

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE
N° :



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
FILIERE : AUTOMATIQUE
OPTION : AUTOMATIQUE ET SYSTEMES

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique
Par : Sebaa Abdelkader
Zidelkheir Radhwane

Intitulé

Commande par mode glissant des systèmes photovoltaïques

Soutenu le 12/06/2024 , devant le jury composé de :

Fayssal Ouagueni	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Président
Sabir Messalti	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Rapporteur
Assam Boudia	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Rapporteur
Abdelghafour Herizi	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Examineur

Année universitaire : 2023/2024



Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mon cher père et ma chère mère ;

A ma chère sœur ;

A mes chers frères ;

A toute ma famille ;

A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.

RADHWANE

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis, à toi mon père.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.

- *A ma chère sœur ;*
- *A mes chers frères ;*
- *A toute ma famille ;*
- *A mes collègues des études.*

Abdelkader

Remerciements

Tout d'abord, nous exprimons notre gratitude envers Dieu, le tout-puissant, pour nous avoir accordé la force et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail .

Nous tenons aussi à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Monsieur **Dr Boudia Assam**, pour la confiance et l'intérêt qu'il a témoigné, pour ses conseils précieux, ses remarques pertinentes et pour le bon déroulement de ce mémoire,

A la suite Nous tenons à remercier vivement monsieur **Pr. MESSALTI Sabir** qui a fourni des efforts énormes, par ses Informations liées à la recherche scientifique, ses conseils et ses encouragements,

Nous souhaitons également exprimer notre gratitude envers les membres du jury pour leur honneur d'accepter d'évaluer ce travail.

Nous tenons à remercier les responsables et tout le personnel du département génie électrique de l'UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA pour les facilités qu'ils nous ont accordés pour terminer ce travail,

Enfin, nous exprimons notre gratitude envers tous ceux qui ont apporté leur contribution de près ou de loin à la création de ce petit mémoire, notamment les professeurs du département de génie électrique.

Table des Matières

Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Historique	3
I.3. Energies renouvelable.....	4
I.4. Energies solaire.....	4
I.4.1. Energies thermique	5
I.4.2. Energies photovoltaïques	5
I.4.3. Avantages et inconvénients de l'énergie PV	6
I.5. Systèmes photovoltaïque	6
I.6. Rayonnement solaire	6
I.7. Effet PV	7
I.8. Cellule PV.....	7
I.8.1. Principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque.....	7
I.8.2. Différent type de cellule photovoltaïque	8
I.8.3. Caractéristique électrique de la cellule photovoltaïque.....	9
I.8.4. Caractéristiques des modules photovoltaïques Siemens	9
I.8.5. Caractéristique du Module photovoltaïque Siemens utilisé	9
I.9. Module PV.....	11
I.9.1. Module mathématique d'un module PV	11
I.9.2. Paramètres d'un module PV.....	12
I.9.3. Effet de la température et l'éclairement sur le comportement du module PV....	12
I.9.3.1. Effet de la température	12
I.9.3.2. Effet de l'éclairement	14
I.9.4. Effet de l'association en série et en parallèle des cellules PV	15
I.9.4.1. Effet de la corrélation en série des cellules PV	15
I.9.4.2. Effet de la corrélation en parallèle des cellules PV	15

I.9.4.3. Effet de la corrélation mixte (Série + Parallèle) des cellules PV	16
I.10. Générateur PV	16
I.11. Modélisation d'un système PV	17
I.11.1. Modèle mathématique d'un PV	17
I.11.2. Modélisation simplifiée de la cellule PV « seule diode »	17
I.12. Conclusion	19

Chapitre II : la commande MPPT des systèmes photovoltaïques

II.1. Introduction	19
II.2. Convertisseurs continu – continu (DC/DC)	19
II.2.1. Le convertisseur BOOST	20
II.2.2. Séquences de fonctionnement.....	20
a. Première séquence [0 à αT_c] interrupteur fermé (état passant)	20
b. Deuxième séquence [αT_c à T_c] interrupteur ouvert (état bloqué)	21
II.3. Avantage de convertisseur BOOST	21
II.4. Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque	21
II.5. Poursuite du point de puissance maximale (PPPM ou MPPT)	22
II.5.1. La Commande MPPT	22
II.5.2. Principe de fonctionnement de MPPT	23
II.6. Les algorithmes de MPPT	24
II.7. Classification des techniques MPPT	24
a. MPPT indirectes (les méthodes indirectes)	24
b. MPPT directe (les méthodes directes)	25
II.8. Les commandes MPPT à algorithmes performantes.....	25
II.8.1. Commande « Perturbation et Observation » (P&O)	25
a. Principe de la Méthode P&O	25
b. Algorithme de la Méthode P&O	26
II.9. Simulation de système photovoltaïque avec la commande P&O.....	27
II.10. Conclusion	32

Chapitre III : Commande par mode glissant d'un système PV

III.1. : Introduction	33
III.2. : systèmes à structures variables	33
III.3. : Théorie des modes glissants	33
III.4. : Principe de la commande par mode glissant	34
III.4.1. : Mode de convergence (MC)	34
III.4.2. : Mode de glissement (MG)	34
III.4.3. : La fonction de Lyapunov	35
III.4.4. : Objectif de la commande par mode glissant	36
III.5. : Conception de control par mode de glissement.....	36
III.5.1. : Choix de la surface glissement	37
III.5.2. : Conditions d'existence du glissement	38
III.5.3. : Détermination de la loi de commande par la méthode u_{eq}.....	38
III.5.3.1. : Commande équivalente u_{eq}	39
III.5.3.2. : Commande discontinue u_n	40
III.6. : Avantages et inconvénients de la commande par mode de glissement	41
III.7. La commande MPPT par mode de glissant pour les systèmes photovoltaïques	42
III.7.1. : Commande par mode de glissement avec surface impose.....	43
III.7.2. : Commande par mode de glissement avec surface Slotine	43
III.8. : Résultat de simulation d'un système PV	45
III.8.1. : Simulation de MPPT en conditions constantes	46
III.8.2. : Simulation de MPPT en conditions variables	48
III .9. : Conclusion.....	49
Conclusion Générale.....	50

Liste des Figures

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Figure I.1: L'utilisation mondiale de l'énergie photovoltaïque	4
Figure I.2 : Système solaire photovoltaïque	5
Figure I.3 : principe de transformation de l'énergie solaire à l'énergie électrique	5
Figure I.4 : Répartition spectrale de l'irradiation solaire	6
Figure I.5 : Mécanisme de la conversion d'énergie lumineuse en électricité par effet Photovoltaïque	8
Figure I.6 : Schéma complet d'un système photovoltaïque connecté au réseau	10
Figure I.7 : Panneau photovoltaïque	11
Figure I.8 : Influence de la température sur les performances des générateurs Photovoltaïque.....	13
Figure I.9 : Influence de l'éclairement sur les performances des générateur photovoltaïques	14
Figure I.10 : Circuit de base de l'Association de NS modules solaires en série	15
Figure I.11 : Circuit de base de l'Association de NP modules solaires en parallèle	16
Figure I.12 : Circuit de base de l'Association mixte (hybride) $N_s \times N_p$ modules solaire	16
Figure I.13 : Schéma général d'un générateur photovoltaïque	17
Figure I.14: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque	18

Chapitre II : Commande MPPT des système photovoltaïques

Figure II.1 : Schéma du convertisseur DC-DC boost	20
Figure II.2: La chaine de conversion photovoltaïque commande par une MPPT	22
Figure II.3 : La principe de la commande MPPT	23
Figure II.4: Principe de fonctionnement de l'algorithme P&O.....	26
Figure II.5 : Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O	27
Figure II.6: Simulation de la commande MPPT à base de la méthode P&O	28

Figure II.7 : Analyse des tensions dans des conditions stables ($G=1000\text{W/m}^2$, $T=25\text{C}^\circ$).....	29
Figure II.8 : Analyse des tensions dans des conditions stables ($G=1000\text{W/m}^2$, $T=25\text{C}^\circ$).....	29
Figure II.9 : Analyse des courbes de puissance pour la commande MPPT en utilisant la méthode P&O avec un éclairement variable.	30
Figure II.10 : Résultats de simulation des courbes de puissance pour la commande MPPT à base de la méthode P&O avec température variable	31

Chapitre III : Commande par mode glissant d'un système PV

Figure III.1 : Principe de la commande par mode glissant	35
Figure III.2 : Commande équivalente	39
Figure III.3 : Représentation graphique de la fonction « signe »	40
Figure III.4 : Système photovoltaïque : structure globale	42
Figure III.5 : Installation globale d'un système solaire photovoltaïque avec un contrôle MPPT	45
Figure III.6 : Résultat de simulation des puissances sous conditions stables ($G= 1000\text{W} / \text{m}^2$, $T=25\text{C}^\circ$)	46
Figure III.7 : Résultat de simulation des tensions sous conditions stables ($G= 1000\text{W} / \text{m}^2$, $T=25\text{C}^\circ$)	47
Figure III.8: Courbes de puissance simulées sous éclairement variable	48
Figure III.9: Courbes de puissance simulées sous température variable.....	49

Liste des Tableaux

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Tableau I.1 : Caractéristique électrique d'un module photovoltaïque SP60 éventuelle 10

Chapitre II : Commande MPPT des système photovoltaïques

Tableau II.1: Paramètres du hacheur Boost 28

Tableau II. 2 : Performance des MPPT avec l'éclairement variable 31

Tableau II. 3 : Performance des MPPT avec température variable 32

Chapitre III : Commande par mode glissant d'un système PV

Tableau III.1 : Paramètres du hacheur Boost et Mode glissant..... 45

Liste des abréviations

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur Photovoltaïque.

AC : Courant Alternatif (Alternative Current).

DC : Courant Continu.

DC/DC : Hacheur Courant Continu/Courant Continu.

MPPT : Poursuite du Point de Puissance Maximale, 'Maximum Power Point Tracking'.

PPM : Point de Puissance Maximale.

P&O : Perturb And Observe (Perturbation et Observation).

SMC : algorithme de contrôle en anglais "sliding mode control"

MOSFET : Transistors à effet de champ d'oxyde de métal.

FF : Facteur de forme

MC : Mode de Convergence

MG : Mode de Glissement

Liste des symboles

R_p	:Résistance de shunt en parallèle (Ω).
R_s	:Résistance connectée en série (Ω).
I_{obsc}	:Densité de courant d'obscurité.
I_{ph}	:Densité de courante photo générée (A) .
I_{sat}	:Courant de saturation (A).
T_r	:Température de référence de la cellule.
G	:Irradiation .
α	:Coefficient de courant-température (A/°C).
β	:Tension à vide .
n	:Facteur de non-idéalité de la jonction diode:.
I_{cc}	:Le courant de court-circuit (A).
N_s	:Nombre de modules en série dans la chaîne photovoltaïque.
N_p	:Nombre de modules en parallèle dans la chaîne photovoltaïque.
I_{mpp}	:Courant au point de la puissance maximale.
V_{mpp}	:La tension de MPP.
P_{max}	:Puissance de sortie maximale d'un panneau PV (W)
V_{max}	:Tension de fonctionnement pour la puissance maximale (V).
I_{max}	:Courant de fonctionnement pour la puissance maximale (A)
V_{co}	:Tension de circuit ouvert du panneau (V).

I_{GPV}	:Le courant du GPV.
V_{GPV}	:La tension du générateur photovoltaïque.
I_{rs}	:Le courant de saturation inverse de la cellule photovoltaïque.
I_D	:Courant de la diode Schottky.
I_S	:Le courant de saturation de la diode.
A	:Constante d'idéalité de la diode
K	:Coefficient de Boltzman ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J / K}$).
q	:Charge électrique ($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$).
I	:Le courant délivré par le module.
I_{sc}	:Le courant de court-circuit à la température de référence et à l'irradiation
α	:Rapport cyclique
k_i	:Coefficient de température du courant de court-circuit.
V	:Tension de sortie de cellule (V).
S	:Surface de glissement.
$Sat(x)$	:Fonction saturation.
$Sign(x)$	:Fonction signe.
U	:Loi de commande.
u_{eq}	:Loi de commande équivalente.
u_n	:Loi de commande discontinue .
$V(x)$	:Fonction de Lyapunov.
Λ	:Constante positive qui interprète la bonde passante du contrôle désiré.
K_x	:Le signe du gain.

Introduction Général

Introduction Générale

En raison de l'inquiétude croissante concernant la consommation d'énergie ces dernières années, l'augmentation rapide de la demande est liée à l'industrialisation et au développement démographique [1]. Malgré cette demande croissante, aucune quantité d'énergie disponible ne peut être suffisante, et l'utilisation des combustibles fossiles est en déclin [2]. De plus, la diminution de l'offre de combustibles fossiles, l'augmentation du coût du pétrole et les problèmes environnementaux liés aux sources d'énergie traditionnelles, tels que le réchauffement climatique [3], nous tournons vers des sources d'énergie alternatives en raison des effets des émissions de carbone provenant de la combustion de combustibles fossiles et de la contamination de l'environnement [4]. Récemment, l'énergie produite à partir de sources propres, efficaces et non nocives vis-à-vis de l'environnement est devenue l'une des principales sources d'énergie des plus grandes difficultés rencontrées par les scientifiques et les ingénieurs [5-6]. Tenir compte de toutes les sources d'énergie renouvelable, l'énergie solaire est l'une de ces sources qui attirent davantage l'attention parce qu'elles offrent d'excellentes possibilités pour le groupe électrogène. Cependant, nous notons que les systèmes photovoltaïques sont fortement non linéaires en raison des changements de température affectant ainsi l'efficacité des installations photovoltaïques.

Un système photovoltaïque typique est constitué généralement d'un générateur PV composé par une série de modules solaires et d'un convertisseur statique DC-DC pour transformer la puissance fournie par la source PV à la charge. Ces conditions rendent difficile de prévoir la tension et le courant pour garantir une production maximale de puissance [7-8].

Le générateur photovoltaïque, qui est constitué de cellules photovoltaïques connectées, fonctionne dans une variété de tension et de courant, ne produisant sa puissance électrique maximale qu'en un seul point de fonctionnement spécifique sur la caractéristique courant-tension. Le point de puissance maximale (MPP) est désigné comme ce point. Afin d'optimiser la gestion de l'énergie disponible à la sortie du générateur photovoltaïque, les méthodes d'optimisation, de régulation et de contrôle permettent d'améliorer le rendement énergétique de l'ensemble de l'installation photovoltaïque en transférant la puissance électrique maximale du générateur photovoltaïque à la charge, et ce, peu importe les fluctuations de l'éclairage et de la température [9-10].

Le principe du suivi du point de puissance maximale (MPPT) repose sur l'ajustement automatique du rapport cyclique du convertisseur statique (CS) afin de maximiser en permanence la puissance générée par le générateur photovoltaïque (GPV). Parmi les méthodes classiques pour atteindre ce point de puissance maximale, on peut citer l'algorithme d'incrémentation de l'inductance et la méthode de perturbation et d'observation (P&O). Bien que cette dernière donne de bons résultats, elle présente quelques inconvénients, notamment son manque d'efficacité dans des conditions de faible irradiance solaire [11].

Les contrôleurs par mode glissant (SMC) sont plus simples à implémenter par rapport à d'autres types de contrôleurs non linéaires [12], Par conséquent, certaines solutions basées sur cette approche ont été proposées pour fournir de bonnes performances dans l'atténuation des oscillations de la tension de sortie et pour assurer le suivi de la référence fournie par l'algorithme MPPT [12-13], Cependant, ces solutions ne garantissent pas l'existence du mode glissant dans toute la plage de fonctionnement.

En plus, la conception rapportée des paramètres SMC n'est pas nécessairement liée aux exigences de l'algorithme MPPT, il est donc difficile de garantir le comportement souhaité du système PV complet [14-15].

Afin de résoudre ces problèmes, l'utilisation de techniques de commande non linéaire, telles que la commande par mode glissant, se révèle prometteuse. Dans ce contexte, l'objectif principal de notre travail est de résoudre le problème de transfert d'énergie au sein de la chaîne de conversion photovoltaïque.

❖ Dans ce mémoire, nous présentons en :

- **Premier chapitre :** quelques généralités sur l'énergie solaire et les systèmes photovoltaïques.
- **Deuxième chapitre :** Notre chapitre porte sur la modélisation des convertisseurs DC/DC et l'application du principe de commande MPPT dans notre système photovoltaïque. Nous présenterons les résultats d'optimisation de la puissance générée par le générateur photovoltaïque en utilisant la méthode P&O, simulée avec Matlab Simulink
- **Troisième chapitre :** nous présenterons l'application de la commande MPPT (P&O) par mode glissant sur le système photovoltaïque. L'efficacité de cette commande sera illustrée à travers des simulations.

CHAPITRE I

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction :

L'énergie photovoltaïque désigne la transformation d'une source d'énergie lumineuse⁰ en électricité et son utilisation. La conversion de l'énergie solaire (photovoltaïque) en énergie Électrique est effectuée par des cellules photovoltaïques formant des générateurs Photovoltaïques (PV) [16-17], Dans ce chapitre, nous allons présenter l'origine des énergies renouvelables et ses sources, en suite celui du système photovoltaïque et son fonctionnement

I.2. Historique :

Les systèmes photovoltaïques ont une longue histoire et leurs applications ont été installées avec le programme spatial pour la transmission radio par satellite en 45 heures. Depuis, leur utilisation est tendue dans d'autres domaines, tout comme les balises et l'équipement des sites isolés le mois suivant, merci d'utiliser les piles pour stocker l'énergie électrique pendant au soleil [18] :

- **En 1839** : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le procédé permettant à la lentille de produire de l'énergie électrique dans un mat solide, permettant l'effet photovoltaïque.
- **En 1875** : Werner Von Siemens présente devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.
- **En 1954** : trois chercheurs américains mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement, en découvrant que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée par ajout "impuretés", une technique appelée le dopage.
- **En 1958** : une cellule avec un rendement de 9% est mise au point, permettant l'envoi dans l'espace des premiers satellites alimentés par des cellules solaires.
- **En 1973** : la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delawar.
- **En 1983** : une voiture entièrement alimentée par l'énergie solaire photovoltaïque a réalisé avec succès un parcours de 4000 km à travers l'Australie. Cet exploit technologique a permis de démontrer les avancées significatives accomplies dans l'application de la technologie photovoltaïque au domaine de la mobilité électrique à cette époque.
- **En 2013** : la production mondiale des modules photovoltaïques a connu une forte croissance, passant de 5 MWc en 1982 à 18 GWc. Durant cette même année, le groupe

algérien Condor Électronique a lancé la production de panneaux photovoltaïques dont la puissance varie entre 70 W et 285 W.

