

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DÉPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Études de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Energies renouvelables

Présenté par

KECILI Thanina

ARAB Idir

Thème

Modélisation et simulation d'un champ photovoltaïque utilisant un Convertisseur élévateur de tension (Boost)

Mémoire soutenu publiquement le 23/09/2024 devant le jury composé de :

Mr Chafik BIROUCHE

MAA, UMMTO, Président

Mme Kamelia HELALI

MAB, UMMTO, Encadrante

Mlle Nadia RADJA

MCB, UMMTO, Examinatrice

Dédicace

Je souhaite dédier ce mémoire à ceux qui ont été une source constante de soutien, d'inspiration et de motivation tout au long de ce parcours :

*À mon père **KECILI MADJID**, dont le dévouement et le sacrifice pour nous sont incommensurables. Ce diplôme est un témoignage de tout ce que tu as fait pour moi et pour notre famille.*

*À ma mère **HADJI FARIZA**, pour son amour inconditionnel et son soutien sans faille, qui ont été les piliers de ma réussite.*

*À ma grande sœur, **THAZDAIT KECILI**, pour son encouragement constant et son soutien indéfectible.*

*À mes petits frère et sœur **THASSEDA** et **MOHAMMED**, dont leurs présences joyeuses et les encouragements ont apporté lumière et motivation tout au long de ce voyage.*

*À mon grand-père **KECILI MOHAMMED**, un homme brave dont l'exemple de force et de sagesse m'a inspiré chaque jour.*

*À mes cousines **KAMELIA**, **SADIA**, **MELLISSA**, **SYNDIA**, **ALISSIA** et **LILIA**, dont l'affection et le soutien ont également contribué à ce succès.*

*À mes copines **SARAH CHAUCHE** et **NEKKAR YANIS**, qui ont partagé avec moi des moments de joie et de complicité, apportant un équilibre précieux dans ma vie personnelle.*

*À mes très chères, **CHEMMAM NOUARA** et **BAHIA KECILI**, dont le souvenir reste vivant dans nos cœurs. Votre mémoire continue de nous inspirer et de nous guider.*

Merci à vous tous, vous êtes la source de ma force et de mon inspiration.

THANINA

Remerciements

Au terme de cette étude, Nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir donné la force et le courage.

*Nous tenons vivement à exprimer notre profonde reconnaissance et gratitude, en remerciant Mme **HELLALI KAMELIA**, pour son encadrement, ses conseils éclairés et son soutien tout au long de ce projet. Sa patience, sa disponibilité et son expertise ont été des éléments clés dans l'aboutissement de ce travail.*

*Nous remercions M **CHFIK BIROUCHE** d'avoir accepté de présider le jury.*

*Nous tenons également à remercier le membre de jury qui a accepté d'examiner notre Travail en occurrence Mlle **NADJA RADIA**.*

*Nous souhaitons également remercier l'ensemble des enseignants et membres du corps académique de la faculté du génie électrique et informatique, **département Électrotechnique**, qui nous 'ont transmis de précieuses connaissances tout au long de notre cursus.*

Un grand merci à nos collègues et camarades de promotion pour les moments de collaboration, les discussions enrichissantes et le soutien mutuel, qui ont rendu cette période plus stimulante et agréable.

*Sans oublier d'adresser nos remerciements les plus chaleureux à nos familles (**KECILI & ARAB**), pour leur encouragement constant, leurs patiences et leurs présence bienveillante, sans lesquels ce mémoire n'aurait pas pu voir le jour.*

Enfin nous nous remercions toutes personnes, qui de près ou de loin ayant contribué à la réalisation de notre travail et participé à cette aventure.

Table des matières

Introduction générale	01
CHAPITRE I : Introduction à l'Énergie Solaire Photovoltaïque	04
Introduction	04
I.1 Energie renouvelable	05
I.1.1 Types d'énergies renouvelables	05
I.1.2 L'énergie hydraulique	05
I.1.3 L'énergie de la biomasse	05
I.1.4 L'énergie géothermique	06
I.1.5 L'énergie éolienne	07
I.1.6 L'énergie solaire	07
I.2 Le photovoltaïque	07
I.2.1 La cellule photovoltaïque	08
I.2.2 Effet photovoltaïque	09
I.2.3 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	10
I.3 Générateur photovoltaïque (GPV)	14
I.3.1 La constitution d'un module photovoltaïque	14
I.3.2 Regroupement des cellules en séries	15
I.3.3 Regroupement des cellules en parallèles	16
I.4 Caractéristique électrique des modules photovoltaïques	17
I.4.1 Propriétés	17
I.4.2 Paramètres photovoltaïques	18
I.4.3 Courant de court-circuit (I_{cc})	18
I.4.4 Tension de circuit ouvert (V_{co})	19
I.4.5 Facteur de forme (FF)	20
I.4.6 Le rendement	20
I.4.7 Caractéristique courant-tension et puissance -tension d'un module Photovoltaïque	20
I.5 Protection d'un GPV	21
I.5.1 La diode anti-retour	22
I.5.2 Les diodes de dérivation	23
Conclusion	23
CHAPITRE II : Modélisation du système photovoltaïque	25
II-1 Introduction	25
II-2 Modélisation des cellules photovoltaïques	26
II-2-1 Modèle simplifié	26
II-2-2 Modèle à deux diodes	27
II-2-3 Modèle à une diode	29
II-2-4 Modélisation du champ PV	31
II-3 Modélisation du convertisseur élévateur (Boost)	31

II-3-1 Définition	32
II-3-2 Principe de fonctionnement	32
II-4 Commande MPPT	35
II-4-1 La technique Perturbation & Observation (P&O)	36
II-4-2 Avantage de la méthode P&O	38
II-4-3 Inconvénients de la méthode P&O	38
II-4-4 L'algorithme de la conductivité incrémentale (INC Cond)	38
II-4-5 Avantage et l'inconvénient de la méthode	40
II-5 Conclusion	41
CHAPITRE III : Simulation et interprétation des résultats	42
III-1 Introduction	42
III-2 Simulation	42
III-2-1 Implémentation du champ PV sous Simulink	42
III-2-2 Résultats et analyses	43
III-2-3 Implémentation sous Simulink du système complet	45
III-3 Conclusion	51
Conclusion générale	52
References	54

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 :	Parcours de conversion pour les énergies renouvelables	05
Figure I-2 :	Une source d'énergie géothermique	06
Figure I-3 :	Une éolienne	07
Figure I-4 :	Structure basique d'une cellule solaire	09
Figure I-5 :	Principe de fonctionnement photovoltaïque	10
Figure I-6 :	Le fonctionnement des cellules photovoltaïques	11
Figure I-7 :	Types de cellules photovoltaïques	12
Figure I-8 :	Cellule au silicium amorphe	12
Figure I-9 :	Cellule au silicium monocristallin	13
Figure I-10 :	Cellule au silicium poly cristallin	14
Figure I-11 :	Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série	15
Figure I-12 :	Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle	16
Figure I-13 :	Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque	17
Figure I-14 :	Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque	18
Figure I-15 :	Caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'une cellule PV, mise en évidence du point de puissance maximum (MPP)	21
Figure I-16 :	Schéma d'un module photovoltaïque avec la protection	22
Figure II-1 :	Modèle simplifié d'une cellule PV.	26
Figure II-2 :	Modèle à deux diodes d'une cellule PV.	27
Figure II-3 :	Modèle à une diode d'une cellule PV	30
Figure II-4 :	Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost.	33
Figure II-5 :	Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé	33
Figure II-6 :	Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert.	34
Figure II-7 :	Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque	36
Figure II-8 :	Recherche du PPM par la méthode (P&O).	37
Figure II-9 :	Algorithme de la méthode P&O	37
Figure II-10 :	Calcul du MPP par Incrémentation de Conductance (INC).	39
Figure II-11 :	Organigramme de la méthode INC	40
Figure III-1 :	Caractéristiques électriques du module.	43
Figure III-2 :	Schéma de bloc d'un champ PV	43
Figure III-3 :	Caractéristiques du champ PV pour une variation de l'éclairement	43
Figure III-4 :	Caractéristiques statiques lors d'une variation de la température ambiante.	44
Figure III-5 :	Schéma bloc du convertisseur boost proposé.	45
Figure III-6 :	Perturbation et Observation sous Simulink	46
Figure III-7 :	Schéma bloc du système complet sous Simulink.	46
Figure III-8 :	puissance de sortie du champ P V, $G=1000W/m^2$ et, $T=25^\circ C$	47
Figure III-9 :	Puissance de sortie du boost, $G=1000W/m^2$ et, $T=25^\circ C$.	47
Figure III-10 :	Tension de sortie du boost et du champ PV avec $G=1000W/m^2$ et, $T=25^\circ C$.	47
Figure III-11 :	Simulation de l'influence des variations d'éclairement sur les grandeurs électriques à la sortie d'un Boost du champ PV muni de la commande MPPT avec $T=25^\circ C$.	48
Figure III-12 :	Simulation de l'influence des variations de la température sur les grandeurs électriques à la sortie d'un Boost du champ PV muni de la commande MPPT avec $G=1000W/m^2$.	48

Introduction générale

Introduction générale

Introduction

Ces dernières années, la production énergétique mondiale et la demande en ressources fossiles sont devenues des enjeux cruciaux pour répondre aux besoins d'une population croissante et aux exigences de confort de nos sociétés modernes. En particulier, les sociétés industrialisées affichent une demande énergétique toujours plus élevée. Les principales sources d'énergie fossiles, telles que le pétrole, le gaz, le charbon et l'uranium, restent prédominantes. Cependant, la consommation excessive de ces ressources non renouvelables entraîne d'importantes émissions de gaz à effet de serre, ce qui contribue à l'aggravation de la pollution et menace la disponibilité de ces ressources pour les générations futures.

Aujourd'hui, la communauté scientifique accorde une attention croissante aux nouvelles sources d'énergie dites renouvelables, qui représentent une alternative prometteuse aux énergies fossiles. Ces énergies renouvelables se distinguent non seulement par leur capacité à réduire les émissions de gaz à effet de serre et la pollution, mais également par leur potentiel de développement à grande échelle. Parmi les principales sources, on retrouve l'énergie éolienne décentralisée, l'hydroélectricité, la géothermie, la biomasse, et surtout l'énergie solaire, qui fait l'objet de nombreuses recherches [1]. Ce mémoire se focalisera plus spécifiquement sur l'étude de l'énergie solaire photovoltaïque, en raison de son rôle clé dans la transition énergétique mondiale.

L'énergie photovoltaïque, obtenue à partir du rayonnement solaire, se distingue par sa capacité à produire de l'électricité propre et renouvelable. Grâce à l'effet photovoltaïque, les panneaux solaires, composés de cellules photovoltaïques, transforment les photons en électrons, générant un courant continu utilisable. Les systèmes photovoltaïques (PV) sont largement reconnus comme une solution efficace pour produire de l'électricité propre, et ils peuvent être utilisés à la fois pour des applications autonomes (isolées) et pour l'injection dans le réseau électrique [2-3].

Un système photovoltaïque classique se compose d'un générateur solaire, formé par plusieurs modules de cellules photovoltaïques, couplé à un convertisseur DC-DC. Ce convertisseur permet de transformer l'énergie produite en une forme adaptée à l'usage souhaité. Cependant, la performance de ces systèmes est sujette à des variations importantes, en raison des caractéristiques non linéaires du fonctionnement des cellules solaires. Ces variations sont directement liées aux conditions environnementales, telles que le niveau d'ensoleillement, la température, et l'ombrage partiel, ce qui complique la prédiction précise de la tension et du courant pour maximiser la production de puissance [4-5].

L'objectif fondamental de toute recherche dans le domaine photovoltaïque est d'améliorer les performances globales des systèmes de conversion d'énergie solaire. Lorsqu'un générateur photovoltaïque alimente une charge, quelle que soit la nature de cette charge, cela n'implique pas nécessairement une faible rentabilité du système dans son ensemble. L'efficacité du système est plutôt déterminée par un équilibre acceptable entre une performance énergétique équivalente et des coûts d'exploitation optimisés. En d'autres termes, la rentabilité et l'efficacité dépendent de la capacité du système à maximiser l'utilisation de l'énergie solaire tout en minimisant les pertes et les coûts associés.

Pour garantir une adaptabilité optimale et un rendement élevé, diverses normes et technologies ont été mises en œuvre afin d'optimiser la performance des systèmes photovoltaïques. Cela inclut l'usage de technologies avancées de suivi du point de puissance maximale (MPPT), la mise en place de convertisseurs plus efficaces, ainsi que l'amélioration des matériaux utilisés dans les cellules photovoltaïques. Ces efforts visent à rendre les systèmes photovoltaïques plus robustes face aux variations climatiques, tout en augmentant la production énergétique et en réduisant les coûts de maintenance et d'exploitation. En intégrant ces innovations, les systèmes photovoltaïques deviennent non seulement plus performants, mais aussi plus compétitifs par rapport aux autres sources d'énergie, favorisant ainsi leur adoption à grande échelle [1].

Les technologies de suivi du point de puissance maximale (MPPT) sont cruciales pour optimiser les systèmes photovoltaïques. Les algorithmes les plus courants sont la conductance incrémentale (IC) et la perturbation et observation (P&O), cette dernière étant populaire pour sa simplicité. Cependant, ces méthodes peuvent échouer lors de changements rapides de conditions météorologiques.

D'autres contrôleurs, tels que ceux basés sur des lois adaptatives, le bilan énergétique ou la théorie de l'inversion, ont été proposés pour améliorer la performance. Afin de réduire les effets déstabilisants sur le système photovoltaïque, nous proposons d'utiliser la stratégie de contrôle par backstepping, qui est une méthode récente pour les systèmes non linéaires [6].

Le but de ce travail est l'étude d'un système photovoltaïque. Notre mémoire est structurée en trois chapitres en plus d'une introduction générale, la conclusion générale

Dans le premier chapitre, nous présenterons les généralités sur les systèmes photovoltaïques. Ainsi que les différentes technologies des cellules solaires, leur principe de fonctionnement

Dans le deuxième chapitre, nous examinerons d'abord les composants essentiels des systèmes photovoltaïques, ainsi que les convertisseurs statiques DC-DC utilisés pour la conversion de l'énergie solaire. Ensuite, nous aborderons les algorithmes classiques de recherche du point de puissance maximale (MPPT), en mettant l'accent sur les méthodes les plus couramment utilisées : la conductance incrémentale (IC) et la méthode de perturbation et observation (P&O).

Le dernier chapitre est consacré à la simulation et l'optimisation de système Photovoltaïque.

Nous récapitulons nos résultats en tirant une conclusion générale qui synthétise l'essentiel de notre travail

Chapitre I

Introduction à l'Énergie Solaire Photovoltaïque

Chapitre I

Introduction

L'énergie renouvelable est l'énergie produite à partir de ressources naturelles. Les flux d'énergie renouvelable impliquent des phénomènes naturels tels que la lumière du soleil, le vent, les marées et la chaleur géothermique [7].

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui présente chaque année environ 15000 fois de la consommation énergétique de l'humanité. Cela équivaut à une puissance instantanée reçue par mètre carré de 1 kilowatt crête, répartie sur tout le spectre de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que consomme l'humanité en une année [8].

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est une forme d'énergie renouvelable clé, tirant parti de la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Cette conversion se réalise à travers des capteurs, ou cellules photovoltaïques, qui exploitent la capacité des matériaux à générer un courant électrique lorsqu'ils sont exposés à la lumière solaire. Les cellules solaires sont typiquement agencées en modules photovoltaïques, qui sont ensuite interconnectés pour former un générateur photovoltaïque. Ces générateurs peuvent produire une puissance électrique continue, adaptée aux besoins électriques habituels, grâce à une organisation efficace des modules. Pour accroître l'efficacité et la puissance de sortie du générateur, les modules PV sont souvent disposés en série et en parallèle. Cette configuration en série-parallèle permet d'augmenter à la fois la tension et l'intensité du courant électrique généré, offrant ainsi des performances optimales dans diverses conditions d'ensoleillement [1].

Ce chapitre est consacré à des notions et concepts générales sur l'énergie solaire photovoltaïque, ainsi que le fonctionnement physique d'une cellule photovoltaïque avec les différentes technologies des cellules photovoltaïques et leurs regroupements (séries ou parallèles), les différentes caractéristiques des modules photovoltaïques.

I.1. Energie renouvelable

I.1.1 Types d'énergies renouvelables

Les sources principales des énergies renouvelables sont : solaire, hydraulique, éolienne, biomasse et géothermique. La Figure (I-1) donne une vue d'ensemble des principales ressources énergétiques qu'on peut exploiter pour produire de l'électricité propre.

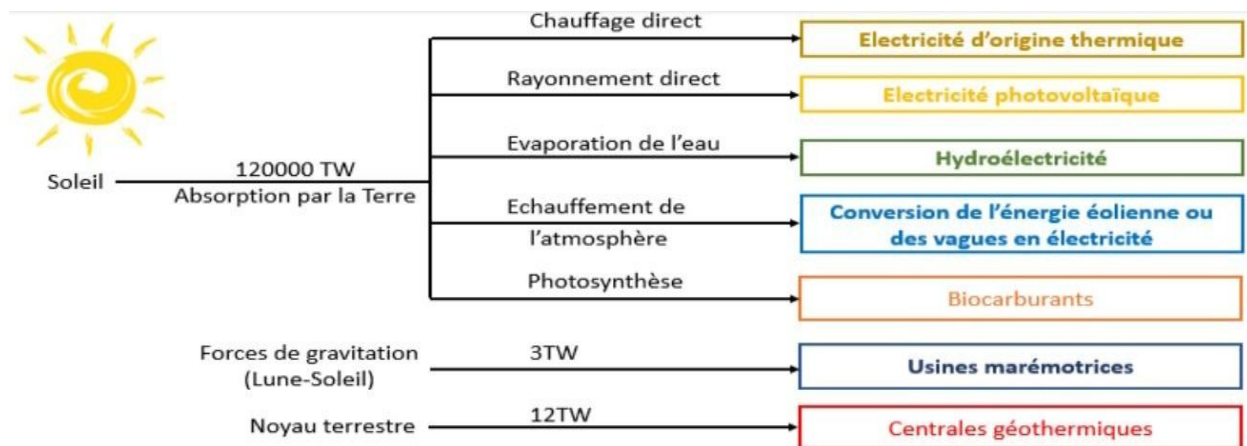


Figure I-1 : Parcours de conversion pour les énergies renouvelables [9]

I.1.2 L'énergie hydraulique

L'énergie électrique est produite par la transformation de l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'un rotor alternateur relié à un ensemble mécanique situé autour de la roue motrice. La quantité d'énergie extraite de l'eau retenue derrière un barrage dépend du volume d'eau et de la hauteur de chute. Cette source a l'avantage de ne pas être polluante. On peut maîtriser le stockage de l'énergie d'une manière assez simple afin de débarrasser les cours d'eau des déchets grâce aux différents filtres des barrages, la technologie nécessaire pour son utilisation est maîtrisée. Le bruit, l'impact sur la vie aquatique, des installations complexées, et des sites limités pour l'exploitation sont ses principaux inconvénients [10].

I.1.3 L'énergie de la biomasse

La biomasse est la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture et de l'élevage des animaux, de la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux peuvent être utilisés principalement de deux manières [10] :

- Lors de la fermentation des déchets, le gaz méthane peut être capté et utilisé comme Source d'énergie,
- La biomasse elle-même peut être incinérée.

