | « Hacheurs ». Consulté le: 19 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://sitelec.org/cours/bonnet/hacheurs.htm |
| [19] | « Buck-Boost Converters ». Consulté le: 19 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/power-electronics/dc-dc-converters/buck-boost-converters |
| [20] | F. Chekired, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA », Thesis, Ecole nationale polytechnique, 2008. Consulté le: 8 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: http://repository.enp.edu.dz/jspui/handle/123456789/4003 |
| [21] | O. N. T. Kebir et G. Filiz, « Commande des hacheurs MPPT par la logique floue », Thesis, Ecole nationale polytechnique, 2006. Consulté le: 8 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: http://repository.enp.edu.dz/jspui/handle/123456789/3845 |
| [22] | « Fig 6: chaine de conversion d'énergie solaire Le convertisseur statique... », ResearchGate. Consulté le: 19 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/figure/chaine-de-conversion-denergie-solaire-Le-convertisseur-statique-continu-continu-DC-DC_fig1_338038124 |
| [23] | M. M. Tadjine, M. S. Taheri, et M. S. Berkane, « Étude des commandes MPPT d'un système Photovoltaïque », 2020 |
| [24] | T. Esum et P. L. Chapman, « Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques », <i>IEEE Transactions on Energy Conversion</i> , vol. 22, n° 2, p. 439-449, juin 2007, doi: 10.1109/TEC.2006.874230. |
| [25] | A. Mohapatra, B. Nayak, P. Das, et K. B. Mohanty, « A review on MPPT techniques of PV system under partial shading condition », <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , vol. 80, p. 854-867, déc. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.083. |
| [26] | M. A. Eltawil et Z. Zhao, « MPPT techniques for photovoltaic applications », <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , vol. 25, p. 793-813, sept. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.05.022. |

Références bibliographiques

| | |
|-------------|---|
| [27] | H. Abbes, H. Abid, K. Loukil, A. Toumi, et M. Abid, « Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque », <i>J. Ren. Energies</i> , vol. 17, n° 3, oct. 2023, doi: 10.54966/jreen.v17i3.458. |
| [28] | L. L. Jiang, « Modeling and optimization of photovoltaic systems under partially shaded and rapidly changing conditions », 2014. doi: 10.32657/10356/62198. |
| [29] | « réalisation d'un système photovoltaïque avec une commande mppt - International / Français », Arduino Forum. Consulté le: 19 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://forum.arduino.cc/t/realisation-dun-systeme-photovoltaïque-avec-une-commande-mppt/517694 |
| [30] | H. Chaieb et A. Sakly, « Comparison between P&O and P.S.O methods based MPPT algorithm for photovoltaic systems », <i>2015 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)</i> , p. 694-699, déc. 2015, doi: 10.1109/STA.2015.7505205. |
| [31] | « Fig. 9: Schéma synoptique d'un régulateur -contrôleur flou 4.1... », ResearchGate. Consulté le: 19 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/figure/Schema-synoptique-dun-regulateur-contrôleur-flou-41-Poursuite-du-point-de-puissance_fig4_258049801 |
| [32] | « Chapitre III Commande par mode glissant d'un drone quadrotor ». |
| [33] | C. Edwards, E. Fossas Colet, et L. Fridman, Éd., <i>Advances in Variable Structure and Sliding Mode Control</i> , vol. 334. in <i>Lecture Notes in Control and Information Science</i> , vol. 334. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. doi: 10.1007/11612735. |
| [34] | J.-J. E. Slotine et W. Li, <i>Applied nonlinear control</i> . Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1991. |
| [35] | V. Utkin, « Variable structure systems with sliding modes », <i>IEEE Transactions on Automatic Control</i> , vol. 22, n° 2, p. 212-222, avr. 1977, doi: 10.1109/TAC.1977.1101446. |

ملخص

يركز هذا العمل على التحكم في المحول عن طريق الوضع المنزلق لمحول Buck-Boost المدمج في النظام الكهروضوئي. لكي يعمل هذا النظام بأقصى طاقته، ارتبطت مرحلة التكيف بشكل أساسي بخوارزميات MPPT P&O وخوارزميات MPPT. الغامضة لمقارنتها مع MPPT استنادًا إلى الوضع المنزلق SMC و DISMC المزدوج المتكامل الذي يتمتع بميزة التكيف مع الأنظمة غير الخطية. تم تطوير النمذجة والتحسين من خلال البحث في MPP بالإضافة إلى المحاكاة في بيئة MATTLAB/SUMILINK. تم إجراء اختبارات المحاكاة لـ MPPTs الأربعة. أكدت نتائج المحاكاة تفوق التحكم في الوضع المنزلق وخاصة DISMC.

الكلمات الرئيسية: النظام الكهروضوئي، P&O، MPPT غامض، Buck-Boost، SMC، DISMC

Résumé

Ce travail s'intéresse à la commande d'un convertisseur par mode glissant d'un convertisseur Buck-Boost intégré dans un système photovoltaïque. Pour que ce système fonctionne à sa puissance maximale, un étage d'adaptation a été associé principalement à des algorithmes MPPT P&O et MPPT flou pour être comparée à des MPPT basée sur le mode glissant SMC et un Double intégrale DISMC qui a l'avantage de s'adapter aux systèmes non linéaires. La modélisation l'optimisation par la recherche du MPP ainsi que la simulation ont été développés sous l'environnement MATTLAB/SUMILINK. Les essais de simulation ont été réalisés pour les quatre MPPT. Les résultats de simulations ont confirmé la supériorité de la commande par mode glissant et en particulier la DISMC.

Mots clés : Système PV, P&O, MPPT flou, Buck-Boost, SMC, DISMC

Abstract

This work focuses on the control of a converter by sliding mode of a Buck-Boost converter integrated in a photovoltaic system. For this system to operate at its maximum power, an adaptation stage was associated mainly with MPPT P&O and fuzzy MPPT algorithms to be compared to MPPT based on the sliding mode SMC and a Double integral DISMC which has the advantage of adapt to non-linear systems. The modeling, optimization by research of the MPP as well as the simulation were developed in the MATTLAB/SUMILINK environment. Simulation tests were carried out for the four MPPTs. The simulation results confirmed the superiority of sliding mode control and in particular DISMC.

Keywords: PV system, P&O, fuzzy MPPT, Buck-Boost, SMC, DISMC.