- **En 2019 :** l'énergie photovoltaïque était devenue accessible à l'industrie, aux entreprises et aux particuliers, notamment pour des applications domestiques.

I.3. Energies renouvelables :

Les sources d'énergie renouvelables, sont produites à partir de sources théoriquement illimitées comme la lumière du soleil ou le vent, disponibles sans limite de temps ou pouvant être rapidement reconstituées en énergie. Ils diffèrent des combustibles fossiles, dont les stocks sont limités et non renouvelables à l'échelle humaine, comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel. L'énergie renouvelable fait référence à un ensemble de méthodes permettant de produire de l'énergie à partir de ces sources théoriquement illimitées [20-21].

I.4. Energie solaire :

Energie solaire est une source d'énergie renouvelable produite par le rayonnement du soleil. Ce rayonnement, sous forme de lumière et de chaleur, peut être converti en électricité ou en chaleur exploitable grâce à différentes technologies, comme les panneaux photovoltaïques ou les capteurs solaires thermiques.

L'énergie solaire est une énergie propre, inépuisable à l'échelle humaine et qui ne produit pas de pollution lors de son utilisation. Son fort potentiel en fait une option majeure pour diversifier et décarboner notre approvisionnement énergétique à l'avenir [22].

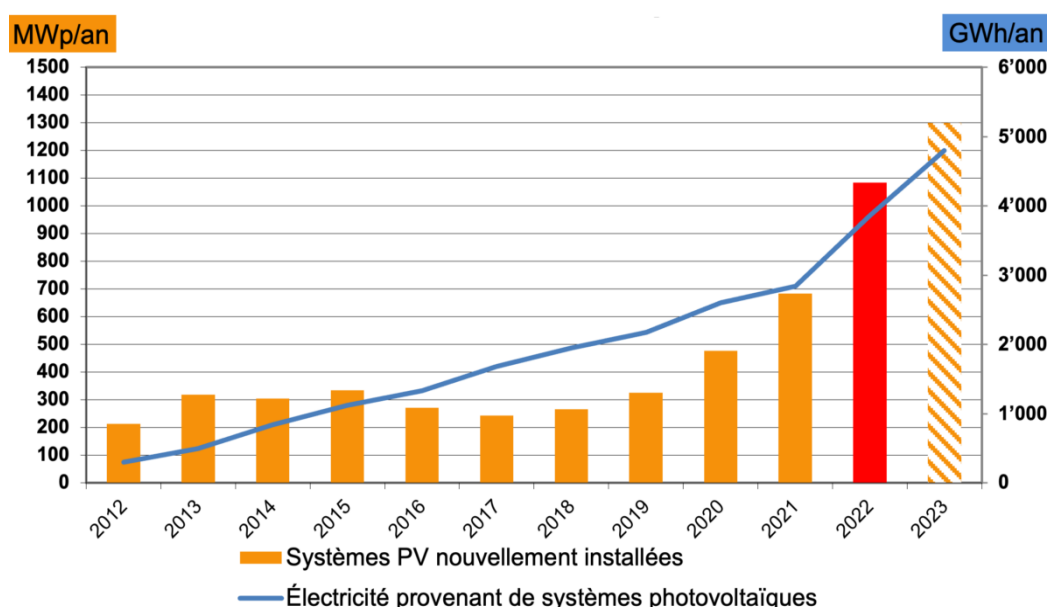


Figure I.1: L'utilisation mondiale de l'énergie photovoltaïque.



Figure I.2 : Système solaire photovoltaïque [22].

I.4.1. Energies thermique :

La technologie de l'énergie solaire thermique consiste simplement à générer de la chaleur en utilisant des panneaux sombres. Il est également possible de fabriquer de la vapeur en utilisant la chaleur du soleil, puis de la convertir en électricité.

I.4.2. Energies photovoltaïque :

La production d'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires est appelée énergie solaire photovoltaïque. De nombreux pays utilisent déjà cette forme d'énergie, en particulier dans les pays ou les régions qui ne possèdent pas de ressources énergétiques traditionnelles comme les hydrocarbures ou le charbon.[23]

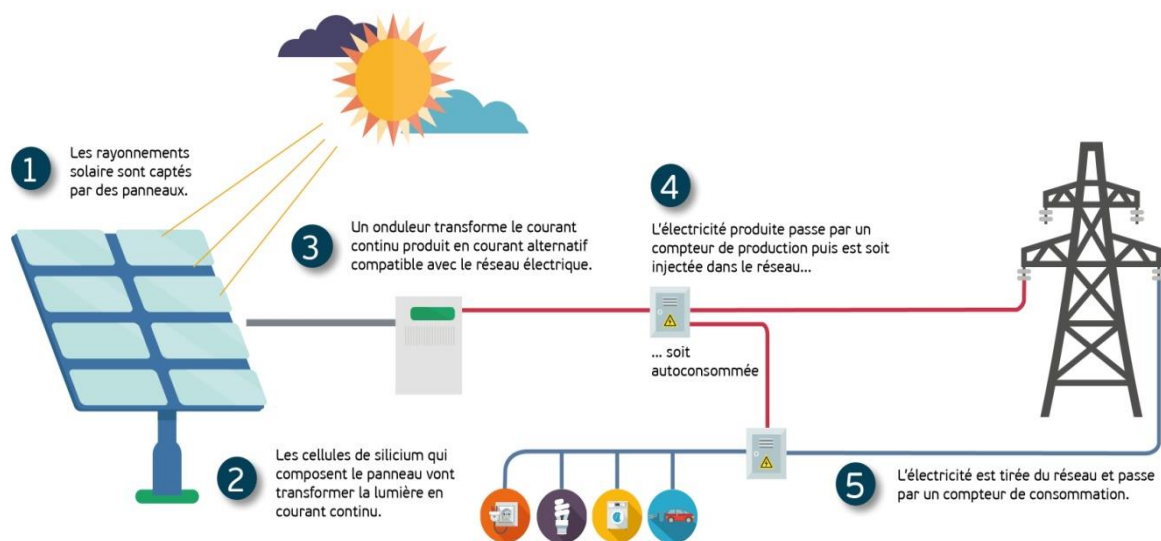


Figure I.3 : Principe de transformation de l'énergie solaire à l'énergie électrique [23].

I.4.3. Avantages et inconvénients de l'énergie PV :**➤ Les Avantages :**

- L'énergie photovoltaïque est renouvelable, gratuite, non polluante et indépendante.
- Les systèmes de cette filière ne génèrent pas de déchets, sans pollution et sans bruit.
- Pas de gaz à effet de serre.
- Peut se combiner avec d'autre source d'énergie avec une longue durée de vie
- Une nouvelle technologie décentralisée qui demande moins d'entretien production d'énergie à la demande en allant des milliwatts au mégawatt.
- Les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés.

➤ Les inconvénients : Malgré les avantages qu'elle présente, l'énergie photovoltaïque présente certains inconvénients qui peuvent être résumés comme suit :

- L'efficacité de conversion des modules est assez faible en pratique.
- Après une période de 20 ans, l'efficacité de l'électricité diminue de 20 %.
- Le recyclage des modules présente un souci pour l'environnement.
- L'intermittence et la sensibilité contre les conditions météorologiques [43].

I.5. Système Photovoltaïque :

Un système photovoltaïque est un ensemble intégré de différents composants qui permettent de convertir l'énergie du soleil en électricité utilisable. Il se compose principalement de modules photovoltaïques qui captent la lumière du soleil, d'un onduleur qui transforme le courant continu en courant alternatif, ainsi que de structures de montage, de câblages et de systèmes de contrôle et de surveillance. Grâce à cette combinaison de technologies, le système photovoltaïque peut produire de l'électricité verte et renouvelable, que ce soit pour alimenter un bâtiment, un réseau électrique ou tout autre application nécessitant de l'énergie solaire. La configuration du système est adaptée en fonction des besoins et des contraintes de chaque installation.[30]

I.6. Rayonnement solaire :

Le soleil, une étoile de 4,5 milliards d'années, est située à 150 millions de kilomètres de la Terre. L'énergie du soleil est dérivée de réactions thermonucléaires en permanence dans son noyau. Le rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère est 342W.m^2 , et la surface terrestre n'absorbe plus que 168W.m^2 [24-25].

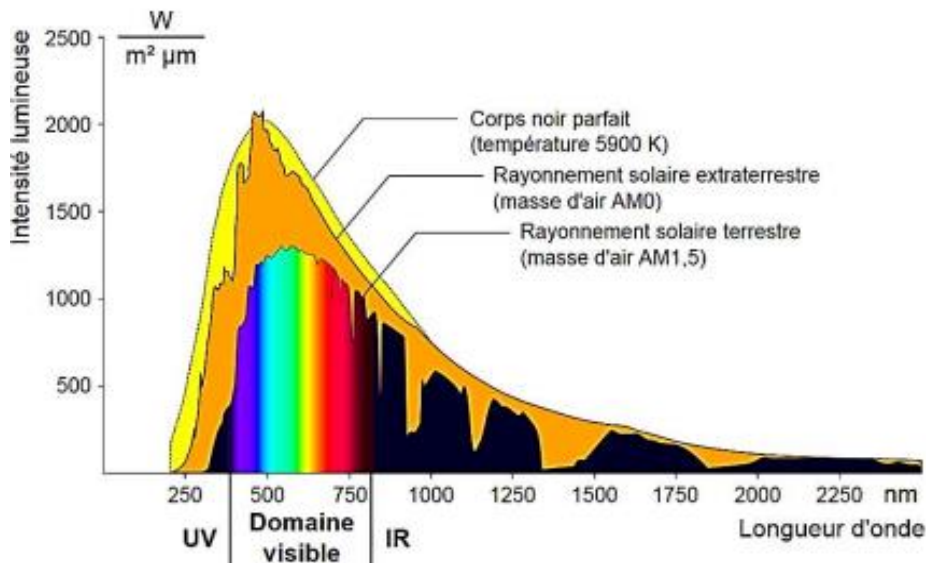


Figure I.4 : Répartition spectrale de l'irradiation solaire [24].

I.7. Effet PV :

L'effet photovoltaïque est le phénomène physique qui permet de convertir directement l'énergie lumineuse en électricité. Il se produit au sein de matériaux semi-conducteurs, comme le silicium, lorsqu'ils sont exposés au rayonnement solaire. [34].

I.8. Cellules PV :

Les cellules solaires sont des composants optoélectroniques qui convertissent la lumière du soleil en électricité grâce à l'effet « photovoltaïque », car la lumière du soleil est la source de lumière la plus intense sur Terre. La plupart des applications se font en plein air, mais certains préfèrent l'expression « énergie lumineuse » pour souligner que toute source de lumière, même artificielle, peut générer de l'électricité grâce à une cellule solaire. [26].

I.8.1. Principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque :

Le phénomène photoélectrique permet aux cellules solaires de convertir directement le rayonnement solaire du soleil en énergie électrique en produisant et en transférant des charges électriques positives et négatives dans une substance semi-conductrice sous l'effet de la lumière. Le semi-conducteur se compose de deux éléments différents, l'un avec une surcharge d'électrons et l'autre avec une faible quantité d'électrons, respectivement le dopé de type « n » et le dopé de type « p ». Quand ces deux éléments se rencontrent, les électrons du matériau « n » se propagent dans le matériau « p », ce qui entraîne la formation d'une charge positive dans la région dopée « n » et une charge négative dans la région dopée « p » [27].

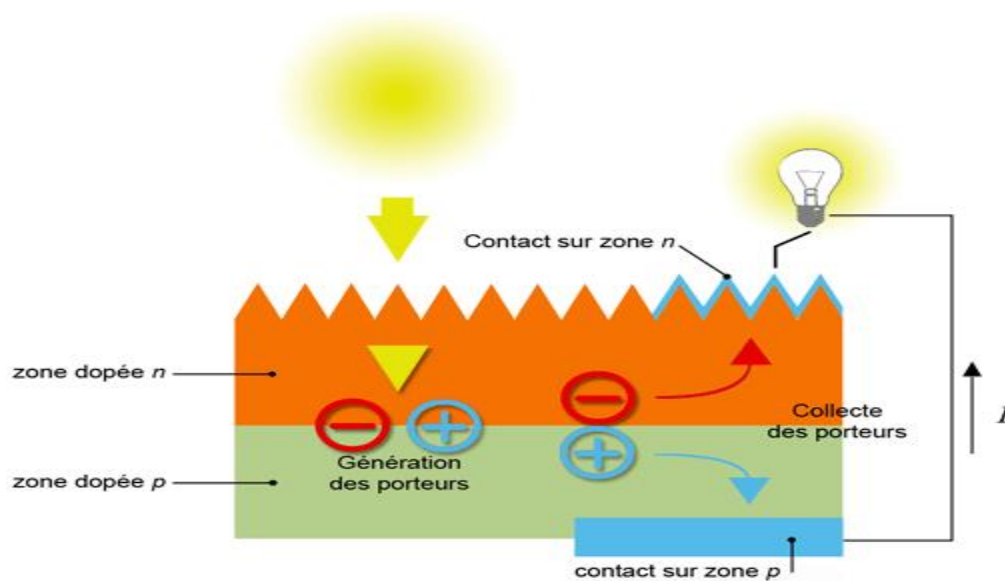


Figure I.5 : Mécanisme de la conversion d'énergie lumineuse en électricité par effet photovoltaïque [27].

I.8.2. Différent type de cellules photovoltaïques :

Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont

Propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de

L'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules

1. Cellules monocristallines : sont fabriquées à partir de lingots de silicium pur unique, c'est-à-dire d'un seul cristal de silicium. Ce procédé de fabrication permet d'obtenir un matériau hautement ordonné et de grande qualité cristalline. les bénéfices des cellules monocristallines incluent :

Rendement de conversion élevé, généralement entre 15% et 22%, Durée de vie plus longue que les autres types de cellules, encombrement réduit pour une même puissance électrique

2. Les cellules poly cristallines : Les cellules polycristallines sont fabriquées à partir de lingots de silicium composés de nombreux petits cristaux. Ce procédé de fabrication est plus simple et moins coûteux que celui des cellules monocristallines.

3. Cellules amorphes : également appelées cellules en silicium amorphe, sont fabriquées à partir de silicium déposé en couches minces, sans structure cristalline [28].

I.8.3. Caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque :

Les équations électriques d'une cellule photovoltaïque :

$$I(V) = I_{ph}(V) - I_{obs}(V) \quad (I.1)$$

- I_{ph} : le courant photogénéré [A].
- I_{obs} : Densité de courant d'obscurité.

Dans le cas d'obscurité, $I(V)$ obéit à l'équation du courant de la diode Schottky suivante [29] :

$$I_D(V) = I_s \times \left(\exp \left(\frac{q \times V}{n \times k \times T} \right) - 1 \right) \quad (I.2)$$

- I_D : courant de la diode Schottky.

$$I(V) = I_{ph} - I_s \times \left(\exp \left(\frac{q \times V}{n \times k \times T} \right) - 1 \right) \quad (I.3)$$

I.8.4. Caractéristiques des modules photovoltaïques « Siemens » :

Siemens est l'un des acteurs historiques du marché photovoltaïque, avec une expertise reconnue dans la conception et la fabrication de modules solaires.

- **Technologie des cellules** : Siemens fabrique principalement des modules à base de cellules solaires monocristallines et polycristallines de haute qualité.
- **Rendement élevé** : Les modules Siemens affichent des rendements de conversion allant de 15% à 22%, selon les modèles.
- **Durabilité et fiabilité** : La construction robuste et les matériaux de qualité assurent une longue durée de vie aux modules Siemens. La construction robuste et les matériaux de qualité assurent une longue durée de vie aux modules Siemens. [28]

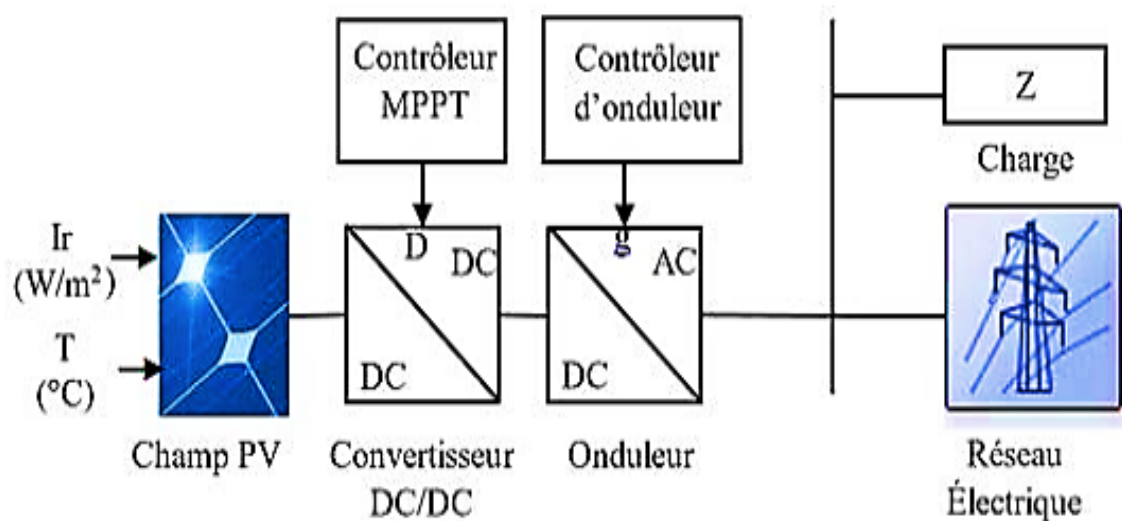
I.8.5. Caractéristique du module photovoltaïque « Siemens » utilisé :

Nous avons sélectionné un module Siemens SP60 avec 32 cellules monocristallines en silicium connectées en série, d'une puissance maximale de 60w dans des conditions $G=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$, et utilisé MATLAB pour les tests et la simulation.

Puissance	Puissance maximale	P_{max} : 60.26 w
Tension à vide		V_{co} : 21.7 V
Courant de court-circuit		I_{sc} : 4.8A
Tension au point de puissance maximale		V_{mpp} : 22.3 V
Courant au point de puissance maximale		I_{mpp} : 3.24A
Noct		45 ± 2 ° C
Coefficient de température :		
Tension à vide		β : - 0.77v/° C
Courant court-circuit		α : 2.6 ma / ° C

Tableau I.1 : Caractéristique électrique d'un module photovoltaïque

SP60 éventuelle.

**Figure I.6** : Schéma complet d'un système photovoltaïque connecté au réseau [30]

I.9. Module PV :

Une seule cellule photovoltaïque produit une faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 Watts sous une tension de 0,6 volts. Pour produire plus d'énergie, les cellules sont combinées pour former une unité ou un panneau. La série de connexions entre plusieurs cellules augmente la tension pour un seul courant. Les cellules sont reliées par des lamelles métalliques, avec des points de contact sur les faces avant (-) et arrière (+).[31]



Figure I.7 : Panneau photovoltaïque [31].