Dans les deux cas, l'énergie thermique peut être utilisée pour produire de l'électricité dans des centrales thermiques. L'intérêt est que le dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère lors de l'incinération de la biomasse ou le méthane est compensé par celui absorbé par la repousse des plantes qui, entre autres, sont la source principale de biomasse. De cette manière, le bilan carbone peut être proche de zéro

I.1.4 L'énergie géothermique

Dans le contexte des sciences pour l'ingénieur, le terme de « géothermie » regroupe des moyens de capter l'énergie thermique de l'intérieur du globe terrestre et de l'utiliser comme source de chaleur ou de la convertir en électricité par des turbines et générateurs électriques. Pour capter l'énergie géothermique, un fluide est mis en circulation dans les profondeurs de la terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe captive naturelle, de l'eau injectée dans une roche chaude imperméable ou dans des puits spéciaux. Dans tous les cas, le fluide se réchauffe et remonte avec une température supérieure

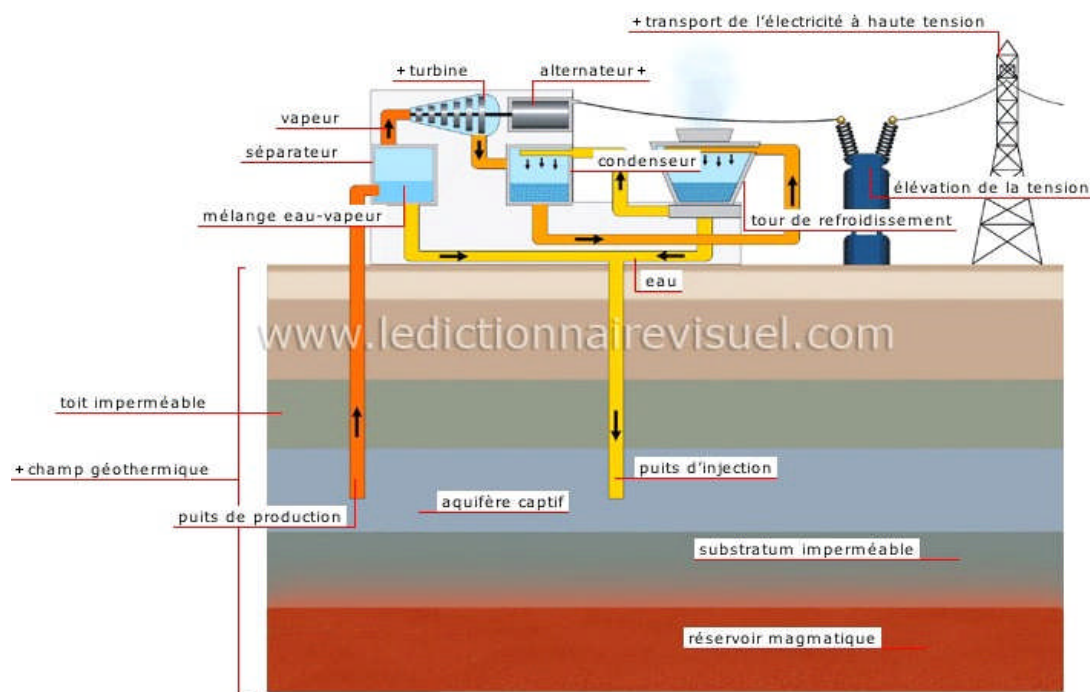


Figure I-2 : Une source d'énergie géothermique [11]

I.1.5 L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire, puisque ce sont les différences de températures et de pressions induites dans l'atmosphère par l'absorption du rayonnement solaire qui mettent les vents en mouvement. L'utilisation du vent par l'homme ne date pas d'aujourd'hui, elle est très ancienne. De nos jours l'énergie mécanique du vent produit l'électricité. Le principe des éoliennes s'inspire de celui des moulins à vent et à eau autrefois utilisé pour moudre le grain ou pomper l'eau.

L'éolien est l'une des énergies renouvelables les plus « prometteuses » à développer. Elle est intéressante d'un point de vue économique et environnemental. Pendant ces dernières années l'éolien c'est très fortement développé, dans le monde et plus particulièrement en Europe. Les avancements technologiques dans ce domaine, ne cessent de progresser [12].

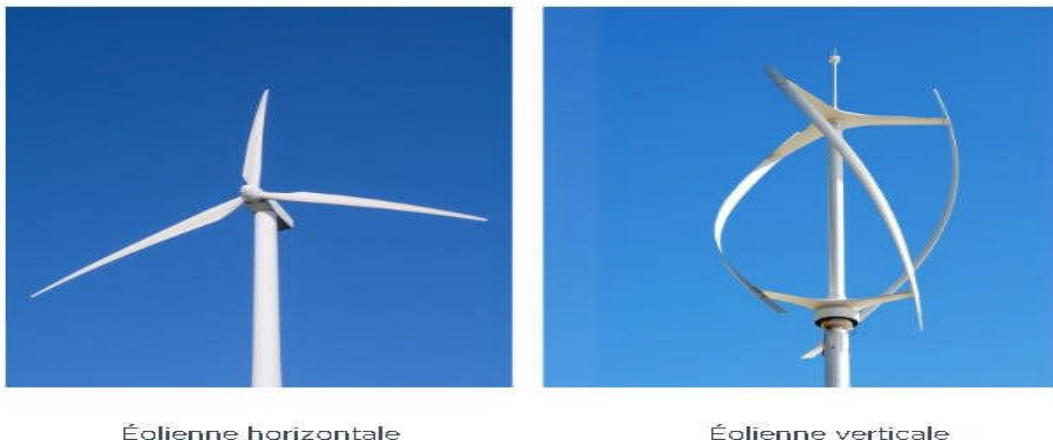


Figure I-3 : Une éolienne [12].

I.1.6 L'énergie solaire

Le soleil est une source d'énergie presque inépuisable, envoyant un rayonnement à la surface de la Terre équivalent à environ 8 400 fois la consommation énergétique annuelle des humains. Cela correspond à une réception de puissance instantanée de 1 kilowatt crête par mètre carré (kW/m²) répartie sur tout le spectre de l'UV à l'IR. Les déserts de notre planète obtiennent plus d'énergie du soleil en 6 heures que les humains n'en utilisent en une année.

I.2 Le photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en Énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste

La filière la plus avancée sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium et l'un Des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

Pour définition le mot " photovoltaïque " vient de la grec " photo " qui signifie lumière et de "voltaïque" qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la lumière électricité.

I.2.1 La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque, également appelée photopile, est un dispositif qui convertit l'énergie lumineuse en courant électrique. Les premières photopiles ont été développées aux États-Unis en 1954 par des chercheurs du laboratoire Bell.

Bien que les scientifiques aient montré un intérêt pour ces technologies au fil des années, ce n'est qu'avec la course à l'espace que les cellules ont commencé à quitter les laboratoires. En effet, les photopiles sont devenues la solution idéale pour répondre aux besoins en électricité des satellites et des sites isolés. De nos jours, l'objectif principal est de produire de l'électricité sans pollution pour alimenter les réseaux de distribution [13].

Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne,
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires,
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le Dessous ou anode,
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

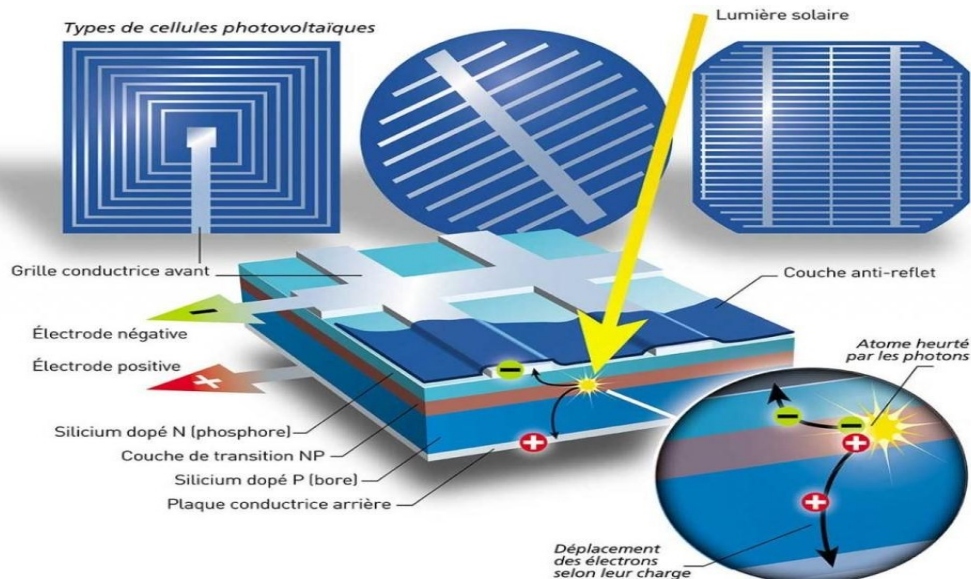


Figure I-4 : Structure basique d'une cellule solaire [10].

I.2.2 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet 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.

Les semi-conducteurs comportent 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*. 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 et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron trou [14]. 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. L'effet repose donc à la base sur les propriétés semi-conductrices du matériau et son dopage afin d'en améliorer la conductivité [14].

Le silicium employé aujourd'hui dans la plupart des cellules a été choisi pour la présence de quatre électrons de valence sur sa couche périphérique (colonne *IV* du tableau de Mendeleïev).

Dans le silicium solide, chaque atome – dit tétravalent – est lié à quatre voisins, et tous les électrons de la couche périphérique participent aux liaisons [14]. Si un atome de silicium est remplacé par un atome de la colonne *V* (phosphore par exemple), un de ses cinq électrons de valence ne participe pas aux liaisons ; par agitation thermique, il va très vite passer dans la bande de conduction et ainsi devenir libre de se déplacer dans le cristal, laissant derrière lui un trou fixe lié à l'atome de dopant. Il y a conduction par un électron, et le semi-conducteur dit dopé de type *N*. Si au contraire un atome de silicium est remplacé par un atome de la colonne *III* (bore par exemple) à trois électrons de valence, il en manque un pour réaliser toutes les liaisons, et un électron peut rapidement venir combler ce manque et occuper l'énergie photovoltaïque l'orbitale vacante par agitation thermique.

Il en résulte un trou dans la bande de valence, qui va contribuer à la conduction, et le semi-conducteur est dit dopé de type *P*. Les atomes tels que le bore ou le phosphore sont donc des dopants du silicium. Les cellules photovoltaïques sont assemblées pour former des panneaux photovoltaïques.

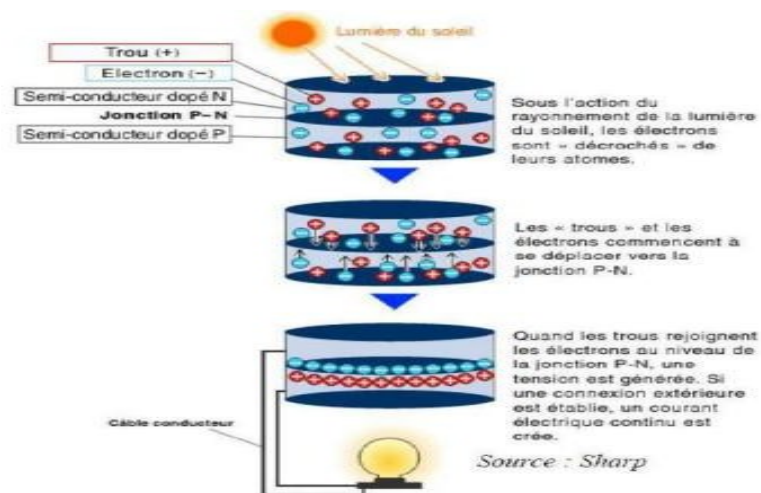


Figure I-5 : principe de fonctionnement photovoltaïque [14].

I.2.3 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en Énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la Création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif. Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction *PN*. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure (I-6).

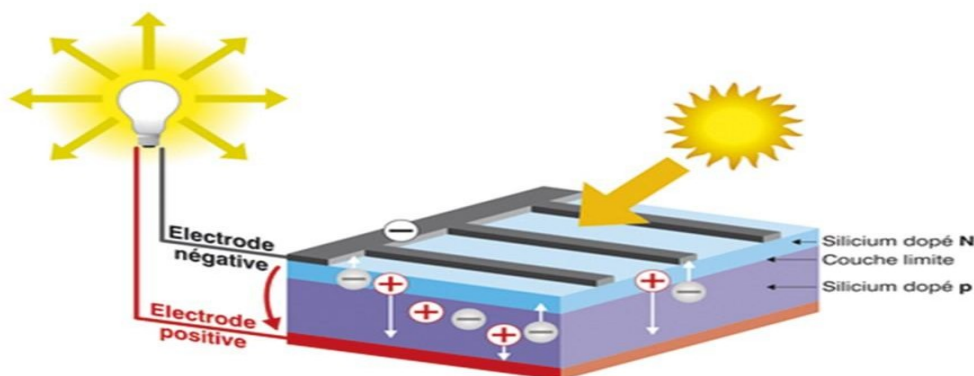


Figure I-6 : Le fonctionnement des cellules photovoltaïques [14].

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et dans la zone de charge d'espace. Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région :

- Dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura une photo courant de diffusion.
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électron/ trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P. On aura un photon courant de génération [13].

Il existe différents types de cellules et de procédés de fabrication. Le semi-conducteur le plus utilisé est le silicium. La performance se mesure d'abord par le rendement : pourcentage de l'énergie lumineuse effectivement transformée en électricité. Dans les panneaux vendus dans le commerce, du moins cher au plus cher :

- La cellule au silicium amorphe (rendement : 6 à 10%).
- La cellule au silicium monocristallin (rendement : 13 à 17%).
- La cellule au silicium poly cristallin (rendement : 11 à 15%).

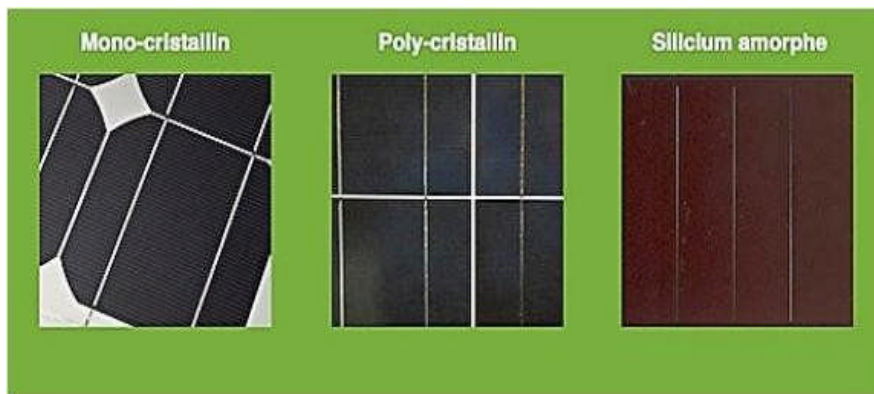


Figure I-7 : Types de cellules photovoltaïques [10].

▪ Cellule au silicium amorphe

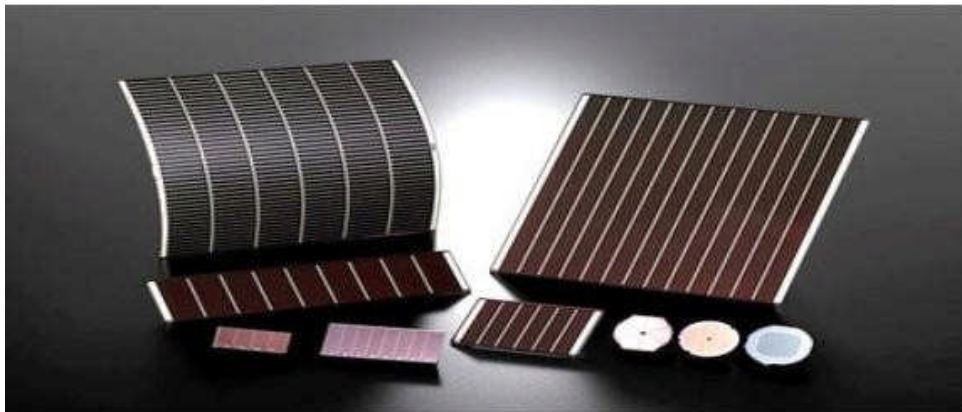


Figure I-8 : Cellule au silicium amorphe

Les panneaux photovoltaïques en Silicium Amorphe sont bien adaptés pour l'alimentation électrique des équipements de faibles puissances installés dans des zones à faible éclairage (à l'intérieur, sous éclairage artificiel) et sous ensoleillement diffus (à l'extérieur, soumis à un ombrage important).

Le panneau solaire amorphe présente un rendement plus faible, en revanche le silicium amorphe est l'une des technologies photovoltaïques couches minces les plus respectueuses de l'environnement, puisqu'elle n'utilise pas de métaux toxiques.

La sensibilité spectrale des cellules solaires de silicium amorphe aux spectres de lumière des éclairages fluorescents et des LED blanches, en fait un matériau attrayant pour les applications intérieures. Contrairement au panneau cristallin traditionnel, le panneau solaire amorphe continu à fournir de l'énergie même si une partie du panneau est ombragée.

▪ Cellule au silicium monocristallin

Les cellules au silicium monocristallin offrent le meilleur rendement parmi les panneaux solaires disponibles dans le commerce : entre 13 à 15%. Il faudra donc moins de cellules pour atteindre la puissance désirée, mais comme le silicium monocristallin est aussi le plus cher, son seul avantage est finalement d'utiliser une surface réduite : il faut environ 7m² pour obtenir 1 kilowatt Crète (kWc) [15].



Figure I-6 : Cellule au silicium monocristallin [15].

Ces cellules sont en général octogonales et d'une couleur uniforme foncée (bleu marine ou gris). Ces cellules sont les plus performantes, elles permettent donc de constituer des panneaux qui sont très performants : ceux qui produisent le plus d'énergie avec le moins de surface.

▪ Cellule au silicium poly cristallin

Les cellules poly cristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux. Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Elles sont en général de forme rectangulaire et sont couleur bleu nuit avec des reflets [15]



Figure I-10 : Cellule au silicium poly cristallin [15]

I.3 Générateur photovoltaïque (GPV)

I.3.1 La constitution d'un module photovoltaïque

Un module photovoltaïque est en général constitué :

- Câblage des cellules photovoltaïque : les cellules sont connectées entre elle par un fin ruban métallique (cuivre étamé).
- Les cellules sont encapsulées sous vide entre deux films thermoplastiques transparents
- Le plus souvent présence d'un cadre en aluminium avec un joint périphérique pour Permettre la dilatation.
- Un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière.
- La face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLAR.
- Connexion ; la boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass.
- Les 2 câbles unipolaires sont raccordés.

En combinant les cellules photovoltaïques en série (additionnant les tensions de chaque cellule) ou en parallèle (additionnant les intensités de chaque cellule), il est possible de construire un générateur photovoltaïque sur mesure pour répondre aux besoins des différentes applications. Ces deux modes d'association sont non seulement réalisables mais aussi fréquemment employés afin d'atteindre les valeurs de tension et d'intensité désirées en sortie.

Par exemple, lorsque N_s cellules sont disposées en série pour former des branches comportant chacune N_p cellules en parallèle, cela permet d'ajuster de manière précise la tension et l'intensité de sortie du générateur PV en fonction des spécificités de l'application envisagée. Cette flexibilité dans la configuration des cellules photovoltaïques contribue à optimiser les performances et l'efficacité des systèmes d'énergie solaire.