I.9.1. Modèle mathématique d'un module PV :

Le modèle mathématique, qui caractérise le panneau PV, est donné par l'équation suivante [29]

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_{sat} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + \frac{N_p}{N_s} I_{pv} R_s}{n V_T} \right) - 1 \right) - \frac{V_{pv} + \frac{N_p}{N_s} R_s I_{pv}}{\frac{N_p}{N_s} R_{sh}} \quad (I.4)$$

- N_s : le nombre de cellules en série.
- N_p : le nombre de cellules en parallèle.

1.9.2. Paramètres d'un module PV :

Les principaux paramètres caractérisant un module photovoltaïque sont :

- **Puissance nominale (Pmax) :** C'est la puissance maximale que le module peut délivrer dans des conditions standards (irradiance de 1 000 W/m², température de 25°C).

$$P_{\max} = V_{\max} \times I_{\max} \quad (\text{I.5})$$

- **Tension en circuit ouvert (Voc) :** C'est la tension maximale que le module peut fournir lorsqu'il n'est pas chargé.
- **Courant de court-circuit (Isc) :** C'est le courant maximal que le module peut délivrer lorsqu'il est court-circuité.
- **Tension et courant au point de puissance maximale (Vmp, Imp) :** Ce sont les valeurs de tension et de courant correspondant à la puissance maximale du module.
- **Rendement de conversion (η) :** C'est le ratio entre la puissance électrique produite et la puissance solaire incidente sur le module.

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{inc}}} \quad (\text{I.6})$$

- **Coefficient de température :** Indique la variation de la puissance en fonction de la température des cellules.
- **Facteur de forme FF :** Rapport de la puissance maximale qui peut être délivré à la charge sur le produit de (Icc, Vco).

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (\text{I.7})$$

Ces paramètres sont essentiels pour dimensionner et comparer les différents modules photovoltaïques disponibles sur le marché, en fonction des besoins de l'installation.

I.9.3. Effet de l'éclairement et température sur le comportement du module PV :

I.9.3.1. Effet de la température :

Les courbes P(V) et I(V) pour différentes températures de fonctionnement du module photovoltaïque à irradiation constante sont présentées dans la figure (I.6). L'influence de la température sur la valeur du courant de court-circuit est assez faible, tandis que la tension en circuit ouvert diminue assez fortement avec l'augmentation de la température. Cela suggère que le panneau peut fournir une tension adéquate, même à une luminosité faible,

ce qui permet d'extraire la puissance. Il est primordial de saisir que pour chaque niveau de température de la cellule supérieure à 25°C, la puissance du panneau diminue d'environ 0,5%.

Enfin, il est essentiel de se rappeler que la tension du panneau change lorsque l'éclairage est inférieur à 1000 W/m². Elle s'assombrit au fur et à mesure que le niveau d'éclairement augmente [32].

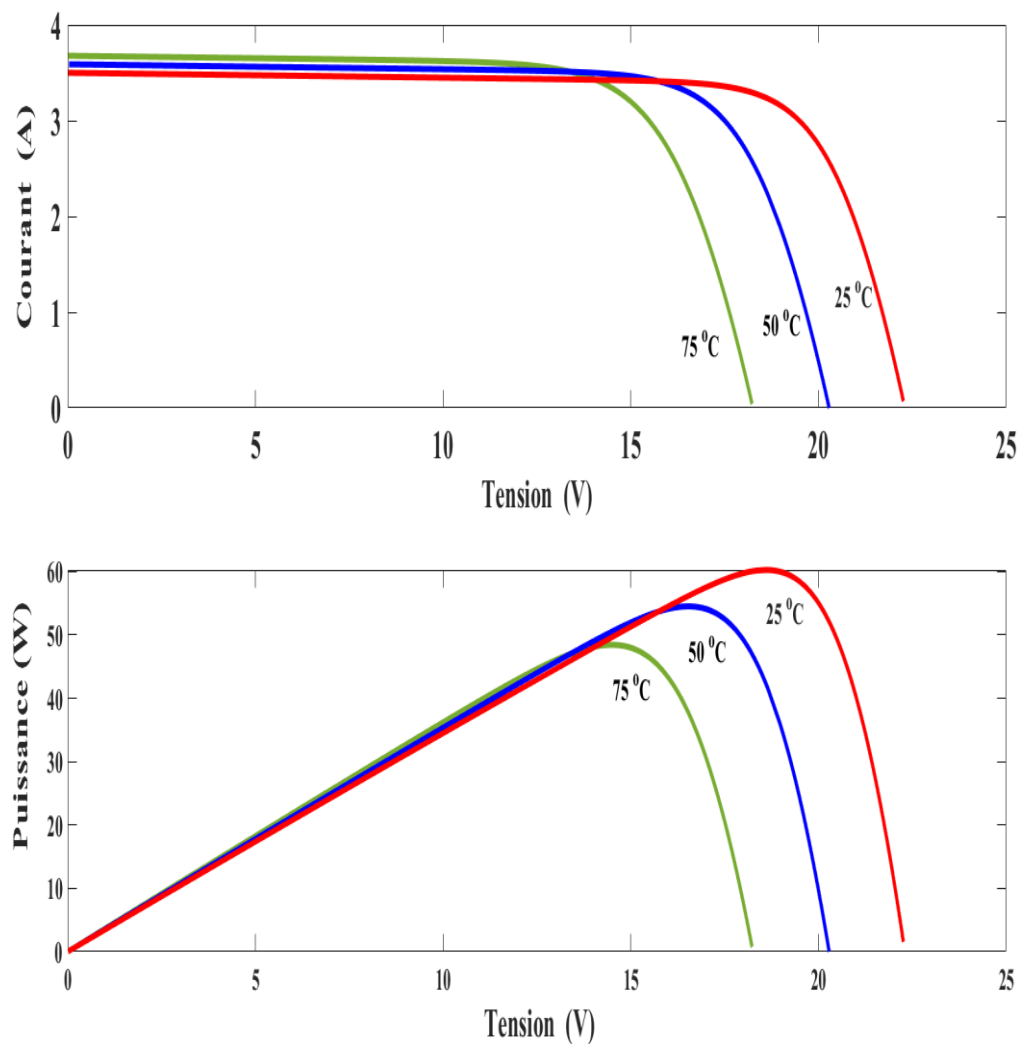


Figure I.8 : Influence de la température sur les performances des générateurs photovoltaïques

I.9.3.2. Effet de l'éclairement :

Les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'un générateur photovoltaïque sont représentées graphiquement pour une température constante de 25°C et une irradiance solaire variable. On observe que la variation de l'éclairement solaire a un impact significatif sur le courant de court-circuit du module, tandis que la tension en circuit ouvert n'est que légèrement affectée. Par conséquent, la puissance maximale du module varie de manière proportionnelle à l'éclairement incident, comme le montrent les courbes de la figure I.9.

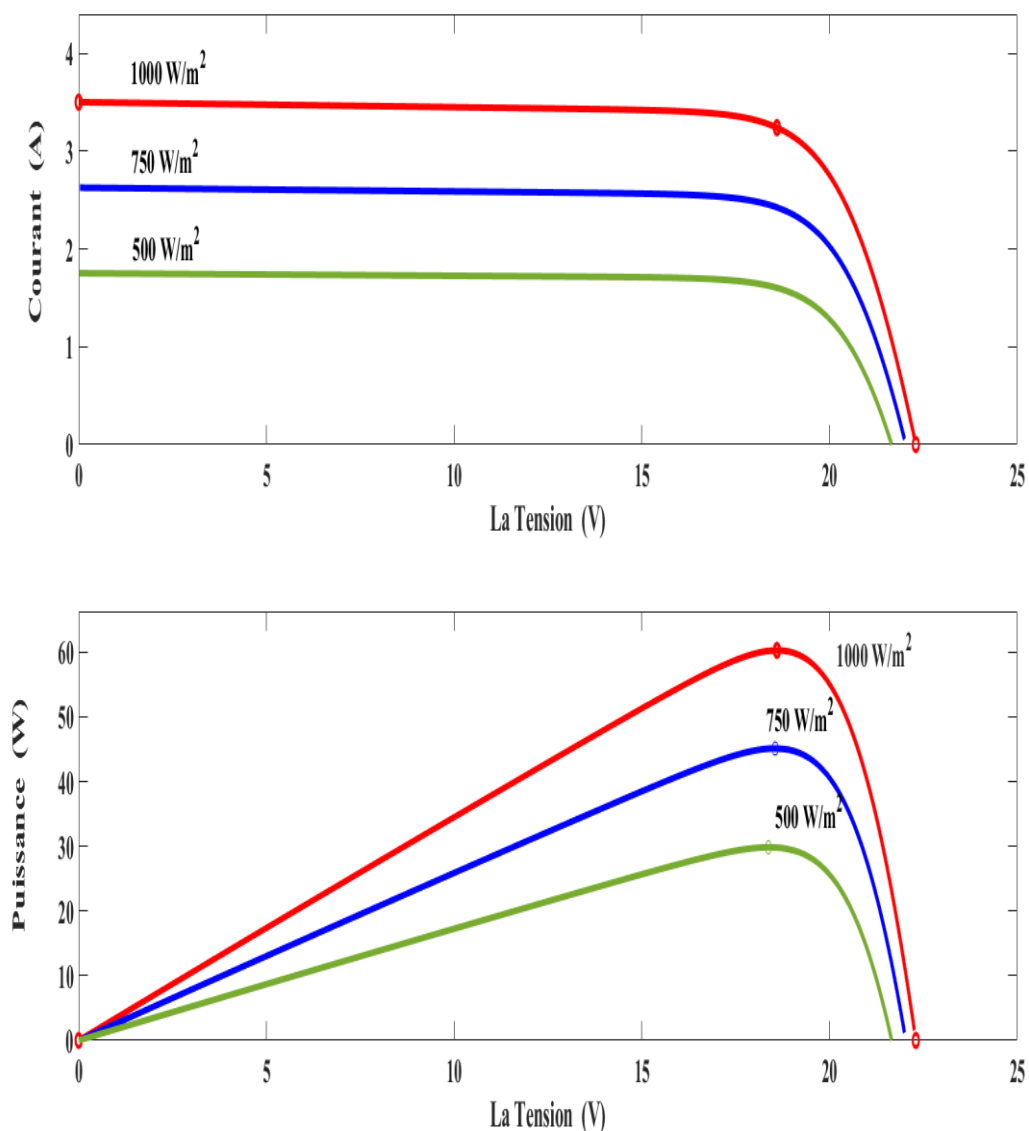


Figure I.9 : Influence de l'éclairement sur les performances des générateurs photovoltaïques

I.9.4. Effet de l'association en série et en parallèle des cellules PV :

I.9.4.1. Effet de la corrélation en série des cellules PV :

La cellule photovoltaïque est l'élément de base d'un système photovoltaïque, mais elle ne produit qu'une très faible puissance électrique, généralement de l'ordre de **0,5 W** avec une tension inférieure à **1 volt**. Pour augmenter la puissance électrique, les cellules sont assemblées en modules (ou panneaux). Un module de 36 cellules connectées en série (type Siemens 60) peut atteindre une tension suffisante pour alimenter une charge. Pour obtenir une tension plus élevée, plusieurs modules doivent être connectés en série (**Ns** modules). Pour augmenter le courant, plusieurs modules peuvent être assemblés en parallèle (**Np** modules).

Des diodes de protection sont installées en série et en parallèle afin de protéger le circuit contre tout retour de courant.[42].

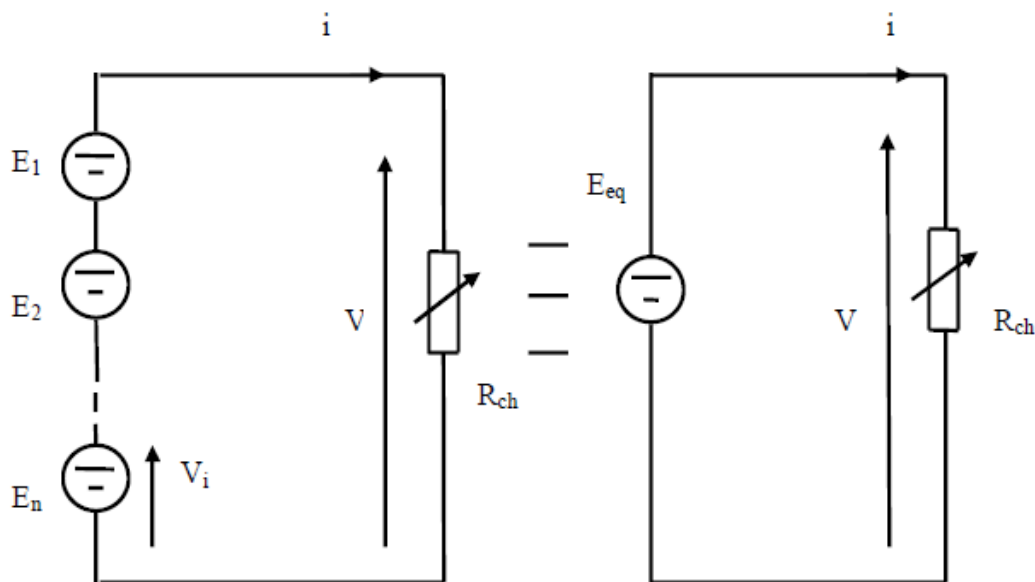


Figure I.10 : Circuit de base de l'Association de NS modules solaires en série

I.9.4.2. Effet de la corrélation en parallèle des cellules PV :

L'association parallèle de photopiles produit un courant égal à la somme des courants individuels et une tension égale à celle d'une seule cellule.

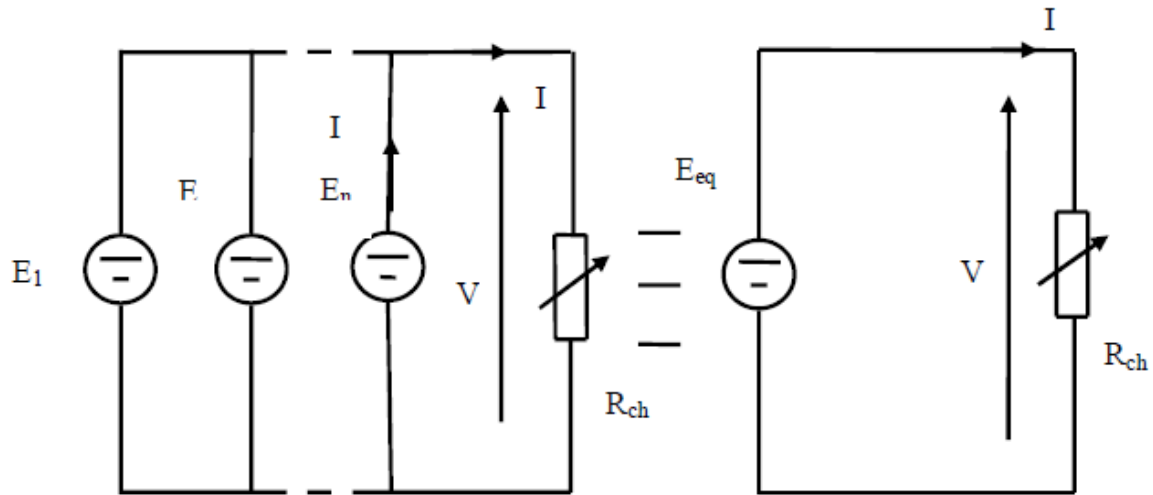


Figure I.11 : Circuit de base de l'Association de NP modules solaires en parallèle.

I.9.4.3. Effet de la corrélation mixte (Série +Parallèle) des cellules PV :

Il est nécessaire d'utiliser un groupement mixte, c'est-à-dire Série-Parallèle, afin d'obtenir une satisfaction en courant et en tension.

Il s'agit d'un appareil qui convertit l'énergie photovoltaïque en électricité. En fonction de la puissance crête souhaitée, ce générateur photovoltaïque est composé de plusieurs modules qui sont assemblés entre eux en série ou en parallèle [42].

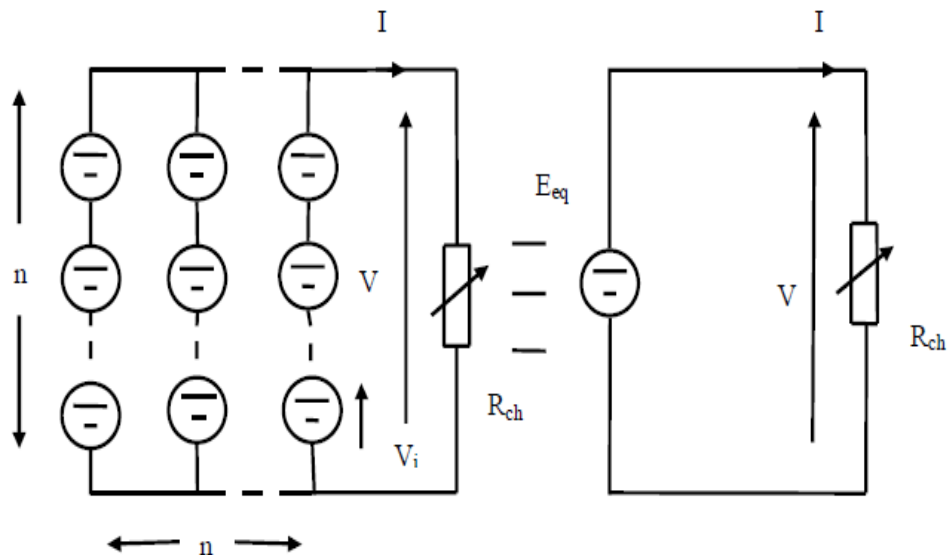


Figure I.12 : Circuit de base de l'Association mixte (hybride) $N_s \times N_p$ modules solaire

I.10. Générateur PV :

En fonction de la puissance électrique souhaitée, les panneaux photovoltaïques individuels peuvent être assemblés pour former un champ ou générateur photovoltaïque complet. Le point

de fonctionnement du générateur photovoltaïque est caractérisé par :

$$I_{GPV} = N_p \times I \quad (I.8)$$

$$V_{GPV} = N_s \times V \quad (I.9)$$

I_{GPV} : le courant du générateur photovoltaïque

V_{GPV} : la tension du générateur photovoltaïque

P , N , S et N : les nombres des modules en parallèle et en série.

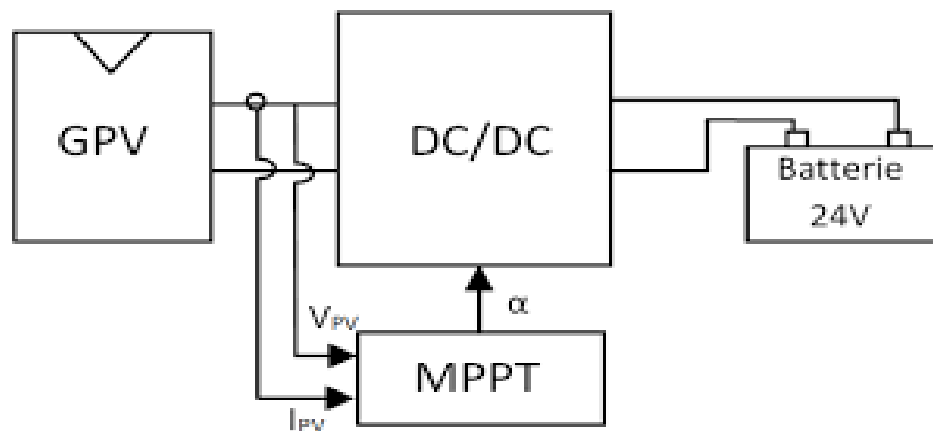


Figure I.13 : Schéma général d'un générateur photovoltaïque

I.11. Modélisation d'un système PV :

Dans la littérature, plusieurs modèles de générateurs photovoltaïques diffèrent par leur procédure et le nombre de paramètres impliqués dans le calcul de la tension et du courant final du générateur.

I.11.1. Modelé mathématique d'un PV :

Il existe plusieurs modèles mathématiques permettant de décrire le fonctionnement et le comportement des générateurs photovoltaïques [36-37]. Parmi ces modèles, le plus couramment utilisé est le modèle à une seule diode, également appelé modèle empirique.

I.11.2. Modélisation simplifiée de la cellule PV « seule diode » :

Ce modèle s'appuie sur le circuit électrique équivalent des modules photovoltaïques. Il permet d'exprimer le courant généré par un module en fonction de la tension à ses bornes,

et ce pour différentes conditions climatiques telles que l'ensoleillement et la température ambiante. Ce modèle à une seule diode présente l'avantage d'être relativement simple tout en offrant une description fidèle du comportement des panneaux photovoltaïques, C'est pour cette raison qu'il est actuellement le plus répandu dans la modélisation de ces générateurs.

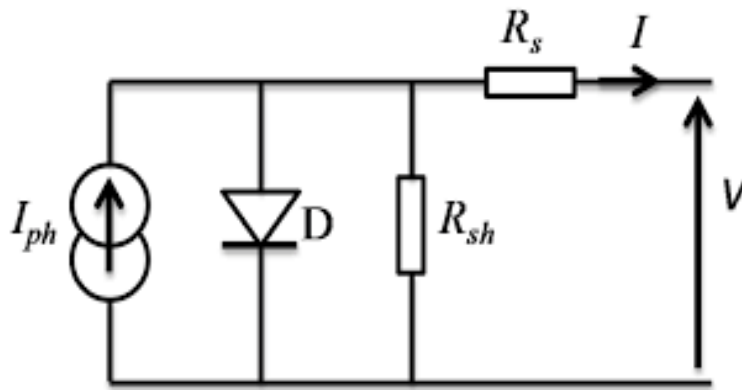


Figure I.14: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque [38].

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{I.10})$$

Avec :

I : Le courant délivré par le module.

I_{ph} : Photo courant.

I_d : Courant de diode.

I_{sh} : Le courant shunt.

La caractéristique courant-tension d'un générateur photovoltaïque est décrite par l'équation suivante :

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_{rs} \left[e^{\frac{q(V+R_s I)}{AKN_s}} - 1 \right] - N_p \frac{q(V+R_s I)}{N_s R_{sk}} \quad (\text{I.11})$$

La photo courante générée I_{ph} est lié à l'irradiation solaire par l'équation suivante :

$$I_{ph} = \frac{G}{1000} (I_{sc} + k_i (T - T_r)) \quad (\text{I.12})$$

Avec :

I_{rs} : le courant de saturation inverse des cellules.

V : la tension de sortie de cellule en (V).

A : la constante d'idéalité de la diode.

T : la température de fonctionnement de la cellule de référence

q : la charge d'électron ($1.60217646 \times 10^{-19}$ C)

k : la constante de Boltzmann ($1.3806503 \times 10^{-23}$ J/K)

R_s et **R_p** : les résistances série et shunt de la cellule .

I_{sc} : courant de court-circuit de la cellule à la température de référence et à l'irradiation.

G : irradiation en W/m^2 .

T_r : température de la cellule.

k_i : coefficient de température du courant de court-circuit.

I.12. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le monde de la conversion photovoltaïque donné un aperçu général sur les différentes notions importantes pour l'étude d'un système solaire photovoltaïque et les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire, le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et le module photovoltaïque.

Nous avons exploré les technologies utilisées ainsi que les différents types des cellules photovoltaïques.

Les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température.

CHAPITRE II

Commande MPPT des système photovoltaïques

II.1. Introduction :

Pour optimiser la puissance maximale d'un système photovoltaïque, la tension de sortie du générateur photovoltaïque est régulée par un convertisseur continu/continu (étage d'adaptation). Ce convertisseur est lui-même contrôlé en permanence par son rapport cyclique, qui varie en fonction des conditions météorologiques et de la charge. Dans ce chapitre, nous examinerons les différents types de convertisseurs continu/continu qui composent l'étage d'adaptation. Ensuite, nous expliquerons le principe de fonctionnement des commandes permettant de rechercher le point de puissance maximale (MPPT). Enfin, nous présenterons les résultats de simulation du système photovoltaïque en boucle fermée, où le rapport cyclique est commandé par l'algorithme « Perturbation et Observation (P&O) », en tenant compte des variations de l'éclairement.

II.2. Convertisseurs continu – continu (DC/DC) :

Les convertisseurs du type continue/continue, appelés aussi hacheurs, permettent de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

L'hacheur convertit l'énergie continue à un niveau de tension spécifique en énergie continue à un autre niveau de tension, utilisée pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries ou pour maintenir une charge continue. Il se compose de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Le rendement élevé des hacheurs est un avantage majeur, car il minimise les pertes d'énergie et garantit une utilisation efficace de l'énergie produite par les panneaux solaires. En ajustant les paramètres de l'hacheur, comme le rapport cyclique (rapport entre le temps d'ouverture et le temps de fermeture du commutateur), on peut optimiser la puissance de sortie. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements [36].

Il existe plusieurs types de convertisseurs DC-DC nous citons :

- Convertisseur BUCK (hacheur série).
 - Convertisseur BOOST (hacheur parallèle).
 - Convertisseur BUCK-BOOST (hacheur série - parallèle).
- Le présent travail est basé sur le convertisseur BOOST.

II.2.1. Le convertisseur BOOST :

Le convertisseur Boost, également connu sous le nom d'élévateur de tension, est un convertisseur DC-DC direct avec une source de courant continu et une sortie de tension continue. peut être représenté par la **figure (II.1)** , La source d'entrée est de type courant avec une inductance en série, et la source de sortie est de type courant avec un condensateur parallèle et une charge résistive [36].

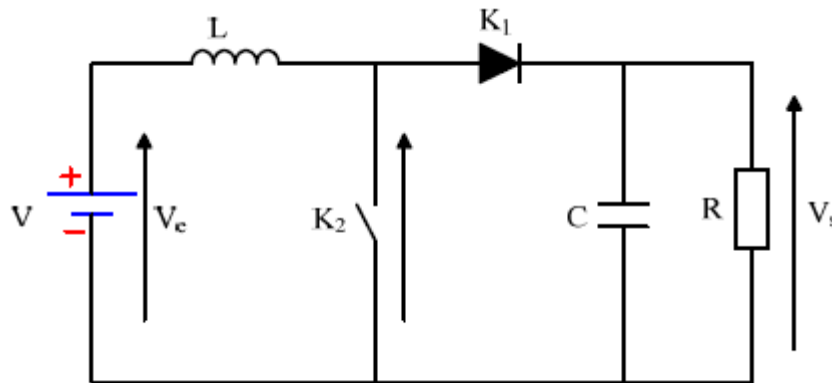


Figure II.1 : Schéma du convertisseur DC-DC Boost.

II.2.2. Séquences de fonctionnement :

Déterminer le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail Son modèle mathématique.

Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par la suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/ sortie.

➤ Fonctionne en deux phases :

a) Première séquence [0 à αT_c] : interrupteur fermé (état passant) :

cela entraine l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est bloquée et la charge est déconnectée de l'alimentation, ce qui entraîne une tension nulle sur les traces de l'inductance, on arrive à :

$$V_e = V_L \quad (II.1)$$

$$I_c = I_L = \frac{V_s}{R} \quad (II.2)$$

b) Deuxième séquence [αT_c à T_c] : interrupteur ouvert (état bloqué) :

Lorsque l'interrupteur s'ouvre, l'interruption de courant dans l'inductance provoque une surtension qui s'ajoute à celle du condensateur.

$$V_L = V_e - V_s \quad (\text{II.3})$$

$$I_c = I_L - I_s = I_L - \frac{V_s}{R} \quad (\text{II.4})$$

Par conséquent, les expressions de la tension d'inductance et le courant du condensateur dans les deux cas de commutation sont évaluées et considéré sur une période de commutation.

$$I_L = \frac{V_s}{R} \frac{1}{1-\alpha} \quad (\text{II.5})$$

$$V_s = V_e \frac{1}{1-\alpha} \quad (\text{II.6})$$

Cependant il est important de dimensionner l'inductance et la capacité pour obtenir les performances données par la figure suivante afin de calculer la valeur de l'inductance.

II.3. Avantage de convertisseur BOOST :

Malgré le rendement élevé du convertisseur BUCK dans les systèmes utilisant des sources de puissance conventionnelles, le convertisseur BOOST peut être plus approprié pour les systèmes photovoltaïques équipés d'un suiveur du point de puissance maximale (MPPT). En effet, le convertisseur BOOST fonctionne en mode courant continu, extrayant autant de puissance que possible à partir des cellules solaires. Par conséquent, le rendement énergétique du convertisseur BOOST peut être supérieur à celui du convertisseur BUCK. Le convertisseur BOOST est généralement utilisé pour obtenir une tension de sortie plus élevée, tandis que le convertisseur BUCK est employé pour abaisser la tension de sortie [47].

II.4. Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque :

La poursuite du point de puissance maximale (MPPT) est un élément essentiel dans les systèmes photovoltaïques. Depuis la publication de la première loi de commande de ce type en 1968, plusieurs techniques ont été développées pour s'adapter aux sources d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques diffèrent en termes de complexité, de nombre de capteurs requis, de vitesse de convergence, de coût, de rendement et de domaine d'application. [47]

II.5. 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) tout en maintenant une bonne adaptation entre le générateur et sa charge, afin d'assurer le transfert de la puissance maximale [44-45].

II.5.1. La Commande MPPT :

Une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque (GPV) de manière à produire en permanence la puissance maximale, permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque (GPV) de manière à produire en permanence la puissance maximale. Ainsi, quelles que soient les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum.

La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT [40].

Il peut être représenté par le schéma de la **figure II.2**.

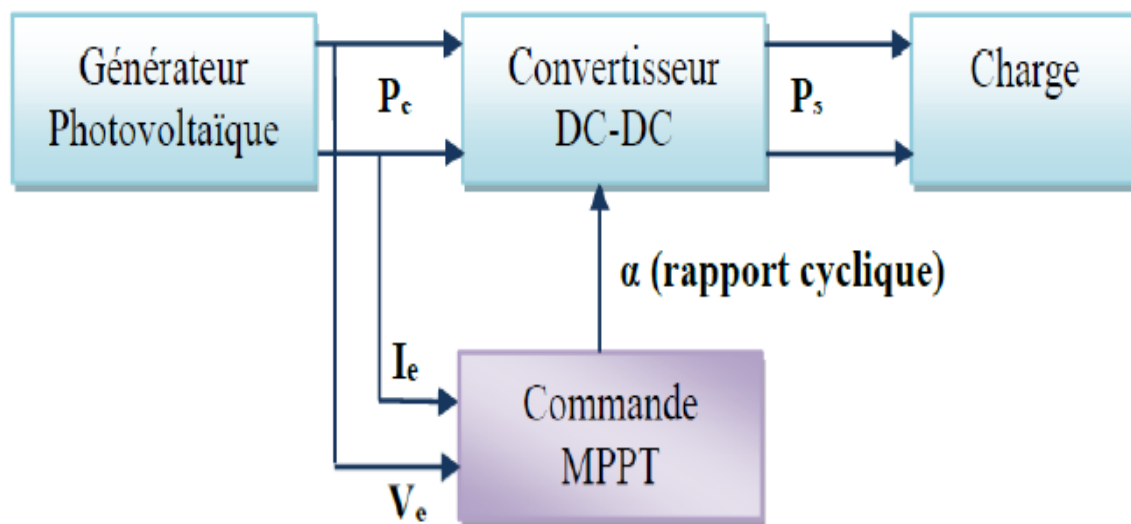


Figure II.2 : La chaîne de conversion photovoltaïque commandée par une MPPT [40].

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) permet de faire varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) à l'aide d'un signal électrique approprié. Son objectif est d'extraire la puissance maximale que le générateur photovoltaïque (GPV) peut fournir. mais en général, L'algorithme MPPT il se base sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée (courant I et tension V) pour se positionner sur le (MPP) [47].

II.5.2. Principe de fonctionnement de MPPT :

Le MPPT (Maximum Power Point Tracking), de l'anglais « Suivi du Point de Puissance Maximale », est un principe qui permet de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclaircissement, la puissance délivrée variera selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (par exemple, une batterie) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence la puissance maximale à la charge à chaque instant.

La figure (II.3) représentent la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur.

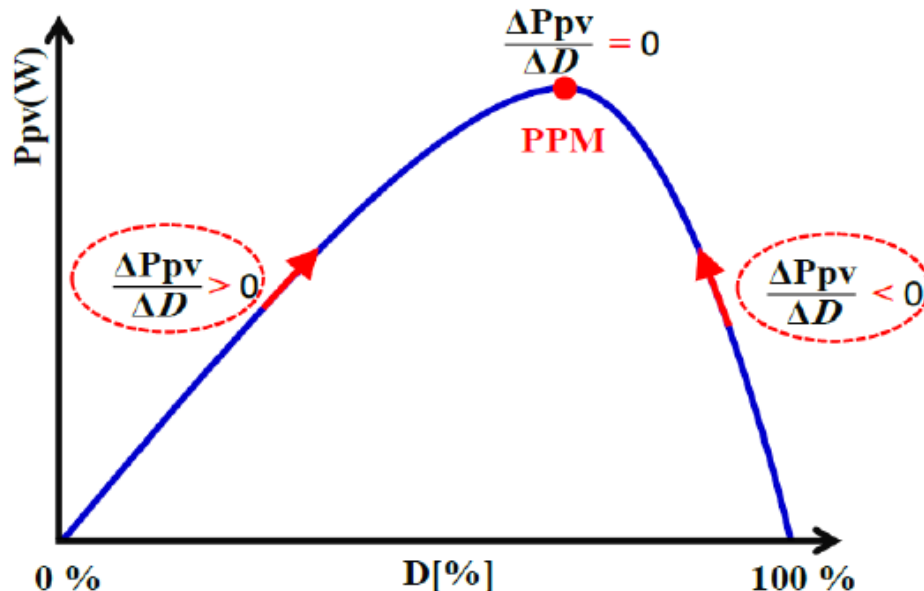


Figure II.3 : La Principe de la commande MPPT

II.6. Les Algorithmes MPPT :

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche de la PPM existants dans ce chapitre nous a permis de bien identifier l'existant et les points qu'il restait à améliorer. [47]

II.7. Classification des techniques MPPT :

La classification des algorithmes du suiveur peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées : méthodes directes et indirectes. [47]

a. MPPT indirecte (Les méthodes indirectes) :

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions climatiques (température ensoleillement...) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum. Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et donc difficile à généraliser :

- La méthode d'ajustement de courbe.
- La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur.
- La méthode de court-circuit.

Ce type de commande MPPT repose sur le modèle mathématique du générateur photovoltaïque (GPV) et la position approximative du point de puissance maximale (MPP). L'estimation du point de fonctionnement du GPV est réalisée à partir d'un modèle paramétrique préalablement défini. L'idée fondamentale est d'optimiser la poursuite de la puissance maximale (ou de la tension optimale), Ces les commandes sont faciles à mettre en œuvre et généralement adaptées à des systèmes peu coûteux et non spécifiques, notamment dans les zones géographiques aux fluctuations climatiques limitées. Les zones aux fluctuations climatiques limitées [47-48].

b. MPPT directe (les méthodes directes) :

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures.

L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV, Parmi ces méthodes, on retrouve les méthodes

- Perturbe & Observe (P&O).
- L'incrément de conductance (IncCond).
- Hill Climbing.

II.8. Les commandes MPPT à algorithmes performants :

Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes effectuant la recherche du PPM. La méthode la plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement (P&O).

II.8.1. Commande « Perturbation et Observation » (P&O) :

La méthode de P&O est une approche largement répandue dans le domaine des techniques MPPT, car elle est simple. Elle exige seulement des mesures sur la tension aux bornes du panneau et son courant de sortie.

a. Principe de la méthode P&O :

- Comme son nom l'indique, la méthode de P&O fonctionne par la perturbation de la tension de fonctionnement du panneau et l'observation de son impact sur le changement de la puissance à sa sortie. Cette commande est de générer des perturbations en diminuant ou en augmentant le rapport cyclique α et d'observer l'effet sur la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque.
- Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte Ainsi [43], comme l'illustre la figure II.4.