La puissance disponible en sortie du générateur PV est donné par [16].

$$P_{pv} = N_s I_{pv} N_p V_{pv} \quad (\text{I-1})$$

Avec :

P_{pv} : la puissance disponible en sortie du GPV (watt)

V_{pv} : la tension à la sortie du GPV (volt)

I_{pv} : le courant de sortie du GPV (ampère)

I.3.2 Regroupement des cellules en séries

Une association de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, figure (I-11). Cette méthode d'association est largement répandue dans l'industrie des modules photovoltaïques. Avec l'expansion de la surface des cellules, le courant généré par chaque cellule augmente progressivement grâce aux avancées technologiques, tandis que sa tension reste maintenue à un niveau bas.

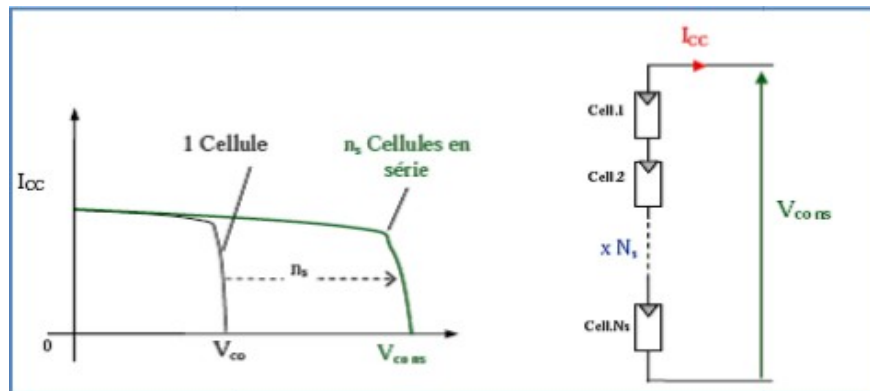


Figure I-11 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série [16].

L'équation (I-2) résume les caractéristiques électriques d'une association série de N_s cellules.

$$V_{C0} = N_s V_{C0} \quad (\text{I-2})$$

Avec :

V_{C0} : La tension du circuit ouvert

L'association en série permet d'augmenter la tension globale, ce qui se traduit par une augmentation de la puissance totale. Les panneaux commerciaux, fabriqués à partir de cellules de première génération, sont généralement assemblés en série avec 36 cellules ($V_{CO_{ns}}=0.6V*36=21.6V$), afin d'obtenir une tension optimale du panneau (V_{op}) similaire à celle d'une batterie standard de 12V [16].

I.3.3 Regroupement des cellules en parallèles

L'association en parallèle de N_p cellules représente une autre option, permettant d'accroître le courant de sortie du générateur photovoltaïque. Dans un tel agencement, toutes les cellules identiques sont connectées en parallèle, ce qui signifie qu'elles sont soumises à la même tension. La caractéristique résultante de ce groupement est obtenue par la sommation des courants générés individuellement par chaque cellule, figure (I-12).

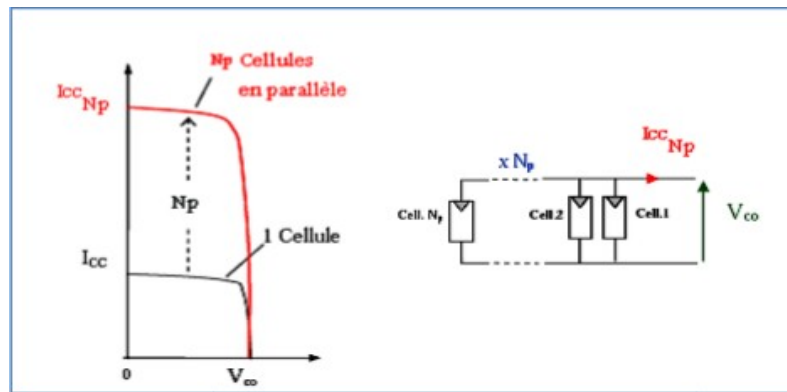


Figure I-12. Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle [6].

L'équation (I-3) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_p cellules.

$$I_{CC} = N_p I_{CC} \quad (I-3)$$

Si l'on vise à accroître le courant de sortie d'un générateur photovoltaïque, deux approches principales se présentent : l'usage de cellules PV de plus grande surface et de rendement supérieur, ou l'association en parallèle de multiples modules PV aux caractéristiques similaires. Pour garantir le fonctionnement optimal de ce générateur, il est crucial que toutes les cellules (N_s , N_p) se comportent de manière uniforme. Cela implique qu'elles doivent être issues de la même technologie, du même lot de fabrication, et être exposées aux mêmes conditions de fonctionnement telles que l'éclairement, la température, le vieillissement et

l'orientation. Cette cohérence assure la performance optimale et la fiabilité du générateur photovoltaïque dans son ensemble.

Dans le but de réduire les risques de dysfonctionnement, les fabricants ont choisi de ne pas commercialiser les cellules photovoltaïques individuellement. Ainsi, les générateurs photovoltaïques sont couramment disponibles sous forme de modules préassemblés, composés de plusieurs cellules, souvent désignés à tort sous le nom de "panneaux PV". Chaque modèle de module possède ses propres spécifications électriques, garanties avec une marge d'erreur généralement de $\pm 10\%$, selon le lot de fabrication. Cette approche vise à garantir une fiabilité et une homogénéité optimales des performances des systèmes photovoltaïques [6].

I.4 Caractéristique électrique des modules photovoltaïques

La puissance électrique délivrée par le module photovoltaïque est le produit de la tension et du courant qu'il génère. Ces deux grandeurs courant-tension délivrées par le module photovoltaïque dépendent des propriétés du module mais aussi de la charge aux bornes du module.

I.4.1 Propriétés

La caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque est non linéaire, figure (I-13). Elle parcourt trois des quatre quadrants disponibles.

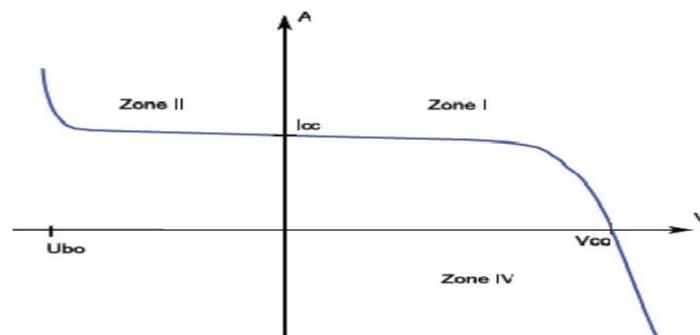


Figure I-13 : Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque [6].

Une cellule PV se situe dans le quadrant 2 et le quadrant 4, mais il est recommandé d'éviter son fonctionnement dans ces deux quadrants en raison du risque de destruction par phénomène d'échauffement local (hot spot). Le fonctionnement optimal se trouve dans le quadrant 1, où la cellule agit comme un générateur, générant ainsi de l'énergie. Par conséquent, l'objectif principal est de maintenir le fonctionnement de la cellule dans ce quadrant pour garantir une performance sûre et efficace [6].

I.4.2 Paramètres photovoltaïques

Les paramètres des cellules photovoltaïques sont des valeurs qui décrivent les caractéristiques électriques et physiques de ces cellules. La figure (I-14) représente une caractéristique fondamentale d'une cellule photovoltaïque à jonction PN, fournissant des informations essentielles sur son comportement électrique sous différentes conditions d'illumination. À partir de cette courbe, plusieurs paramètres physiques peuvent être extraits, notamment le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension à circuit ouvert (V_{co}), et le facteur de forme (FF), qui sont des indicateurs clés de la performance et de la qualité de la cellule photovoltaïque.

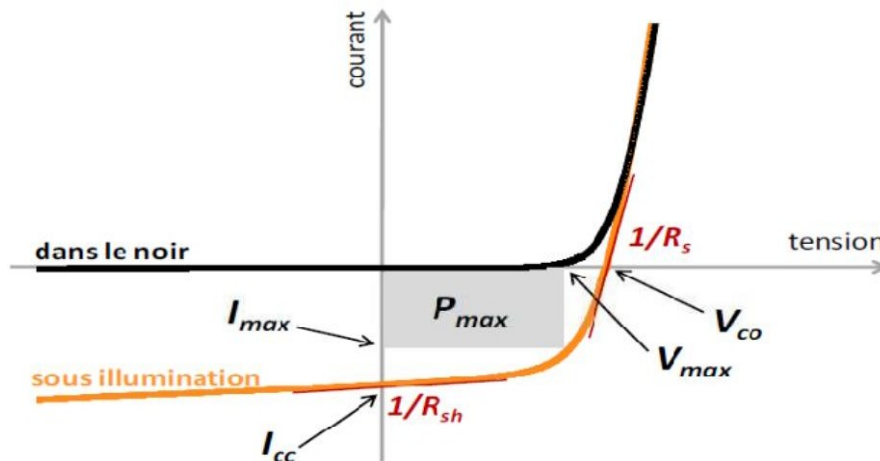


Figure I-14 : Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque [6].

I.4.3 Courant de court-circuit (I_{cc})

- **Phénomènes physiques** : Dans cette zone, le courant est principalement déterminé par la quantité de photons *incidents* qui libèrent des porteurs de charge dans le matériau semi-conducteur du module. Le courant généré est donc directement lié à l'intensité de l'irradiation solaire. À faible tension, le champ électrique interne du module n'est pas assez fort pour limiter le mouvement des porteurs de charge, ce qui permet au courant de rester constant [17].
- **Représentation mathématique** : Le courant dans cette zone peut être approximé par : $I \approx I_{cc} - \frac{V}{R_{sh}}$, où I_{cc} est le courant de court-circuit et R_{sh} est la résistance shunt (parallèle) du module.
- **Applications pratiques** : Cette zone est souvent utilisée pour caractériser les modules photovoltaïques en termes de leur capacité à produire un courant sous une irradiation donnée, indépendamment de la charge connectée.

I.4.4 Tension de circuit ouvert (V_{co})

- **Phénomènes physiques** : Dans cette zone, le courant diminue à mesure que la tension s'approche de la tension de circuit ouvert (V_{co}). La recombinaison des porteurs de charge devient plus significative à haute tension, ce qui réduit le courant. La tension de circuit ouvert représente la situation où les bornes du module sont déconnectées, permettant une accumulation maximale de charge.
- **Représentation mathématique** : Près du point de tension de circuit ouvert, le courant peut être approximé par $I \approx I_0 \left(e^{\frac{V}{nV_t}} - 1 \right) - \frac{V}{R_{sh}}$, où I_0 est le courant de saturation inverse, n est le facteur d'idéalité de la diode, et V_t est la tension thermique [17].
- **Applications pratiques** : La zone de tension de circuit ouvert est souvent utilisée pour diagnostiquer l'intégrité des modules photovoltaïques, par exemple en vérifiant que le V_{oc} est conforme aux spécifications sous irradiation normale.

I.4.5 Point de Puissance Maximale (MPP)

- **Phénomènes physiques** : Dans cette zone, le module fonctionne dans un état où l'énergie collectée est convertie de manière optimale en énergie électrique. L'impédance interne du module varie de manière significative, rendant le calcul du point de puissance maximale complexe sans l'aide de systèmes de suivi. La variation d'impédance est due aux effets combinés de la résistance série R_s , qui limite le courant, et de la résistance shunt R_{sh} , qui permet un certain courant de fuite.
 - **Représentation mathématique** : Le point de puissance maximale peut être déterminé en résolvant l'équation dérivée de la puissance par rapport à la tension et en l'égalant à zéro : $\frac{dP}{dV} = 0$; alors la puissance est tout simplement donnée par $P = IV = I(V) \times V$ [17].
- **Applications pratiques** : Les systèmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) sont utilisés pour maintenir le module photovoltaïque à son point de puissance maximale, même en cas de variations d'irradiation ou de température. Cela permet de maximiser l'énergie extraite du module dans diverses conditions d'exploitation.

I.4.5 Facteur de forme (FF)

Le facteur de forme d'une cellule solaire dépend d'un ensemble de paramètres, il est défini comme le rapport d'une puissance maximale à la puissance calculée en multipliant la tension de circuit-ouvert par le courant de court-circuit. Le facteur de forme détermine la qualité électrique de la cellule ; il est obtenu par l'équation suivante [17]. :

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

I.4.6 Le rendement

Le rendement d'une cellule solaire est défini comme le rapport de la puissance maximale fournie par la cellule P_m à la puissance lumineuse d'incident [17].

$$= \frac{P_m}{S \times E} \quad (I.5)$$

I.4.7 Caractéristique courant-tension et puissance -tension d'un module photovoltaïque

La caractéristique courant-tension (I-V) d'un module photovoltaïque est une représentation graphique qui illustre la relation entre le courant généré par le module et la tension à ses bornes sous une illumination constante. Cette courbe est fondamentale pour comprendre le comportement électrique du module. Le courant de court-circuit (I_{cc}) est un point clé de cette courbe, représentant le courant maximal que le module peut produire lorsque la tension aux bornes est nulle, ce qui correspond à une situation où le module est connecté à un court-circuit.

D'autre part, la tension en circuit ouvert (V_{co}) est la tension maximale que le module peut atteindre lorsque le courant est nul, ce qui se produit lorsque le circuit est ouvert et qu'aucun courant ne circule.

Le point de puissance maximale (MPP) se situe sur la courbe I-V à l'endroit où le produit de la tension et du courant atteint son maximum. Ce point est crucial pour l'optimisation de la performance du module, car il indique les conditions idéales pour extraire le maximum de puissance du système. La courbe puissance-tension (P-V), quant à elle, montre comment la puissance générée par le module varie en fonction de la tension. Le point MPP sur cette courbe correspond à la valeur maximale de puissance, et il est essentiel pour le dimensionnement des systèmes photovoltaïques [17].

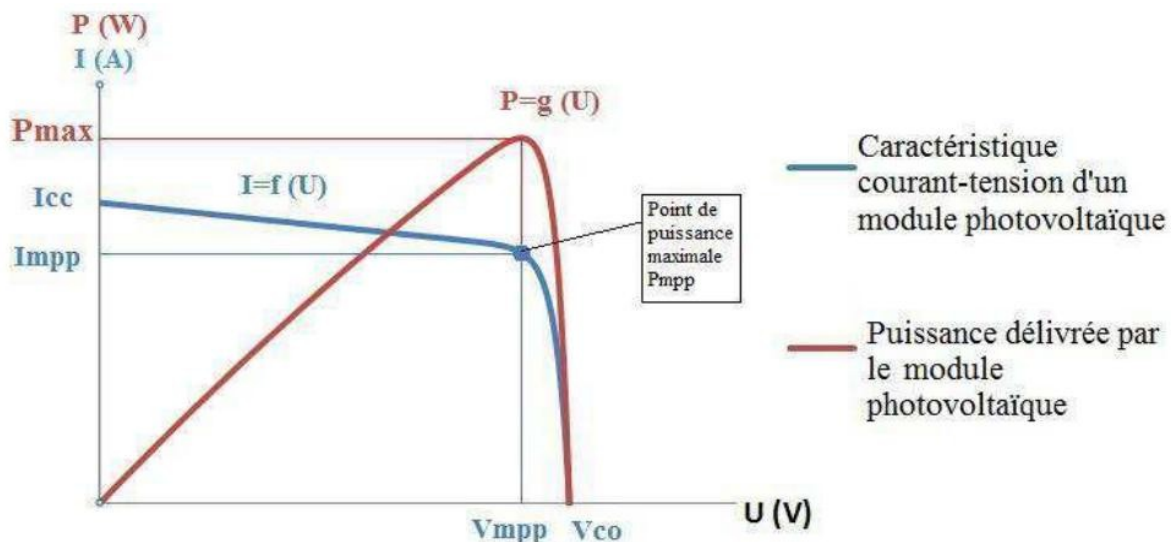


Figure I-15 : Caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'une cellule PV, mise en évidence du point de puissance maximum (MPP) [17].

Les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'une cellule PV sont directement influencées par plusieurs facteurs environnementaux. L'irradiation solaire joue un rôle majeur en augmentant le courant de court-circuit à mesure qu'elle augmente, ce qui accroît également la puissance maximale disponible. En revanche, la température, a un effet inverse sur la tension en circuit ouvert, la réduisant à mesure qu'elle augmente, ce qui peut entraîner une diminution de la puissance maximale du module. Ces interactions rendent la compréhension des courbes I-V et P-V essentielle pour la conception et l'optimisation des systèmes photovoltaïques, permettant aux ingénieurs de prédire et d'ajuster les performances du module en fonction des conditions réelles d'exploitation. En résumé, ces courbes fournissent des informations critiques pour assurer que les modules photovoltaïques fonctionnent à leur pleine capacité, maximisant ainsi l'efficacité énergétique globale du système [17].

I.5 Protection d'un GPV

Pour assurer une durée de vie prolongée d'une installation photovoltaïque destinée à la production d'énergie électrique sur plusieurs années, il est essentiel d'intégrer des dispositifs de protection électrique aux modules commerciaux. Ces dispositifs sont conçus pour prévenir les pannes destructrices potentielles liées à l'association de cellules en série et en parallèle dans les panneaux solaires. Pour ce faire, deux types de protections sont couramment utilisés dans les installations actuelles comme le montre la figure (I-16) [18].

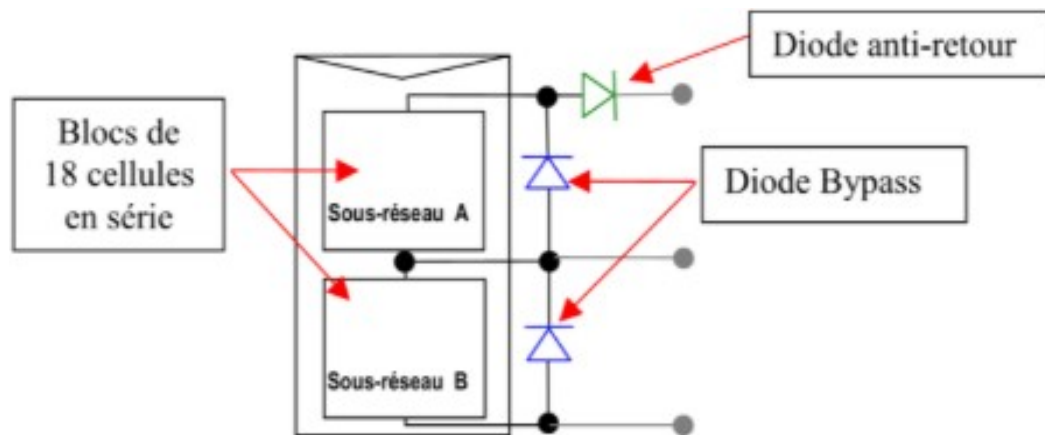


Figure I-16 : Schéma d'un module photovoltaïque avec la protection [17].

I.5.1 La diode anti-retour

La diode anti-retour, également connue sous le nom de diode de blocage ou de diode de dérivation, est un composant essentiel dans les installations photovoltaïques pour prévenir le courant inverse. Ce phénomène peut survenir lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle ou lorsqu'une charge en connexion directe, telle qu'une batterie, peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple pendant la nuit [17].