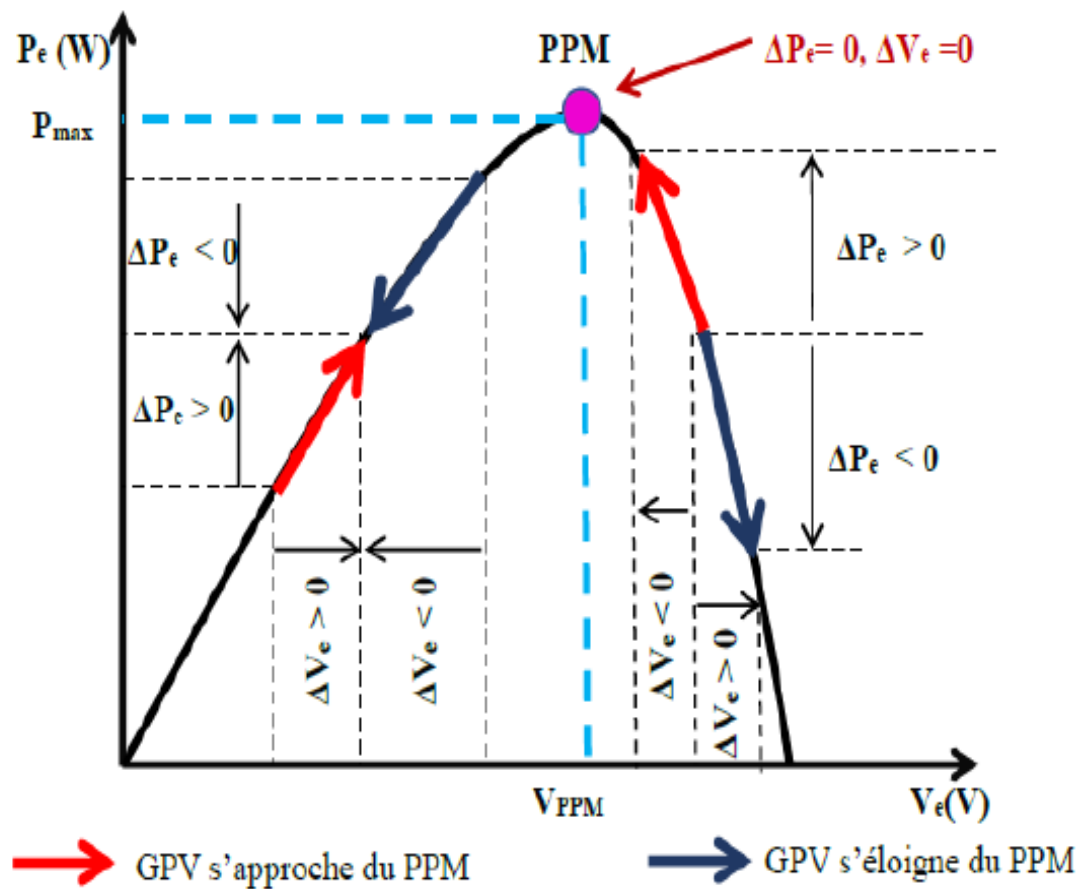


Figure II.4 : Principe de fonctionnement de l'algorithme P&O [46].

b. Algorithme de la méthode P&O :

La figure II.5 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour ce type de commande afin de déterminer la puissance du PV à chaque instant. [40].

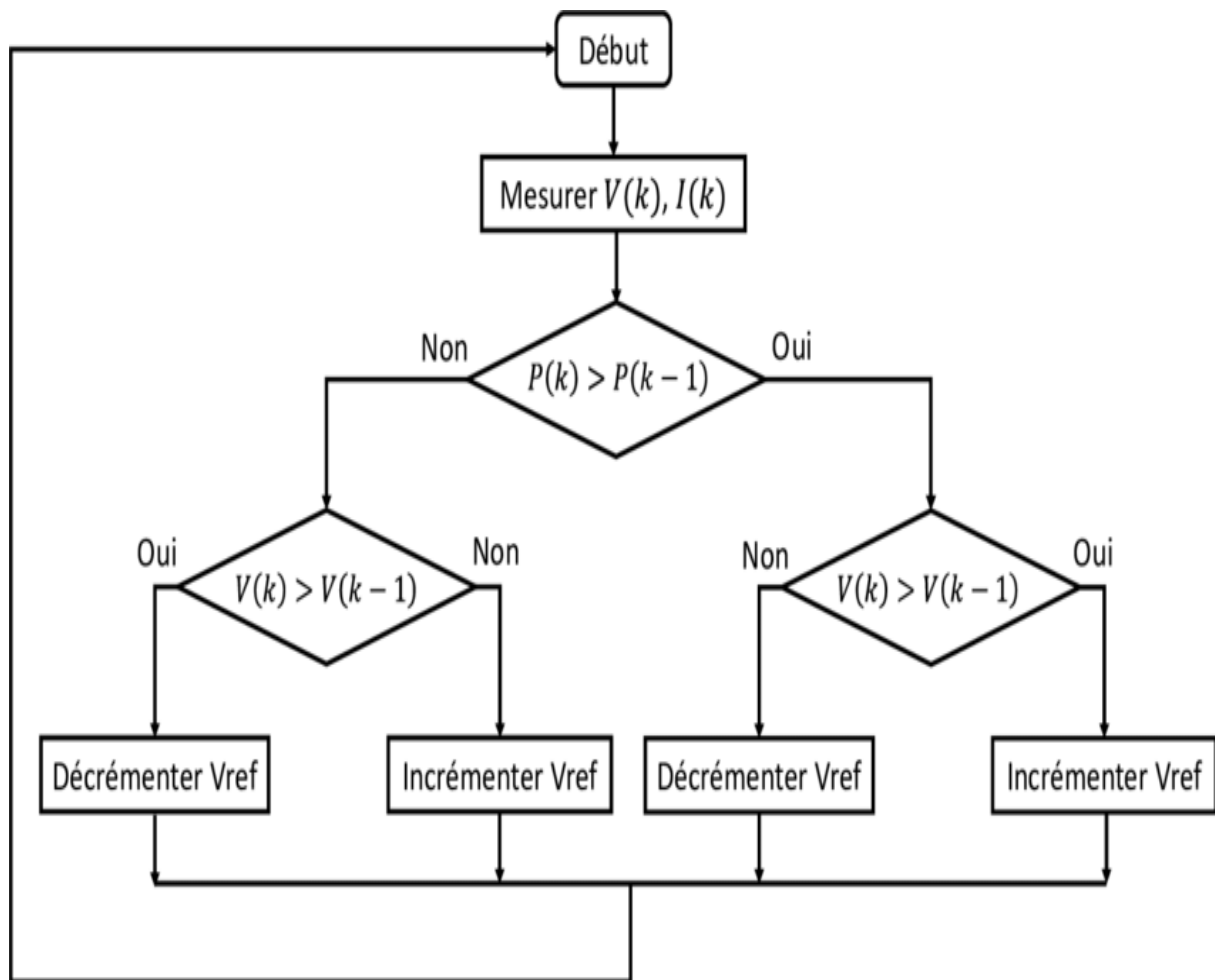


Figure II.5 : Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O. [48]

Si la puissance de sortie a augmenté depuis la dernière mesure, c'est-à-dire le point de puissance maximale n'est pas atteint, la perturbation de la tension continuera dans la même direction que celle qui a été prise au dernier cycle. Lorsque le point de puissance maximale est atteint, la tension du panneau oscille autour du PPM car la recherche doit être répétée périodiquement pour obliger le système à osciller autour du PPM. Une fois la puissance de sortie a diminué depuis la dernière mesure, c'est-à-dire le point de puissance maximale est dépassé, la tension est perturbée dans la direction opposée de celle de l'itération précédent .

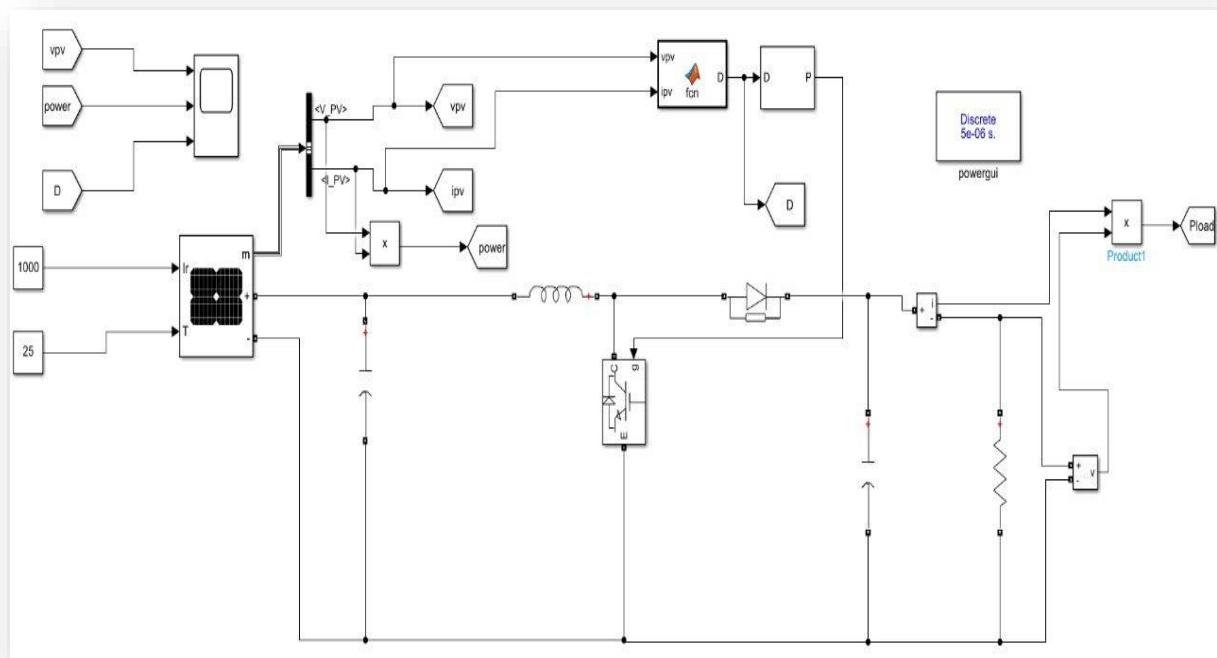
II.9. Simulation de système photovoltaïque avec la commande P&O :

La figure (II.6) Représente le schéma global d'un système photovoltaïque composé d'un module PV avec un hacheur BOOST commandé en MPPT (P&O). Le système photovoltaïque autonome est composé d'un panneau photovoltaïque de 60.26W. cette simulation sur MATLAB/ SIMULINK a été effectuée pour évaluer les performances de contrôleur.

Tableau II.1: Paramètres de convertisseur Boost.

Paramètres	Valeurs
Inductance L	5e-3 H
Capacité C_{pv}	14 e-6 F
Capacité C_{dc}	66e-6 F

Tableau II.1 présente les paramètres utilisés, en supposant que les interrupteurs utilisés soient parfaits.

**Figure II.6:** Simulation la commande MPPT a base de la méthode P&O.

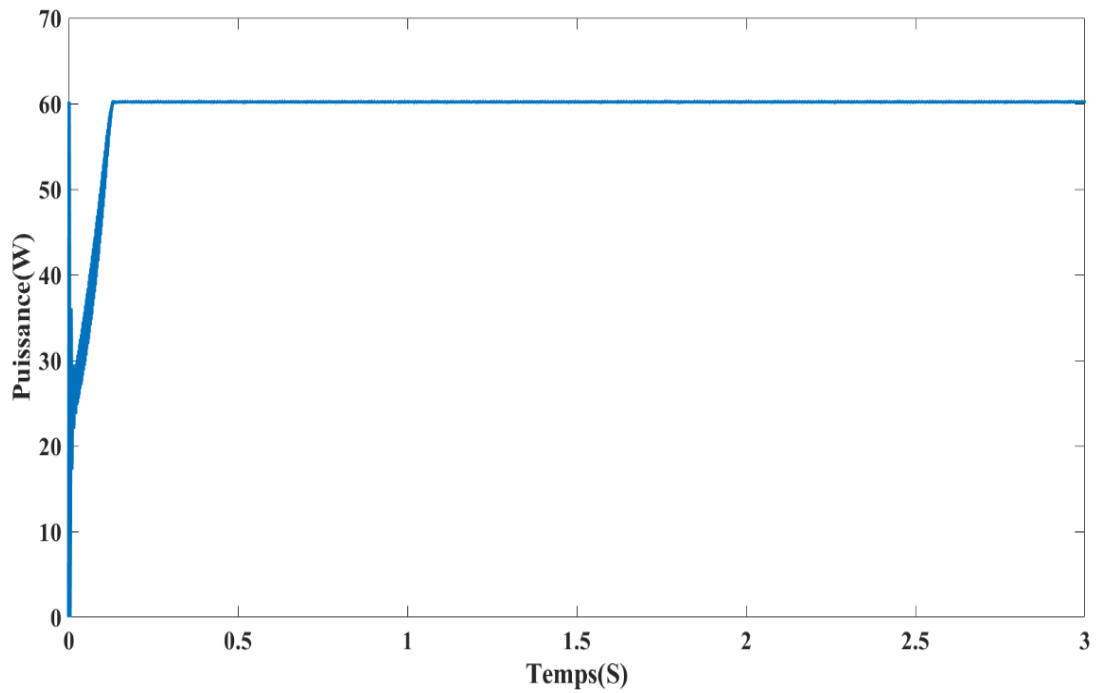


Figure II.7 : Analyse des puissances dans des conditions stables

($G=1000\text{W/m}^2$, $T=25\text{C}^\circ$)

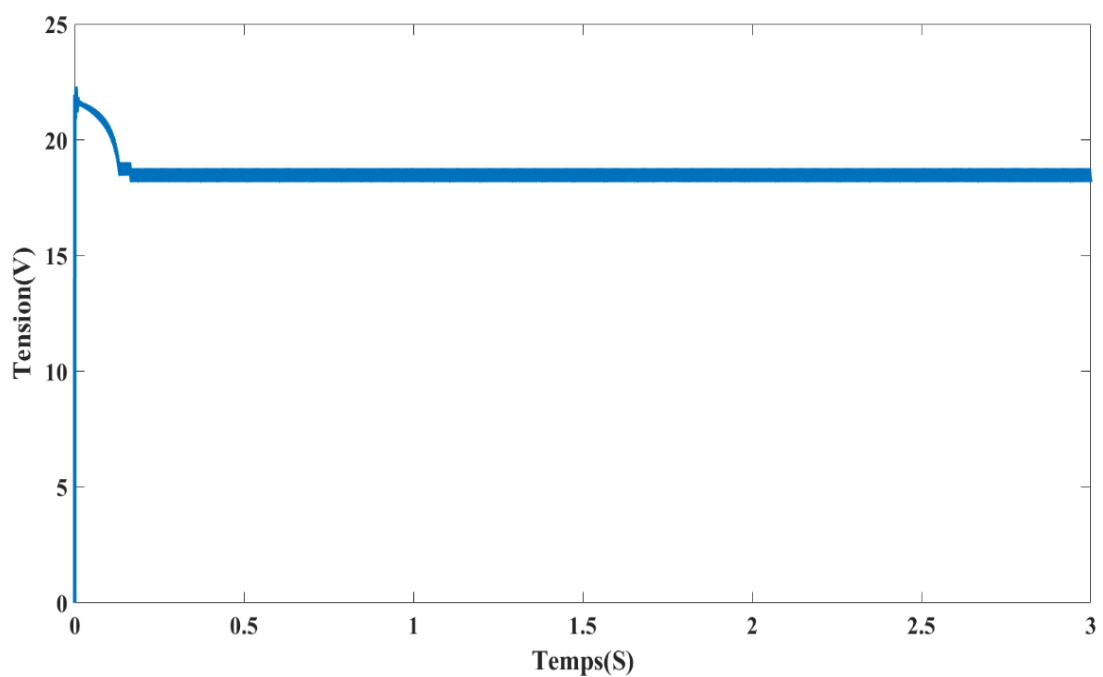


Figure II.8 : Analyse des tensions dans des conditions stables

($G=1000\text{W/m}^2$, $T=25\text{C}^\circ$)

- Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT (perturbation et observation) représentent par les figures (II.7) à (II.8). Ces figures représentent la tension et puissance générées par le générateur photovoltaïque. Ainsi, la tension, et la puissance à la sortie du système photovoltaïque.
 - Selon ces résultats, il est démontré que l'hacheur survolteur et la commande MPPT (perturbation et observation) accomplissent leurs opérations de manière efficace.
 - Pour analyser le comportement du système face aux variations de l'éclairement et de la température, nous allons le tester selon les illustrations II.9 et II.10.
- Nous avons effectué des variations rapides de l'ensoleillement (1000W/m^2 , 500W/m^2 et 250W/m^2 , $T=25\text{C}^\circ$) et de la température (25C° , 50C° et 75C° , $G=1000\text{W/m}^2$).

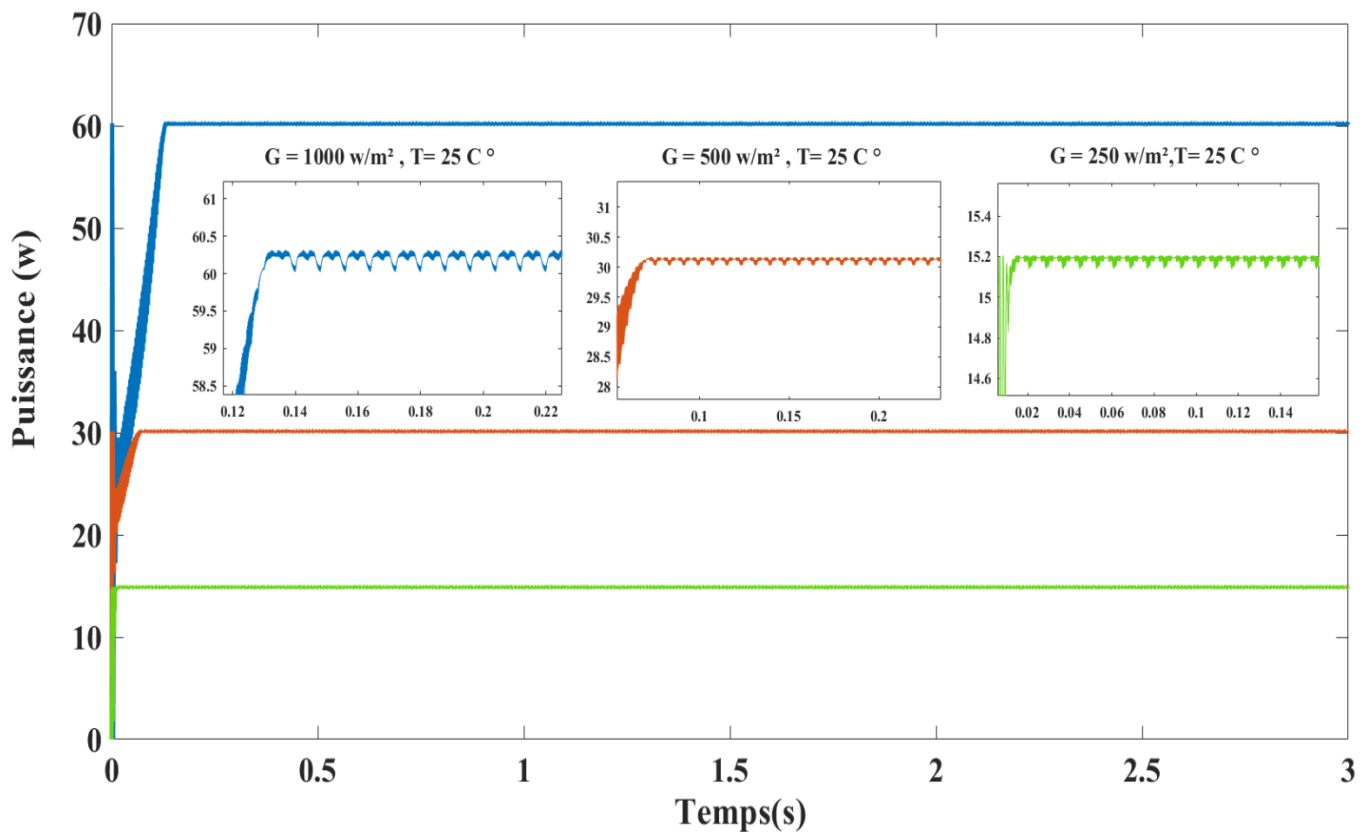


Figure II.9 : Analyse des courbes de puissance pour la commande MPPT en utilisant la méthode P&O avec un éclairement variable.

Tableau II. 2 : Performance des MPPT avec L'éclairement variable

L'éclairement	La puissance
250 W/m ²	15.65 W
500 W/m ²	30.13 W
1000 W/m ²	60.26 W

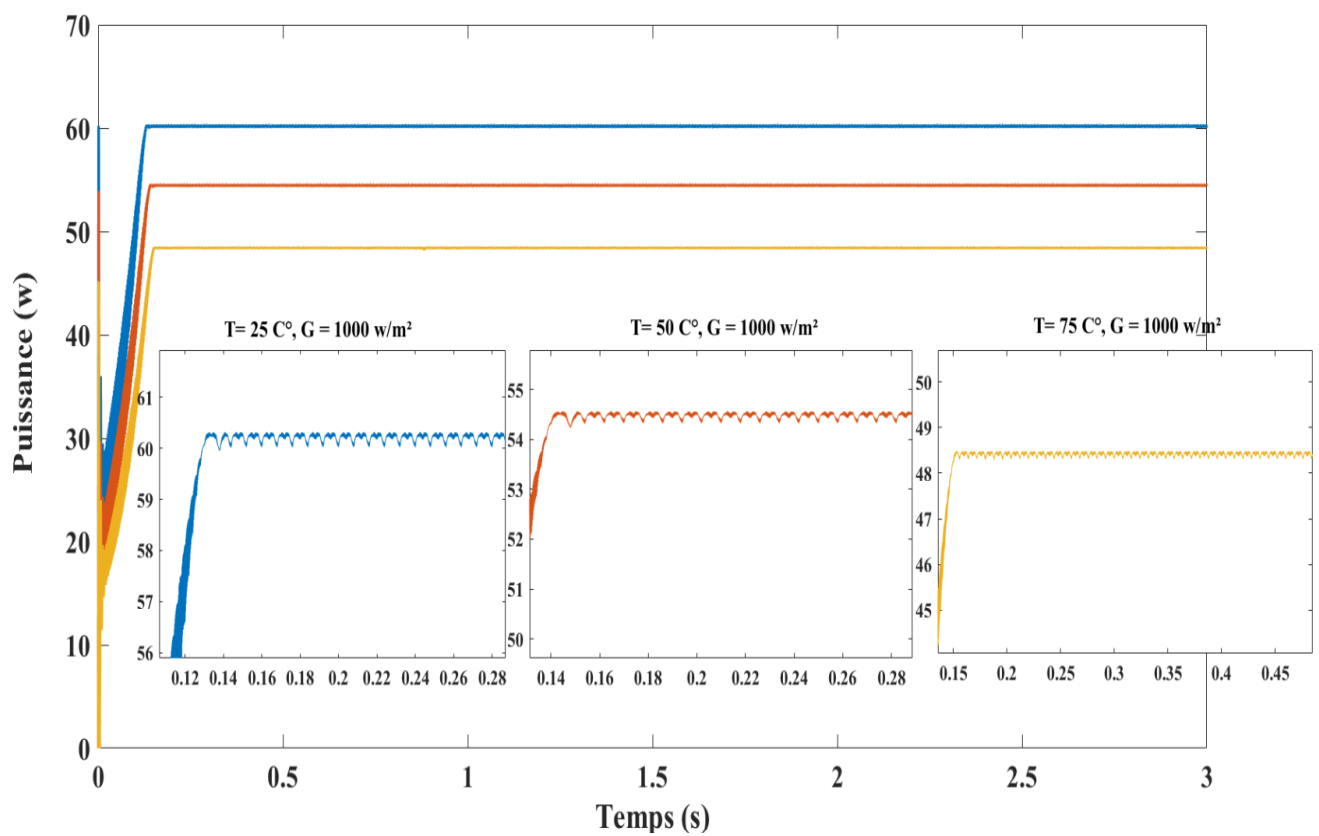


Figure II.10 : Résultats de simulation des courbes de puissance pour la commande MPPT a base de la méthode P&O avec température variable.

Tableau II. 3 : Performance des MPPT avec température variable

Température	La puissance
25 C °	60.13 W
50 C °	54.62 W
75 C °	48.6 W

🌈 L'algorithme P&O a comme avantage la précision et la rapidité de réaction. Il a permis de déterminer le point de puissance maximale pour différentes valeurs d'ensoleillement.

II.10. Conclusion :

Dans ce chapitre on a fait l'étude d'un convertisseur DC-DC de type BOOST et aussi on a présenté et détaillée la technique de la commande MPPT, Nous avons choisi pour cela, la méthode P&O (perturbation & Observation). Cette commande MPPT utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

Nous avons basé sur l'étude des convertisseurs du courant continu (boost) et la commande MPPT de type P&O pour le but d'utiliser dans le chapitre suivant.

Dans le but d'étudier le comportement du système photovoltaïque par rapport aux variations climatiques, plus précisément l'éclairement, nous avons simulé le système photovoltaïque pour différentes valeurs de l'ensoleillement. Les résultats de simulation montrent que le système est stable. et la méthode P&O lui ont permis de fonctionner au PPM même face aux changements de l'éclairement.

CHAPITRE III

Commande par mode glissant d'un système PV

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous intéressons à l'application de la commande MPPT basée sur le mode glissant sur les systèmes photovoltaïques. L'intérêt de cette commande ne cesse d'augmenter en raison de sa simplicité d'élaboration et ses multiples applications dans l'automatique ou de l'électronique de puissance. Le but de cette commande est d'extraire le maximum de puissance des panneaux PV.

III .2. Systèmes à structures variables :

Un système à structure variable est un système dont la structure change pendant son fonctionnement. Il est caractérisé par le choix d'une structure et d'une logique de commutation. Il admet une représentation par des équations différentielles du type :

$$\dot{x} = \begin{cases} f_1(x) & \text{si la condition 1 est vérifiée} \\ f_n(x) & \text{si la condition n est vérifiée} \end{cases} \quad \text{III.1}$$

Où f_i sont des fonctions appartenant à un ensemble de sous-systèmes.

III .3. Théorie des modes glissants :

Dans les systèmes à structures variables avec mode de glissement, la trajectoire d'état est amenée vers une surface, puis à l'aide de la loi de commutation, elle est obligée de rester au voisinage de cette surface. Cette dernière est dite surface de glissement et le mouvement le long de laquelle il se produit, est dit mouvement de glissement. Cette commande est Appliquée aux systèmes décrits par l'équation suivante (on se limite au cas de deux modes de fonctionnement $n = 2$) [49].

$$\dot{X} = \begin{cases} f^+(x, u^+) & \text{si } S(x, t) > 0 \\ f^-(x, u^-) & \text{si } S(x, t) < 0 \end{cases} \quad \text{III.2}$$

Les champs de vecteurs de la loi de commande u^+ et u^- sont définis par :

$$U = \begin{cases} u^+ & \text{si } S(x, t) > 0 \\ u^- & \text{si } S(x, t) < 0 \end{cases} \quad \text{III.3}$$

Où $S(x, t)$ est la surface de commutation (ou de glissement).

➤ La surface de commutation S_0 est définie comme suit :

$$S_0 = \{x(t) / s(x, t) = 0\} \quad \text{III.4}$$

III.4. Principe de la commande par mode glissant :

La commande par modes glissants implique de ramener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation adéquate jusqu'au point d'équilibre. Cette trajectoire se compose de trois composantes différentes.

III.4.1. Mode de convergence (MC) :

Dans le mode de convergence (reaching mode), la variable à ajuster se déplace depuis n'importe quel point initial x_0 dans le plan de phase et se dirige vers la surface de commutation $S(x) = 0$. La loi de commande et le critère de convergence caractérisent ce mode.

III.4.2. Mode de glissement (MG) :

En mode de glissement, la variable d'état atteint la surface de glissement et se dirige vers l'origine du plan de phase. Dans ce mode, la dynamique se manifeste par la sélection de la surface de glissement $S(x)$ [59].

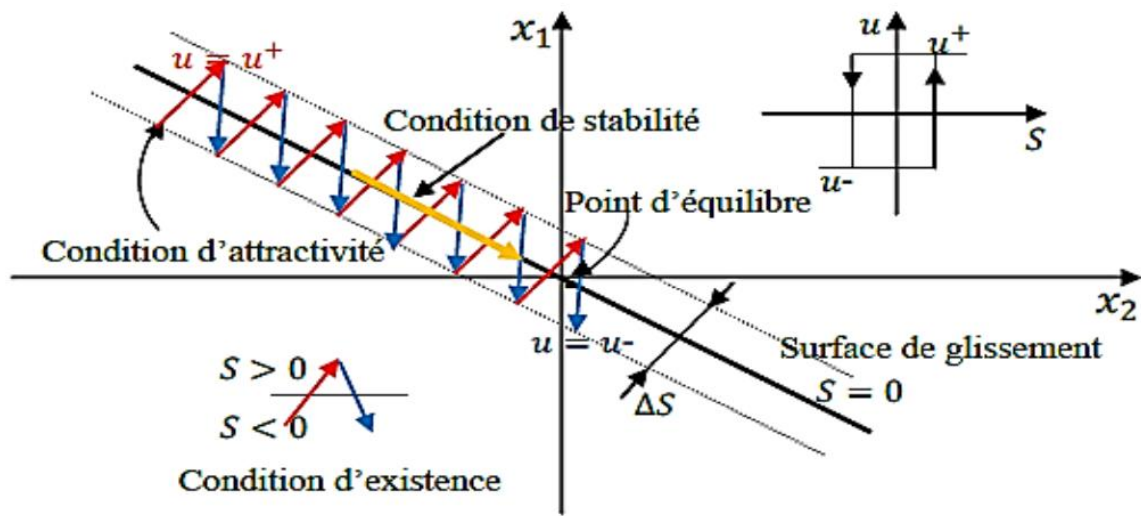


Figure III.1 : Principe de la commande par mode glissant [50].

Théorème 1 : Soit $V(x)$ une fonction dite fonction de Lyapunov qui vérifie les conditions suivantes [49] :

$$\begin{cases} V(0) = 0 \\ V(x) > 0 \\ \dot{V}(x) \leq 0 \end{cases} \quad \forall x \neq 0 \quad \text{III.5}$$

Si ces trois conditions sont satisfaites, $x = 0$ est un point d'équilibre stable. Si de plus $V(x) < 0$ (strictement négative) Le point $x = 0$ est asymptotiquement stable pour $\forall x \neq 0$.

III.4.3. La fonction de Lyapunov :

Pour les variables d'état du système, la fonction de LYAPUNOV est une fonction scalaire positive ($V(x) > 0$) qui est positive. Il est nécessaire que la loi de commande réduise cette fonction ($\dot{V}(x) < 0$).

Cette fonction est généralement utilisée pour garantir la stabilité des systèmes non linéaires. En définissant par exemple une fonction de Lyapunov pour le système comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad \text{III.6}$$

Ainsi, sa dérivée vérifie l'équation suivante :

$$\dot{V}(x) = S(x)\dot{S}(x) \quad \text{III.7}$$

Pour que fonction de Lyapunov puisse décroître, il suffit d'assurer que :

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0 \quad \text{III.8}$$

III.4.4. Objectif de la commande par mode glissant :

L'objectif de la commande par mode glissant se résume en deux points essentiels :

- Synthétiser une surface $S(x,t)$ telle que toutes les trajectoires du système obéissent à un comportement désiré de poursuite, régulation et stabilité .
- Déterminer une loi de commande (commutation) $u(x, t)$ qui est capable d'attirer toutes les trajectoires d'état vers la surface de glissement et les maintenir sur cette surface.

III.5. Conception de la control par mode de glissement :

La conception de la commande par mode glissant passe par trois étapes principales et complémentaires :

- Choix de la surface de glissement $S(x)$.
- Établissement des conditions d'existence de la convergence.
- Détermination de la loi de commande u .

III.5.1. Choix de la surface de glissement :

Le choix de la surface de glissement concerne le nombre et la forme nécessaires. Ces deux facteurs sont en fonction de l'application et de l'objectif visé. En général, pour un système défini par l'équation d'état suivante :

$$\dot{x}(t) = f(x, t) + g(x, t) u(t) \quad \text{III.9}$$

La surface $S(x)$ représente le comportement dynamique désiré du système. Une forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable vers sa valeur désirée est donnée par [51].

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{r-1} e(x) \quad \text{III.10}$$

Avec :

- $e(x)$: écart de la variable à régler $e(x) = V_{pv} - V_{ref}$.
- λ : constante positive.
- r : degré relatif, égale au nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaître la commande [52-53].

Ainsi, on trouve :

- Pour $r = 1$, $S(x) = e(x)$,
- Pour $r = 2$, $S(x) = \lambda e(x) + \dot{e}(x)$.
- $S(x) = 0$ est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $e(x) = 0$.

III.5.2. Condition d'existence du glissement :

Cette condition représente le critère permettant à la dynamique du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester même face aux perturbations. Cela est assuré quand la fonction de Lyapunov est décroissante. Ainsi, il suffit d'assurer que sa dérivée est négative ce qui est équivalent à :

$$S(x) \dot{S}(x) < 0 \quad \text{III.11}$$

III.5.3. Détermination de la loi de commande par la méthode Ueq :

Après le choix de la surface de glissement et du critère de convergence, il faut déterminer la commande nécessaire qui a pour but de ramener la variable à contrôler vers la surface de glissement et ensuite vers son point d'équilibre.

Une des hypothèses essentielles dans la conception des systèmes à structure variable contrôlés par les modes glissants, est que la commande doit commuter entre une valeur maximale u_+ et une valeur minimale u_- en fonction du signe de la surface de glissement (figure III.2). Dans ce cas, des oscillations de très haute fréquence appelées 'broutement' ou 'Chattering' apparaissent dans le mode de glissement.

➤ La structure d'un contrôleur par mode glissant comporte deux parties :

- Une commande discontinue en fonction du signe de la surface de glissement u_n .
- Une commande dite équivalente u_{eq} caractérisant la dynamique du système sur la surface de glissement.

$$u = u_{eq} + u_n \quad \text{III.12}$$

Nous nous intéressons au calcul de la commande équivalente et par la suite au calcul de la commande attractive du système défini dans l'espace d'état par l'équation (III.9).

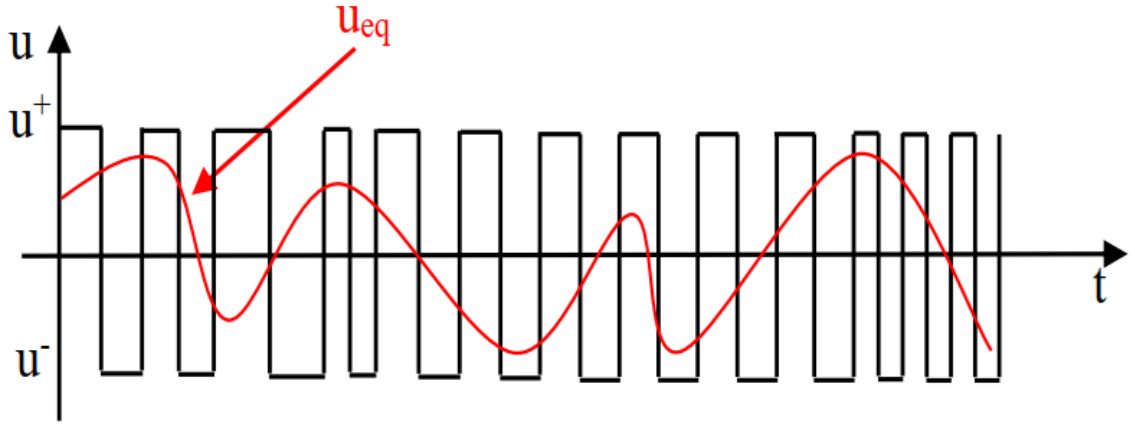


Figure III.2 : Commande équivalente [50].

III.5.3.1. Commande équivalente u_{eq} :

La commande équivalente u_{eq} est la composante non linéaire qui permet de garantir l'attractivité de la variable à contrôler vers la surface de glissement. Elle peut être interprétée comme la valeur moyenne que prend la commande lors de la commutation rapide entre u^+ et u^- :

À partir de (III.9) et (III.12) nous avons :

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} (f(x, t) + g(x, t)u_{eq}) + \frac{\partial S}{\partial x} g(x, t)u_n \quad \text{III.13}$$

En mode de glissement et en régime permanent, la dérivée de la surface est nulle ($\dot{S}(x) = 0$ car la surface est égale à zéro). Cette condition permet de déterminer la commande équivalente :

$$u_{eq} = -\left(\frac{\partial S}{\partial x} g(x, t)\right)^{-1} \left(\frac{\partial S}{\partial x} f(x, t)\right), \quad u_n = 0 \quad \text{III.14}$$

Durant le mode de convergence, en remplaçant le terme u_{eq} par sa valeur tirée de l'équation (III.14) dans l'équation (III.13). Donc nous obtenons une nouvelle expression de la dérivée de la surface soit :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} g(x, t) u_n \quad \text{III.15}$$

III.5.3.2 Commande discontinue u_n :

La commande u_n est la composante non linéaire qui permet de garantir l'attractivité de la variable à contrôler vers la surface de glissement et satisfaire la condition de convergence donnée par l'équation (III.11) ($S(x) \dot{S}(x) < 0$). Ainsi à partir de l'équation (III.15), le problème revient à trouver u_n tel que :

$$S(x) \dot{S}(x) = S(x) \frac{\partial S}{\partial x} g(x, t) u_n < 0 \quad \text{III.16}$$

La solution la plus simple vérifiant cette condition est donnée par la fonction signe illustrée sur figure III.3 :

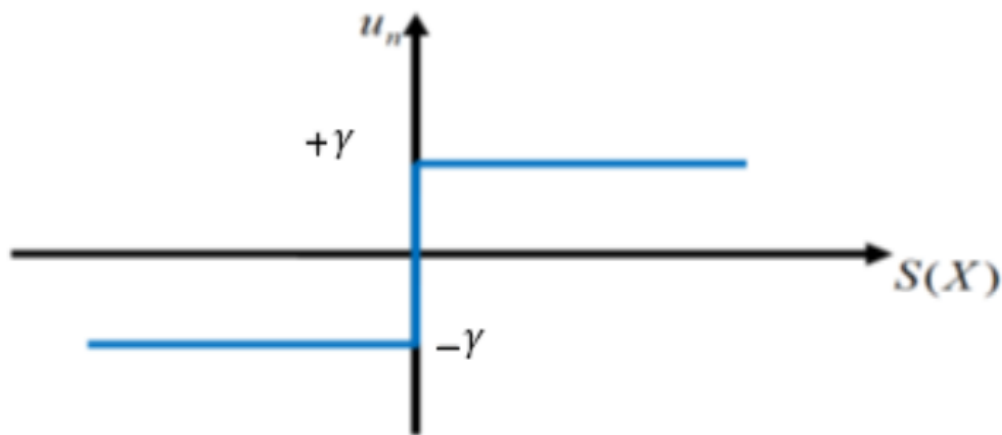


Figure III.3 : Représentation graphique de la fonction " Signe "

Dans ce cas, la commande u_n s'écrit comme suit :

$$U_n = K_x \text{Sign } S(x) \quad \text{III.17}$$

En remplaçant l'expression (III.17) dans (III.16), on obtient :

$$S(x)\dot{S}(x) = S(x) \frac{\partial S}{\partial x} g(x, t) \cdot K_x S(x) < 0 \quad \text{III.18}$$

Afin de satisfaire la condition d'attractivité (III.18), le signe du gain K_x doit être opposé

au signe du facteur $\frac{\partial S}{\partial x} g(x, t)$.