- **Principe de fonctionnement** : La diode anti-retour est polarisée de telle sorte qu'elle laisse passer le courant dans un seul sens et bloque le courant dans l'autre sens. Lorsque les cellules photovoltaïques produisent de l'électricité, la diode permet au courant de circuler du panneau solaire vers la charge ou le système de stockage, mais elle bloque le courant en sens inverse, ce qui empêche toute décharge non désirée du système.
- **Protection contre le courant inverse** : Le courant inverse peut se produire dans plusieurs situations, telles que lorsque plusieurs panneaux solaires sont connectés en parallèle ou lorsqu'une charge connectée directement, comme une batterie, peut basculer de la charge au générateur. Sans la diode anti-retour, le courant inverse peut causer des dommages aux cellules photovoltaïques et réduire la durée de vie du système.
- **Choix et installation** : Le choix de la diode anti-retour dépend de la taille et du type de l'installation photovoltaïque, ainsi que des spécifications électriques du système. Elle doit être correctement dimensionnée pour gérer le courant maximal produit par les panneaux solaires. De plus, elle doit être installée correctement pour garantir un fonctionnement efficace et fiable du système.

I.5.2 Les diodes de dérivation

Les diodes de dérivation, également connues sous le nom de diodes by-pass, sont des composants électriques utilisés dans les installations photovoltaïques pour contourner ou court-circuiter une partie du courant produit par les cellules solaires.

Les diodes de dérivation sont généralement intégrées dans les boîtiers de jonction des panneaux solaires. Elles sont connectées en parallèle avec les cellules solaires et sont activées lorsqu'une cellule est ombragée, permettant au courant de contourner la zone ombragée et de continuer à circuler à travers les cellules non ombragées. Cela garantit que la puissance de sortie du panneau solaire reste aussi élevée que possible, même en présence d'ombres partielles [17].

Conclusion

L'énergie solaire photovoltaïque s'impose comme une des solutions les plus prometteuses et innovantes dans la quête d'une transition énergétique mondiale. En captant directement la lumière du soleil pour la convertir en électricité, cette technologie ne dépend ni des combustibles fossiles ni des émissions de gaz à effet de serre, ce qui en fait un pilier fondamental pour une économie de carbone.

Les avancées technologiques continuent d'améliorer l'efficacité des cellules photovoltaïques, rendant cette forme d'énergie de plus en plus compétitive par rapport aux sources conventionnelles. De plus, la flexibilité d'intégration des systèmes photovoltaïques, que ce soit dans les infrastructures résidentielles, industrielles, ou à grande échelle dans les fermes solaires, en fait une solution adaptable aux divers besoins énergétiques mondiaux.

D'un point de vue technologique, un capteur photovoltaïque est comparable à une diode PN en raison de sa constitution, des matériaux employés, et des phénomènes physiques similaires qu'il met en œuvre. Le comportement d'une cellule photovoltaïque peut donc être modélisé comme celui d'une jonction PN imparfaite, en statique comme en dynamique, surtout lorsqu'elle n'est pas exposée à la lumière.

Dans ce chapitre, nous avons exploré les enjeux actuels et les développements en cours dans le domaine photovoltaïque. Le fonctionnement d'une cellule a été expliqué en mettant en lumière le phénomène photovoltaïque. Nous avons montré que la cellule photovoltaïque possède une courbe caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire, avec un point de

Puissance maximale (PPM) déterminé par un courant (I_{max}) et une tension (V_{max}), et que son comportement peut être modélisé par un circuit électrique simple.

Nous avons également étudié l'influence de divers paramètres externes sur cette courbe. Le courant de court-circuit varie principalement avec l'éclairement, tandis que la tension à vide est influencée par la température. L'interconnexion de cellules photovoltaïques en série ou en parallèle présente des défis de déséquilibre, particulièrement pénalisants si les cellules ne partagent pas le même point de fonctionnement.

Nous avons passé en revue les différentes technologies de cellules photovoltaïques actuellement sur le marché en développement. Bien que la fin de l'ère du silicium ait été prédite à plusieurs reprises, ce matériau continue de dominer les autres technologies. Pour garantir la longévité des installations photovoltaïques destinées à la production d'énergie sur de longues périodes, il est essentiel d'intégrer des protections électriques adéquates aux modules.

Chapitre II

Modélisation du système photovoltaïque

Chapitre II

II-1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui permet la conversion directe de la lumière en électricité via des cellules solaires, représente une solution énergétique particulièrement intéressante, notamment pour répondre à des besoins limités. Ce type de système se distingue par sa simplicité de mise en œuvre, son faible impact environnemental, et la faible maintenance qu'il nécessite. Cependant, malgré ces avantages, un système photovoltaïque perd en compétitivité lorsque la demande énergétique devient plus élevée. Cela souligne l'importance de réaliser une étude rigoureuse pour identifier la solution la plus performante et la plus économique possible.

La performance d'un système PV est étroitement liée aux conditions météorologiques telles que le rayonnement solaire, la température, la vitesse du vent, et l'éclairement. Pour assurer une production d'énergie constante tout au long de l'année, il est impératif de dimensionner correctement le système PV. Toutefois, les informations fournies par les fabricants d'équipements photovoltaïques ne permettent souvent qu'un dimensionnement approximatif, ce qui peut compromettre l'efficacité du système.

Dans ce contexte, la modélisation mathématique des cellules solaires devient essentielle pour toute opération d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur photovoltaïque. En général, un module photovoltaïque est représenté par un circuit équivalent, dont les paramètres sont calculés de manière expérimentale en utilisant la caractéristique courant-tension (I-V). Ces paramètres, souvent non directement mesurables ni inclus dans les données de fabrication, doivent être déterminés à partir des caractéristiques V-I à divers points de fonctionnement, soit fournis par le constructeur, soit obtenus par des mesures directes sur le module [13].

La modélisation des cellules solaires est donc une étape cruciale, ayant conduit à une diversification des modèles proposés par les chercheurs. Ces modèles varient principalement en fonction du nombre de diodes incluses, de la prise en compte d'une résistance shunt finie ou infinie, de la constance ou de la variabilité du facteur d'idéalité, ainsi que des méthodes numériques employées pour déterminer les différents paramètres inconnus [13].

II-2 Modélisation des cellules photovoltaïques

La modélisation des cellules photovoltaïques repose sur une compréhension approfondie de leur configuration physique et de leurs caractéristiques électriques. Les cellules photovoltaïques sont constituées de jonctions semi-conductrices, de contacts métalliques, et de couches de protection, chacun influençant le comportement électrique de la cellule. La résistance série (R_s) et la résistance de shunt (R_{sh}) sont des paramètres clés [13], représentant respectivement les pertes ohmiques et les chemins de fuite du courant. Le courant de court-circuit (I_{cc}) est également crucial, car il indique la capacité maximale de la cellule à produire du courant sous illumination. Un modèle équivalent efficace intègre ces éléments, souvent en utilisant une source de courant idéale, une diode idéale, et les résistances série et de shunt pour simuler le comportement non linéaire et complexe de la cellule. Une telle modélisation permet de mieux comprendre et optimiser la performance des cellules photovoltaïques dans des conditions variées.

Il existe plusieurs modèles électriques caractérisant le fonctionnement de la cellule photovoltaïque, et ils ont comme facteur commun la considération de la cellule PV comme générateur du courant idéal. Généralement on a trois modèles différents selon la modélisation électrique des comportements physiques de la cellule.

II-2-1 Modèle simplifié

La cellule sera modélisée par une source du courant I_{ph} en parallèle avec une diode et pour optimiser la modélisation de quelques phénomènes au niveau de la cellule, le modèle comme le montre la figure (II-1) contient une résistance série R_s qui modélise les pertes ohmiques.

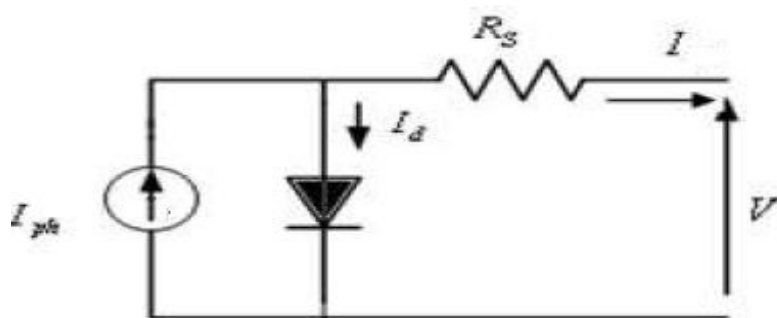


Figure II.1: Modèle simplifié d'une cellule PV [19].

Ce modèle électrique modélise la cellule en un générateur du courant idéal, selon la loi des nœuds, le courant résultant I est donné par [13] :

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

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation [13,20]

$$I_d = I_s \left(\exp \left(\frac{V+R_s I}{n \cdot V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{II-2})$$

Le courant fourni par ce modèle est donc donné par [13,20]:

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V+R_s I}{n \cdot V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{II-3})$$

Avec I_{ph} : Constant pour un ensoleillement donné

I_s : courant de saturation

n : Facteur d'idéalité de la diode.

Le modèle de l'expression (II-3) est nommé aussi « modèle à quatre paramètres » (I_{ph}, I_s, R_s, n).

II-2-2 Modèle à deux diodes

Le modèle électrique le plus avancé et le plus proche du comportement réel d'une cellule photovoltaïque est le modèle à deux diodes, également connu sous le nom de modèle à double exponentiel [13]. Ce modèle offre une représentation plus précise en modélisant la cellule photovoltaïque comme un générateur de courant électrique, équivalent à une source de courant couplée à deux diodes en parallèle. Ces deux diodes permettent de prendre en compte les différents mécanismes de recombinaison de charges au sein de la cellule, ce qui améliore considérablement la précision de la modélisation par rapport aux modèles à diode unique.

En plus de ces deux diodes, pour capturer les phénomènes physiques qui influencent le comportement de la cellule, le modèle intègre également deux résistances : la résistance série R_s et la résistance de shunt R_{sh} . La résistance série R_s modélise les pertes ohmiques dues aux matériaux de contact et aux connexions internes, tandis que la résistance de shunt R_{sh} représente les fuites de courant autour de la jonction p-n, souvent causées par des impuretés ou des défauts structuraux [13,20]. L'ajout de ces résistances permet de représenter plus fidèlement les pertes de puissance et les inefficacités observées dans une cellule photovoltaïque réelle.

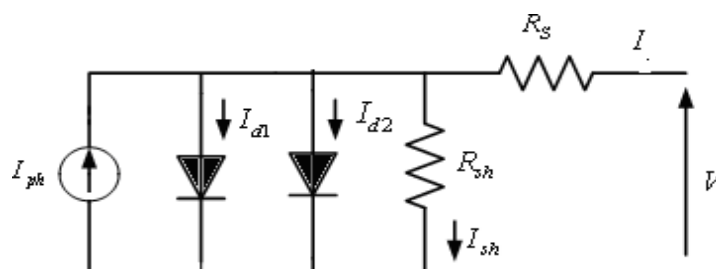


Figure. II-2 : Modèle à deux diodes d'une cellule PV [19].

Avec quelques difficultés de calcul et développement mathématique, ce modèle donne un Courant presque semblable au courant d'une cellule PV selon la relation [13,20-21]:

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (II-4)$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation

$$I_{d1} = I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V + I R_s}{n_1 \times 7t}\right) - 1 \right) \quad (II-5)$$

$$I_{d2} = I_{s2} \left(\exp\left(\frac{V + I R_s}{n_2 \times 7t}\right) - 1 \right) \quad (II-6)$$

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + R_s I}{R_{sh}} \quad (II-7)$$

Avec :

$$V_t = \frac{KT_c}{q} : \text{représentant le potentiel thermodynamique}$$

T_c : est la température absolue

q : la constante de charge d'électron, $1.602 * 10^{-19}C$

K : la constante de Boltzmann, $1.38 * 10^{-23}J/K$

I_{sh} : est le courant de la résistance de shunt

Donc :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V + R_s I}{n_1 \cdot V_t}\right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp\left(\frac{V + R_s I}{n_2 \cdot V_t}\right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (II-8)$$

Avec :

n_1 et n_2 : Facteurs d'idéalité des diodes D1 et D2 respectivement.

I_{s1} et I_{s2} : Courants de saturation des diodes D1 et D2 respectivement.

Le courant photonique lié à l'éclairement, à la température et au courant photonique mesuré Aux conditions de référence est donné par [13,20-21] :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{ph-ref} - \mu_{cc}(T_c - T_{c-ref})) \quad (II-9)$$

Avec :

$I_{ph,ref}$: Le courant photonique sous condition de référence [A]

μ_{cc} : Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température [A/K]

G_{ref}, G : L'éclairement réels et à la condition de référence [W/m²]

$T_c ; T_{c-ref}$: La température de cellule, réelle et à la condition de référence

Les courants de saturation I_{s1} et I_{s2} sont donnés par les relations suivantes :

$$I_{s1} = C_{s1} \cdot T_c^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_{gap} \cdot g}{n_1 \cdot T \cdot K}\right) \quad (II-10)$$

$$I_{s2} = C_{s2} \cdot T_c^{3/2} \cdot \exp\left(\frac{-E_{gap} \cdot g}{n_2 \cdot T \cdot K}\right) \quad (II-11)$$

Les constantes C_{s1} et C_{s2} sont généralement comprises respectivement entre $150 - 180 \text{ A} \cdot \text{K}^{-3}$ et $1,3 - 1,7 \times 10^{-2} \text{ A} \cdot \text{K}^{-5/2}$ pour une cellule de 100 cm^2 .

Une valeur du facteur d'idéalité n différent de l'unité est associée à un mécanisme de recombinaison prédominant et elle dépend de la nature et de la position des niveaux pièges.

- $n = 1$: La zone de charge d'espace est dépeuplée (cas idéal).
 $1 < n < 2$: Le niveau piège est peu profond dans la zone de charge d'espace et n dépend de la polarisation [13,20].
- $n = 2$: Les centres de recombinaison sont distribués uniformément dans la zone de charge d'espace et sur un seul niveau au milieu de la bande interdite.
- $2 < n < 4$: Les centres de recombinaison sont distribués de façon non uniforme avec une densité réduite au centre de la zone de charge d'espace par rapport à la surface

E_{gap} : Energie de gap (Silicium cristallin = 1,12 eV, Silicium amorphe = 1,7 eV, CIS = 1,03 eV, CdTe = 1,5 eV).

II-2-3 Modèle à une diode

Le modèle équivaut d'une cellule photovoltaïque, tel qu'illustré par la figure II-3, se base sur une structure similaire au modèle simplifié. Ce modèle inclut une source de courant et une diode en parallèle, combinées avec une résistance série. Cependant, pour améliorer la précision, une résistance de shunt (R_{sh}) est ajoutée. Cette résistance de shunt a une influence significative sur le courant généré par le modèle, rapprochant ainsi les prédictions de celui-ci du comportement d'une cellule photovoltaïque réelle. En termes physiques, la résistance de shunt est essentielle pour modéliser les pertes qui surviennent autour de la jonction $p - n$. Ces pertes sont généralement dues aux impuretés présentes dans le matériau semi-conducteur ainsi qu'aux effets aux coins de la cellule, où les défauts structuraux peuvent causer des fuites de courant. L'intégration de la résistance de shunt dans le modèle permet ainsi de mieux représenter les conditions réelles de fonctionnement de la cellule, en prenant en compte des phénomènes qui sont négligés dans des modèles plus simplifiés.

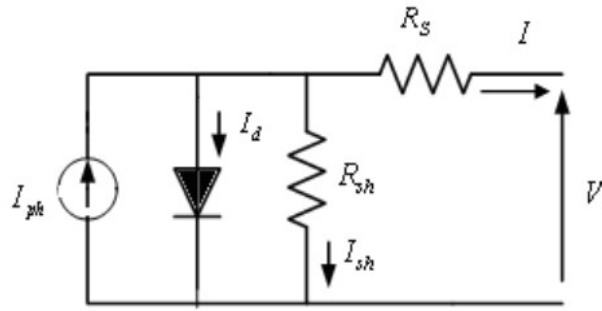


Figure. II-3 : Modèle à une diode d'une cellule PV [19]

Ce modèle est largement utilisé dans de nombreuses recherches en raison de son comportement qui se rapproche davantage de celui d'une cellule photovoltaïque réelle, comparé au modèle simplifié à résistance série. D'une part, il offre une meilleure précision, tout en restant relativement simple à manipuler pour les calculs mathématiques, contrairement au modèle à deux diodes, qui sera décrit par la suite.

Cette combinaison de précision et de simplicité rend ce modèle particulièrement attrayant pour les études et les applications pratiques dans le domaine de l'énergie photovoltaïque.

Le courant généré par ce modèle est donné par [13,20-21] :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II-12})$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{n \cdot V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II-13})$$

Le modèle de l'expression (II-13) est nommé aussi modèle implicite avec cinq paramètres (I_{ph} , I_s , R_s , R_{sh} , n). Dans ce mémoire, nous effectuons une analyse approfondie du modèle d'une diode, caractérisée par cinq paramètres fondamentaux, afin de mieux comprendre son comportement et ses performances.

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation [13,20] :

$$I_d = I_s \left(\exp \left(\frac{V_d}{V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{II-14})$$

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression

$$I_S = I_{S-ref} \cdot \left(\frac{T_c}{T_{c-ref}} \right)^3 \exp \left(\left(\frac{q \cdot E_{gap}}{n \cdot K} \right) \cdot \left(\frac{1}{T_{c-ref}} \right) - \left(\frac{1}{T_c} \right) \right) \quad (\text{II-15})$$

Le courant photonique lié à l'éclairement, à la température et au courant photonique mesuré aux conditions de référence est donné par [20-21]

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{ph-ref} - \mu_{cc}(T_c - T_{c-ref})) \quad (II-16)$$

II-2-4 Modélisation du champ PV

Lorsque les modules sont connectés en série, les tensions s'additionnent, tandis que le courant reste constant. À l'inverse, en parallèle, ce sont les courants qui s'additionnent, alors que la tension demeure inchangée. La performance globale du champ photovoltaïque (PV) résulte d'interactions complexes entre les cellules et les modules, influencées par des facteurs environnementaux tels que l'irradiance, la température et les ombrages partiels, qui peuvent provoquer des déséquilibres et entraîner des pertes d'efficacité.

Une modélisation précise du champ PV permet de simuler le comportement du système dans des conditions réelles et de mieux évaluer son rendement énergétique. Cela facilite l'optimisation de la conception du système afin de maximiser la production d'énergie et d'améliorer l'efficacité globale du champ photovoltaïque.

L'équation de la caractéristique tension-courant du champ PV est donnée par l'équation (II-17) [13,20]

$$I = N_{pp} I_{ph} - N_{pp} I_s \left[\exp \left(\frac{V + (R_s N_{ss} / N_{pp}) I}{V_{tn}} \right) - 1 \right] - \frac{V + (R_s N_{ss} / N_{pp}) I}{R_{sh} N_{ss} / N_{pp}} \quad (II-17)$$

Avec : N_{pp} et N_{ss} sont respectivement le nombre de module en parallèle et en série.

II-3 Modélisation du convertisseur élévateur (Boost)

La conversion d'énergie est un aspect crucial des systèmes électriques et électroniques modernes, et parmi les différentes topologies de convertisseurs disponibles, le convertisseur boost occupe une place importante. Un convertisseur boost, ou élévateur de tension, est un type de convertisseur de puissance à découpage qui permet de convertir une tension d'entrée continue (DC) en une tension de sortie continue plus élevée. Ce type de convertisseur est largement utilisé dans de nombreuses applications, telles que les systèmes photovoltaïques, les alimentations à découpage, et les véhicules électriques, en raison de sa capacité à augmenter la tension d'alimentation pour répondre aux besoins spécifiques des charges connectées [22]

La modélisation d'un convertisseur boost est une étape essentielle pour analyser et concevoir ces systèmes. Une modélisation précise permet de comprendre le comportement dynamique

du convertisseur, d'optimiser ses performances, et de garantir sa stabilité et son efficacité. En modélisant les composants clés du convertisseur, tels que les inductances, les capacités, les interrupteurs et les diodes, il est possible de prédire le fonctionnement du système sous différentes conditions de charge et de régulation [22].

Cette introduction au processus de modélisation du convertisseur boost vise à fournir une base théorique solide, ainsi qu'une approche pratique pour simuler et analyser ce type de convertisseur. Nous aborderons les principes de fonctionnement du convertisseur boost, ses équations fondamentales, et les techniques de modélisation couramment utilisées pour évaluer ses performances. Grâce à cette modélisation, il sera possible de concevoir des convertisseurs boost optimisés pour des applications spécifiques, en tenant compte des contraintes de rendement énergétique, de régulation de la tension et de minimisation des pertes [22].

II-3-1 Définition

Le hacheur parallèle (Boost) est un convertisseur statique permettant de convertir une tension continue constante à une autre tension continue réglable de valeur moyenne plus grande. Il est constitué d'un interrupteur en parallèle avec le générateur, d'une diode, d'une inductance pour lissage de courant et d'un condensateur pour le filtrage de la tension [23]. On utilise un convertisseur Boost lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue.

II-3-2 Principe de fonctionnement

Il est composé essentiellement d'un interrupteur K (comme IGBT ou MOSFET) et d'une diode D. L'interrupteur K est commandé par un signal à modulation de largeur d'impulsion (MLI) de période de découpage fixe T_d et de rapport cyclique variable α . La conduction des deux interrupteurs est complémentaire, quand K est fermé D est ouvert ; et quand K est ouvert, D est fermé. Durant chaque période, K est fermé de l'instant 0 à αT_d et ouvert de αT_d à T_d . On distingue deux modes de fonctionnement selon que le courant dans l'inductance s'annule (conduction discontinue) ou pas (conduction continue). On s'intéresse au second cas qui est le plus important.

La figure (II-4) donne le schéma de principe de ce convertisseur, les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode ainsi que les formes d'ondes de ses courants (à gauche) et tensions (à droite) [24-25].

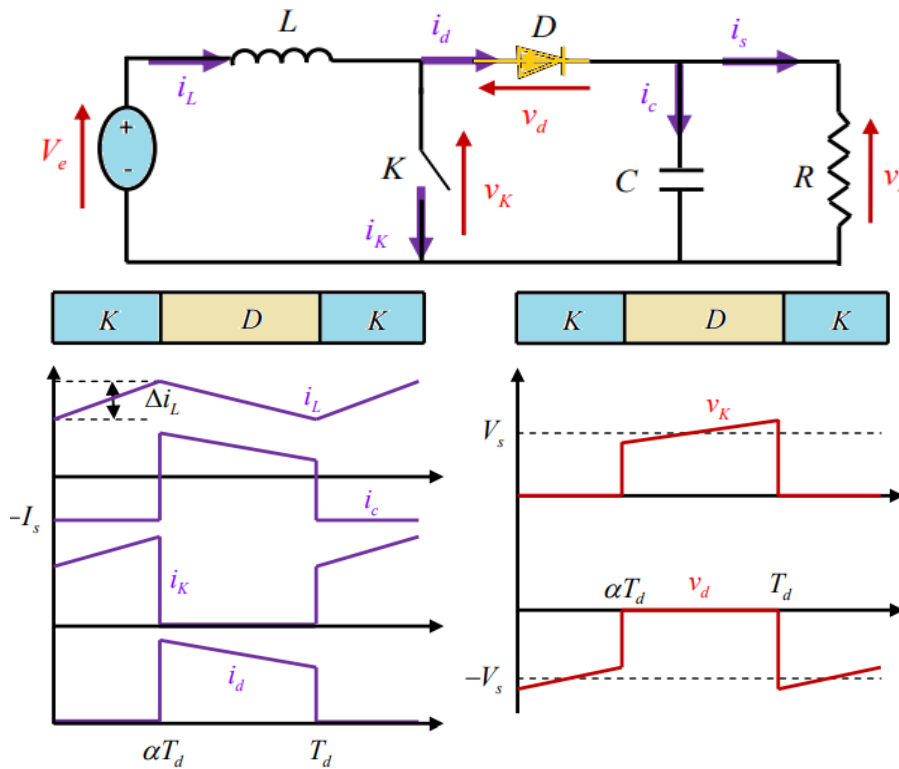


Figure. II-4 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost [26].

Lorsque l'interrupteur K est fermé ($0 < t < \alpha T_d$), (état de conduction), ce qui fait augmenter le courant dans l'inductance, emmagasinant ainsi une certaine quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est ensuite déconnectée de l'alimentation le circuit du convertisseur sera comme montré dans la figure -II-5.

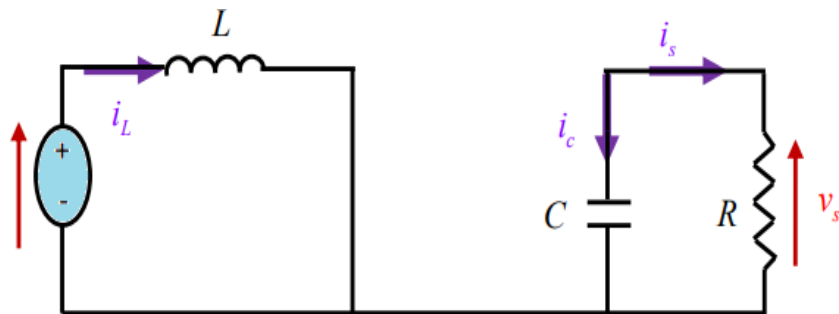


Figure. II-5 : Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé [26].

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e \quad (\text{II-18})$$

$$i_L = I_{\min} + \frac{V_e}{L} t \quad (\text{II-19})$$

Avec : I_{\min} : la valeur minimale du courant dans l'inductance.

A l'instant $t = \alpha T_d$, le courant dans l'inductance atteint sa valeur maximale

$$I_{\max} = I_{\min} + \frac{V_e}{L} \alpha T_d \quad (\text{II-20})$$

Lorsque l'interrupteur K est ouvert ($\alpha T_d < t < T_d$) et l'inducteur est connecté en série avec le générateur. Sa f. é. m. a été ajoutée au générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance passe par le Ensuite, il y a la diode D, le condensateur C et la charge R. Cela provoque le transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la charge, ce qui fixe la tension d le circuit du convertisseur sera comme montré dans la Figure (II-6).

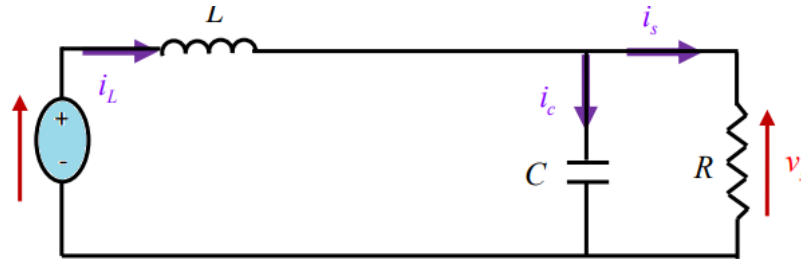


Figure. II-6 : Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert [26].

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

$$i_L = I_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T_d) \quad (\text{II-22})$$

A l'instant $t = T_d$, le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale I_{min}

$$i_{min} = I_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (1 - \alpha) T_d \quad (\text{II-23})$$

Soit $\Delta i_L = I_{max} - i_{min}$ l'ondulation du courant dans l'inductance. En faisant l'égalité des valeurs de l'ondulation du courant tirées des équations (II-20) et (II-23), on peut déduire la valeur moyenne de la tension de sortie V_s :

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} V_e \quad (\text{II-24})$$

On observe qu'il est possible de contrôler la tension de sortie du convertisseur en ajustant soit sa tension d'entrée, soit son rapport cyclique, qui est compris entre 0 et 1. Lorsque le rapport cyclique est ajusté de manière appropriée, le convertisseur peut fonctionner en mode élévateur de tension.

En appliquant le principe de conservation de l'énergie entre l'entrée et la sortie du convertisseur, il est possible de déterminer la valeur moyenne du courant dans l'inductance. Cette valeur est fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique. Plus précisément, le courant moyen dans l'inductance peut être calculé en utilisant la relation entre le courant moyen de la charge et le rapport cyclique, ce qui permet d'optimiser le fonctionnement du convertisseur pour atteindre les performances souhaitées [13,20-21].

$$I_L = \frac{1}{1-\alpha} I_s \quad (\text{II-25})$$

De l'expression (II-20), on exprime l'ondulation de courant dans l'inductance :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L} T_d = \frac{\alpha V_e}{L f} \quad (\text{II-26})$$

Avec f la fréquence de découpage. Pendant la première séquence de fonctionnement ($0 < t < \alpha T_d$), seul le condensateur donne de l'énergie à la charge, on peut écrire [13,20-21]. :

$$C \frac{dv_s}{dt} = -i_s \quad (\text{II-27})$$

Alors l'ondulation de la tension de sortie peut être exprimée par :

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{C \cdot f} = \frac{\alpha V_e}{(1-\alpha)RCf} \quad (\text{II-28})$$

D'après l'analyse des deux séquences de fonctionnement, on constate que les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes en courant et en tension [13,20-21]..

$$i_{K, \max} = i_{d, \max} = I_{\max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta I_s}{2} \quad (\text{II-29})$$

$$V_{K, \max} = V_{d, \max} = V_{s, \max} = V_s + \frac{\Delta V_s}{2} = \frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (\text{II-30})$$

II-4 Commande MPPT

Les cellules photovoltaïques sont couramment utilisées pour fournir de l'énergie dans une vaste gamme d'applications électriques. Afin de maximiser la puissance extraite d'un panneau solaire, un dispositif de suivi du point de puissance maximale, appelé Maximum Power Point Tracker (MPPT), est employé pour contrôler le convertisseur (ou hacheur). Ce composant électronique, agissant comme un régulateur, permet d'extraire le maximum d'énergie disponible des installations solaires photovoltaïques, en ajustant dynamiquement les paramètres du système en fonction des conditions environnementales, telles que l'ensoleillement et la température [24]. Les régulateurs MPPT permettent d'augmenter jusqu'à 30 % le rendement des panneaux solaires. Ainsi, pour un panneau photovoltaïque donné, la batterie pourra recevoir jusqu'à 30% d'énergie supplémentaire par rapport à un régulateur solaire classique [24 ,26].

Le régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking) est utilisé pour la commande des hacheurs dans les systèmes photovoltaïques. Introduite en 1968, cette technologie joue un rôle clé dans l'optimisation des performances des panneaux solaires. Elle fonctionne en ajustant automatiquement le rapport cyclique afin d'atteindre la valeur optimale qui permet de maximiser la puissance extraite du panneau.

Le régulateur ajuste le convertisseur de manière à maintenir le système au point de puissance maximale (V_{mpp} , I_{mpp}), quelles que soient les variations des conditions météorologiques telles que la température et l'irradiation solaire [24].

Il existe dans la littérature plusieurs algorithmes MPPT, les plus utilisés sont [27-28] :

- Algorithme de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)
- Algorithme du Courant constant (Constant Current)
- Perturbation et Observation (P&O, Perturb and Observe)
- Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance)

Les algorithmes P&O et IncCond font partie de la technique appelée Hill Climbing (monté de pente).

Parmi ces techniques de la MPPT, on a choisi les méthodes les plus utilisés dans littérature

- Méthode Perturbation and Observation (P&O).
- Méthode Incrémental Conductance (INC).

Dans ce travail, nous allons étudier les différentes techniques de recherche poursuivie de la puissance maximale sous différents points de fonctionnement.

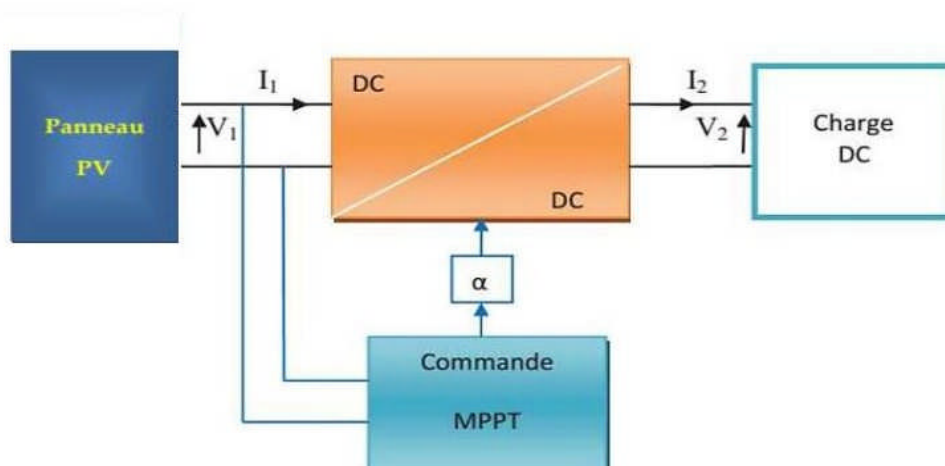


Figure II-7 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque [29]

II-4-1 La technique Perturbation & Observation (P&O)

L'algorithme perturbé et observé (P&O) est l'algorithme le plus largement utilisé dans la littérature, notamment en pratique en raison de sa facilité de mise en œuvre. Le principe de la technique consiste à perturber (diminuer ou augmenter) la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et à analyser le comportement de la variation de puissance résultante P_{pv} .

La Figure (II-8) montre que si la tension de fonctionnement est perturbée dans une direction donnée et que la puissance augmente ($dP/dV > 0$), alors il est clair que la perturbation a déplacé le point de fonctionnement vers le MPP. L'algorithme P&O continuera à perturber la tension dans la même direction. Par contre, si la puissance est réduite de ($dP/dV < 0$), alors la perturbation s'est éloignée du point de fonctionnement du MPP. L'algorithme inversera la direction de la perturbation suivante [1].

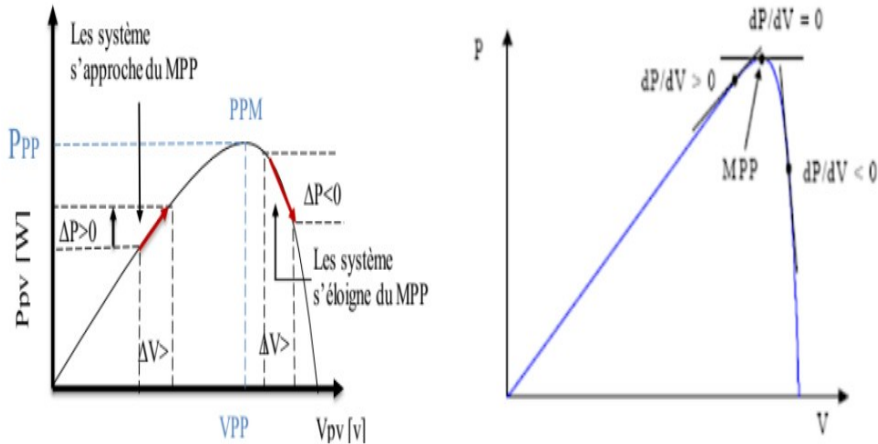


Figure II-8: Recherche du PPM par la méthode (P&O) [29].

Si la puissance aux bornes des panneaux augmente à la suite de la perturbation, la perturbation suivante est effectuée dans la même direction. Inversement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé. Lorsque le point de puissance maximale est atteint, V_{pv} oscille autour de la valeur optimale, ce qui entraîne une perte de puissance proportionnelle à la taille du pas d'incrémentacion de la perturbation. Si ce pas d'incrémentacion est grand, l'algorithme MPPT réagit rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement. [30]

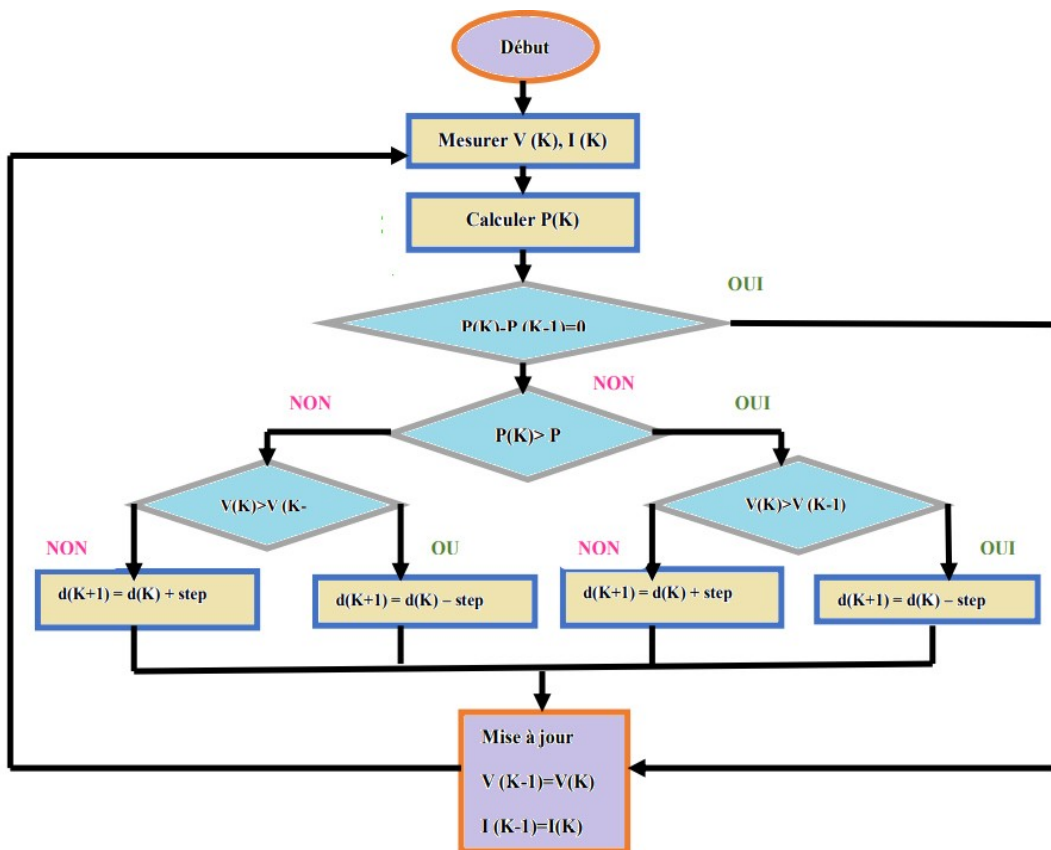


Figure II-9 : Algorithme de la méthode P&O[31].