III.6. Avantages et inconvénients de la commande par mode de glissement :

Il est reconnu que la commande par mode de glissement présente l'avantage majeur d'être très robuste face aux perturbations et aux incertitudes du modèle. Contrairement à des lois de commande classiques, les performances dynamiques sont maintenues quelle que soit la variation des paramètres du système ou l'amplitude des perturbations appliquées [53]. De plus, la réduction de l'ordre du système constitue un autre point fort de ce type de commande, permettant ainsi de simplifier la complexité du système.

Cependant, ces performances intéressantes s'accompagnent aussi de certains inconvénients [54] :

- Le phénomène de chattering ou broutement, causé par la partie discontinue de la commande, peut avoir un effet néfaste sur les actionneurs du système.
- Le système est soumis à chaque instant à une commande à fréquence élevée afin d'assurer sa convergence vers l'état désiré, ce qui n'est pas toujours souhaitable.

Ainsi, bien que la commande par mode glissant offre une très bonne robustesse, ces aspects doivent être pris en compte lors de sa mise en œuvre pour les systèmes photovoltaïques.

III.7. La commande MPPT par mode de glissant pour les systèmes photovoltaïques :

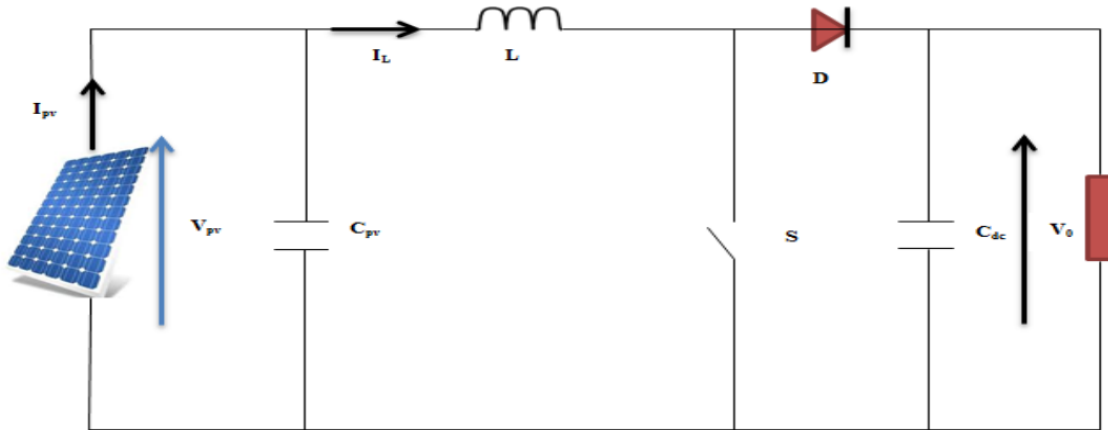


Figure III.4 : Système photovoltaïque : structure globale [59].

On peut représenter notre système de la façon suivante :

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{C_{pv}} i_{pv} - \frac{1}{C_{pv}} x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = \frac{1}{L} x_1 - \frac{1-\alpha}{L} V_o \end{cases} \quad \text{III. 19}$$

Avec :

$$x = [x_1 \ x_2]^T = [V_{pv} \ I_L]^T$$

Dans cette recherche, nous présentons le concept de la technique de contrôle approchée.

- En optant pour la surface de glissement comme étant [55-56] :

III.7.1. Commande par mode glissement avec surface impose :

$$S = \frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} = 0 \quad \text{III.20}$$

➤ La commande équivalente est déterminée selon la condition suivante :

$$S = \left(\frac{\partial S}{\partial X} \right)^T \dot{X} = \left(\frac{\partial S}{\partial X} \right)^T (f(x) + g(x)\alpha_{eq}) = 0 \quad \text{III.21}$$

- Le contrôle équivalent est donné alors :

$$\alpha_{eq} = \frac{\left(\frac{\partial S}{\partial X} \right)^T f(x)}{\left(\frac{\partial S}{\partial X} \right)^T g(x)} = 1 - \frac{V_{PV}}{V_0} \quad \text{III.22}$$

Et:

$$\alpha_n = K * \text{Sign}(S) \quad \text{III.23}$$

- Le contrôle de commande est donné comme :

$$\alpha = \alpha_{eq} + \alpha_n = 1 - \frac{V_{PV}}{V_0} + K * \text{Sign}(S) \quad \text{III.24}$$

III.7.2. Commande par mode glissement avec surface slotine:

En ce qui concerne la deuxième méthode, nous employons la surface de slotine, qui est choisie par l'application dans le contrôleur de mode glissant, [57-58].

D'après l'équation III.19

On a :

$r = 2$ et par l'application sur l'équation III.10 :

r : degré relative

On trouve :

$$S = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right) e(x) \quad \text{III.25}$$

$$S = \dot{e} + \lambda e \quad \text{III.26}$$

Avec :

$$e = V_{pv} - V_{ref} \quad \text{III.27}$$

En remplaçant les expressions des équations **III.19** et **III.27** dans l'équation **III.26**, nous obtenons la forme finale de la surface de Slotine :

$$S = \dot{x}_1 - \dot{V}_{ref} + \lambda e \quad \text{III.28}$$

$$S = \frac{1}{c_{pv}} (\dot{i}_{pv} - \dot{x}_2) - \dot{V}_{ref} + \lambda e \quad \text{III.29}$$

➤ Le dérivé de surface est :

$$\dot{S} = \frac{1}{c_{pv}} (\ddot{i}_{pv} - \ddot{x}_2) - \ddot{V}_{ref} + \lambda \dot{e} = -k * \text{sign}(S) \quad \text{III.30}$$

En remplaçant l'expression de l'équation **III.19** dans l'équation **III.30**, nous obtenons la loi de commande suivante :

$$\alpha = 1 - \frac{Lc_{pv}}{V_0} \left[v_{ref}'' + \frac{1}{Lc_{pv}} x_1 - k \text{sign}(S) - \lambda \dot{e} - \frac{\dot{i}_{pv}}{c_{pv}} \right] \quad \text{III.31}$$

III.8. Résultat de simulation d'un système PV :

Le schéma de la **figure (III.5)** présente un système comprenant un module photovoltaïque, un contrôleur MPPT et un convertisseur DC-DC de type boost pour mettre en pratique les techniques précédentes. Un circuit de commande est utilisé pour optimiser les sorties du module solaire (puissance, courant et tension) en utilisant les données du module photovoltaïque.

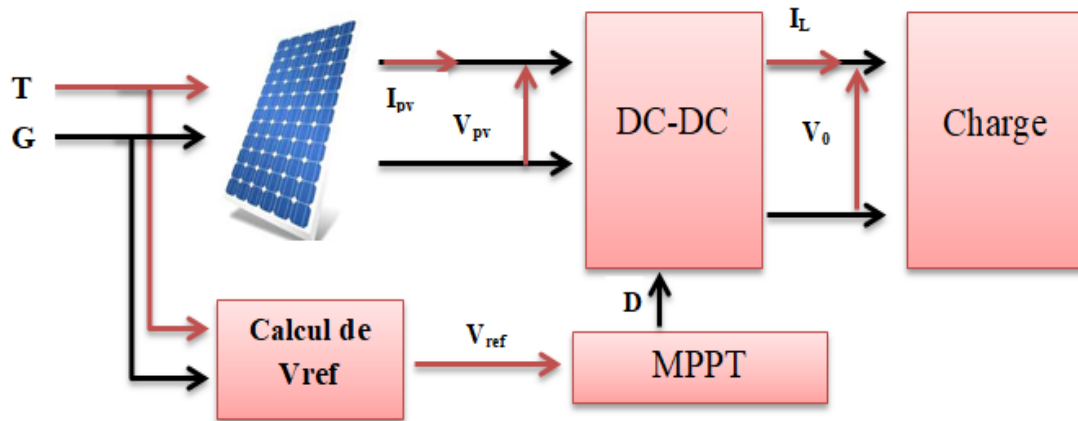


Figure III.5 : Installation globale d'un système solaire photovoltaïque avec un contrôle MPPT [59].

Le système photovoltaïque étudié est un système autonome, c'est-à-dire fonctionnant indépendamment du réseau électrique. Il est équipé d'un panneau photovoltaïque d'une puissance nominale de 60,26 watts.

Tableau III.1 : Paramètres du le hacheur boost.

Paramètres	Valeurs
Capacité C_{dc}	50e-6 F
Capacité C_{pv}	3e-5 F
Inductance L	2e-3 H
Le gain K	0.5
Lemda λ	0.5

Le Tableau III.1 présente les paramètres utilisés, en supposant que les interrupteurs utilisés soient parfaits.

III.8.1 Simulation de MPPT en conditions constantes :

La température et l'ensoleillement sont maintenus stables lors de ce test. La température T est de 25°C et l'ensoleillement est de $1000\text{W}/\text{m}^2$.

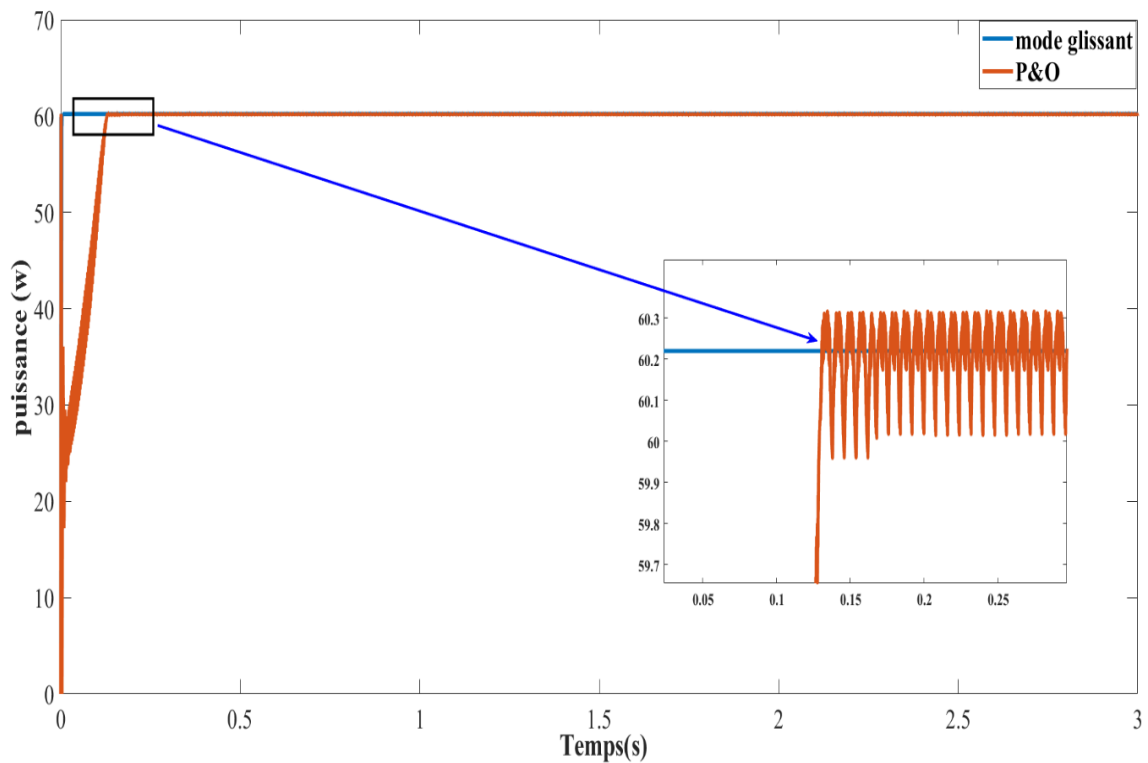


Figure III.6: Résultat de simulation des puissances avec les conditions stables

($G = 1000\text{W} / \text{m}^2$, $T=25^{\circ}\text{C}$)

Les deux méthodes (P&O et Mode glissant) sont clairement démontrées dans la figure III.6 pour assurer le point de puissance maximale. Les méthodes (mode glissant et P&O) garantissent un point maximal avec moins d'oscillations par rapport aux autres techniques.

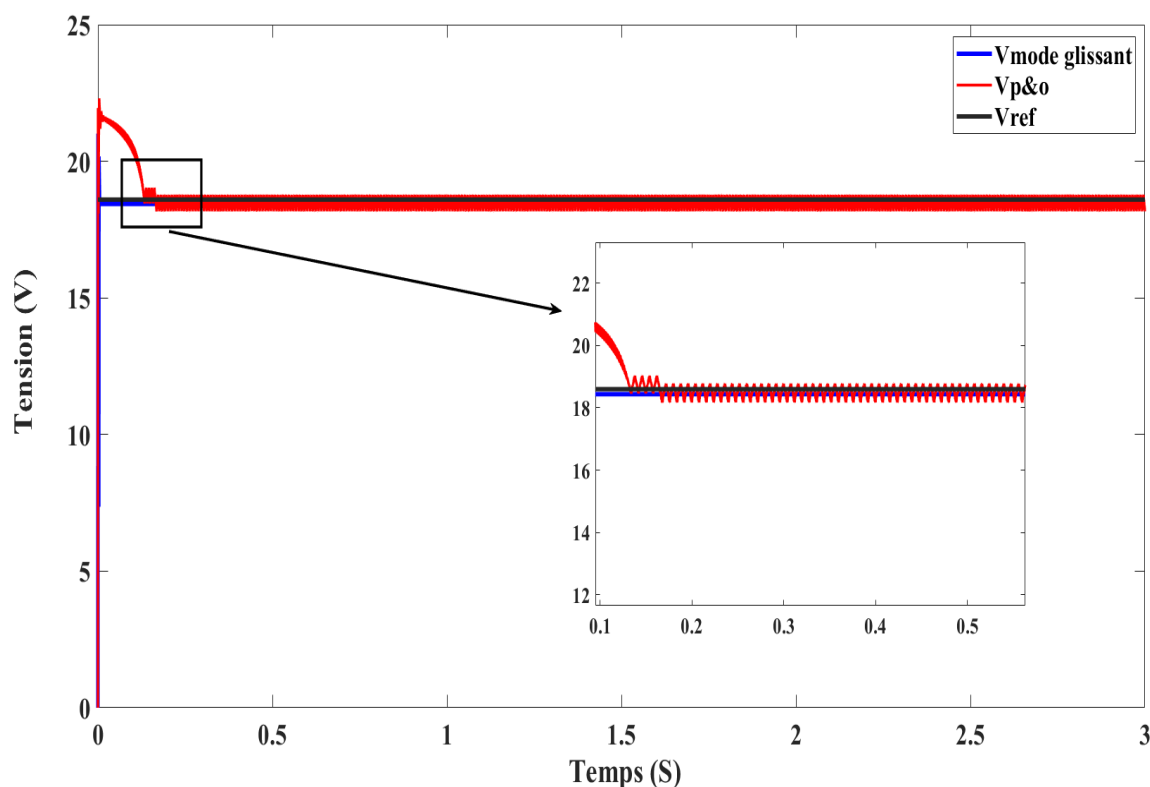


Figure III.7 : Résultat de simulation des tensions avec la condition stable
($G= 1000W /m^2$, $T=25C^{\circ}$)

Comme illustré dans la **figure III.7**, la tension de référence est précise et la méthode convient exactement à cette tension. Cependant, la méthode mode glissant présente une performance élevée (moins d'oscillation et d'erreur) par rapport aux autres méthodes similaires.

III.8.2 Simulation de MPPT en conditions variables :

Pour étudier le comportement du système en fonction des variations de l'éclairement et de la température, nous allons le tester comme indiqué dans la **figure III.8**.

La **figure III.9**, on a fait varier rapidement l'ensoleillement de ($1000W/m^2$, $500W/m^2$ et $250W/m^2$, $T=25C^{\circ}$), la température de ($25C^{\circ}$, $50C^{\circ}$ et $75C^{\circ}$, $G =1000W/m^2$).