II-4-2 Avantage de la méthode P&O

La méthode P&O est largement utilisée pour ses précieux avantages tels que [32-33]:

- **Structure de régulation simple** : L'algorithme P&O est relativement simple à mettre en œuvre par rapport à d'autres techniques MPPT. Il ne nécessite pas de calculs complexes, ce qui facilite son intégration dans des systèmes de contrôle embarqués.
- **Nombre réduit de paramètres de mesure** : Cette méthode ne nécessite que la mesure de la tension et du courant du panneau photovoltaïque pour calculer la puissance. Il n'y a pas besoin de connaître des paramètres supplémentaires comme la dérivée de la conductance, ce qui en fait un choix économique en termes de capteurs.
- **Facilité de mise en œuvre matérielle** : En raison de sa simplicité, la méthode P&O peut être facilement implémentée sur des microcontrôleurs ou des circuits intégrés, ce qui en fait une solution rentable pour les applications résidentielles et industrielles.
- **Robustesse** : La méthode P&O est robuste et fonctionne de manière fiable dans des conditions météorologiques relativement stables. Elle s'adapte automatiquement aux variations des conditions d'ensoleillement et de température, bien qu'avec certaines limitations.

II-4-3 Inconvénients de la méthode P&O

Bien que la méthode P&O soit largement utilisée en raison de sa simplicité, elle présente certains inconvénients qui limitent ses performances dans certaines conditions [32-33] :

- **Oscillations autour du point de puissance maximale (MPP)** : L'un des principaux inconvénients de la méthode P&O est la présence d'oscillations constantes autour du point de puissance maximale (MPP). En effet, l'algorithme perturbe en continu le système pour suivre les variations, ce qui entraîne des fluctuations de la puissance délivrée, réduisant ainsi l'efficacité globale.
- **Réaction lente aux changements rapides des conditions météorologiques** : Lorsque les conditions de température ou d'ensoleillement changent rapidement, la méthode P&O peut tarder à trouver le nouveau point de puissance maximale. Cela s'explique par le fait que l'algorithme effectue des perturbations successives, ce qui ralentit la convergence vers le MPP.

II-4-4 L'algorithme de la conductivité incrémentale (INC Cond)

L'algorithme de la conductivité incrémentale (INC Cond) est une variante améliorée de l'algorithme P&O, utilisée pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les

systèmes photovoltaïques. Ce type d'algorithme se distingue par sa capacité à mieux répondre aux changements rapides des conditions météorologiques, telles que les variations d'irradiance solaire et de température [34].

Le principe de l'algorithme INC Cond repose sur le calcul de la dérivée de la puissance en fonction de la tension (dP/dV) à chaque instant. L'idée est que la puissance maximale est atteinte lorsque cette dérivée devient nulle, c'est-à-dire lorsque le point de fonctionnement se situe au maximum de la courbe puissance-tension [34].

La puissance maximale du PV peut être atteinte quand le rapport dP/dV s'approche de zéro. Le contrôleur calcule la dérivée dP/dV basé sur la puissance mesurée et la tension de sortie incrémentale de PV. Si dP/dV n'est pas étroitement zéro, le contrôleur ajustera la tension du PV point par point jusqu'à ce que dP/dV approche zéro, auquel le PV atteint sa puissance maximale (Figure II-10).

Dans la méthode de la conductance incrémentielle, la tension aux bornes du réseau est toujours ajustée en fonction de la tension MPP. Elle est basée sur la conductance incrémentielle et instantanée du module PV.

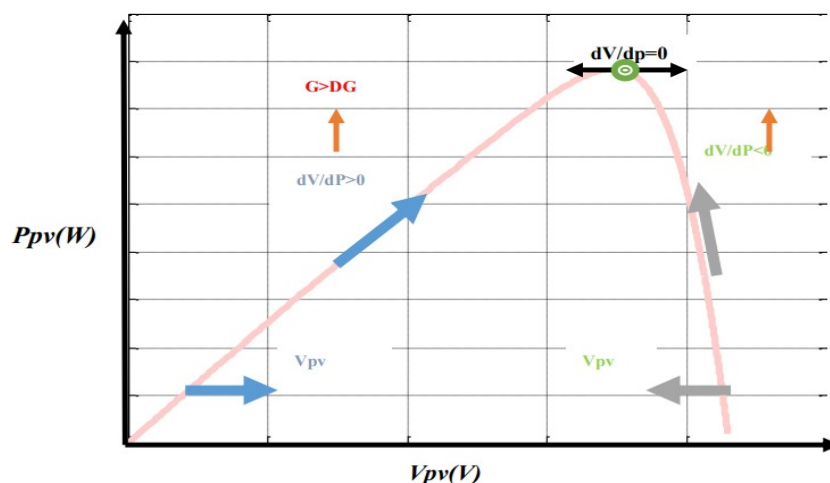


Figure II.10 : Calcul de MPP par Incrément de Conductance (INC) [35].

La figure ci-dessus nous permet de déduire facilement les actions à faire dans les différents cas.

- Si $dP / dV > 0$ alors augmenter V .
- Si $dP / dV < 0$ alors diminuer V .

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance (I_{pv}/V_{pv}) avec celle de l'incrément de conductance (dI_{pv} / dV_{pv}).

Si on est au MPPT, alors la tension V_{pv} correspond bien à la tension optimale V_{max} . Une fois le MPPT atteint, le point de fonctionnement peut être maintenu sur cette position jusqu'à la détection d'une variation de ΔI_{pv} . Cela indique alors un changement de conditions climatiques, donc un nouveau PPM à rechercher. Pour cela, l'algorithme incrémente ou décrémente la valeur de V_r jusqu'à atteindre le MPP. Le schéma de principe de cette méthode est illustré sur l'organigramme suivant :

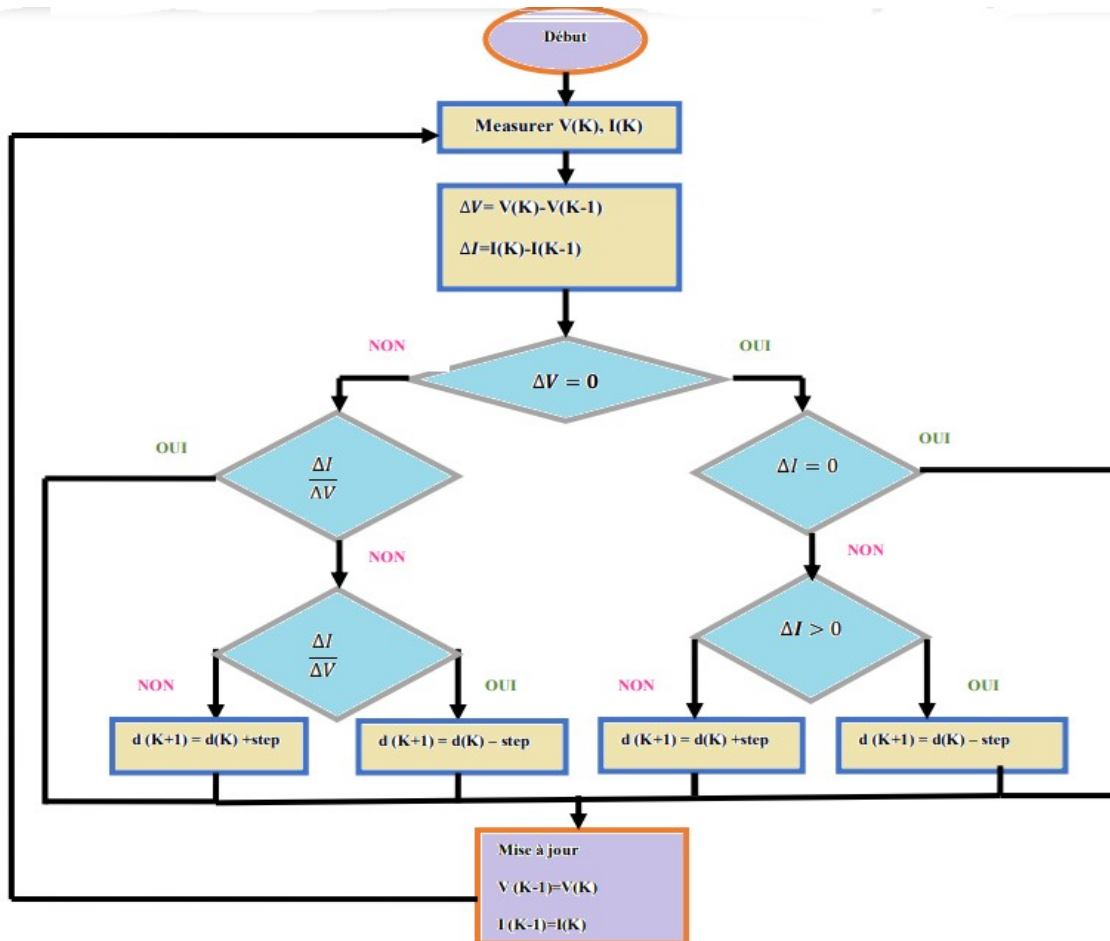


Figure II-11 : Organigramme de la méthode INC [35].

II-4-5 Avantage et l'inconvénient de la méthode

L'un des principaux avantages de cet algorithme est qu'il ne présente pas d'oscillations autour du point de puissance maximale (MPP), grâce au test basé sur la condition $dI_{pv}=0$. Une fois le MPP atteint, le système se stabilise [36].

L'inconvénient de cette méthode, c'est que l'approximation de dV et dI et l'utilisation d'un pas constant, la condition $(I/V) = -(dI/dV)$ est rarement vraie ce qui conduit à des oscillations autour du MPPT. Pour remédier à ce problème une erreur marginale ξ est ajoutée aux conditions du MPP, c'est-à-dire que le MPP est atteint si $((I/V) + (dI/dV)) \leq \xi$.

II-6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les caractéristiques électriques fondamentales d'une cellule photovoltaïque (ou d'un module photovoltaïque) et décrit les circuits équivalents. Divers modèles mathématiques de complexité variable ont été analysés, permettant de sélectionner une modélisation adaptée aux besoins spécifiques, tout en établissant des critères pour choisir un modèle suffisamment détaillé.

Par ailleurs, nous avons réalisé la modélisation d'un convertisseur DC/DC de type survolteur (boost Converter), afin d'identifier les conditions de fonctionnement optimales pour son couplage avec le générateur photovoltaïque.

Enfin, nous avons présenté certaines méthodes de poursuite de la puissance maximale (MPPT) citées dans la littérature

Chapitre III

Simulation et interprétation des résultats

Chapitre III

III-1 Introduction

Les systèmes photovoltaïques (PV) représentent une solution clé dans la production d'énergie propre et durable, en convertissant la lumière du soleil en électricité de manière efficace et sans émissions de carbone. Cependant, pour maximiser leur efficacité et leur intégration dans les réseaux électriques ou les systèmes autonomes, il est crucial de comprendre et d'optimiser leur comportement sous différentes conditions, telles que l'irradiance solaire, la température et la charge. La modélisation et la simulation jouent un rôle fondamental dans ce processus, permettant aux ingénieurs et aux chercheurs de prédire les performances des systèmes PV et d'identifier les moyens d'améliorer leur conception et leur contrôle.

MATLAB Simulink, une plateforme de simulation largement utilisée dans l'ingénierie, offre des capacités robustes pour la modélisation des systèmes photovoltaïques. Grâce à ses bibliothèques de blocs dédiés et à son interface graphique intuitive, Simulink permet de construire des modèles détaillés de cellules photovoltaïques, d'onduleurs, de convertisseurs de puissance, et de contrôleurs, permettant ainsi de simuler l'ensemble du système électrique associé à la production d'énergie solaire. La possibilité d'introduire des variables dynamiques telles que l'irradiance et la température dans le modèle permet une analyse approfondie des variations de performance. De plus, Simulink facilite l'implémentation de stratégies de contrôle avancées, telles que le suivi du point de puissance maximale (MPPT), optimisant ainsi la quantité d'énergie extraite du système.

III-2 Simulation

III-2-1 Implémentation du champ PV sous Simulink

À travers l'utilisation de MATLAB, nous avons simulé un champ photovoltaïque afin d'étudier les effets de l'irradiation et de la température sur ses caractéristiques électriques, notamment les courbes $I = f(V)$ (courant en fonction de la tension) et $P = f(V)$ (puissance en fonction de la tension). Pour cette analyse, nous avons utilisé le panneau représenté dans la figure (III-1).

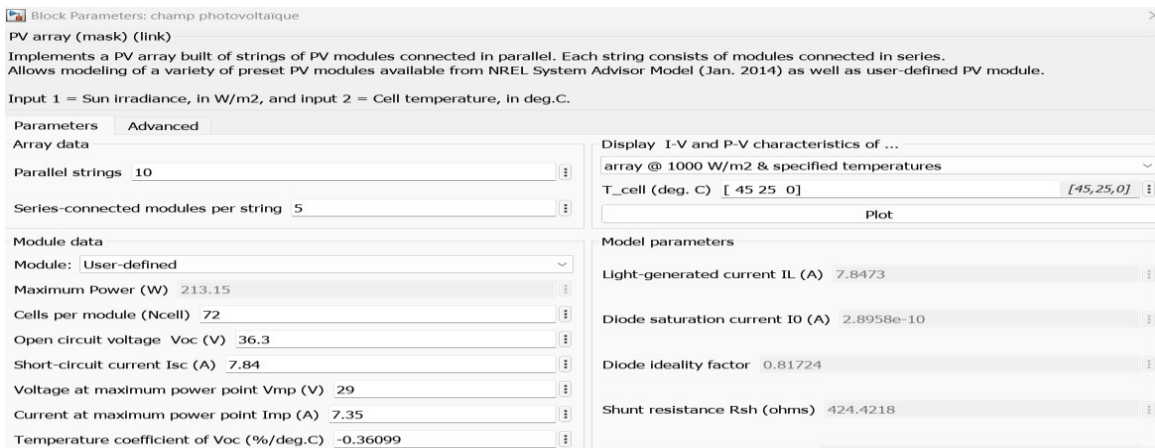


Figure III-1 : Caractéristiques électriques du module.

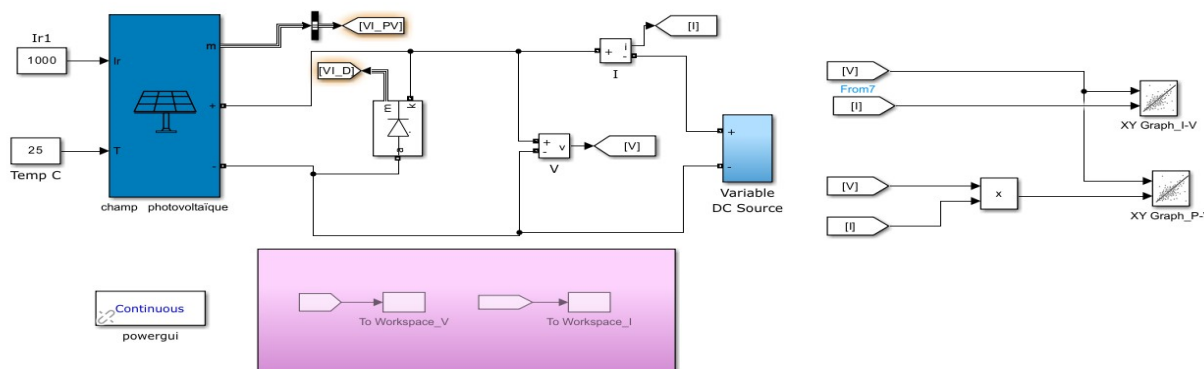


Figure III-2 : Schéma de bloc d'un champ PV

III-2-2 Résultats et analyses

Les simulations faites permettent d'obtenir les courbes $I-V$ et $P-V$ du champ PV pour différents éclairagements et températures. La Figure (III-3) illustre l'évolution du courbes $I-V$ et $P-V$ en fonction de la tension pour différentes valeurs de l'ensoleillement à une température $T = 25^\circ\text{C}$.

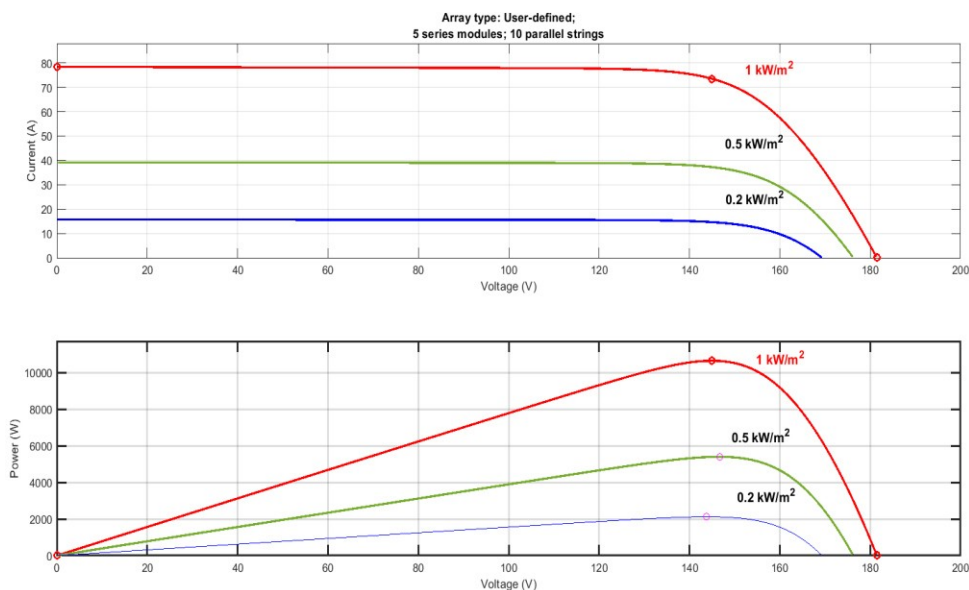


Figure III-3 : Caractéristiques du champ PV pour une variation de l'éclaircement

D'après la figure (III-3), nous observons une forte diminution du courant de court-circuit (I_{cc}) avec l'éclairement (E), tandis que la tension de circuit ouvert (V_{co}) diminue de manière beaucoup plus faible. Ces résultats indiquent que le courant de court-circuit est fortement dépendant de l'éclairement, alors que la tension de circuit ouvert augmente légèrement lorsque l'éclairement passe de 200 W/m² à 1000 W/m². Ce comportement montre que le courant de court-circuit varie de manière significative avec les changements d'éclairement, tandis que la tension de circuit ouvert est moins influencée par ces variations, soulignant ainsi les différences dans la réponse du panneau photovoltaïque aux conditions d'éclairement.

La puissance maximale (Pmax), qui est le produit du courant et de la tension au point de puissance maximale, augmente proportionnellement avec l'ensoleillement, offrant ainsi une meilleure performance énergétique du panneau photovoltaïque.

Pour voir l'influence de la température nous avons tracé les courbes $I-V$ et $P-V$ du champ PV pour une irradiation $G= 1000 \text{ W/m}^2$ et des températures différentes. Elles sont présentées sur la Figure (III-4).

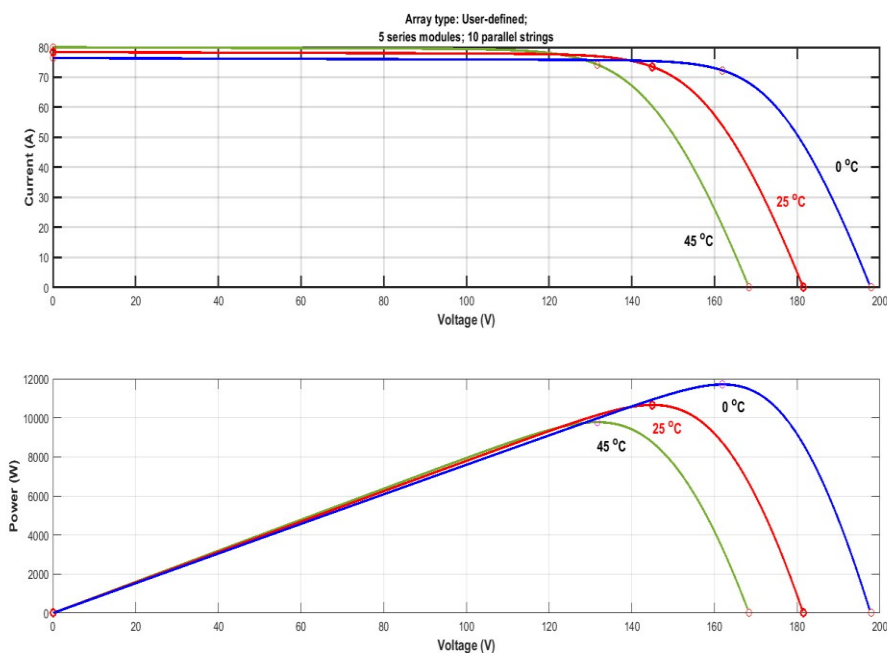


Figure III-4 : Caractéristiques statiques lors d'une variation de la température ambiante.

L'augmentation de la température a un impact notable sur les performances d'un champ photovoltaïque. Tout d'abord, elle entraîne une diminution de la tension en circuit ouvert en raison de la réduction de l'énergie de gap des semi-conducteurs, affectant ainsi la capacité du champ photovoltaïque à générer une tension élevée.

En revanche, le courant de court-circuit reste généralement constant, voire augmente légèrement, en raison de la génération accrue de porteurs de charge. Ces deux effets combinés aboutissent à une réduction significative de la puissance maximale que le champ PV peut produire. En conséquence, l'élévation de la température réduit les performances globales du champ PV, diminuant sa capacité à fournir une puissance optimale.

III-2-3 Implémentation sous Simulink du système complet

La configuration dans laquelle le champ photovoltaïque (PV) est directement connecté à la charge, une approche simple mais qui ne permet pas d'optimiser l'extraction de puissance en fonction des variations d'irradiance et la température. En revanche, la modélisation du convertisseur boost, présentée dans la Figure (III-5), joue un rôle crucial dans l'optimisation de cette extraction. Le mosfet du convertisseur est piloté via un bloc de modulation à largeur d'impulsion (PWM), lequel compare le rapport cyclique (duty cycle) à un signal périodique triangulaire afin de gérer les états de commutation du mosfet, garantissant ainsi une régulation efficace de la tension de sortie.

Contrairement à la majorité des convertisseurs présentés dans la littérature, le convertisseur que nous proposons se distingue par l'intégration de deux condensateurs, C_{in} et C_{out} , ayant chacun un rôle spécifique. Le condensateur C_{in} est chargé de réduire l'ondulation de la tension d'entrée, tandis que le condensateur C_{out} assure le lissage de la tension de sortie du convertisseur, garantissant ainsi une meilleure stabilité du système.

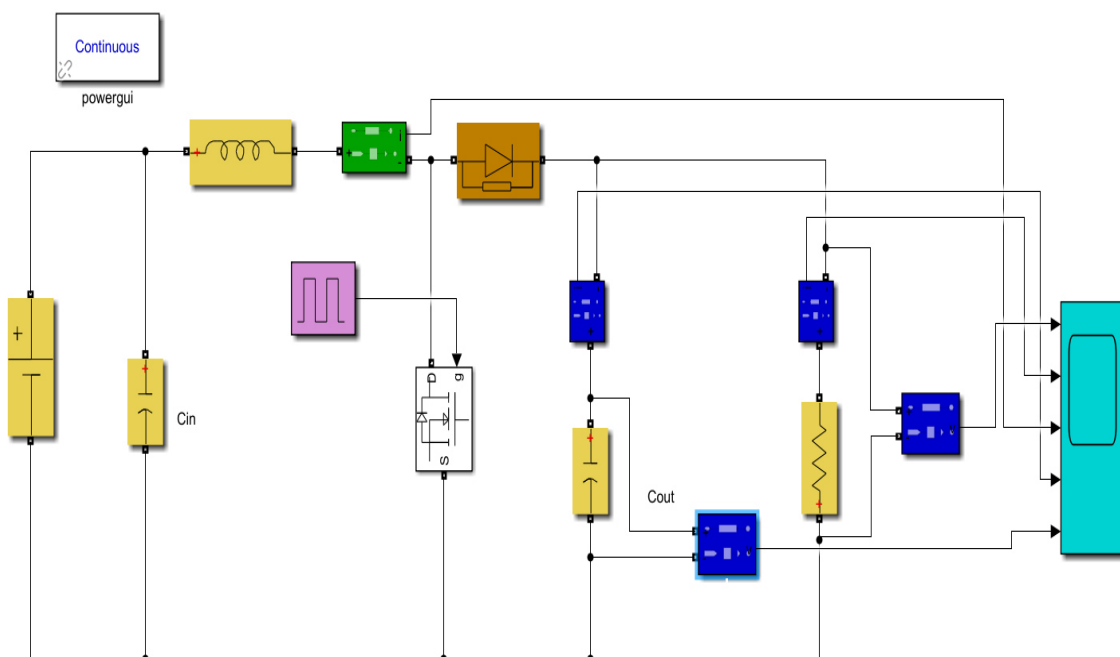


Figure III-5 : Schéma bloc du convertisseur boost proposé.

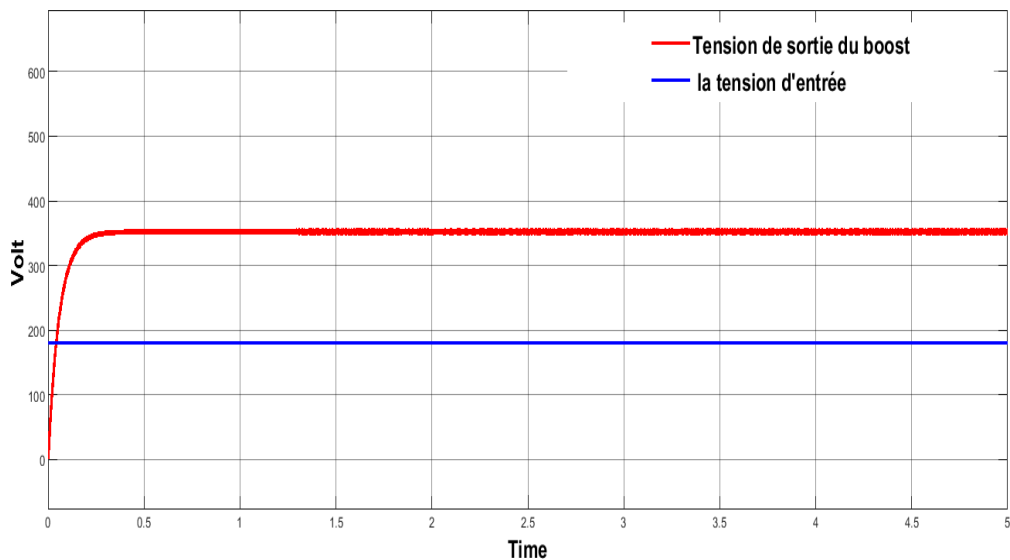


Figure III-6 : La tension d'entrée et de sortie c du convertisseur boost proposé.

Pour adapter automatiquement le rapport cyclique de manière à maximiser la puissance extraite sous des conditions d'irradiance solaire variables, nous utilisons la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) basée sur l'algorithme de Perturbation et Observation (P&O). Cette méthode permet de suivre le point de puissance maximale (MPP) en ajustant dynamiquement le rapport cyclique du PWM.

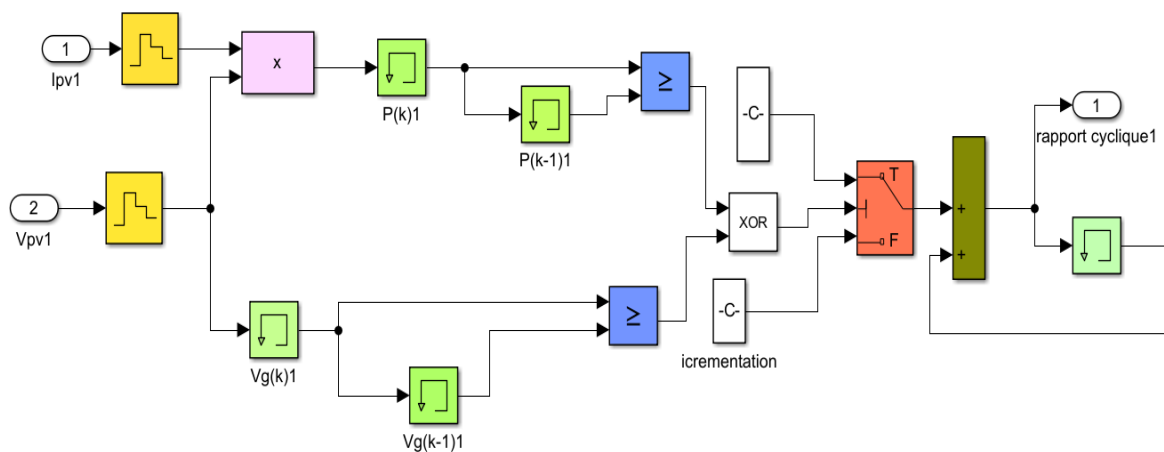


Figure III-7 : Perturbation et Observation sous Simulink

Enfin, le schéma global du système de connexion entre le champ PV et le convertisseur boost sous Simulink, qui inclut à la fois le contrôle PWM et l'algorithme P&O, est détaillé dans la Figure (III-8). Ce montage permet d'optimiser le rendement énergétique du système, en adaptant automatiquement la tension et la puissance du champ PV aux variations des conditions externes.

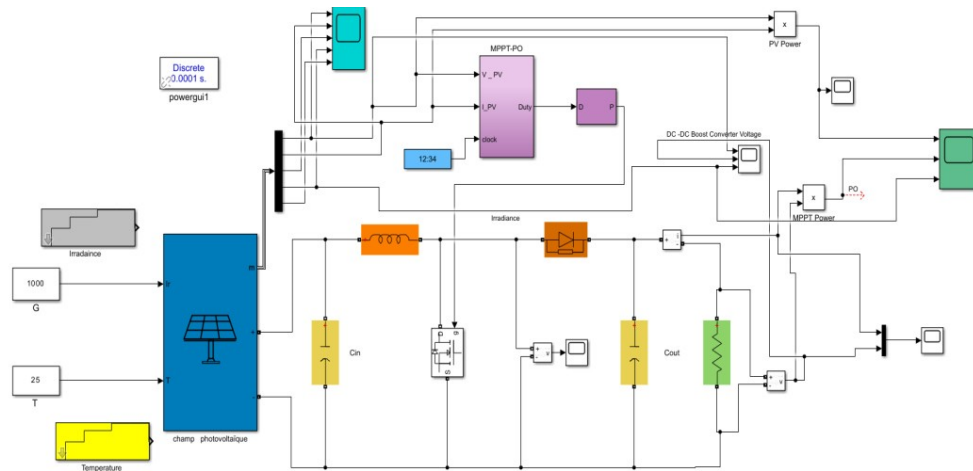


Figure III-8 : Schéma bloc du système complet sous Simulink.

Les figures (III-9), (III-10), (III-11), (III-12), (III-13), (III-14) et (III-15), ci-dessous, représenteraient les résultats de la simulation du système complet.

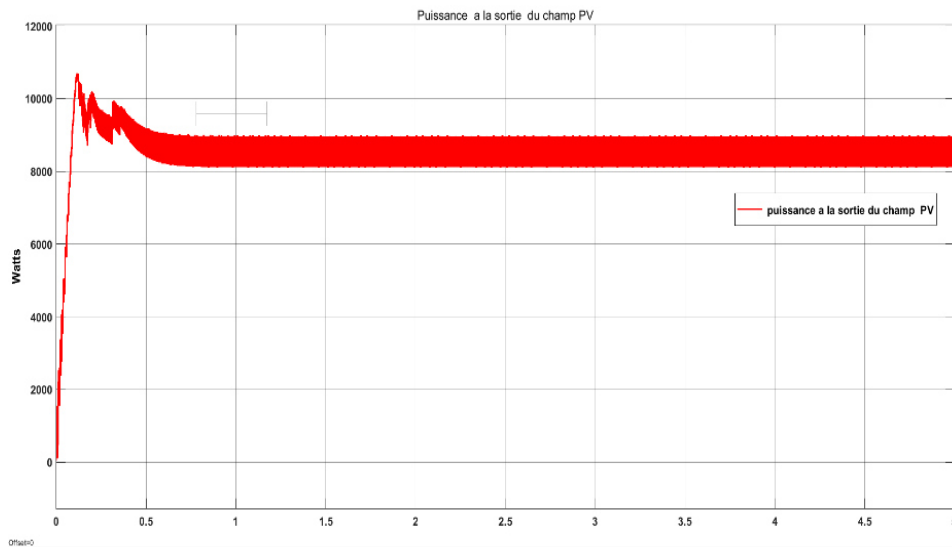


Figure III-9 : puissance de sortie du champ P V, $G=1000W/m^2$ et, $T=25^{\circ}C$

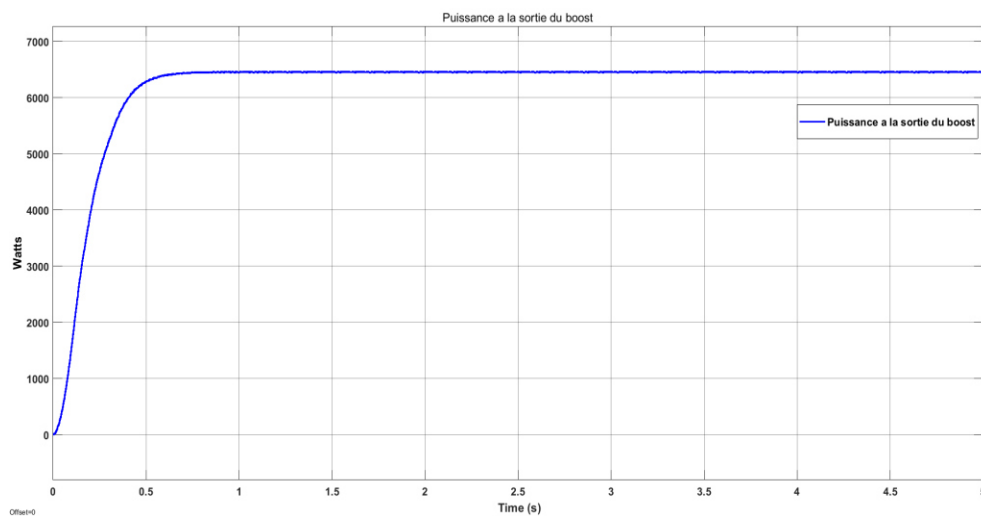


Figure III-10 : Puissance de sortie du boost, $G=1000W/m^2$ et, $T=25^{\circ}C$.

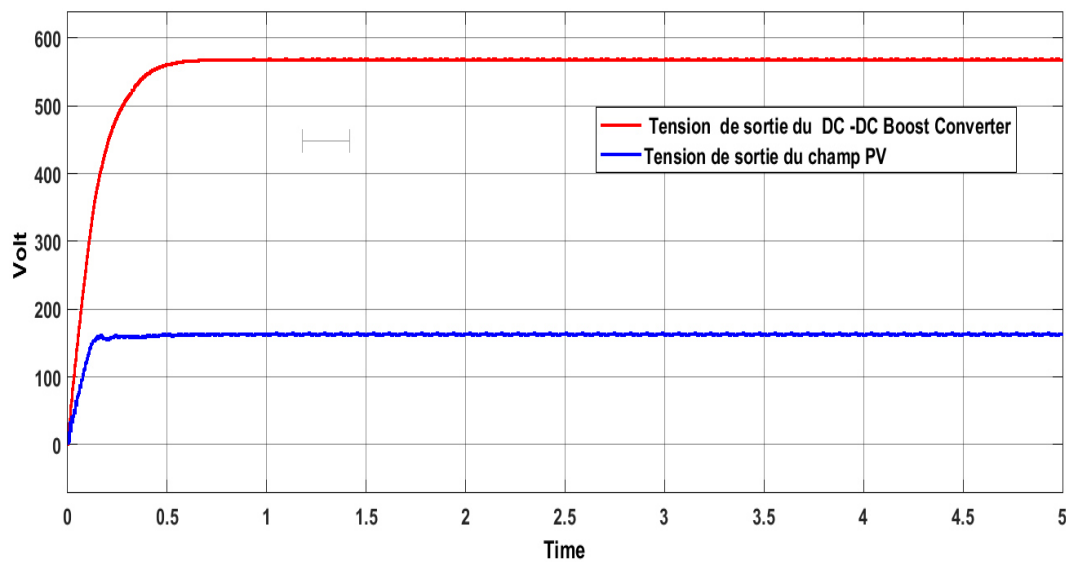


Figure III-11 : Tension de sortie du boost et du champ PV avec $G=1000W/m^2$ et, $T=25^{\circ}C$.

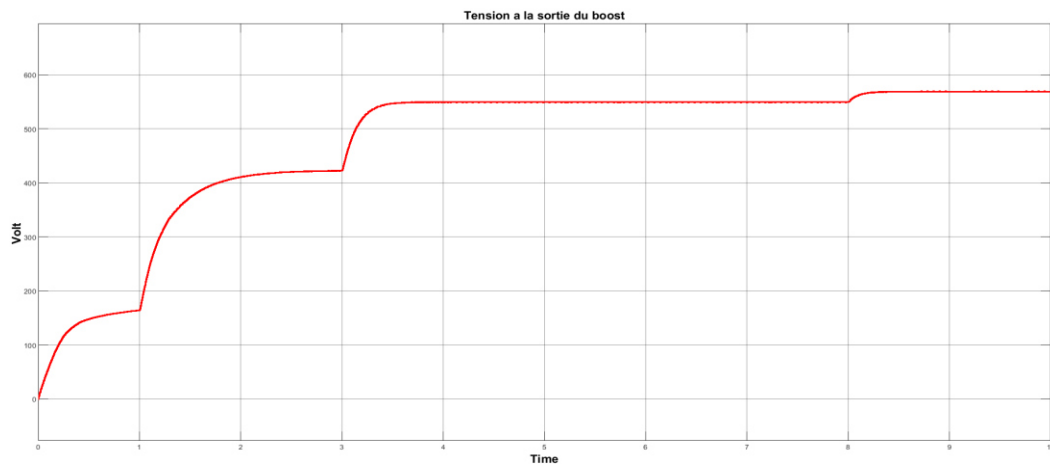


Figure III-12 : Simulation de l'influence des variations d'éclairement a la tension à la sortie du champ PV muni de la commande MPPT avec $T=25^{\circ}C$.