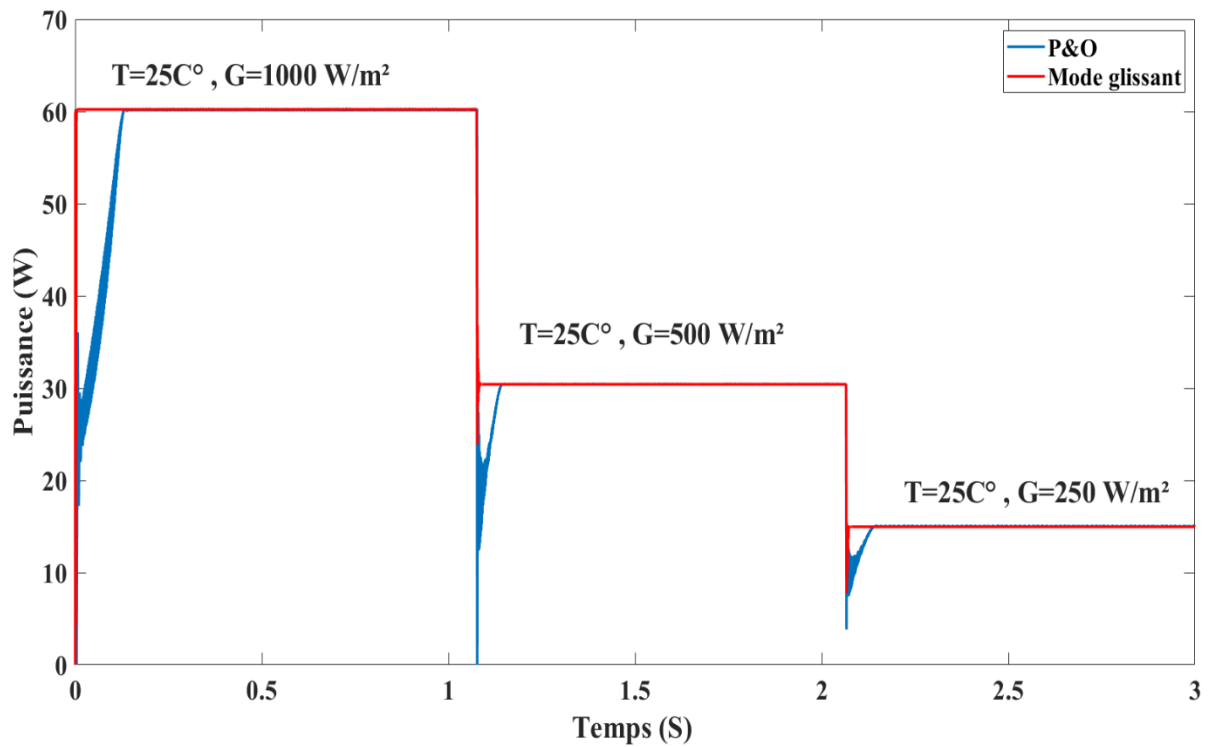


Figure III.8: Courbes de puissance simulée sous éclaircissement variable
(1000 W/m^2 , 500 W/m^2 et 250 W/m^2 , $T=25^\circ\text{C}$)

- En premier lieu, une simulation des deux méthodes MPPT (P&O) et mode glissant a été effectuée afin de visualiser laquelle des deux méthodes est la plus précise et la plus réactive aux variations de l'ensoleillement et température. On considère des niveaux différents d'ensoleillement d'une durée d'une seconde (**1s**) chacun. Les niveaux d'ensoleillement traités à température constante (25°C), sont (1000 W/m^2 , 500 W/m^2 et 250 W/m^2) Fig. **III.8**.

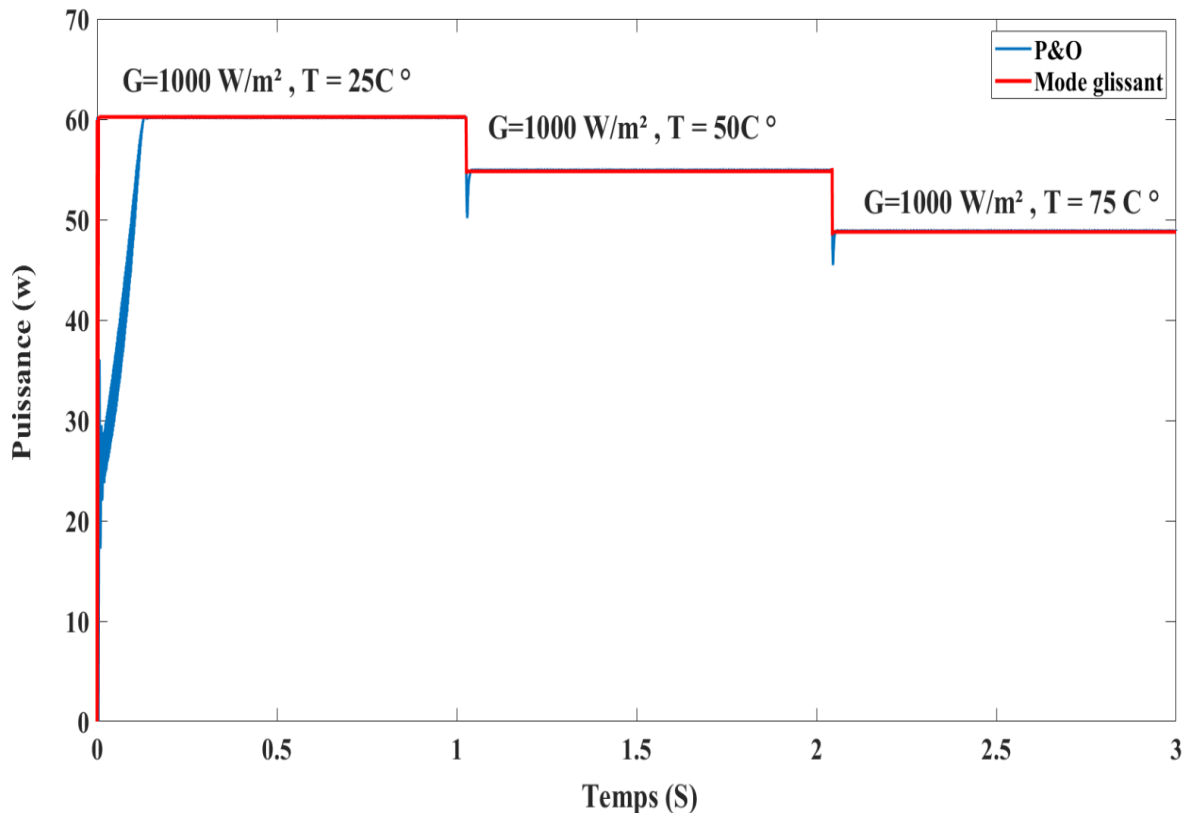


Figure III.9: Courbes de puissance pour la température variable
(25C°, 50C°et 75C°, G =1000W/m²)

- De nouveau, nous avons considéré un niveau d'irradiation constant (1000W/m²) mais a température variable (25C°, 50C° et 75C°) Fig. III.9.
- Dans les deux cas (Fig. III.8 et Fig. III.9), on constate une relation directement proportionnelle entre la puissance et le temps.

III.9. Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté l'application de la commande MPPT basée sur le mode glissant sur le système photovoltaïque, comparant avec la méthode P&O, cette commande permet au système de rejoindre son PPM rapidement même face aux changements rapides de l'éclairement.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Le travail que nous présentons traite la modélisation et la commande d'un système photovoltaïque. L'énergie produite est utilisée pour alimenter des charges à courant-continu à travers un convertisseur DC-DC. Ce convertisseur est appelé convertisseur de Boost.

En premier lieu, des généralités ont été présentées sur les systèmes photovoltaïques. Puis, nous avons traité en détail la synthèse du modèle mathématique de chaque système photovoltaïque à savoir les générateurs photovoltaïques et les hacheurs.

Notre intérêt est basé ensuite aux techniques de poursuite du point de puissance maximale MPPT qui permettent d'assurer le fonctionnement du système photovoltaïque au PPM. Une méthode conventionnelle a été introduite qui sert à perturber et observer (P&O). Le problème observé de la technique P&O est la déviation du vrai point de puissance maximale lors d'un changement brusque de l'ensoleillement.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous avons essayé de présenter l'application de Commande par mode glissant d'un système PV sur les systèmes photovoltaïques. Le problème majeur de cette commande est le phénomène de réticence. Ce problème a été majoritairement résolu en utilisant une version modifiée de la commande par mode glissant qui sert à remplacer la fonction discontinue signe par la fonction saturation, mais cela a nécessité un compromis avec le temps de réponse.

Les résultats de simulation exposés montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer le rendement des installations photovoltaïques.

Résumé :

Ce mémoire porte essentiellement sur l'étude des commandes des systèmes photovoltaïques. Cette étude concerne le développement d'une méthode MPPT basée sur une approche non linéaire appelée commande par mode glissant pour le transfert optimal de l'énergie depuis un générateur PV vers sa charge. Distinct du contrôleur par mode glissant, le schéma de contrôle proposé présente les caractéristiques de convergence rapide et en temps fini. Pour évaluer l'amélioration effective apportée par la commande.

Mots Clés : énergies renouvelables, systèmes photovoltaïque, MPPT, convertisseurs statiques, commande par mode glissant.

المخلص :

تتركز هذه الأطروحة على دراسة الضوابط القوية للأنظمة الكهروضوئية. تتعلق هذه الدراسة بتطوير طريقة MPPT بناء إلى نهج غير خطي يسمى التحكم في وضع الانزلاق من أجل نقل طاقة أمثل من مولد PV إلى حمولته. يتميز مخطط التحكم المقترح عن وحدة التحكم في وضع الانزلاق بخصائص التقارب السريع و المحدود لتقييم التحسين الفعال الذي يوفره هذا التحكم.

الكلمات الرئيسية : الطاقات المتجددة، الأنظمة الكهروضوئية، التحكم في وضع الانزلاق .

Abstract:

This study concerns the development of the MPPT (Maximum Power Point Tracking) method based on a nonlinear approach called sliding mode control for the optimal transfer of energy from a PV generator to its load.

Keywords: Renewable energy, photovoltaic systems, MPPT, static converters, sliding mode control.

Références bibliographiques

Références bibliographies:

- [1] U. Nzotcha, J. Kenfack, and M. B. Manjia, “Integrated multicriteria decision making methodology for pumped hydroenergy storage plant site selection from a sustainable development perspective with an application,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 112, pp. 930–947, 2019.
- [2] AEI, “World energy investment outlook| special report,” in *The International Energy Agency (IEA)*, 2016.
- [3] J. Kenfack, O. V. Bossou, J. Voufo, S. Djom, and N. Crettenand, “New renewable energy promotion approach for rural electrification in Cameroon,” in *Renewable Energy in the Service of Mankind Vol II*, pp. 429–442, Springer, Cham, 2016.
- [4] J. Kenfack, O. V. Bossou, J. Voufo, and S. Djom, “Addressing the current remote area electrification problems with solar and microhydro systems in Central Africa,” *Renewable Energy*, vol. 67, pp. 10–19, 2014.
- [5] M. Vitale and D. Piazza, *Photovoltaic sources: modeling and emulation*, Springer, Verlag London, 2013.
- [6] M. M. Hassan, K. H. Refat, M. Z. Baten, and R. N. Sajjad, “Energy saving potential of photovoltaic windows: impact of shading, geography and climate,” *Solar Energy*, vol. 240, pp. 342–353, 2022
- [7] B. Yang, W. Li, Y. Zhao, and X. He, “Design and analysis of a grid-connected Photovoltaic power system,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25 , no. 4, 2010.
- [8] R. Khanna, Q. Zhang, W. Stanchina, G. Reed, and Z.-H. Mao, “Maximum power point tracking using model reference adaptive control,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 3, pp. 1490–1499, 2014.

- [9] H. Knopf, Analysis, Simulation, and Evaluation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Methods for a Solar Powered Vehicle, Master of Science in Electrical and Computer Engineering, Portland State University, 1999.
- [10] R. Gottschalg, M. Rommel, D.G. Ineld, and H. Ryssel, Comparison of different methods for the parameter determination of the solar cell's double exponential equation, In 14th European Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC), Barcelona, Spain, 1997
- [11] S. Dorahaki, "Evaluating the radiation and temperature effect on photovoltaic systems," Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, vol. 4, no. 1, pp. 1–6, 2015.
- [12] S.-C. Tan, Y. Lai, and C. Tse, "General design issues of sliding mode controllers in dc-dc converters," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 3, pp. 1160–1174, 2008.
- [13] S. . Tan, Y. M. Lai, and C. K. Tse, "General design issues of sliding-mode controllers in dc-dc converters," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 3, pp. 1160–1174, 2008.
- [14] Y. Levron and D. Shmilovitz, "Maximum power point tracking employing sliding mode control," IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 60, no. 3, 2013.
- [15] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "A technique for improving P&O mppt performances of double-stage gridconnected photovoltaic systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 11, pp. 4473–4482, 2009.
- [16] T. Eswam and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," IEEE Transactions on energy conversion, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, 2007.
- [17] J. Chavarria, D. Biel, F. Guinjoan, C. Meza, and J. Negroni, "Energy-balance control of PV cascaded multilevel grid-connected inverters under level-shifted and phase-shifted pwms," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 1, pp. 98–111, 2013.

- [18] MT. Dang, « élaboration de cellules solaire photovoltaïque à base de polymères conjugués, études des systèmes », Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, 2009.
- [19] B. L. Sofia, "Cours Energie Solaire Photovoltaïque. «Université de Béjaia, 2015.
- [20] <https://youmatter.world/fr/definition/energies-renouvelables-definition/>
- [21] <https://www.lenergiétoutcompris.fr/actualites-conseils/>
- [22] <https://www2.uned.es/biblioteca/energiarenovable3/sistemas.htm#solar>
- [23] Belakehal Soltane, "Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Énergies Renouvelables," Thèse de Doctorat, université de Constantine, 10/06/2010 ".
- [24] Bessemoulin P, Oliiviéri J. Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette. .Physique Atmosphérique La Météorologie 8ème Série-N°31-Sept 2000:42–59.
- [25] AOUCHICHE NEDJMA. Conception d’une commande MPPT optimale à base d’intelligence artificielle d’un système photovoltaïque. thèse de doctorat de l’établissement université bourgogne Franche-Comté, 2020.
- [26] Anne Labouret, Pascal Cumunel, "Cellules solaires Les bases de l’énergie photovoltaïque", Dunod, 5e édition, 2010
- [27] Cours énergie solaire photovoltaïque par Dr BELAID LALOUNI Sofia Maitre de Conférences Classe B département de Génie Electrique Université A. MIRA BEJAIA.
- [28] M.L. Louazane „“Etude technico-économique d’un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla „“Mémoire de Magister Université El Hadj Lakhdar-Batna 16/06/2008.
- [29] Nedjma Aouchiche : Conception d’une commande MPPT optimale à base d’intelligence artificielle d’un système photovoltaïque, thèse de Doctorat, Faculté de Technologie, Département Électrotechnique, Université Bourgogne Franche-Comté, Français .NNT2020UBFCA001, pp 06, p 09, pp14, pp16,2020.
- [30] DJERIOU SALIM, Simulation d’un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone, mémoire de Magister, Faculté de Technologie, Département Électrotechnique, Université Ferhat Abbas-Sétif, pp 03,2011.
- [31] [https://www.anme.tn/?q=fr/node/1739/Module photovoltaïque](https://www.anme.tn/?q=fr/node/1739/Module%20photovoltaïque)

- [32] MADANI Maroua «Implémentation d'un algorithme MPPT dans une FPGA en utilisant la carte ML605», Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2018
- [33] Chebana A, "Contrôle d'un système photovoltaïque connecté au réseau," Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [34] <https://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/effet-photovoltaque.html>
- [35] Nedjma Aouchiche, Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque, thèse de Doctorat, Faculté de Technologie, Département Électrotechnique, Université Bourgogne Franche-Comté, Français. NNT 2020UBFCA001, pp 06, p 09, pp14, pp16, 2020
- [36] I. BENDJAMAA, "Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque," 2012.
- [37] H. Abbes, H. Abid, K. Loukil, A. Toumi, and R. Abid, "Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque," J Revue des Energies Renouvelables, vol. 17, no. 3, pp. 435-445, 2014
- [38] S. Messalti, A. Harrag, and A. Loukriz, "A new neural networks MPPT controller for PV systems," in IREC2015 The Sixth International Renewable Energy Congress, 2015, pp. 1-6: IEEE
- [39] Yun Jack Chin, Zainal Salam, and Kashif Ishaque. Cell modeling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application : A review. *Applied Energy*, 154:500 – 519, 2015.
- [40] Aamarouayache Mohamed, « contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque », doctorat en sciences en électrotechnique option ,2014.
- [41] S. Motahhir, A. El Ghzizal, et A Derouich « Modélisation et commande d'un panneau Photovoltaïque dans l'environnement PSIM » , CIGIMS 2015, EST de Fès, 2015.
- [42] W.Bensaci'' Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT '' Mémoire de Master Université Kasdi Merbah-Ouargla 2011/2012.

- [43] Ressources naturelles du Canada: Les systèmes photovoltaïques (guide de l'acheteur), division de l'énergie renouvelable et électrique, nOM92-28/2001F, Ottawa, Canada 2018 .
- [44] F.Slama ‘‘ Modélisation d’un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique ’’ Mémoire de Magister université ferhat abbas - setif-01/04/2011.
- [45] M. Madani, « Réalisation des couches antireflets dans les cellules solaires à couches minces », thèse de magister en physique, université ABOU-BAKR BELKAID de Tlemcen, 2006.
- [46] S. Motahhir, A. El Ghzizal, et A Derouich « Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM » , CIGIMS 2015, EST de Fès, 2015.
- [47] BENSACI Wafa , «Modélisation et simulation d’un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », mémoire de master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2012.
- [48] BENADEL Faiza. Etude Et Simulation D’une Commande MPPT Pour Système PV, université MOHAMED BOUDIAF - M’SILA.
- [49] M.Loucif, « Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d’une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur », Thèse de doctorat, université ABOU-BAKR BELKAID de Tlemcen, 2016.
- [50] «BOUCHAMA Messaoud» Mémoire de Fin d’Études Pour l’obtention du diplôme Master en Automatique Année Universitaire 2017/2018.
- [51] A. Belkaid, « Conception et implémentation d’une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas - Setif 1, 2015.
- [52] O. Mahmoudi, N. Madani, M. F Benkhoris, F. Boudjema, « Cascade sliding mode control of a field oriented induction machine drive », The European Physical journal, April 1999.
- [53] Bühler H. Réglage par mode de glissement. Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, 1986

[54] M.Sahraoui Mebarek, H.Benderradji, commandes non linéaires de la machine asynchrone, mémoire de master, université de m'sila 2013.

[55] C. Chu and C. Chen, "Robust maximum power point tracking method for photovoltaic cells: A sliding mode control approach," J Solar Energy, vol. 83, no. 8, pp. 1370-1378, 2009.

[56] Y. Levron, D. Shmilovitz, and S. Papers, "Maximum power point tracking employing sliding mode control," J IEEE Transactions on Circuits Systems I: Regular Papers, vol. 60, no. 3, pp. 724-732, 2013.

[57] J.Slotine and W. Li, Applied nonlinear control (no. 1). Prentice hall Englewood Cliffs, NJ, 1991.

[58] A. Kechich and B. Mazari, "La commande par mode glissant : Application à la machine synchrone à aimants permanents (approche linéaire)," J Afrique Science, vol. 4, no. 1, pp. 21-37, 2008.

[59] Boudia Assam, Présentée pour l'obtention du diplôme de DOCTORAT LMD ,
Electrotechnique « Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec un système de stockage à base d'une inductance supraconductrice (SMES) »

Soutenue le : 15/11/2020