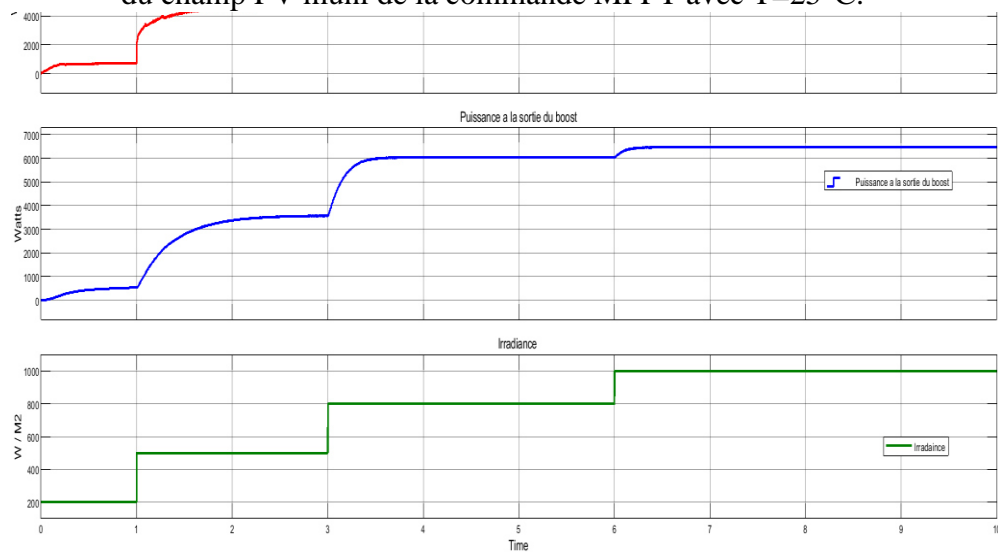


Figure III-13 : Simulation de l'influence des variations d'éclairement sur les grandeurs électriques à la sortie d'un Boost du champ PV muni de la commande MPPT avec $T=25^{\circ}C$.

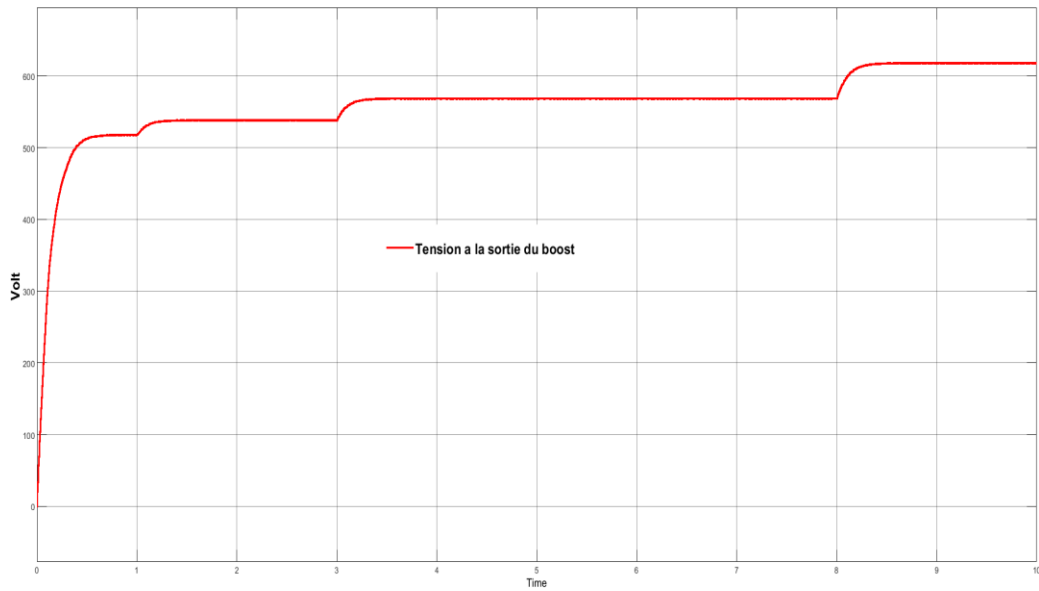


Figure III-14 : Simulation de l'influence des variations de température a la tension à la sortie du champ PV muni de la commande MPPT avec $G=1000W/m^2$.

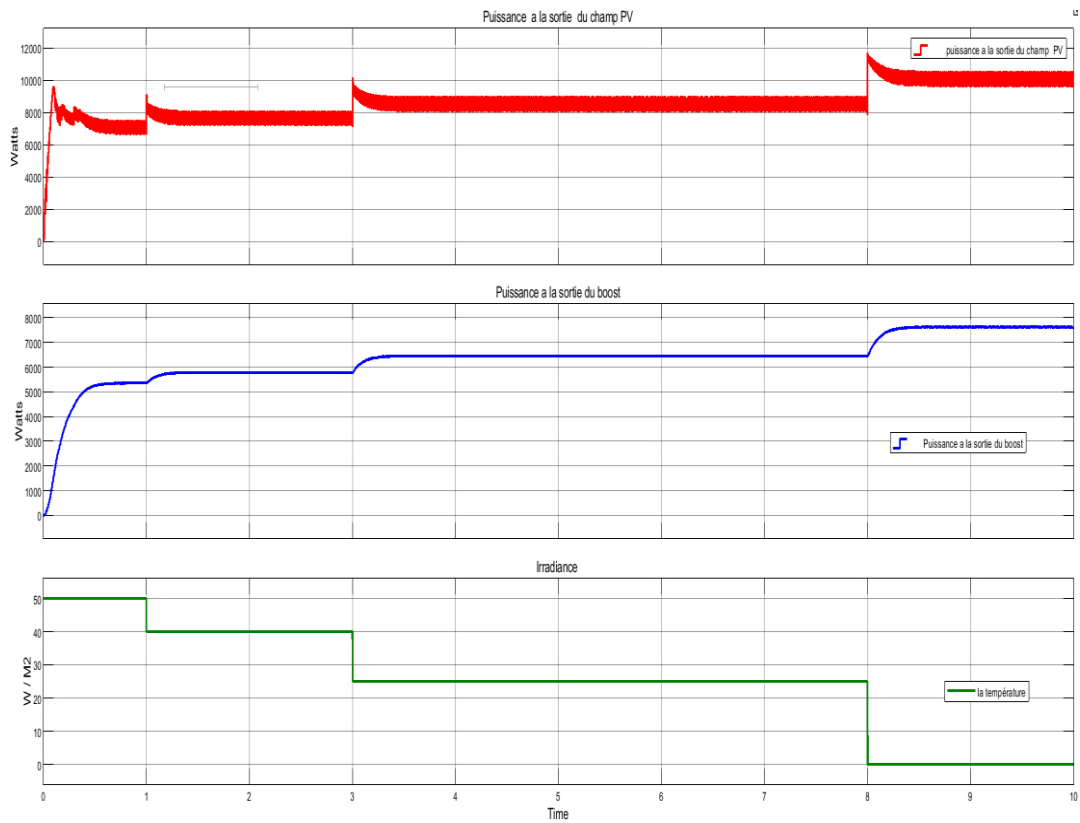


Figure III-15 : Simulation de l'influence des variations de la température sur les grandeurs électriques à la sortie d'un Boost du champ PV muni de la commande MPPT avec $G=1000W/m^2$.

Interprétation des résultats

Lorsque l'éclairement augmente, le courant de sortie du champ photovoltaïque (**PV**) augmente de manière significative, ce qui entraîne une augmentation notable de la puissance de sortie. Bien que la tension à la sortie du champ PV puisse connaître de légères variations, elle reste généralement stable dans des plages normales d'éclairement. Le **MPPT** ajuste en permanence la tension pour optimiser le point de puissance maximale, assurant ainsi une extraction efficace de l'énergie disponible malgré les changements d'éclairement. Le convertisseur **Boost** utilise la puissance optimale déterminée par le MPPT pour maintenir une tension de sortie constante tout en adaptant le courant selon la puissance disponible. Cette synergie entre le MPPT et le Boost permet de maximiser la performance du système photovoltaïque, garantissant une conversion efficace de l'énergie solaire en une puissance stable et élevée.

Lorsque la température diminue, la performance des cellules photovoltaïques s'améliore, car la tension de sortie du champ photovoltaïque augmente. Le **MPPT** ajuste alors la tension de fonctionnement en temps réel pour optimiser le point de puissance maximale, tirant parti de cette hausse de tension. Cette adaptation permet au convertisseur **Boost** de bénéficier de la meilleure performance des cellules en assurant une conversion efficace de la puissance, même si le courant peut légèrement varier. En conséquence, la puissance totale générée par le système PV augmente, car l'augmentation de la tension compense les variations du courant. Le **MPPT** maximise cette puissance accrue, ce qui améliore l'efficacité globale du système dans des conditions de température plus basse.

La performance d'un système photovoltaïque est optimisée grâce à la coordination entre le champ PV, le MPPT (Maximum Power Point Tracking) et le convertisseur Boost. Lorsque l'éclairement augmente, le MPPT ajuste la tension pour maximiser la puissance, et le convertisseur Boost stabilise la tension de sortie tout en adaptant le courant. À des températures plus basses, la tension du PV augmente, améliorant la performance des cellules. Le MPPT tire parti de cette hausse pour optimiser la conversion de puissance, ce qui améliore l'efficacité globale du système malgré les variations du courant.

III-3 Conclusion

Les résultats des simulations confirment que les performances d'un champ photovoltaïque (PV) sont fortement influencées par les conditions climatiques, notamment l'éclairement solaire et la température ambiante. L'augmentation de l'ensoleillement se traduit par une augmentation significative de l'intensité du courant produit, permettant au champ PV de générer une puissance électrique plus élevée. En effet, la courbe $P = f(V)$ présente un point de puissance maximal (PPM), qui correspond à la zone de fonctionnement optimale du module PV.

En parallèle, l'analyse de la caractéristique $I = f(V)$ montre que, lorsque la température augmente, le courant de sortie du champ PV s'accroît légèrement. Cependant, cette augmentation du courant s'accompagne souvent d'une baisse de la tension à vide, ce qui peut entraîner une réduction de la puissance totale générée si la gestion du point de puissance maximale n'est pas correctement optimisée.

Pour pallier ces limitations, notre système a été équipé d'une commande de suivi du point de puissance maximal (MPPT). Cette commande, non seulement permet de compenser les effets de la variation des conditions météorologiques, mais s'adapte également aux différentes charges. Elle garantit que le système fonctionne toujours au point de puissance optimal, en ajustant automatiquement les paramètres en fonction des variations de l'éclairement solaire et de la température.

Les simulations confirment que la commande MPPT assure la poursuite du point de puissance maximal même en cas de variation rapide des conditions climatiques ou de la charge. Ce mécanisme d'optimisation dynamique contribue à améliorer de manière significative les performances du système PV, en minimisant les pertes d'énergie et en garantissant une production électrique stable et fiable.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Aujourd'hui, la demande mondiale en énergie ne cesse de croître de manière exponentielle, tandis que les ressources naturelles s'épuisent progressivement, notamment en raison de la pression démographique et de l'industrialisation massive. Face à ces défis, l'exploitation des énergies renouvelables s'impose comme une solution durable et nécessaire. Parmi ces énergies, l'énergie solaire se distingue par son abondance et sa disponibilité dans presque toutes les régions du monde. Son caractère renouvelable et inépuisable à l'échelle humaine en fait une alternative particulièrement prometteuse.

Dans le cadre de ce travail, nous avons entrepris une étude approfondie de la modélisation d'une chaîne photovoltaïque. Cette chaîne se compose de plusieurs éléments essentiels : un champ photovoltaïque (PV), un convertisseur DC/DC pour adapter la tension, une charge DC (une résistance), et un système de commande destiné à piloter le convertisseur. Nous avons focalisé notre attention sur une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) classique, en utilisant les algorithmes de **Perturbation et Observation (P&O)** pour optimiser le suivi du point de puissance maximale.

Dans un premier temps, nous avons procédé à une présentation générale des systèmes d'énergie renouvelable, en mettant un accent particulier sur les systèmes photovoltaïques, qui transforment l'énergie solaire en énergie électrique à travers l'utilisation de matériaux semi-conducteurs. Nous avons ensuite présenté les technologies variées des cellules solaires, détaillant leurs principes de fonctionnement ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Une fois le champ PV modélisé, nous avons étudié les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) du système photovoltaïque en fonction des variations climatiques, telles que l'irradiation solaire et la température. Les résultats de la simulation ont mis en évidence une relation directe entre les performances du panneau photovoltaïque et les conditions climatiques. Plus spécifiquement, il a été observé que l'augmentation de la température réduit la tension en circuit ouvert du panneau, tandis que l'irradiation joue un rôle essentiel dans l'intensité du courant produit.

Pour assurer que le système fonctionne à sa puissance maximale, il est indispensable d'inclure un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge, associé à une commande MPPT. Cette commande permet de suivre en temps réel le point de puissance maximale, malgré les variations des conditions environnementales. À cet égard, nous avons opté pour l'algorithme MPPT Perturbation et Observation (P&O), qui présente l'avantage d'être simple à mettre en œuvre tout en garantissant une efficacité raisonnable. Après avoir modélisé et simulé cette technique, nous avons analysé les résultats obtenus, démontrant que le système peut suivre efficacement le point de puissance maximale sous des irradiances solaires et des températures variables.

En conclusion, notre étude démontre l'importance d'une bonne gestion de la commande MPPT ainsi que du rôle clé du convertisseur DC/DC pour optimiser les performances d'un système photovoltaïque. Grâce à l'utilisation d'algorithmes adaptés comme le P&O et des méthodes de régulation efficaces, il est possible de maximiser la production d'énergie solaire et d'améliorer ainsi la rentabilité et l'efficacité globale des installations photovoltaïques dans des conditions réelles d'exploitation.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Références

- [1] M. Amarouayache, «Contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque». Thèse de Doctorat, université constantine 1, (2014).
- [2] E. Saloux, «Optimisation structurelle des systèmes énergétiques». Thèse de Doctorat École Polytechnique de Montréal, (2014).
- [3] S. Abada, «Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic». Mémoire dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie en vue de l'obtention du grade de maître en sciences. Université Laval, (2011).
- [4] R. Khanna, Q. Zhang, W. E. Stanchina, G. F. Reed, and Z.-H. Mao, «Maximum power point tracking using model reference adaptive control». IEEE Trans. power Electron., vol. 29, no. 3, pp. 1490–1499, (2013).
- [5] C. Konstantopoulos and E. Koutroulis, «Global maximum power point tracking of flexible photovoltaic modules», IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 6, pp. 2817–2828, (2013).
- [6] A. Azouz & M. R. Sahih, «Etude et implémentation d'un modèle du convertisseur DC/DC Boost » sur FPGA application au système photovoltaïque». Mémoire de Projet de Fin d'Études Université Said Dahleb Blida, (2014).
- [7] S. Gassab «Gestion d'énergie d'une centrale à énergie renouvelable hybride dédiée à l'alimentation d'un site isolé». Thèse de doctorat. Université Ferhat Abbas – Sétif1(2019).
- [8] S. Belkehal. «Conception et Commande des machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables ».Thèse de doctorat, Université de Constantine, (2010).
- [9] L. L. Freris and D. G. «Infield, Renewable energy in power systems». Chichester, U.K: John Wiley & Sons, (2008).
- [10] I. Zaoui & T. Bedjag. « Etude des Différentes Commandes MPPT pour Générateur Photovoltaïque». Mémoire de Fin d'Études En vue de l'obtention du diplôme master académique, université echahid hamma lakhdar d'el-oued faculté de technologie, (2023).

- [11] <https://www.ikonet.com/fr/ledictionnairevisuel/energies/geothermie-et-energie-fossile/production-electricite-par-energie-geothermique.php>
- [12] <https://www.ecojoko.com/eolienne-autoconsommation/>
- [13] K. Helali «Modélisation d'une Cellule Photovoltaïque: Etude Comparative». Mémoire de Magister Université de Tizi-Ouzou. (2012).
- [14] B. Ben Nasser, «étude et modelisation de la commande mppt avec matlab». Mémoire dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie en vue de l'obtention du grade de maître en sciences appliquées (M. Sc. A.), Université du Québec (2021).
- [15] A. Larabi & I. Rabia, «Etude, modélisation et simulation d'un convertisseur boost entrelacé pour les applications photovoltaïques». Memoire de master, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou (2012).
- [16] A. Larabi & I. Rabia, «Réalisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque». Memoire de master, Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouagh (2017).
- [17] H. Messaoudene, «Détermination intelligente de la puissance maximale des modules photovoltaïques». Mémoire de Magister, Université El Hadj Lakhdar de Batna (2014).
- [18] M. Angel Cid Pastor, «conception et realisation de modules photovoltaïques électroniques».Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, (2006).
- [19] S. Sheik Mohammed and D. Devaraj «Simulation and Analysis of Stand-alone Photovoltaic System with Boost Converter using MATLAB/Simulink» Conference: IEEE International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies - ICCPCT-(2014)
- [20] A. Chauhan, and S. Prakash, «A new emperor penguin optimisation-based approach for solar photovoltaic parameter estimation». Int. Trans. Electr. Energ .Syst. V.31, (2021).
- [21] S. Motahhir, A. El Ghzizal, A. Derouich, «Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM». CIGIMS 2015, EST de Fès – (2015).
- [22] T. Wu, and C. Tsai, (2008). Analysis and Modeling of Boost Converter with Coupled Inductor and Synchronous Rectifier. IEEE Transactions on Power Electronics, 23, 221-229, (2008).

- [23] F. Z. Benkassis et A. Sellaoui. «Modélisation dynamique et analyse des convertisseurs DCDC pour applications en énergies renouvelables» Mémoire de master, Université 8 Mai 1945 – Guelma (2020).
- [24] M.G., Gazoli, J.R., Filho, E.R., «Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays ». IEEE Trans. Power Electron. 24, 1198–1208,(2009).
- [25] C. Cabal, «Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque» Université Paul Sabatier-Toulouse III, (2008).
- [26] O. Boukli-Hacene, «Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour meilleure gestion énergétique» Mémoire de Magister, Université de Telemcen (2011).
- [27] O. Akihiro, «Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System», Faculty of California Polytechnic State University, 2005
- [28] T. Esram, and Patrick L. «Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques», IEEE transactions on energy conversion, V.2, 439 – 449, (2007).
- [29] S. Riahi, A. Mami, and V. Mînz, «Simulation Study for a UV Water Disinfection Unit Powered by a Photovoltaic System ». IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, Vol. 22 No.1, 175-182, (2022).
- [30] Nattorn Pongratananukul, «Analysis and Simulation Tools for Solar Array Power Systems», University of Central Florida, USA (2005).
- [31] M. Zerouali, A. El Ougli, B. Tidhaf, «A robust fuzzy logic PI controller for solar system battery charging». International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS) Vol. 14, No. 1, pp. 384~394, (2023).
- [32] A. Reza Reisi, M. Hassan Moradi, S. Jamasb «Classification and Comparison of Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic System: A Review», Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 19, pp. 433-443, (2013).
- [33] T. Esram, 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).
- [34] S. Surawdhaniwar, R. Diwan, «An Improved Approach of Perturb and Observe Method Over Other Maximum Power Point Tracking Methods», International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), Vol.1, 2277-3878, 1, (2012).

- [35] B. Gaied Chortane, «Amélioration de l'algorithme MPPT pour un système PV par l'intégration des nouvelles techniques basées sur l'intelligence artificielle». Mémoire dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie en vue de l'obtention du grade de maître en sciences appliquées (M. Sc. A.), Université du Québec (2022).
- [36] A. Pandey, A. Mandal «study of maximum power point tracking using perturb and observe method for boost converter». IJournals: International Journal of Software & Hardware Research in Engineering , Vol. 3, 2347-4890, (2015).
- [33]